# ВІСНИК

### КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ISSN 1723-273x

– АСТРОНОМІЯ –

= 46/2010

Засновано 1958 року

Викладено результати оригінальних досліджень учених Київського університету з питань фізики Сонця, позагалактичної астрономії, астрофізики високих енергій, астрометрії, метеорної та кометної астрономії та озону над Антарктидою.

Випуск присвячено 165-річчю Астрономічної обсерваторії.

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

The Herald includes results of original investigations of scientists of Kyiv University on solar physics, extra-galactic astronomy, high energy astrophysics, astrometry, meteor and comet astronomy and ozone over the Antarctic.

The issue is dedicated to the 165-th anniversary of Astronomical observatory. It is intended for scientists, post-graduate students and student-astronomers.

ВІДПОВІДАЛЬНИЙ РЕДАКТОР	В.М. Івченко, д-р фізмат. наук, проф.			
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	Б. І. Гнатик, д-р фізмат. наук (заст. відп. ред.); М. І. Пішкало, ка фізмат. наук (відп. секр.); Д. П. Дума, д-р фізмат. наук, про В. М. Єфіменко, канд. фізмат. наук; В. І. Жданов, д-р фізмат. на проф.; В. В. Клещонок, канд. фізмат. наук; Р. І. Костик, д-р фізм наук, члкор. НАН України; В. Г. Кручиненко, д-р фізмат. на проф.; В. Г. Лозицький, д-р фізмат. наук; Г. П. Міліневський, фізмат. наук; С. Л. Парновський, д-р фізмат. наук; К. І. Чурюм д-р фізмат. наук, проф., члкор. НАН України			
Адреса редколегії	04053, Київ-53, вул. Обсерваторна, 3, Астрономічна обсерваторія 🖀 (38044) 486 26 91, 486 09 06 E-mail: pish@observ.univ.kiev.ua			
Затверджено	Вченою радою Астрономічної обсерваторії 14.09.09 (протокол № 10)			
Атестовано	Вищою атестаційною комісією України. Постанова Президії ВАК України № 01-05/9 від 08.09.99			
Зареєстровано	Міністерством інформації України. Свідоцтво про державну реєстрацію КІ № 251 від 31.10.97			
Засновник та видавець	Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет". Свідоцтво внесено до Державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02			
Адреса видавця	01601, Київ-601, б-р Т. Шевченка, 14, кімн. 43 🖀 (38044) 239 3172, 239 32 22; факс 239 31 28			

© Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2010

Єфіменко В.	
Про електричні поля в плазмових шарах сонячної атмосфери	4
Лейко У.	
Дослідження варіацій загального магнітного поля Сонця	8
Лозицький В., Курочка Є.	
Порівняння магнітних полів і термодинамічних умов	
у сонячних спалахах та неспалахових областях на Сонці	11
Лозицька Н.	
Міжрічні варіації модулів та асиметрії магнітного поля, площ та широт сонячних плям	16
Пішкало М., Садовенко Є.	
Сонячна корона під час повних сонячних затемнень 29 березня 2006 р. і 1 серпня 2008 р	22
Парновський С.	
Дослідження великоммасштабних колективних рухів галактик на основі каталогу RFGC	26
Хміль С.	
Спостережні обмеження на космологічну сталу	29
Гнатик Б.	
Дослідження з астрофізики високих енергій в Астрономічній обсерваторії Київського університету	33
Данилевський В.	
Визначення діаметра Сонця в Астрономічній обсерваторії Київського університету	
за спостереженнями сонячних затемнень	36
Казанцев А., Кравцов Ф., Лук'яник I., Казанцева Л.	
Минуле та сьогодення досліджень астероїдів у Києві	39
Клещонок В., Буромський М.	
Розвиток спостережень покриттів зір Місяцем	
в Астрономічній обсерваторії Київського університету	44
Чурюмов К., Кручиненко В. Клещонок В., Лук'яник I., Кравцов Ф.,	
Чубко Л., Баранський О., Пономаренко В.	
Дослідження комет у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка	47
Тарануха Ю., Козак П., Рожило О., Кручиненко В.	
Історія розвитку та деякі результати метеорних досліджень	
в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка	51
Євтушевський О., Грицай А., Кравченко В., Міліневський Г., Грицай З., Лозицький В., Леонов М.	
Зміни загального вмісту озону над Антарктикою	55

Efimenko V.	
About electric fields in plasma layers of solar atmosphere	4
Leiko U.	
Investigation of variations of solar mean magnetic field	8
Lozitsky V., Kurochka E.	
Comparison of magnetic fields and thermodynamical conditions	
in solar flares and non-flare regions on the Sun	11
Lozitska N.	
Inter-annual modules and asymmetry variations of sunspots magnetic fields, areas and latitudes	16
Pishkalo M., Sadovenko le.	
The solar corona during the total solar eclipses on March 29, 2006 and August 1, 2008	22
Parnovsky S.	
Study of large-scale collective galaxy motions based on RFGC catalogue	26
Khmil S.	
Observational limitations on the cosmological constant	29
Hnatyk B.	
Investigations in area of high energy astrophysics at Astronomical Observatory of Kyiv. University	33
Danylevsky V.	
The Sun's diameter determination at Astronomical observatory	
of Kyiv University from solar eclipses observations	36
Kazantsev A., Kravtsov F., Luk'yanyk I., Kazantseva L.	
The past and the present of asteroid research in Kyiv	39
Kleshchonok V., Buromsky M.	
Development of observations stars occultation by Moon	
in Astronomical observatory of Kyiv University	44
Churyumov K., Kruchinenko V., Kleshchonok V., Luk'yanyk I., Kravtsov F., Chubko L.,	
Baransky O., Ponomarenko V.	
Study of comets in Kyiv Taras Shevchenko National University	47
Taranukha Yu., Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V.	
History of development and some results of meteor investigations	
at Astronomical Observatory of Kyiv Taras Shevchenko National University	51
Evtushevsky O., Grytsai A., Kravchenko V., Milinevsky G., Grytsai Z., Lozitsky V., Leonov M.	
Total ozone content changes over the Antarctic	55

УДК 523.735

В. Єфіменко

#### ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ ПОЛЯ В ПЛАЗМОВИХ ШАРАХ СОНЯЧНОЇ АТМОСФЕРИ

Виконано оцінки електричних полів у сонячній короні, які викликаються різними фізичними механізмами – поляризаційних електричних полів, полів викликаних припливними силами та індукційних електричних полів зумовлених неоднорідністю обертання Сонця. Показано, що індукційні електричні поля в сонячній короні на декілька порядків перевищують поля, викликані іншими механізмами.

Estimations of electric fields in a solar corona which are caused by various physical mechanisms – polarizing electric fields, fields caused by tidal forces and the induction electric fields caused by heterogeneity of rotation of the Sun are executed. It is shown that induction electric fields in a solar corona on some usages exceed the fields caused by other mechanisms.

Вступ. Електростатичне поле, яке виникає в результаті поляризації статичної плазми в гравітаційному полі, широко відоме під назвою поля Панекока-Росселанда [22, 26]. З відкриттям сонячного вітру необхідно було врахувати вплив плазмових потоків на це поляризаційне електричне поле. Аналіз ранніх робіт, присвячених розгляду цього впливу, подано в огляді Хундхаузена [16].

Подальший розвиток уявлень про електричні поля отримано в моделях корони з вмістом гелію. У першому, грубому наближенні, корона вважалась статичною. Зміну поляризаційного поля, пов'язаного з динамічним характером моделі розширення корони, знайшов Гейс та ін. [20]. Останнім часом електричні поля в короні враховувались при комп'ютерних розрахунках в рамках 16-ти компонентної моделі сонячного вітру [21].

Розширення плазми у вакуум – одне з важливих явищ фізики плазми. Пов'язані з ним ефекти відіграють істотну роль у прискоренні заряджених частинок у лабораторній [1, 8] і космічній плазмі [7], при витоку плазми із зірок, у лазерному термоядерному синтезі.

Прискорення іонів при розширенні плазми у вакуум спостерігалося у багатьох експериментах, починаючи з роботи Танберга [27]. Пояснення цього ефекту на основі механізму амбіполярного прискорення іонів електронами було запропоновано Плютто [10]. Більш строгий розгляд задачі про розширення плазми без зіткнень у вакуум, при умові постійності електронної температури, було виконано Гуревичем та ін. [2]. Один із висновків цієї роботи – можливість прискорення частини іонів завдяки дії виникаючого поляризаційного електричного поля до швидкостей порядка теплової швидкості електронів. Цей результат був потім підтверджений чисельним розв'язком аналогічної задачі на ЕОМ з урахуванням порушення квазінейтральності на фронті плазми, що розширюється [17]. Природно, при розгляді лабораторної плазми нехтували гравітаційними полями.

Дослідження потоків іонів у сонячному вітрі актуальні і сьогодні. В ряді робіт, присвячених сонячному вітру [3, 19, 21], враховується поляризаційне електричне поле.

У цій роботі подано оцінки електричних полів у сонячній короні, зумовлені різними фізичними процесами – поляризаційних електричних полів; полів, викликаних припливними силами; та індукційних полів, зумовлених неоднорідністю обертання Сонця.

У роботах [3, 4, 19] розглянута задача про застосування гідродинамічного наближення Паркера [23] до стаціонарного потоку плазми, який розширюється у вакуум із Сонця. Розглянуто рух квазінейтральної, при постійних однорідних температурах компонент, плазми. Основною іонною компонентою плазми вважався водень. У рамках прийнятої моделі отримано аналітичні вирази для залежності швидкості і концентрації електронів, поляризаційного поля і заряду від відстані до центра Сонця.

Нижче наведено формулу, отриману [3, 19] для оцінки поляризаційного електричного поля

$$E = \frac{GM \ m_p}{er^2 \left(1 + \frac{T_p}{T_e}\right)} \left(1 - \frac{T_p m_e}{T_e m_p}\right),\tag{1}$$

де G (=6.67·10<sup>-11</sup> H·м<sup>2</sup>·кг<sup>-2</sup>) – гравітаційна постійна, М- маса Сонця, Е – радіальна компонента напруженості електричного поля, *m*<sub>e</sub> – маса електрона, *m*<sub>p</sub> – маса протона, *r* – відстань від центра Сонця, *-е* – заряд електрона.

У випадку ізотермічної корони  $T_p = T_e$  і нехтуючи  $m_e/m_p$  (1) переходить у відомий вираз для електричного поля статичної плазми поляризованої гравітаційним полем (Панекока-Росселанда) [16]

$$E = \frac{GM \ m_p}{2er^2} \,. \tag{2}$$

Підставляючи в (1) параметри Сонця (*M* =1.99·10<sup>30</sup> кг - маса Сонця) і корони (*T<sub>p</sub>*, *T<sub>e</sub>*) можна оцінити електричне поле в основі сонячної корони

$$E = 2.84 \frac{\left(1 - \frac{T_p m_e}{T_e m_p}\right)}{\left(1 + \frac{T_p}{T_e}\right)} \text{ MKB/M.}$$
(3)

Важливою особливістю обертання Сонця є його неоднорідність. Геліосейсмологічні дослідження дозволили визначити обертання внутрішніх шарів Сонця [6]. Вивчення неоднорідного обертання стимулюється тим, що воно, ймовірно, відіграє важливу роль в магнітній активності Сонця як зірки [9].

Індукційні явища, що виникають навколо однорідно намагніченої зірки, яка однорідно обертається, вперше розглядались Девісом [18] при розрахунках радіального і меридіонального електричних полів і електричних потенціалів. Задача про обертання намагніченої кулі в електроліті розглянута в класичній електродинаміці [11].

У даній роботі розглянуто електричні явища, які виникають внаслідок неоднорідного обертання однорідно намагніченого Сонця з урахуванням наявності зовнішніх плазмових шарів (атмосфери і корони).

Як відзначено в роботі [25] при ідеальному магнітогідродинамічному розгляді [22] з нескінченою провідністю плазми електрорушійні сили не індукуються. Тому в цій роботі також врахована скінченність питомої електричної провідності плазмових шарів Сонця, його атмосфери і корони.

**Модель.** Скористаємось моделлю Девіса однорідно намагніченої зірки, яка обертається [18]. Загальне магнітне поле Сонця вважаємо дипольним. Приймаємо, що вісь диполя паралельна вісі обертання Сонця. В області *r* < *a* магнітна індукція *B* постійна (*a* – радіус Сонця).

На відміну від Девіса, який вважав що вся сфера радіуса а обертається як тверде тіло з кутовою швидкістю  $\omega$ , ми враховуємо неоднорідність обертання сонячних шарів (рис. 1). Вважаємо, що внутрішня частина нижче тахоклину (промениста зона з ядром – *L*) обертається зі швидкістю  $\omega_L$ , а зовнішня (конвективна зона – *Z*, нижня атмосфера – *A* і корона – *C*), при  $r > a_L$ , зі швидкістю  $\omega_0$  [9] ( $\omega_Z = \omega_A = \omega_C = \omega_0$ ).



Рис. 1. Використана модель плазмових шарів Сонця

У сферичній системі координат для намагніченої кулі r < a радіальна компонента магнітної індукції дорівнює

$$B_r^L = B_r^Z = B_0 \cos\theta \,, \tag{4}$$

а меридіональна компонента

$$B_{\theta}^{L} = B_{\theta}^{Z} = -B_{0} \sin \theta \,. \tag{5}$$

Для зовнішнього шару кулі r > a радіальна компонента магнітної індукції

$$B_{r}^{A} = B_{r}^{C} = \frac{B_{0}a^{3}\cos\theta}{r^{3}},$$
 (6)

а меридіональна

$$B_{\theta}^{A} = B_{\theta}^{C} = \frac{B_{0}a^{3}\sin\theta}{2r^{3}},$$
(7)

де *B*<sub>0</sub> – магнітне поле на полюсі, *r* – відстань від центра Сонця, *θ* – полярний кут, який відраховується від осі обертання.

Для отримання аналітичних розв'язків приймаємо наближення ізотермічності для кожного плазмового шару. При проведенні чисельних оцінок приймалось, що питомі електропровідності плазмових шарів задовольняють нерівностям  $\lambda_A << \lambda_m$ ,  $\lambda_C$ .

**Основні рівняння.** Для електричного потенціала  $\varphi_L$  в нерухомій сферичній системі координат можна записати рівняння Пуасона для променистої зони (нижче тахоклину)  $r < a_L < a$ 

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \varphi_L}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \varphi_L}{\partial \theta} \right) = 2B_0 \omega_L.$$
(8)

Для електричного потенціала  $\varphi_{Z}$  - рівняння Пуасона для конвективної зони (вище тахоклину)  $a_{L} < r < a$ 

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\varphi_Z}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\varphi_Z}{\partial\theta}\right) = 2B_0\omega_0, \qquad (9)$$

а для зовнішнього шару *r* > *a* для атмосфери, потенціал  $\varphi_A$ , і корони, потенціал  $\varphi_C$ , відповідно, задовольняють наступним рівнянням

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\varphi_A}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\varphi_A}{\partial\theta}\right) = B_0\omega_0\frac{a^3}{r^3}\left(3\cos^2\theta - 1\right),\tag{10}$$

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial\varphi_C}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(\sin\theta\frac{\partial\varphi_C}{\partial\theta}\right) = B_0\omega_0\frac{a^3}{r^3}\left(3\cos^2\theta - 1\right).$$
(11)

На межі між плазмовими шарами на тахоклині, тобто при *r* = *a*<sub>L</sub> повинні виконуватися наступні граничні умови: для потенціалів

$$\varphi_L = \varphi_Z \tag{12}$$

і для радіальної компоненти електричного струму

$$-\lambda_m \frac{\partial \varphi_L}{\partial r} + \lambda_m B_0 \omega_L r \sin^2 \theta = -\lambda_m \frac{\partial \varphi_Z}{\partial r} + \lambda_m B_0 \omega_0 r \sin^2 \theta .$$
(13)

На межі між конвективною зоною і фотосферою, тобто при *r* = *a* повинні виконуватися граничні умови: для потенціалів

$$\varphi_A = \varphi_Z \tag{14}$$

~

і для радіальної компоненти струму

$$-\lambda_m \frac{\partial \varphi_Z}{\partial r} + \lambda_m B_0 \omega_0 r \sin^2 \theta = -\lambda_A \frac{\partial \varphi_A}{\partial r} - \lambda_A B_0 \omega_0 \frac{a^3}{2r^2} \sin^2 \theta \,. \tag{15}$$

На нижній межі корони, тобто при *r* = *a*<sub>*C*</sub> повинні виконуватися граничні умови: для потенціалів

$$\varphi_A = \varphi_C \tag{16}$$

і радіальної компоненти струму

$$\lambda_C \frac{\partial \varphi_C}{\partial r} - \lambda_C B_0 \omega_0 \frac{a^3}{2r^2} \sin^2 \theta = -\lambda_A \frac{\partial \varphi_A}{\partial r} - \lambda_A B_0 \omega_0 \frac{a^3}{2r^2} \sin^2 \theta.$$
(17)

Так як і Девіс [18], ми приймали потенціал на нескінченості рівним нулю. Рівняння (8)–(11) утворюють повну систему диференційних рівнянь для потенціалів із граничними умовами (12)–(17).

**Аналітичні розв'язки для електричних потенціалів та електричних полів.** В рамках прийнятої моделі отримані аналітичні розв'язки для розподілів потенціалів в плазмових шарах Сонця (променистої зони, конвективної зони, атмосфери та корони, відповідно):

$$\varphi_{L}(r,\theta) = \left[A + \frac{B}{a^{5}} - \frac{B_{0}\omega_{0}}{3} - \frac{2B_{0}\left(a^{5} - a_{L}^{5}\right)\left(\omega_{L} - \omega_{0}\right)}{15a^{5}}\right]r^{2}\frac{3\cos^{2}\theta - 1}{2} + \frac{B_{0}a_{L}^{2}\left(\omega_{0} - \omega_{L}\right)}{3} + \frac{B_{0}r^{2}\omega_{L}}{3}$$
(18)

$$\varphi_{Z}(r,\theta) = \left[ \left(A + \frac{B}{a^{5}} - \frac{B_{0}\omega_{0}}{3} + \frac{2B_{0}a_{L}^{5}(\omega_{L} - \omega_{0})}{15a^{5}}\right)r^{2} - \frac{2B_{0}a_{L}^{5}(\omega_{L} - \omega_{0})}{15r^{3}} \right] \frac{3\cos^{2}\theta - 1}{2} + \frac{B_{0}r^{2}\omega_{0}}{3}$$
(19)

$$\varphi_A(r,\theta) = \left(\frac{B}{r^3} + Ar^2 - \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r}\right) \frac{3\cos^2 \theta - 1}{2} + \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r} \quad , \tag{20}$$

$$\varphi_C(r,\theta) = \left(\frac{C}{r^3} - \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r}\right) \frac{3\cos^2 \theta - 1}{2} + \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r} \quad , \tag{21}$$

де

$$A = \frac{2B_0 a_L^2 \lambda_m (\omega_L - \omega_0) (\lambda_C - \lambda_A)}{\left(a_C^5 (6\lambda_m \lambda_C + 4\lambda_m \lambda_A + 9\lambda_A \lambda_C + 6\lambda_A^2) + 6a^5 (\lambda_A \lambda_C - \lambda_A^2 - \lambda_m \lambda_C + \lambda_m \lambda_A)\right)},$$
(22)

$$B = \frac{-2B_0 a_C^5 a_L^5 \lambda_m (\omega_L - \omega_0) (2\lambda_A + 3\lambda_C)}{3 (a_C^5 (6\lambda_m \lambda_C + 4\lambda_m \lambda_A + 9\lambda_A \lambda_C + 6\lambda_A^2) + 6a^5 (\lambda_A \lambda_C - \lambda_A^2 - \lambda_m \lambda_C + \lambda_m \lambda_A))},$$
(23)

$$C = \frac{-10B_0 a_C^5 a_L^5 \lambda_A \lambda_m (\omega_L - \omega_0)}{3 \left( a_C^5 (6\lambda_m \lambda_C + 4\lambda_m \lambda_A + 9\lambda_A \lambda_C + 6\lambda_A^2) + 6a^5 (\lambda_A \lambda_C - \lambda_A^2 - \lambda_m \lambda_C + \lambda_m \lambda_A) \right)}$$
(24)

Отриманий розв'язок для корони переходить у вираз моделі Девіса [18] для електричного потенціалу за межами поверхні Сонця (r > a) при відсутності тахоклину і зовнішніх плазмових шарів ( $\omega_L = \omega$ ,  $\omega_0 = 0$ ,  $a_L = a_C = a$ ,  $\lambda_A = \lambda_C = 0$ )

$$\varphi(r,\theta) = \left(-\frac{B_0 a^5 \omega}{3r^3}\right) \frac{3\cos^2 \theta - 1}{2} \quad .$$
(25)

Використовуючи розв'язки для потенціалів, отримаємо аналітичні вирази для електричних полів [11]

$$E_r^i(r,\theta) = -\frac{\partial \varphi_i}{\partial r} , \qquad (26)$$

$$E_{\theta}^{i}(r,\theta) = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_{i}}{\partial \theta} .$$
<sup>(27)</sup>

Радіальна і меридіональна компоненти електричного поля у короні мають такий вигляд:

$$E_r^C(r,\theta) = \left(\frac{3C}{r^4} - \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r^2}\right) \frac{3\cos^2 \theta - 1}{2} + \frac{B_0 a^3 \omega_0}{3r^2} , \qquad (28)$$

$$E_{\theta}^{C}(r,\theta) = \left(\frac{C}{r^{4}} - \frac{B_{0}a^{3}\omega_{0}}{3r^{2}}\right)\frac{3\sin 2\theta}{2} , \qquad (29)$$

які переходять у вирази моделі Девіса [18] для електричного поля за межами Сонця (r > a) при відсутності тахоклину і зовнішніх плазмових шарів ( $\omega_L = \omega, \omega_0 = 0, a_L = a_C = a, \lambda_A = \lambda_C = 0$ ):

$$E_r(r,\theta) = (-\frac{B_0 a^5 \omega}{r^4}) \frac{3\cos^2 \theta - 1}{2} , \qquad (30)$$

$$E_{\theta}(r,\theta) = \left(-\frac{B_0 a^5 \omega}{r^4}\right) \frac{\sin 2\theta}{2} . \tag{31}$$

Виконаємо оцінки величин радіальних електричних полів:

- поляризаційне електричне поле в основі сонячної корони 2.84 · 10<sup>-6</sup> v/m (згідно [3]);

- електричне поле зумовлене припливними силами планет 2.4 · 10<sup>-13</sup> v/m (згідно [13]);

- індукційне електричне поле в основі корони на екваторі 2.18 · 10<sup>-2</sup> v/m.

Для оцінки індукційних електричних полів використано такі значення параметрів моделі  $B_0 = 10^4$  T,  $a_L = 4.9 \cdot 10^8$  m,  $a_C = 7,021 \cdot 10^8$  m,  $a = 6.96 \cdot 10^8$  m,  $\omega_L = 2.513 \cdot 10^{-6}$  rad/s,  $\omega_0 = 2.262 \cdot 10^{-6}$  rad/s і питомі електропровідності плазмових шарів  $\lambda_m = 10^6$  mho· m<sup>-1</sup>,  $\lambda_A = 10^4$  mho· m<sup>-1</sup>,  $\lambda_C = 10^6$  mho· m<sup>-1</sup>.

Висновки. Отримано аналітичні розв'язки для розподілу електричних потенціалів і полів в плазмових шарах Сонця, зумовлених неоднорідністю його обертання.

1. При відсутності неоднорідності обертання і зовнішніх плазмових шарів (*ω*<sub>L</sub>=*ω*, *ω*<sub>0</sub>=0, *a*<sub>L</sub> = *a*<sub>C</sub> = *a*, *λ*<sub>A</sub> = *λ*<sub>C</sub> =0) розв'язки для розподілу електричних потенціалів і полів за межами поверхні Сонця співпадають з розв'язками Девіса [18].

 Радіальні електричні поля, зумовлені неоднорідністю обертання Сонця на декілька порядків, перевищують радіальні поляризаційні поля і на багато порядків перевищують поля, зумовлені припливними силами планет.

Отримані результати є основою для знаходження індукційних електричних струмів у сонячній короні.

- 1. Быстренко Т., Загородный А. To the problem of influence of charging processeson the grain screening in plasmas // Укр. физ. журн. 2002. Т. 47, №4. С. 341–345.
- 2. Гуревич А.В., Парийская Л.В., Питаевский Л.В. Автомодельное движение разреженной плазмы// Журн. эксп. теор. физ.- 1965.- Т. 49. - С. 647-655.
- 3. *Ефименко В.М., Токий В.В., Токий Н.В.* Электрическое поле и електрический заряд солнечной короны // Кинемат. и физика небес. тел. 2004. Т. 20, № 1. С. 27–33.

4. *Єфіменко В.М., Токій В.В., Токій Н.В.* Про стаціонарне розширення плазми у вакуум з урахуванням гравітаційних і електричних полів // Журн. фіз. досл. – 2005. – Т. 9, № 3. – С. 122–125.

5. Єфіменко В.М., Токій В.В., Токій Н.В. Про поляризаційні припливи в атмосфері Сонця // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2007. – Вип. 44. – С. 4–6.

Кичатинов Л.Л. Дифференциальное вращение звезд // Успехи физ. наук. – 2005. – Т.105, № 5. – С. 475-494.
 Кошевая С.В., Гримальский В.В., Бурлак Г.Н., Коцаренко А.М. Acoustic channel of the lithosphere – ionosphere coupling // Укр. физ. журн. –2002.

- Т. 47. №2. – С. 142–146.

 Находкин Н.Г., Зыков Г.А., Матвеев В.Т. Локализация и пичковый режим эмиссии ионов расширяющейся лазерной плазмой / /Укр. физ. журн. – 1986. – Т. 31, №7. – С. 1017–1025.

9. Паркер Е. Космические магнитные поля. Их образование и проявления. Части 1 и 2. – М., 1982.

10. Плютто А.А. Ускорение положительных ионов в расширяющейся плазме вакуумных искр // Журн. эксп. теор. физ. – 1960.– Т. 39. – С.1589–1593.

11. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М., 2003.

12. Токий В.В., Ефименко В.М., Токий Н.В. Меридиональные и зональные электрические поля в атмосферах Солнца и планет // Вісн. ДІСО. – 2005. – Т. 1. – С. 20-26.

13. Токий В.В., Ефименко В.М., Токий Н.В. Электрические поля, вызванные горизонтальными приливными силами в плазменных слоях атмосфер планет и звезд // Изв. Крым. астрофиз. обсерв. – 2007. – Т. 103, № 4. – С. 51-58.

14. Токий В.В., Ефименко В.М., Токий Н.В. Возмущения общего магнитного поля, вызванные горизонтальными приливными силами в экваториальной плоскости солнечной короны // Труди Першої наукової конференції «Науки про Землю та Космос – Суспільству». Київ, 25-27 червня 2007 р. – K., 2008.

15. Токій В.В., Єфіменко В.М., Токій Н.В. Електричні потенціали та поля, обумовлені тахоклином, в плазмових прошарках однорідно намагніченого Сонця // Зб. наук. статей IV Міжвуз. науково-практичної конф. "Сучасні тенденції наукової парадигми географічної освіти України". – Донецьк., 2008. 16. Хундхаузен А. Расширение короны и солнечный ветер. – М., 1976. 17. Crow J.E., Auer P.L., Allen J.E. The expansion of a plasma into a vacuum // J. Plasma Phys. – 1975.– Vol. 14. – P. 65–76.

18. Davis L. Jr. Stellar Electromagnetic Fields // Phys. Rev. - 1947. - Vol. 72, N 7. - P. 632-633.

19. Efimenko V.M., Tokiy V.V., Tokiy N.V. Stationary electrical polarizing field and charge in plasma of the solar atmosphere // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser. – 2005. – № 5. – P. 169-171. 20. Geiss J., Hirt P., Leutwyler H. On acceleration and motion of ions in corona fnd solar wind// Sol. Phys. – 1970. – Vol. 12. – P. 458-483.

21. Lie-Svendsen O., Hansteen V.H., Leer E., Holzer T.E. The effect of transition region heating on the solar wind from coronal holes // Astrophys.J.-2002. – Vol. 566. – P. 562–576.

22. Pannekoek A. Ionization in stellar atmospheres //Bull. Astron. Inst. Neth. - 1922. - Vol. 1. - P. 107-118.

23. Parker E.N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields // Astrophys. J. - 1958. - Vol. 128, N 3. - P. 664-676.

24. Parker E.N. The Alternative Paradigm for Magnetospheric Physics // J. Geophys. Res. - 1996. - Vol. 101, N 10. - P. 587-597.

25. Parks G.K. Why Space Physics Needs to go Beyond the MHD // Space Sci. Rev. - 2004. - Vol. 113. - P. 97-125.

26. Rosseland S. Electrical state of a star // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. -1924. - Vol. 84. - P. 720-728.

27. Tanberg K. On the cathode of an ARC drawn in vacuum // Phys. Rev. - 1930. - Vol. 35. - P. 1080-1085.

Надійшла до редколегії 29.04.09

УДК-523.9-337

У. Лейко

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАЦІЙ ЗАГАЛЬНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ СОНЦЯ

Підсумовано результати досліджень загального магнітного поля Сонця, що проводилися в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Наведено деякі особливості еволюції загального магнітного поля Сонця напередодні очікуваного довготривалого мінімуму сонячної активності.

We review selected results of investigation of large-scale solar magnetic field which have been made at the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko Kiev National University. Some features of evolution of solar mean magnetic field before expected long-term minimum of solar activity are presented.

Вступ. Загальне магнітне поле Сонця (ЗМПС), що характеризує Сонце як зірку, є інтегроване по видимому диску Сонця значення поздовжньої компоненти поверхневого магнітного поля. По суті, це розбаланс магнітного потоку видимої півсфери Сонця (переважання потоку однієї із полярностей). ЗМПС є глобальною характеристикою магнітної змінності Сонця, корелює зі структурою фотосферного та міжпланетного магнітних полів, числами Вольфа та іншими індексами сонячної активності.

Виміри ЗМПС (магнітографічні спостереження Сонця у паралельному пучку) були започатковані у 1967 р. в Кримській астрофізичній обсерваторії [15]. Регулярні спостереження ЗМПС виконувалися також в обсерваторіях Маунт Вілсон (1972–1982 рр.), сонячній обсерваторії імені Уілкокса Станфордського університету (1975–2009 рр.), епізодичні – у Саянській обсерваторії. Ше на початковій стадії вивчення ЗМПС дослідниками КрАО було показано (а в подальшому підтверджувалося і іншими дослідниками), що визначальний внесок у сигнал магнітографа при вимірюванні ЗМПС дають слабкі фотосферні магнітні поля [3].



Рис. 1. Верхня панель: часовий ряд добових вимірів напруженості В ЗМПС (Станфорд, 5.1975-4.2009); Нижня панель: сумарні місячні значення напруженості компонент ЗМПС позитивної та негативної полярності (верхній і нижній графіки відповідно)

Ряди вимірів ЗМПС, що на сьогодні мають загальну довжину близько 42 років, дають змогу дослідити магнітну змінність Сонця у різних частотних діапазонах та впродовж різних часових інтервалів, обертання, просторовочасовий розподіл великомасштабних магнітних структур. З'ясування динаміки великомасштабних полів, що є першопричиною багатьох явищ сонячної активності, наближає нас до розуміння природи сонячної активності.

У представленій роботі підсумовано деякі результати дослідження особливостей великомасштабних сонячних магнітних полів, що були отримані в результаті обробки часових рядів ЗМПС методами спектрального аналізу та викладені у роботах [4–6, 12, 15], а також деякі особливості його еволюції напередодні очікуваного довготривалого мінімуму сонячної активності.

Просторово-часова організація та обертання великомасштабних магнітних полів. Вперше інформацію про обертання великомасштабних магнітних структур отримав Северний [8], визначивши відстань між екстремумами значень магнітного поля різного знаку за часовим рядом вимірів ЗМПС, отриманих у КрАО впродовж 1968-1969 рр. Отримані у такий спосіб періоди 26.8 та 27.6 діб були проінтерпретовані автором або швидшим обертанням полів позитивної полярності або ближчим розташуванням їх зони концентрації до екватора. Таким чином, аналіз часового ряду вимірів ЗМПС дає можливість визначити швидкість обертання магнітних структур та їх просторово-часовий розподіл. Після накопичення спостережних даних таку інформацію почали отримувати, використовуючи різноманітні методи спектрального аналізу [2, 4, 7, 10, 11].

У спектрах рядів ЗМПС в області періодів обертання спостерігаються кілька груп значимих дискретних піків. Наявність виділених періодів квазіжорсткого обертання магнітних структур на фоні диференційного обертання Сонця свідчить про існування стійких структур, що існують від кількох обертів Сонця до десятків років. Найпотужніший пік з періодом ~27 діб, на думку багатьох дослідників відображає обертання приекваторіальних магнітних полів, групи піків з довшими періодами (наприклад ~28.1 діб, ~30 діб) – обертання високоширотних зон концентрації великомасштабних магнітних структур.

Ряди вимірів ЗМПС нерівномірні – мають місце пропуски спостережень, зумовлені в основному метеорологічними умовами. Тому для обробки рядів вимірів ЗМПС була застосована методика Барнінга для обчислення LSспектрів нерівномірних часових рядів [9]. Аналіз LS-спектрів рядів ЗМПС для 21 та 22 циклів [4–6] виявив, що просторово-часова організація великомасштабних магнітних полів була суттєво відмінною для цих циклів: впродовж 21 циклу великомасштабні магнітні поля мали п'ять зон переважної концентрації, а впродовж 22 циклу – три.

Просторово-часова організація великомасштабних магнітних полів суттєво відмінна на фазах росту та спаду обох циклів. Спектри фази росту мають малопотужні піки і суттєво відмінні від спектрів ЗМПС за весь цикл. Водночас, спектри фази спаду циклів майже ідентичні спектрам ЗМПС всього циклу. Тобто, зони переважної концентрації великомастабних магнітних структур виявляються сформованими лише на фазах спаду циклів.



Рис. 2. LS- спектри в області періодів обертання рядів усіх вимірів ЗМПС (суцільна лінія) та позитивних і негативних значень ЗМПС(лінії з великими та дрібними штрихами відповідно) для 21 циклу (1975–1986 рр.). По осі ординат приведено період у добах

Для визначення часових варіацій обертання великомасштабних магнітних структур була розроблена спеціальна методика обробки часових рядів [7]. В ковзному вікні вибраної довжини (що ковзає з вибраним кроком), обчислюється спектр як для всієї області періодів обертання, так і для окремих діапазонів цієї області. В цьому спектрі визначається значення періоду найпотужнішого піку та середньозваженого періоду. Таким чином отримуємо ряд цих характеристик. В подальшому досліджується зміна цих характеристик з часою. За такою методикою був оброблений часовий ряд станфордських вимірів ЗМПС (1975–2004 рр.) в області періодів обертання та в окремих діапазонах, що

містять групи дискретних домінуючих піків [7]. Виявилося, що впродовж досліджуваного інтервалу часу швидкість приекваторіальних магнітних полів зростала, в той час як швидкість магнітних полів в зонах концентрації на вищих широтах зменшувалася.

Обертання магнітних полів протилежної полярності. Однією із головних особливостей ЗМПС, як було вказано Северним [8], є магнітна асиметрія, яка проявляється у внутрішній часовій поведінці та різній статистиці елементів "+"- і "-"- полярності. На верхній панелі рис. 1 наведено часовий ряд добових вимірів ЗМПС, виконаних в Станфордській обсерваторії, на нижній – сумарні місячні значення ЗМПС "+"- і "-"-полярності. Крива ходу добових значень ЗМПС несиметрична. Виникає враження, що цей ряд складається з двох рядів з незалежною внутрішньою поведінкою, що і підтверджують дві нижні криві. Коефіцієнт кореляції між рядами позитивних та негативних значень ЗМПС становить 0.55, між рядами ЗМПС та позитивною компонентою 0.34, між рядом ЗМПС та негативною компонентою - 0.60 (маються на увазі сумарні місячні ряди).

Окреме дослідження спектрів рядів компонент ЗМПС позитивної та негативної полярності [4, 6] показало, що магнітна асиметрія впродовж 21 та 22 циклів в області періодів обертання проявилась в різній кількості піків в спектрах компонент ЗМПС різної полярності, а також в різних їх формах та значеннях їх потужності. В області довготривалих періодів в спектрах компонент ЗМПС окремих полярностей виявились потужні піки зі значеннями періодів, що відповідають тривалості циклів активності. Таких піків немає в спектрі повного ряду ЗМПС. Квазірічна компонента спостерігається лише в спектрі негативної компоненти ЗМПС впродовж 21 циклу. Наведені результати дослідження підтверджують гіпотезу Северного про різну просторово-часову організацію та внутрішню статистику великомасштабних магнітних структур позитивної та негативної полярності.

Особливості еволюції ЗМПС напередодні очікуваного довготривалого мінімуму сонячної активності. У зв'язку з пониженням загального рівня сонячної активності та очікуванням довготривалого мінімуму сонячної активності, подібному маундерівському, з'явилася низка робіт, в яких висвітлюються особливості еволюції великомасштабних магнітних полів та інших індексів сонячної активності останніх десятиріч [1, 14]. Автори роботи [1], дослідивши конфігурацію і сумарний магнітний потік фотосферного магнітного поля останніх двох (22 і 23) циклів, виявили суттєві відмінності в протіканні мінімумів перед 23 та 24 циклами. На основі своїх досліджень вони підтвердили довготривалу тенденцію зниження рівня сонячної активності.

Тривалість стенфордського ряду добових вимірів ЗМПС, що регулярно виставляються на сайті обсерваторії імені Уілкокса Стенфордського університету *http://WSO.Stanford.edu* на сьогодні становить майже 34 роки (15.05.1975-30.04.2009).

На верхній панелі рис. 1 наведено станфордський ряд добових вимірів напруженості ЗМПС за весь інтервал спостережень. Він включає три цикли – 21, 22 та 23. Тривалість перших двох циклів становить приблизно ~10.5 років, останнього, 23 – ≥13 років. Напруженість ЗМПС цього циклу також нижча, ніж у двох попередніх циклах. Епоха мінімуму перед 23 циклом триваліша, ніж перед 22 циклом, що підтверджує результати авторів роботи [1]. Епоха мінімуму перед 24 циклом також довготривала. Отже аналіз ряду добових вимірів ЗМПС також підтверджує тенденцію загального зниження рівня сонячної активності.

Висновки. В Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка були розроблені оригінальні методики обробки часових рядів та проведені дослідження великомасштабних магнітних полів, зокрема, за часовими рядами загального магнітного поля. В результаті таких досліджень були визначені просторово-часові характеристики великомасштабних магнітних полів та їх обертання для 21 і 22 циклів. Отримані результати дослідження підтверджують гіпотезу Северного про різну просторово-часову організацію та внутрішню статистику великомасштабних магнітних структур позитивної та негативної полярності.

Дослідження майже 34-річного станфордського ряду ЗМПС підтвердили загальну тенденцію зниження рівня сонячної активності.

1. Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф. Начало нового, 24-го, цикла солнечной активности в крупномасштабном открытом магнитном поле Солнца // Геомагнетизм. и аэрономия. – 2008. – Т. 48, N 3. – С. 291–296.

2. Котов В.А. Общее магнитное поле Солнца как звезды // Изв. Крым. астрофиз. обсерв. – 1994. – Т. 91. – С. 5–24.

3. Котов В.А., Степанян Н.Н., Щербакова З.А. Роль фонового магнитного поля и полей активных областей в общем магнитном поле Солнца // Изв. Крым. астрофиз. обсерв. – 1977. – Т. 56. – С. 75–83.

4. *Лейко У.М.* О вращении солнечных крупномасштабных магнитных полей противоположной полярности // Кинематика и физика небес. тел. – 2004. – Т. 20, №1. – С. 34–42.

5. Лейко У.М. Вращения секторных структур системы Солнце – гелиосфера. // Кинематика и физика небес. тел. – 2004. –Т. 20, №4. С. 328–348.

6. Лейко У.М. Общее магнитное поле Солнца: вращение магнитных полей противоположной полярности // Изв. Крым. астрофиз. обсерв. – 2004. – Т. 100. – С. 47–51.

7. Лейко У.М. Вращение магнитных полей Солнца и циклы активности в XX столетии // «Солнечная активность как фактор космической погоды». Тр. IX Пулковской конф. по физике Солнца. Санкт-Петербург, ГАО РАН. – 2006. – С. 411–416.

8. Северный А.Б. Некоторые проблемы физики Солнца – М., 1988. – 221 с.

9. Теребиж В.Ю. Анализ временных рядов в астрофизике – М., 1992. – 399 с.

10. Ханейчук В.И. Вариации общего магнитного поля Солнца: вращение и 22-летний цикл // Изв. Крым. астрофиз. обсерв. – 2000. – Т. 96. – С. 176–187.

11. Haneychuk V. I., Kotov V. A., Tsap, T. T. On stability of rotation of the mean magnetic field of the Sun // Astronomy and Astrophysics. – 2003. – Vol. 403. – P. 1115–1121.

12. Leiko U.M. Large-scale magnetic fields of Sun-heliosphere magnetic system // Spec. Iss. "Kinematika and Fizika Nebes. Tel" - Kyiv, 2005. - P. 187-188.

Leiko U.M. Rotation variations of large-scale solar and interplanetary magnetic fields // Proc. IAU Symposium No 223. – IAU, 2004. – P. 117–118.
 Obridko V.N., Shelting B.D. Anmaliesin the evolution of global and large-scale solar magnetic fields as the precursor of several upcoming low solar cy-

cle // Astronomy Lett. – 2009. – Vol. 35, N 4. – P. 279–285.

15. Severny A.B. The polar fields and time fluctuations of the genaral magnetic field of the Sun // Solar magnetic fields: Proc. IAU Symposium No 43. – Dordrecht ,1971. – P. 675–695.

УДК 523.982 + 523.985

В. Лозицький, Є. Курочка

### ПОРІВНЯННЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ І ТЕРМОДИНАМІЧНИХ УМОВ У СОНЯЧНИХ СПАЛАХАХ ТА НЕСПАЛАХОВИХ ОБЛАСТЯХ НА СОНЦІ

Наведено результати спектрально-поляризаційних досліджень фізичних умов у сонячних спалахах балів X17.2 та М4.1, а також у тіні й півтіні двох великих сонячних плям (з діаметром 30-40 Мм), які спостерігались на горизонтальному сонячному телескопі Астрономічної обсерваторії Київського національного університету у 2003-2005 рр. Для спалаху X17.2 знайдено, що всередині ділянок масштабу 1 Мм структура магнітного поля була багатокомпонентною, з протилежною магнітною полярністю маломасштабних компонент поля. У цьому спалаху магнітне поле в одній з компонент досягало ≈ 10 кГс. У спалаху балу М4.1 розподіл магнітного поля і температури вздовж променя зору був немонотонним, з гострими висотними піками, тоді як у тіні й півтіні плям за межами спалаху – монотонним. Такі піки магнітного поля і температури існували у спалаху близько 10 хв.

The results of spectral-polarized observations are presented related to solar flares of X17.2 and M4.1 importance as well as to umbra and penumbra of two sunspots of 30-40 Mm diameter observed in 2003-2005 on horizontal solar telescope of the Astronomical Observatory of Kyiv Taras Shevchenko National University. For the X17.2 flare, it was shown the multi-component magnetic field structure inside of 1 Mm scale, with opposite magnetic field polarity in small-scale components. In this flare magnetic field strength in one component was about 10 kG. For the M4.1 flare, the magnetic field and temperature distributions along the line of sight were non-monotonous, with sharp high peaks, whereas in sunspot umbra and penumbra outside flares these distributions were monotonous. Such magnetic field and temperature peaks had existed about 10 min.

Вступ. Найбільш потужним проявом сонячної активності є сонячні спалахи. Найчастіше вони виникають в активних областях зі складною, заплутаною структурою магнітного поля, його високими горизонтальними градієнтами і швидкими змінами поля з часом. Ці та деякі інші відомі на сьогодні ознаки можливого виникнення спалахів [9] не дозволяють, однак, з 100% надійністю прогнозувати точний час і місце виникнення спалахів та їх потужність. Очевидно, крім вказаних ознак, мають існувати ще певні (на сьогодні невідомі) особливості магнітного поля, які і є визначальними при виникненні й протіканні процесу спалахового енерговиділення. Можна припустити, що такими є певні локальні характеристики магнітних полів у дуже малих просторових масштабах ( ≤100 км), поки що недоступних для прямих спостережень внаслідок недостатнього просторового розділення сонячних телескопів. Саме вони мають бути визначені зі спектрально-поляризаційних спостережень магнітних полів на Сонці.

При недостатньому просторовому розділенні задача зводиться до інтерпретації спостережень в рамках багатокомпонентних моделей та визначення фізичних параметрів цих компонент. Одна з компонент може бути крупномасштабною (фоновою), тоді як інші – маломасштабними, з субтелескопічними розмірами елементів їх структури.

У багатокомпонентних моделях, однак, різко зростає число вільних параметрів, які використовуються для узгодження моделі зі спостереженнями. При однорідному магнітному полі таких параметрів тільки три (тобто три просторові компоненти вектора індукції поля), тоді як навіть при двохкомпонентній моделі число таких параметрів – близько десяти [7]. Це неминуче призводить до неоднозначності результатів інтерпретації і до необхідності використовувати певні спрощуючі припущення. Яке з таких припущень можна вважати прийнятним, а яке ні – можна оцінити лише шляхом поступового нагромадженням емпіричних даних.

Задача ускладнюється тим, що фактично активні утворення на Сонці є дуже неоднорідними не тільки в картинній площині (тобто по поверхні), але й по променю зору. Для визначення фізичних умов в таких утвореннях використовують моделювання їх спектрів шляхом розв'язку системи рівнянь переносу випромінювання в даних лініях спектру. На сьогодні існує два методи розв'язку: побудова синтетичного спектру та інверсний метод. Розрахунок синтетичного спектру проводиться підбором фізичних параметрів сонячної плазми вздовж променя зору, з використанням методу проб та помилок, по найменшому відхиленню розрахованих та спостережених спектрів. У середині 90-х років XX століття був запропонований інший метод розв'язку рівнянь переносу випромінювання, який отримав назву інверсного. Його появу викликали спостереження чутливих до магнітного поля ліній та вимірювання їх параметрів Стокса. Основою методу була стаття [13]. В ній пропонувалося розглядати рівняння переносу в магніточутливій лінії в залежності від стоксових параметрів та величини магнітного поля. При цьому матриця, яка входить в рівняння переносу, розпадається на 2 складові: залежну тільки від оптичної глибини та залежну від характеристик магнітного поля. Створені на основі цього методу програми успішно використовуються для отримання характеристик спокійної сонячної атмосфери та тіні плями [17, 18].

У відділі сонячної активності і сонячно-земних зв'язків Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (АО КНУ) використовуються різні методи досліджень фізичних умов в активних областях на Сонці. Для вивчення багатокомпонентної структури магнітного поля на якому-небудь одному рівні сонячної атмосфери використовуються методи аналізу бісекторів в *I* ± *V* профілях ліній з різними факторами Ланде а також метод "відношення ліній" [6, 14]. Для дослідження висотної неоднорідності активних утворень проводяться модельні розрахунки на основі застосування програми розрахунку синтетичного спектру, розробленої співробітником Кримської астрофізичної обсерваторії Е.О.Барановським [10]. З її допомогою ведеться прямий розрахунок профілів методом ітерацій для слабких та помірних ліній при умові локальної термодинамічної рівноваги до узгодження зі спостереженими профілями.

У даній роботі подано короткий огляд основних результатів, отриманих у цьому напрямі в АО КНУ за останні три роки.

Багатокомпонентна структура і полярність магнітного поля. У роботах [5, 15] на основі спектральнополяризаційних спостережень розвинуто діагностичні підходи, які дозволяють виявити і дослідити сильні субтелескопічні магнітні поля, притому такі, які дають картину ефекту Зеємана як в поглинанні, так і в емісії. Запропонована наступна схема аналізу спостережних даних. 1. Спершу досліджуються профілі Стокса *I* ± *V* та *V* кількох магніточутливих ліній з близькими глибинами формування в атмосфері, але різними факторами Ланде g. Вивчається розподіл розщеплення бісекторів Δλ<sub>B</sub> з віддаллю від центра лінії Δλ. При однорідному магнітному полі, якщо розщеплення бісекторів профілів *I* ± *V* значно менше за спостережену півширину спектральної лінії Δλ<sub>1/2</sub>, можна очікувати Δλ<sub>B</sub>(Δλ) ≈ const. Якщо ж на залежності Δλ<sub>B</sub> від Δλ виявляються певні екстремуми, це може свідчити про неоднорідність магнітного поля в картинній площині, тобто про те, що спостережений профіль лінії є результатом сумування кількох профілів, що відповідають кільком компонентам магнітного поля (з різними факторами заповнення, полярностями і локальними індукціями). Достовірність цих екстремумів слід перевірити шляхом порівняння досліджених магніточутливих ліній з немагнітними або телуричними. Можна також порівняти ту ж саму лінію у сонячному спалаху і неспалаховій області – наприклад, у факелі чи плямі без спалаху (рис. 1).



Рис. 1. Порівняння профілів I ± V лінії Fel 5233 у сонячному спалаху 28 жовтня 2003 р., а також у плямі з магнітним полем 2700 Гс, в якій на момент спостереження не було спалахів. Видно, що у спалаху бісектори профілів I ± V суттєво непаралельні, тоді як у плямі вони майже паралельні

2. Якщо знайдено достовірні екстремуми, далі слід побудувати залежність Δλ<sub>в</sub> не від Δλ, а від відношення Δλ/g (або ж Δλ/gλ<sup>2</sup>, якщо лінії мають суттєво відмінні довжини хвиль λ). Якщо при цьому дані по лініях з різними факторами Ланде виявляються взаємно доповнюючими (існують спільні для всіх ліній екстремуми при однакових значеннях Δλ/g), то це може вказувати на магнітну природу цих екстремімів. Іншими словами, положення в спектрі цих екстремумів вказує тоді на спектральні вклади (зеєманівські σ-компоненти) тих магнітних компонент, які просторово не розділяються внаслідок дрібного масштабу відповідних структур.

3. Картина залежності Δλ<sub>В</sub> від Δλ/g може бути дуже складною – з кількома максимумами і мінімумами. Щоб з'ясувати, якій особливості відповідає дійсне зеєманівське розщеплення в одній з компонент субтелескопічної структури, слід вивчити профілі Стокса *I*, тобто профілі інтегральної інтенсивності, і з'ясувати, які прояви ефекту Зеємана – емісії чи абсорбції – ми спостерігаємо в даній спектральній лінії. При емісійних σ-компонентах повинні спостерігатись слабкі надлишкові інтенсивності у плавному розподілі випромінювання вздовж профілю лінії, а при абсорбції – слабкі локальні депресії (поглинання). Слабкими ці особливості мають бути принаймні з двох причин: а) малого фактора заповнення і б) малої концентрації плазми в силових трубках з сильними магнітними полями [6]. Порівнюючи положення локальних особливостей у профілях *I*±*V*, *V* та *I*, знаходимо дійсні земанівські розщеплення Δλ<sub>H</sub> та відповідні дійсні індукції *B* в різних компонентах поля.

Використовуючи описану методику, було виявлено сильні магнітні поля (за межами сонячної плями) поблизу сейсмічного джерела великого сонячного спалаху 28 жовтня 2003 р. балу X17.2/4В [5]. Ешельні зеєманспектрограми спалаху отримані на горизонтальному сонячному телескопі Астрономічної обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка (ГСТ АО КНУ) [2]. Вивчення стоксових профілів *I* ± *V* ліній Fel 5232.9, 5247.1, 5250.2 і 5397.1 Å виявило низку характерних спектральних особливостей, які вказують як на присутність фонового поля з індукцією *B* = 300 Гс, так і на маломасштабні поля з *B* = 1300–3100 Гс. Обидві компоненти мали S полярність – таку ж, як у найближчої плями. У цьому ж місці спалаху (в межах площі вхідної щілини, близько 1 Мм) ймовірно існувала ще одна маломасштабна компонента з особливо сильним полем *B* = 8–10 кГс протилежної (*N*) полярності. На це вказують дуже характерні особливості – локальні "здуття" профілів лінії Fel 5233 на відстанях близько ±200 мÅ від її центру (рис. 1). У цій компоненті виявлено червоне зміщення (опускання речовини) зі швидкістю 1 км/с. З рис. 2 видно, що всі компоненти розщеплення є досить вузькими – з повною шириною 70–100 мÅ, що в 3–4 рази менше, ніж фраунгоферовий профіль лінії за межами спалаху. Ймовірно, це пов'язано з суттєвим охоло-дженням плазми і пригніченням турбулентних швидкостей в маломасштабних структурах з сильними полями.

Подібна картина магнітного поля виявлена і в спалахах 25 липня 1981 р. (бал 2N) та 2 квітня 2001 р. (бал X1/2B) [15]. Використовуючи три різні методи вимірювань ("центрів ваги", відношення ліній і метод аналізу бісекторів), було знайдено, що в окремих ділянках спалахів (також за межами плям) можна виділити чотири магнітні компоненти: фонову з полем ±1.05 кГс і маломасштабні з полями у 1.3–1.5, 3.9–5.6 та 7.8–8.0 кГс.



Рис. 2. Профілі інтенсивності  $I_s$  (в %) зеєманівських о-компонент для двох компонент магнітного поля у спалаху 28 жовтня 2003 р. для лінії Fel 5232.9: S1v – «фіолетова» і S1r – «червона» о-компоненти для першої магнітної компоненти (B = 1.3 ± 0.2 кГс, S полярність), S2v та S2r – аналогічні профілі для другої компоненти магнітного поля (B = 10.0 ± 0.2 кГс, N полярність)

У роботах [5, 15] показано, що характерною особливістю магнітних полів в області спалахів є: а) багатокомпонентна структура поля, б) наявність сильної компоненти з магнітною полярністю протилежного знаку по відношенню до фонового поля та г) поява емісійних проявів ефекту Зеємана в лініях типу Fel 5232.9 як в їх ядрах, так і крилах.

Оскільки при звичайних магнітографічних вимірюваннях (з магнітографом типу Бебкока або ж фільтровим магнітографом того типу, який діє на SOHO) використовуються широкі й фіксовані вихідні щілини і записується алгебраїчна сума ефектів різних полярностей, а також ефектів емісії та абсорбції, цілком закономірно, що всі названі вище (чи подібні) особливості там усереднюються і залишаються непоміченими. Саме тим і є цінними спектральнополяризаційні спостереження. Крім того, вони дозволяють аналізувати багато спектральних ліній і завдяки цьому – досліджувати різні рівні в сонячній атмосфері.

Напівемпірична модель спалаху. Був додатково досліджений спалах 5 листопада 2004р., який виник в активній області AR 10696 і мав бал M4.1/1B. Попередні результати дослідження цього спалаху наведено в роботах [3, 4], де визначено фізичні умови для трьох моментів: максимуму (11<sup>h</sup> 35<sup>m</sup> UT), а також 11<sup>h</sup> 39<sup>m</sup> та 11<sup>h</sup> 35<sup>m</sup> UT. На рис.3 добавлено результати розрахунків ще для одного моменту, який відповідає 11<sup>h</sup>37<sup>m</sup>, тобто через 2 хв після максимуму. Всі дані стосуються одного і того ж місця на Сонці в картинній площині і базуються на аналізі профілів десяти спектральних ліній Fel, Fell, Scll та Crll (їх список наведено в роботах [3, 4]).

Розрахунки виявили низку цікавих особливостей в діапазоні фотосферних висот спалаху ( ≈500 км по висоті). Тут виникають два шари підвищеної на 1000 К ÷ 2000 К температури у верхній та нижній фотосфері, які в процесі розвитку спалаху зміщуються в глибину фотосфери (рис. 3). Слід відмітити, що подібний хід температури був отриманий в [1, 11] для спалахів 7.10.1979 р. та 3.06.1979 р., досліджених з використанням програми SIR [16].



Рис. 3. Хід температури з оптичною глибиною τ(5000): 1 (неперервна лінія – 1-а компонента, довгі штрихи – 2-а компонента) – момент спалаху 11<sup>h</sup> 35<sup>m</sup>, 2 (короткі штрихи з однією крапкою) – 11<sup>h</sup> 37<sup>m</sup>, 3 (штрих з трьома крапками) – 11<sup>h</sup> 39<sup>m</sup>, 4 (два штрихи з двома крапками) - 11<sup>h</sup> 45<sup>m</sup>. Тонка неперервна лінія – хід температури у незбуреній фотосфері

На одній і тій же оптичній глибині густина різко змінюється на протязі декількох хвилин. У максимумі спалаху в області температурного мінімуму (між фотосферою і хромосферою) існував шар пониженої в 3 рази густини, який через 4 хв був заміщений шаром підвищеної в 6 раз густини, а ще через 6 хв густина стала такою, як в незбуреній фотосфері. Розподіл турбулентної швидкості мав максимум порівняно з розподілом для незбуреної фотосфери. Максимум швидкості мав величину 2.8 км/с в 1-й моменту спалаху (11<sup>h</sup> 35<sup>m</sup> UT), яка збільшилась до 6.3 км/с в 2-й момент (11<sup>h</sup> 37<sup>m</sup> UT). Через 2 хв в 3-й момент (11<sup>h</sup> 39<sup>m</sup> UT) її значення стало 4.7 км/с та зросло до 5.5 км/с через 6 хв, при цьому положення максимуму зміщувалось в глибину фотосфери.

Магнітне поле у спалаху мало тонку структуру, що випливає як з прямих вимірювань, так і з даних моделювання. Вона проявляється не тільки через фактор заповнення об'єму спалаху магнітними трубками з кілогаусовими значеннями індукції, але також в різких змінах магнітного поля по висоті на протязі 100 км та менше (рис. 4). Це може бути проявом скрученості поля.

Поведінку магнітного поля можна описати, як послідовний підйом 2-х магнітних петель в 1-й та 3-й моменти. В 1-й момент могло відбутися перез'єднання петлі, яка виходить з-під поверхні фотосфери з уже існуючою петлею, виділення енергії та зменшення величини поля. При цьому область пониженої густини в верхній частині фотосфери щезла, а підвищеної (в глибині) – залишилась. В 3-й момент відбувається підйом нової петлі, перез'єднання та поява великої області підвищеної густини, дисипація якої закінчується до 4-го моменту. Поведінка турбулентних швидкості в 1-й момент, зростання їх більш ніж в 2 рази в 2-й, деяке зменшення в 3-й та зростання в 4-й.



Рис. 4. Хід магнітного поля з оптичною глибиною  $\pi$ (5000): 1 (неперерена лінія) — момент спалаху 11<sup>h</sup> 35<sup>m</sup>, 2 (короткі штрихи з однією крапкою) — 11<sup>h</sup> 37<sup>m</sup>, 3 (штрих з трьома крапками) — 11<sup>h</sup> 39<sup>m</sup>, 4 (два штрихи з двома крапками) — 11<sup>h</sup> 45<sup>m</sup>

Така своєрідна поведінка фізичних умов в області спалаху (зокрема, з немонотонними розподілами параметрів вздовж променя зору), природно, вимагала додаткової перевірки для інших об'єктів. Оскільки майже всі сонячні спалахи виникають в активних областях і при цьому проектуються, найчастіше, на півтінь або тінь плями, було важливо побудувати по тій же методиці напівемпіричні моделі також півтіні та тіні плями.

Півтінь сонячної плями від 22.09.2005 р. Була вивчена досить правильна сонячна пляма, яка спостерігалась 22 вересня 2005 р. поблизу центру диску Сонця (µ = 0.98). Ешельний спектр плями був отриманий в ортогональних кругових поляризаціях о 8:19 UT на горизонтальному сонячному телескопі Астрономічної обсерваторії Київського національного університету [2]. Пляма мала діаметр 60", N полярність і індукцію магнітного поля 2900 Гс в її центрі згідно з візуальними вимірюваннями одного з авторів (Л.В.) на ГСТ АО КНУ в лінії Fel 5250.2. Докладний аналіз цього матеріалу спостережень наведено у статті [8].

Виявилося, що півтінь дослідженої сонячної плями також є дуже неоднорідним утворенням. У ній можна виділити три основні компоненти: а) світлу ("фонову") компоненту з магнітним полем 200–400 Гс на рівні фотосфери та фактором заповнення 70%, б) темну маломасштабну компоненту з магнітним полем ≈1500 Гс та фактором заповнення ≈25 % і в) ще одну маломасштабну компоненту з особливо сильним полем ≈1500 Гс та фактором заповнення ≈25 % і в) ще одну маломасштабну компоненту з особливо сильним полем у 8800 Гс, фактором заповнення ≈ 5 % і з протилежною до попередньої магнітною полярністю. У перших двох компонентах магнітне поле монотонно спадало з висотою, з висотним градієнтом – 0.6 Гс/км. Характерною особливістю третьої компоненти є істотно звужені спектральні лінії, які вказують на практично повне пригнічення турбулентних рухів і значне охолодження плазми. Напівемпірична модель півтіні задовільно узгоджується зі спостереженнями, якщо припустити близький до нуля кут нахилу силових ліній до променя зору. Висотний розподіл густини у півтіні має локальне підвищення в середній та нижній фотосфері і типову для спокійної атмосфери густину у верхній фотосфері. Мінімум температури у півтіні знаходиться на тій оптичній глибині, що і в незбуреній атмосфері – при Ig τ(5000) ≈ -3.5. Турбулентна швидкість у півтіні в цілому спадає з висотою і дорівнює 1км/с у верхній фотосфері, і 2 км/с – у нижній. Порівняно з незбуреною фотосферою, півтінь має на 100 км меншу протяжність по висоті.

Зауважимо, що величина магнітного поля у перших двох компонентах добре узгоджується з моделями плям, отриманих в роботі [12]. Щодо ж третьої компоненти, то подібні спектральні ефекти, які вказують на просторово нероздільні поля ~ 10 кГс, виявлені раніше за межами плям, а також у сонячних спалахах [5, 6, 15].

**Модель тіні сонячної плями від 28.07.2004 р.** Спектр плями отриманий на ешельному спектрографі Астрономічної обсерваторії Київського університету імені Тараса Шевченка 28.07.2004 р. о 5<sup>h</sup> 46<sup>m</sup> UT. Пляма знаходилася на відстані 66<sup>0</sup> на захід від центру диска. При розрахунках використовувалися профілі ліній Fel 6302.5, 6301 5, 5247.1, 5250.6 Å, Fell 5234.6 Å, ScII 5239.8 Å, Crl 5247.6 Å, які мають значення ефективних факторів Ланде від 0.9 до 3.0. Висоти їх утворення для спокійного Сонця знаходяться в інтервалі 195÷330 км, а потенціали збудження – від 0.09 еВ до 3.9 еВ.

Були встановлені такі особливості.

1. У фотосфері розподіл температури з оптичною глибиною в тіні плями є плавним і монотонним, без екстремумів. В середньому тінь плями на 500 К холодніша, ніж незбурена фотосфера.

2. Розподіл магнітного поля по оптичній глибині також монотонний (рис. 5): магнітне поле тим сильніше, чим менша висота в атмосфері (тобто чим більша оптична глибина  $\tau$ (5000)). В зоні температурного мінімуму магнітна індукція *B* = 500 Гс, тоді як в основі фотосфери *B* = 3500 Гс; кут між променем зору і силовими лініями  $\gamma$  = 50°. Градієнт магнітного поля тіні плями змінюється вздовж оптичної глибини таким чином, що на відрізках  $\tau$ (5000) = [-2.3 ÷-4.4], [-0.6 ÷-2.3] та [-0.6 ÷0.9] він дорівнює відповідно -1.20 Гс/км, -13.2 Гс/км та -4.95 Гс/км.



Рис. 5. Розподіл магнітного поля з оптичною глибиною у різних плямах: неперервна лінія – у плямі 28.07.2004 р, короткі штрихи – в малій, довгі – в великій плямі з роботи [12]

Висновки. Аналіз нових спектрально-поляризаційних спостережень, проведених на ГСТ АО КНУ, підтвердив зроблені раніше [6, 14] висновки про те, що в області сонячних спалахів виникають підсилені магнітні поля. Для спалаху балу X17.2 знайдено, що всередині ділянок масштабу 1 Мм структура магнітного поля була багатокомпонентною, з протилежною магнітною полярністю маломасштабних компонент поля. У цьому спалаху магнітне поле в одній з компонент досягало 10 кГс. У спалаху балу М4.1 розподіл магнітного поля і температури вздовж променя зору був немонотонним, з гострими висотними піками, тоді як у тіні й півтіні плям за межами спалаху – монотонним. Такі піки магнітного поля і температури існували у спалаху близько 10 хв.

1. Аликаева К.В., Кондрашова Н.Н. Возмущение фотосферы в процессе развития солнечной двухленточной вспышки // Кинематика и физика небес. тел – 2006. – Т. 22, № 3. – С. 163–173.

2. Курочка Е.В., Курочка Л.Н., Лозицкий В.Г. и др. Горизонтальный солнечный телескоп Астрономической обсерватории Киевского университета // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия. – 1980. – Вып. 22. – С. 48–56.

3. *Курочка Е.В., Лозицкий В.Г., Осыка О.Б.* Временные изменения физических условий в фотосферных слоях солнечной вспышки // Кинематика и физика небес. тел – 2008. – Т. 24. – № 4. – С. 308–320.

 Курочка Е.В., Осика О.Б., Лозицький В.Г. Магнітні поля та турбулентні швидкості у різних фазах розвитку сонячного спалаху // Вісн. Київ. унту. Астрономія. – 2006. – Вип. 43. – С. 8–11.
 Лозицкий В.Г. Магнитные поля и профили линий Fel в большой солнечной вспышке 28 октября 2003 г. // Письма в Астрон. журн. – 2009.

– Т. 35, № 2. – С. 154–160.
 6. Лозицкий В.Г. Сильные магнитные поля в мелкомасштабных структурах и вспышках на Солнце. / Дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. – Київ, 2003.

- 299 с.
 7. Лозицкий В.Г., Курочка Е.В., Осыка О.Б., Шеминова В.А., Порфирьева Г.А. Проблемы интерпретации наблюдений мелкомасштабных магни-

7. Лозицкии В.Г., курочка Е.В., Осыка О.В., шеминова В.А., Порфирьева Г.А. Проолемы интерпретации наолюдении мелкомасштаоных магнитных полей в спокойных и активных областях на Солнце // Тр. Уссурийской астрофиз. обсерв.– 2007. – Вып. 10. – С. 79–112.

Лозицький В., Курочка Є. Багатокомпонентна структура півтіні сонячної плями // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія – 2007. – Вип. 44. – С. 8–17.
 Северный А.Б. Некоторые проблемы физики Солнца.- М.: Наука, 1988. – 224 с.

Baranovsky E.A. Semiempirical LTE modeling of solar photosphere layers.1. Theoretical background // Contrrib. Astron. Obs. Skalnate Pleso. – 1993.
 Vol. 23. – P. 107–117.

11. Chornogor S.N., Kondrashova N.N. Physical state of the photosphere at the onset phase of a two-ribbon solar flare // Solar Phys. – 2008. – Vol. 250, № 2. – P. 303–314.

12. Collados M., Martinez Pillet V., Ruis Cobo B., del Toro Iniesta J.C., Vazquez M. Observed differences between large and small sunspots // Astron. Astrophys. – 1994. – Vol.291, №2. – P. 622–634.

13. Landi Degl'Innocenti E., Landi Degl'Innocenti M. Response function for magnetic lines // Astron. Astroph. – 1977. – Vol. 56, № 1/2. – P.111–115.

14. Lozitsky V.G., Baranovsky E.A., Lozitska N.I., Leiko U.M. Observations of magnetic field evolution in a solar flare // Solar Phys. – 2000. – Vol.191, Nº 1. – P. 171–183.

15. Lozitsky V.G., Staude J. Observational evidences for multi-component magnetic field structure in solar flares // J. Astrophys. and Astronomy. – 2008. – Vol. 29, №. 3.4. – P. 387–404.

16. Ruiz Cobo B., del Toro Iniesta J.C. Inversion of Stokes profiles // Astrophys. J. – 1992. – Vol. 398, № 1. – P. 375–385.

17. Sanchez Almeida J., Lites B.W. Physical properties of the solar magnetic photosphere under the MISMA hypothesis. Network and internetwork fields at the disk center // Astrophys. J. – 2000. – Vol. 532, № 2. – P. 1215–1229.

18. Westendorp Plaza C., del Toro Iniesta J.C., Ruiz Cobo B., Martinez Pillet V., Lites B.W., Skumanich A. Optical tomography of a sunspot. II. Vector magnetic field and temperature stratification // Astrophys. J. – 2001. – Vol. 547, № 2. – P. 1130–1147.

Надійшла до редколегії 19.05.09

УДК 523.982 + 52-337

Н. Лозицька

### МІЖРІЧНІ ВАРІАЦІЇ МОДУЛІВ ТА АСИМЕТРІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ, ПЛОЩ ТА ШИРОТ СОНЯЧНИХ ПЛЯМ

Досліджено закономірності міжрічних варіацій модуля магнітних полів сонячних плям і різниць величини поля плям різної полярності. Співставлено N–S-розбаланс магнітного поля з різницями повної площі та широти плям північної та південної півкулі. Виявлено, що при виключені вікових трендів усі досліджені параметри мають 8–9-річний період варіацій, достовірно менший за 10.5-річний цикл числа плям на дослідженому часовому відрізку.

The peculuarities of the sunspot magnetic field variations are studied. An interest is focused on variations of annual mean values of sunspot magnetic fields and differences between fields of opposite polarity. The N–S-magnetic field disbalance is compared with areas and latitudes N–S-hemispheric differences. It was found, that if we exclude the long-term trends, all investigated parameters have 8–9-years period, less then 10.5-years variations of Wolf's number in the same time.

Вступ. Протягом останніх десяти років увага дослідників сонячної активності привернута до створення індексів сонячної активності, одержаних безпосередньо з магнітометричних та магнітографічних спостережень. Це актуально тому, що саме магнітне поле сонячної поверхні, вморожене в потоки сонячного вітру, безпосередньо взаємодіє з магнітосферами планет та з галактичними космічними променями. Постає питання порівняння міжрічних варіацій нових і старих індексів.

Міжрічні зміни магнітних полів сонячних плям досліджувались Рінгнесом та Йєнсеном, ними виявлені вікові зміни напруженості поля, дещо відмінні від вікових змін площ плям [16, 17]. Межі варіацій індивідуальних виміряних значень поля для всіх плям дуже широкі: від ~10 сТл в порах до ~30–35 сТл у великих плямах [7]. Стешенко, Бумба, Беккерс і Шретер в 1960-х рр. показали, що напруженість пор більша за 12 сТл. Пізніше Баранов, Брантс і Цван знайшли в порах та малих плямах поле 18–26 сТл [7]. Окремі ділянки плям з полем 45–55 сТл спостерігались Барановським і Петровою, Стешенком, Дьомкіною і Обрідко, Шпитальною, Лівінгстоном [7], Вебстером, Рокусом, Хюмасоном, Річардсоном та Хікоксом [13]. Крім того, магнітне поле сонячних плям змінюється з амплітудою у кілька сантитесла з періодами у хвилини-години.

Вітинський пропонував як індекс сонячної активності, брати середньорічні значення максимальних напруженостей не всіх плям, а найбільшої в кожній групі [1]. Нещодавно введений Індекс модуля середньорічних значень напруженості магнітного поля всіх плям H<sub>m</sub> [5, 6]. Він має суттєві недоліки, зазначені раніше в [1], зумовлені пропусками або значними похибками вимірювань малих плям при складних умовах спостережень. Наша пропозиція є компромісною між [1] та [5, 6]. Оскільки великих плям за рік у кілька разів більше, ніж груп, ми вирішили розширити щорічну вибірку включенням не однієї плями з кожної групи, як в [1], і не всіх підряд, як у [5, 6], а всіх великих плям, за винятком спорадично виникаючих найбільших, з метою збільшення точності визначення величини середньорічного магнітного поля плям. Нами у 2000 р. [15] запропоновано визначення середньорічного модуля магнітного поля сонячних плям діаметром 30-60 сек. дуги як оптимального параметра для моніторингу локальних магнітних полів Сонця. Пізніше ми назвали цю величину новим індексом сонячної активності В<sub>SP</sub>, і показали, що він суттєво відмінний від нових магнітографічних індексів обсерваторії Маунт Вілсон MPSI та MWSI [14].

Спостереження свідчать, що збільшення магнітного поля в плямах супроводжується зростанням їх площ, тобто з'являється додатковий магнітний потік [2, 7, 16, 17]. Задача даної роботи – знайти періодичність та амплітуду міжрічних змін як середнього модуля магнітного поля, так і середньої площі плями, а також їх N–S-розбалансу.

У роботі [12] введений новий параметр Sunspot Unit Area (SUA) – середня за кожен день площа плям, обчислена діленням щоденних сумарних площ на числа Вольфа. У роботі [12] показано, що SUA має меншу варіабельність в циклі сонячної активності, ніж звичайні індекси, та менший період (10.1 роки). Ми порівнюємо цей параметр з дійсними середніми площами плям, визначеними з 1936 р. та з міжрічними варіаціями магнітного поля плям.

**Дані спостережень.** У роботі ми досліджуємо такі середньорічні параметри сонячних плям: модуль магнітного поля B<sub>SP</sub>, обчислений для плям розміром 30–60 сек дуги з 40-градусної центральної зони диска Сонця – з 1917 до 2009 pp.; розбаланс полярностей магнітного поля плям всіх широт B<sub>N</sub> - B<sub>S</sub> (magnetic field disbalance) – з 1957 до 2009 pp.; модуль магнітного поля всіх плям на всьому диску Сонця H<sub>m</sub> – з 1957 до 1995 pp.; середньорічне значення середньодобових площ окремих плям S<sub>SP</sub> (sunspot unit area) – з 1936 до 2009 pp.; північно-південну різницю сумарної площі (N - S)<sub>AREA</sub> (sunspot total area disbalance) та середньої широти плям (N - S)<sub>LAT</sub> (spot latitude disbalance) – з 1874 до 2009 pp. Різні часові проміжки обумовлені відповідною наявністю однорідних даних.

Для обчислень магнітних полів використані результати спостережень мережі телескопів СНД, опубліковані в щорічних бюлетенях "Солнечные данные" (SD) з 1957 р. (включно з електронним його продовженням до 2004 р. на сайті *www.spb.ru*). Опрацьовані дані Об'єднаної Бази магнітних полів сонячних плям (*www.gao.spb.ru/database/mfbase/*), електронна база спостережень магнітних полів сонячних плям в обсерваторії Маунт-Вілсон, де є дані з 1917 до 1925 рр., з 1994 до 2009 рр. та за окремі роки з 1936 до 1991 рр. (*ftp://howard.astro.ucla.edu/pub/obs/drawings/*) разом з публікаціями [16, 17], з яких взяті результати вимірювань за 1926–1956 рр., котрі ще не включені в електронну базу. Використані також дані вимірювань магнітних полів сонячних плям з сайту НДІ "Кримська астрофізична обсерваторія" з 1998 до 2008 рр. (*http://www.crao.crimea.ua/*).

Сумарні площі та широти плям для N- та S-півкуль Сонця взяті з електронної бази даних, створеної під керівництвом Наговіцина Ю. А. «Extended time series of Solar Activity Indices (ESAI)» об'єднанням грінвічського та кисловодського рядів та з сайту NASA's Marshall Space Flight Center, де дані Грінвічської обсерваторії подовжені спостереженнями в мережі обсерваторій Маунт Вілсон – USAF та відкоректовані в єдиній системі визначення площ груп плям (*http://solarscience.msfc.nasa.gov/*). У Грінвічській обсерваторії використовувалися фотознімки з однотипних телескопів, зроблені на стандартних фотопластинках, в інших в різний час змінювалися способи реєстрації зображення від замальовок до ССD. Дослідження [9] показали, що індивідуальні кориговані площі груп плям X, визначені в 10 обсерваторіях та в "Сонячних даних", можна звести до шкали Дебреценської обсерваторії за допомогою співвідношення S = a+bX, де для більшості обсерваторій величина а знаходиться в межах від 0 до 35 м.д.п., b – від 0.68 до 1.03 при стандартній похибці 43–68 м.д.п.

Для обчислень середніх площ сонячних плям S<sub>SP</sub> використані дані сайту *http://solarscience.msfc.nasa.gov/*, дані Інтерактивної бази даних сонячної активності (SD), створеної під керівництвом Мілецького Є.В. *http://www.gao.spb.ru/database/csa/main\_r.html* та параметри груп плям, зібрані в Міжнародній базі даних на сайті *www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR*.

Обробка даних. Добові і сезонні зміни умов спостережень, труднощі у визначенні максимального поля за наявності тонкої структури і значних коливань поля, а також похибки калібрування на різних інструментах дають дисперсію річного масиву виміряних значень індукції магнітного поля плям 3.5±1.0 сТл. Для доведення реальності міжрічних змін магнітних полів плям на сучасному рівні потрібно усереднення ≥ 100 вимірювань за рік, тобто опрацювання усіх наявних даних. Середньорічні значення магнітних полів сонячних плям всіх розмірів підраховані так само, як в роботах [5, 6]. За ними ми зберегли назву, дану пулковськими астрономами Мілецьким та Наговіциним, а саме H<sub>m</sub>. Наш індекс В<sub>SP</sub> розрахований двома способами: а) як середньоарифметичне значення з усіх вимірювань, здійснених в досліджуваномі році на всіх обсерваторіях та б) як середньоарифметичне значення з середніх величин, одержаних попередньо для кожної обсерваторії. При другому способі підрахунку систематичні похибки, обумовлені неточністю калібровки, дають випадковий розкид середніх значень різних обсерваторій. Обидва способи визначення В<sub>SP</sub> збігаються в межах подвійної середньоквадратичної похибки, тому ми представляємо далі дані, одержані лише одним з них (першим).

За середньорічними значеннями площ та широт всіх плям обчислені різниці (N-S)<sub>AREA</sub> та (N-S)<sub>LAT</sub>. Північнопівденну асиметрію, як правило, підраховують за формулою (N-S)/(N+S) [2]. Проте, нормування розбалансу (N-S) на суму не завжди доцільне. Сонце, згідно з теоретичними дослідженнями [11], має два джерела генерації магнітного поля. Не виключено, що північно-південна асиметрія може виникати з іншою періодичністю, ніж більші по амплітуді 11-річні варіації дипольного магнітного поля. Тому виявити дійсний період асиметрії півкуль простіше при дослідженні абсолютного, а не нормованого розбалансу.

У даній роботі всі наявні ряди визначень середньорічних значень площ груп плям та кількості плям в групах об'єднані зведенням до пулковського ряду SD. Діленням одержаних середньорічних значень площ груп на середньорічні значення числа плям в группах ми отримали середньорічні значення площі окремої плями. Наближені значення середньорічної площі окремої плями можна знайти, використовуючи середньодобові сумарні площі плям S та індекс RI. Відомо, що RI ≈ 12 G, де G – число груп, а в групі приблизно по 6 плям. Тому наближене значення площі окремої плями ми розраховували як відношення поденних значень 2S/RI, усередненням цих площ за рік одержуємо індекс S<sub>SP</sub>.



Рис. 1. Варіації середньорічних значень модуля індукції магнітного поля у великих плямах 30–60 сек. дуги В<sub>sp</sub> та магнітного поля всіх виміряних плям H<sub>m</sub>. Коефіцієнт кореляції між В<sub>sp</sub> та H<sub>m</sub> дорівнює 0.68, достовірність існування зв'язку більша за 95%

Аналіз результатів. Модуль індукції магнітного поля сонячних плям. На рис. 1 показані міжрічні зміни В<sub>SP</sub> та Н<sub>m</sub>. Подвійна стандартна похибка кожної величини знаходиться в межах 0.1 – 1 сТл. Подані на рис. 1 міжрічні зміни величини магнітного поля сонячних плям, що досягають 2–4 сТл для великих плям, є достовірними з імовірністю більше 99%.

У циклі сонячної активності відбуваються зміни як середніх розмірів плям, так і магнітного поля. Наші розрахунки показали, що середній розмір плям в обраному діапазоні діаметрів від 30 до 60 сек. дуги протягом 11-річного циклу змінюється незначно – від 35 до 42 сек дуги, що дає зміни В<sub>SP</sub>, менші за 1 сТл. Для H<sub>m</sub> ситуація інша. В.Н.Обрідко зазначав, що всі спотворення якості зображення, викликані розсіяним світлом, атмосферним дрижанням, турбулентністю в телескопі та спектрографі, призводять як до зменшення контрасту плями, так і до заниження величини виміряного магнітного поля [7]. Для плям, радіус яких менший за величину дрижання, завжди виміряне поле занижене внаслідок замивання зображення, а також для таких плям значним є вклад розсіяного світла. Це пояснює ліву асиметрію розподілу H<sub>m</sub>, котра збільшує амплітуду міжрічних варіацій H<sub>m</sub> до 10 сТл, тоді як у В<sub>SP</sub> вона вдвічі менша. Незважаючи на систематичні похибки, можна стверджувати, що міжрічні зміни H<sub>m</sub> достовірно відбуваються. Про це свідчить досить високий коефіцієнт кореляції між H<sub>m</sub> та В<sub>SP</sub> (r = 0.68, p < 0.05).

Важливим висновком з порівняння змін В<sub>SP</sub> та H<sub>m</sub> є те, що міжрічні варіації магнітного поля спостерігаються в плямах різних розмірів – від одиниць до десятків тисяч кілометрів. З точки зору концепції тонкої структури, це означає, що на сонячній поверхні відбуваються одночасні зміни магнітного поля в магнітних трубках різних масштабів або зміни їх щільності, тобто фактора заповнення.

Середні розміри плям. Обчислимо середньорічні площі окремої плями за даними груп плям, розміщених на вищезазначених сайтах та зведемо їх до однорідного ряду, взятого з електронної Інтерактивної бази даних *http://www.gao.spb.ru/database/*, створеної в Пулковській обсерваторії Мілецьким Є.В., Волобуєвим Д.М., Івановим В.Г. та Наговіциним Ю.А.

Коефіцієнт кореляції між рядами середньорічних площ сонячних плям з пулковської бази даних та з усіх обсерваторій світу, котрі вимірювали площі, є високим: r = 0.79 (рис. 2). Обчислення ж за даними сумарних площ та чисел Вольфа надто наближене, коефіцієнт кореляції ряду 2S/RI з точно обчисленими середньорічними площами плям з усіх обсерваторій світу 0.58 та та з з площами, визначеними обсерваторіями, які надавали результати для публікацій в Пулково, лише r = 0.52. Період варіацій середньої площі окремих плям за даними пулковського ряду 1936–1991 рр., доповненого з 1992 року даними всіх обсерваторій світу, складає 9 років. З ряду наближених середньорічних площ окремої плями, одержаних діленням S на RI, можна одержати лише 10.5 -річні коливання, які має RI. Таким чином індекс SUA [12] можна вважати лише приблизними площами плям, якщо його значення подвоїти.



Рис. 2. Варіації середньорічної площі сонячної плями, обчисленої трьома способами: а) діленням подвійної сумарної площі плям на індекс RI (кружечки); б) зведенням в одну систему даних вимірювань площ груп плям та кількості плям в групі на всіх обсерваторіях світу та обчислення середньорічної площі однієї плями (квадратики); в) розрахунком середньорічної площі плями за даними лише пулковського ряду груп плям СД (ромбики)

**N–S-розбаланс**. Розглянемо міжрічні зміни середньорічних значень N–S-розбалансу магнітного поля сонячних плям. Можна очікувати, що ця величина буде позбавлена деяких систематичних похибок модуля поля. Вперше середньорічні значення різниць напруженості магнітного поля північної та південної полярностей для плям усіх розмірів дослідили Мілецький та Наговіцин [ 5, 6].

Огляд робіт з північно-південної асиметрії індексів сонячної активності зроблений у роботах [3, 8]. У першій роботі досліджено можливий зв'язок між північно-південним розбалансом крупно-масштабного магнітного поля з північнопівденною різницею в площах плям та числі полярних факелів. Зональне магнітне поле було розраховане Єрофеєвим за 1963–2001 рр, використовуючи синоптичні карти крупно-масштабного магнітного поля, одержані на трьох обсерваторіях: Маунт Вілсон, Кітт Пік та Стенфорд. Величина  $|B_N| - |B_S|$  мала період 8.8–10 років для різних широтних зон, північно-піденна різниця величини площі сонячних плям за 1850–2000 рр. та числа полярних факелів за 1850–1994 рр. мала період біля 9 років. Зроблено висновок, що північно-південна асиметрія, взята як різниця значень будь-якого індекса сонячної активності в північній та південній півкулі Сонця, приблизно пропорційна різниці абсолютних значень напруженості магнітного поля у відповідних широтних зонах (r = 0.68). У другій роботі знайдено помітну N–S-асиметрію для більшості існуючих індексів сонячної активності.

У ряді публікацій знайдено 8–9 -річний головний період варіацій як (N - S)<sub>AREA</sub>, так і B<sub>N</sub> - B<sub>S</sub> та H<sub>m</sub> [3, 4, 5, 10].

Наше дослідження показало, що величина розбалансу поля N- та S-полярності, згладженого по трьох роках, має достовірні зміни на всьому неперервному ряді даних, тобто протягом останніх 50 років (рис. 3). Варіації розбалансу поля періодичні, їх період складає біля 8–9 років, амплітуда коливань змінна. В межах подвійного стандартного відхилення величина розбалансу співпадає як для плям усіх розмірів, так і для обраних для аналізу плям у вузькому діапазоні діаметрів від 30 до 60 секунд дуги.



Рис. 3. Міжрічні варіації розбалансу магнітного поля N ma S -полярності для всіх плям з Об'єднанної бази даних 7 обсерваторій (трикутники) та плям розміром 30-60 сек дуги за даними всіх обсерваторій (кружечки). Вказані подвоєні стандартні відхилення

Співставлені зміни N–S-розбалансу магнітного поля на всьому диску з північно-південним розбалансом площ та широт сонячних плям (рис. 4). Найбільша кореляція (r = 0.58) виявлена при зсуві кривої розбалансу площ на 2 роки вперед відносно розбалансу магнітного поля. Екстремуми розбалансу середніх широт плям в північній та південній півкулях виникають через 2 роки після екстремумів розбалансу магнітного поля (r = 0.67). Залежність розбалансу площ та широт плям по півкулям від глобального розбалансу полярностей пояснюється наявністю різних джерел

генерації магнітного поля, котрі знаходяться в екваторіальних та високих широтах, причому високоширотні зони генерують поля однойменної полярності в обох півкулях [11].

На всьому часовому проміжку наявних даних N–S-розбалансу площ та широт плям (1874–2009 pp.) також є достовірна кореляція між ними (r = 0.54) при зсуві (N-S)<sub>ARE</sub> на 4 роки вперед. Період варіацій цих величин становить 8.7±0.3 роки (рис. 5).

Автокореляційний аналіз індивідуальних площ плям показує 8.1±0.2-річний період. У всіх досліджених параметрів, окрім модуля магнітного поля В<sub>SP</sub>, знайдені варіації, достовірність існування яких більша за 95% на всьому часовому проміжку. Щодо В<sub>SP</sub>, по тим екстремумам, які достовірні, можна знайти період біля 8 років. Він збігається з одержаним в роботі [6] періодом варіацій модуля напруженості H<sub>m</sub>. Виявлений віковий тренд амплітуди N–Sрозбалансу, а саме, зменшення її протягом 1960–2005 pp.



Рис. 4. Співставлення згладжених по трьом рокам різниць величин магнітного поля N- та S-полярності (кружечки) з різницями між площею плям в N- та S-півкулях (квадратики), взятими зі зсувом на 2 роки вперед та з різницями між середньою широтою плям в N- та S-півкулях (трикутники), взятими із зсувом на 2 роки назад

Висновки. Виявлені достовірні міжрічні варіації потоку магнітного поля окремих сонячних плям. Варіації середньорічної площі плям відбуваються в межах від 15 до 35 м.ч.п. і супроводжуються варіаціями індукції магнітного поля всіх плям від 13 до 23 сТл та варіаціями поля великих плям від 22 до 27 сТл.

Всі досліджені параметри розбалансу мають 8–9-річний період з амплітудою, модульованою віковим циклом. Зміни розбалансу площ плям на 2–3 роки випереджають зміни розбалансу магнітних полів, а розбаланс широт запізнюється на 2 роки по відношенню до магнітного поля.

Згладжені по трьох роках величини магнітних полів, сумарних площ та середніх широт сонячних плям мають достовірний N–S-розбаланс протягом 8-9 –річного циклу з амплітудами 1–3 сТл, 300–900 м.ч.п. та 2–6°, відповідно. Притому розбаланс магнітного поля на всьому Сонці супроводжується розбалансом площ та широт плям по півкулях.

Одержані результати підтверджують теоретичні роботи про існування двох зон генерації магнітного поля Сонця [11].

Автор висловлює подяку всім колективам обсерваторій, які брали участь у спостереженнях, та укладачам електронних баз даних "Служби Сонця".



Рис. 5. Автокореляційні функції середньорічних значень магнітного поля Вsp з 1917 р.; середньорічних площ окремої плями з 1936р.; різниць середньої широти плям північної та південної півкулі з 1874 р.; різниць сумарних площ сонячних плям північної та південної частин видимої півсфери Сонця з 1874 р. Всі ряди даних були згладжені по 3 роках. Тренди усунуті відніманням згладжених по 9 рокам біжучих середніх значень

1. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. – Л.: Наука. – 1973. – 258 с.

2. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В. Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца. – М.: Наука. – 1986. – 296 с.

3. Ерофеев Д.В. Соотношение между северо-южной асимметрией солнечной активности и солнечного магнитного поля // Солнечная активность и ее влияние на Землю // Тр. Уссурийской астрофиз. обсерв. – Владивосток: "Дальнаука", 2003 – Т. 7. – С. 53–67.

4. Лозицкая Н.И. Анализ баз данных и перспективы визуальных измерений напряженности магнитных полей солнечных пятен // Тр. ІХ Пулковской конф. по физике Солнца, ГАО РАН. – С.-Пб, 2005, – С. 533–538.

5. Милецкий Е.В., Наговицын Ю.А. Магнитные поля солнечных пятен в 21 - 22 циклах солнечной активности // Изв. ГАО в Пулкове. – Т. 215. - 2000. - C. 259

6. Милецкий Е.В., Наговицын Ю.А. Временные вариации среднегодовых значений напряженности магнитных полей солнечных пятен // Тр. V Пулковской конф. по физике Солнца, ГАО РАН. – С.-Пб., 2001. – С. 281–283.

7. Обридко В.Н. Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука, 1985. – 256 с.

8. Пішкало М.І., Бабій В.П., Іванчук В.Г. Північно-південна асиметрія сонячної активності та переполюсовки глобального магнітного поля Сонця у 21-23 циклах активності // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2005. – Вип. 41-42. – С. 86-90.

9. Baranyi T., Györi L., Ludmany A., Coffey H.E. Comparison of sunspot area data bases // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. - 2001. - Vol. 323. - P. 223-230

10. Chang, H.-Y. Variation in North-South Asymmetry of Sun Spot Area // New Astronomy, - Vol. 14, № 2, - P. 133-138.

11. Krivodubskij, V.N. Turbulent dynamo near tachocline and reconstruction of azimuthal magnetic field in the solar convection zone // Astron. Nachr. – 2005. – Vol. 326, № 1. – P. 61–74. 12. Li, K.J.; Qiu, J.; Su, T.W.; Gao, P.X. Sunspot Unit Area: A New Parameter to Describe Long-Term Solar Variability // Astrophys. J. - 2005. - Vol. 621, № 1. – P. L81–L84

13. Livingston, W., Harvey, J.W., Malanushenko O.V. Sunspots with the strongest magnetic fields // Solar Phys. - 2006.- Vol. 239.- P. 41-68.

14. Lozitska. N.I. Comparison of the new indexes of solar activity // Izv. Krim. Astrofiz. Obs. - 2002.- Vol. 98 .- P. 187-188.

15. Lozitsky V.G., Lozitska N.I., Gordovsky N.I. Comparison of the sunspot magnetic field strength for different cycles of solar activity // Proc. of Internat. Astron. Conf. Fourth Vsekhsvjatsky Readings. 'Modern Problems of Physics and Dynamics of the Solar System'. Kyiv, Oct 4-10, 2000 / Kyiv, 2001. C 283-287

16. Ringnes T.S. Secular variations in the magnetic field strength of sunspot groups // Astroph. Norv. - 1965. - Vol. 10, № 3.- P. 27-68.

17. Ringnes T.S., Jensen E. On the relation between magnetic fields and areas of sunspots in the interval 1917–56 // Astroph. Norv. – 1960. – Vol.7, Nº 4. - P. 99-121.

#### Надійшла до редколегії 27.05.09

УДК 523.9

М. Пішкало, Є. Садовенко

### СОНЯЧНА КОРОНА ПІД ЧАС ПОВНИХ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ 29 БЕРЕЗНЯ 2006 р. і 1 СЕРПНЯ 2008 р.

Досліджено структуру і форму сонячної корони під час повних сонячних затемнень 29 березня 2006 р. і 1 серпня 2008 р. Корона 29 березня 2006 р. є короною проміжного перед-мінімального типу, корона 1 серпня 2008 р. – короною біля-мінімального типу. В обох коронах добре розвинуті північна та південна полярні променеві системи над полярними корональними дірами і спостерігаються кілька променів-стрімерів різної яскравості на середніх і низьких геліоширотах. Індекс фотометричної стиснутості сонячної корони 2006 р. становить 0.17, корони 2008 р. – 0.21. Спостережена структура корони краще узгоджується із розрахованою на основі синоптичних магнітографічних даних обсереаторії імені Вілкокса (без внесення поправок) конфігурацією силових ліній магнітного поля у короні в потенціальному радіальному наближенні, ніж в класичному потенціальному наближенні.

Structure and shape of the solar corona during the total solar eclipses on March 29, 2006 and August 1, 2008 were studied. Corona on March 29, 2006 was classified as corona of the intermediate pre-minimum type and corona on August 1, 2008 as corona of near-minimum-type. In the both coronas northern and southern polar rays systems over polar coronal holes are well developed and some streamers of different brightness are observed at lower and intermediate latitudes The flattening index was found to be 0.17 for the solar corona in 2006 and 0.21 in 2008. Observed structure of the solar corona is in better agreement with calculated configuration of magnetic lines of force in the solar corona obtained in radial approach of a PFSS model than in classic approach when synoptic magnetic data of the WSO are used without any corrections.

Вступ. Починаючи з 1936 р. астрономи Київського національного університету імені Тараса Шевченка беруть активну участь у спостереженнях сонячної корони під час повних сонячних затемнень (на даний час – 21 затемнення) і дослідженні структури і динаміки корони. Хоча в наш час бурхливого розвитку космічної техніки та електроніки сонячна корона регулярно спостерігається за допомогою коронографів на борту космічних обсерваторій SOHO і STEREO, наземні спостереження корони під час повних сонячних затемнень зберігають свою важливість та унікальну інформативність для фізики Сонця. Саме наземні спостереження корони під час повних сонячних затемнень є найбільш інформативними з точки зору знань про тонку структуру внутрішньої і середньої корони Сонця, а отже і про структуру магнітного поля в короні. Крім того, історія наземних спостережень корони є значно тривалішою за космічну, що дозволяє детальніше досліджувати, наприклад, деякі аспекти зв'язку форми і структури корони із сонячною активністю.

Як відомо, форма сонячної корони змінюється із сонячним циклом від "мінімальної" корони, що характеризується двома яскравими променями-стрімерами, орієнтованими вздовж екватора, до "максимальної" корони із великою кількістю орієнтованих по всьому лімбу переважно радіальних яскравих променів [5, 10]. Безпосередньо у сонячній короні напруженість магнітного поля не вимірюється прямими методами. Однак, корональні магнітні поля можна змоделювати при певних спрощуючих припущеннях, знаючи величину і розподіл магнітних полів на фотосферному рівні (де вони вимірюються головним чином на основі ефекту Зеємана), оскільки як структура, так і величина магнітного поля в короні значною мірою визначаються умовами у фотосфері. Найбільшого поширення здобули моделі екстраполяції магнітних полів у корону в потенціальному (безструмовому) наближенні з використанням фотосферних магнітографічних даних [6–8, 12].

У даній роботі коротко описані результати дослідження форми і структури сонячної корони під час повних сонячних затемнень 29 березня 2006 р. і 1 серпня 2008 р. за наземними фотографічними спостереженнями. Проведено також порівняння отриманих результатів із магнітними полями в короні, розрахованими в рамках потенціальної моделі.

Спостережні дані. Для фотометричного дослідження та при побудові структурного рисунка корони 29 березня 2006 р. були використані знімки сонячної корони, отримані В. Єфіменком поблизу м. Анталія (Туреччина) [2]. Спостережний матеріал являв собою серію із 13 знімків корони у білому світлі з експозиціями від 1/1000 с до 4 с на плівці Kodak "ProFoto-100-4".

Для дослідження корони 1 серпня 2008 р. була використана серія із 17 фотографій корони, отримана О. Баранським поблизу центру місячної тіні, на відстані 1 км на північний схід від с. Бочкарьово Черепановського району Новосибірської області. Експозиції становили від 1/250 до 1/3 с, використана система із цифрової камери "Canon EOS 350D" і телеоб'єктива МТО-500 (*F* = 500 мм, *D* = 50 мм, *A* = 1/10). Розмір матриці становить 3456×2304 пікселів, кутовий розмір кадру в системі "камера-телеоб'єктив" – 2.5°×1.6°.

Крім того, при побудові структурного рисунка і для уточнення структури корони були також використані знімки коронографів LASCO C2 і C3 орбітальної сонячної обсерваторії SOHO (http://sohowww.nascom.nasa.gov), знімки H<sub>α</sub>лімбового коронографа обсерваторії Пік дю Міді (apxiв *http://bass2000.obspm.fr*) та зображення корони під час затемнення з мережі Інтернет, зокрема, чудові зображення корони 2008 р. Друкмюллера із колегами (*http://www.sam.fme.vutbr.cz/~druck/Eclipse/Ecl2008m*) та знімок корони 2006 р. з радіальним послаблюючим фільтром, отриманий експедицією Паризького Астрофізичного Інституту в Єгипті (*http://www.iap.fr*).

Сонячне затемнення 29 березня 2006 р. відбулося незадовго до мінімуму 23-го циклу сонячної активності, а затемнення 1 серпня 2008 р. – майже в мінімумі між 23-м і 24-м циклами. Фаза сонячної активності для моменту зате-

мнення була обрахована за відомою формулою  $\Phi = \frac{T_{_{3am}} - T_{_{Min}}}{|T_{_{Makc}} - T_{_{Min}}|}$ , де  $T_{_{3am}}$  – момент затемнення,  $T_{_{Mih}}$  і  $T_{_{Makc}}$  – момент

нти найближчих мінімуму і максимуму сонячного циклу. Значення *Т<sub>макс</sub>* було знайдено за місячними числами Вольфа (*http://sidc.oma.be*), що були попередньо двічі згладжені ковзаючим усередненням по 13-ти точках. Для затемнення

2006 р. значення фази сонячної активності становить приблизно -0.18 [4], для затемнення 2008 р. – 0.1 [3]. Про точніше значення фази сонячної активності для затемнень 2006 і 2008 рр. можна буде говорити лише після впевненого визначення моменту мінімуму активності між 23-м і 24-м циклами.

Структура сонячної корони. Структура корони під час повного сонячного затемнення 29 березня 2006 р. характеризується наявністю шести великих променів різної яскравості, розташованих на низьких і середніх широтах, і може бути класифікована як корона проміжного перед-мінімального або після-мінімального типу [5, с. 77]. На рис. 1 зліва наведено структурний рисунок сонячної корони 29 березя 2006 р., основні промені позначені латинськими буквами A–F. Північна полярна променева система є симетричною відносно проекції північного полюса і має протяжність 48° уздовж лімба. Південна полярна променева система має протяжність 44° уздовж лімба, частково перетинається із південною частиною променя C і не є симетричною відносно проекції S-полюса. Північна полярна променева система складається із 12 променів-щіточок, південна полярна променева система із 9 променів-щіточок шириною 0.05–0.15  $R_{\odot}$ , які, у свою чергу, складаються з багатьох тонких променів шириною до 0.01  $R_{\odot}$ . Промінь A (p = 24°–61°) є яскравим шоломоподібним променем, нахиленим відносно локальної нормалі на лімбі на 22° в бік єкватора. Промінь B (p = 61°–84°) є слабким потоком із невеликим (i = 3°) нахилом у бік єкватора. Промінь C (p = 88°– 158°) є дуже широким променем-потоком з нахилом 7° у бік єкватора. Промінь D (p = 193°–253°) нахилений у бік екватора на 9°. Промінь-потік E (p = 255°–287°) є радіальним. Промінь F (p = 287°–336°) є досить яскравим стрімером, він має найбільший з усіх променів нахил у бік екватора – 24°. Промені на W-лімбі є дещо яскравішими від променів на E-лімбі; промені A, D і F мають помітні шоломи-опахала.

У структурі сонячної корони 1 серпня 2008 р. виділяються добре розвинуті північна та південна полярні променеві системи над полярними корональними дірами і кілька променів різної яскравості на середніх і низьких геліоширотах. На Е-лімбі можна виділити три промені, на W-лімбі – два. Структурний рисунок сонячної корони 1 серпня 2008 р. показаний на рис. 1 справа. Промені позначені літерами *A*–*E*. Північна полярна променева система має протяжність вздовж лімба приблизно 40°. Протяжність південної полярної променевої системи складає біля 70° (142°–212°). Обидві полярні променеві системи складаються із 10–12 широких променів (полярних променів або щіточок), які у свою чергу містять до 50–60 тонших променів (3–8 на кожну щіточку) з поперечником до 0.01 *R*<sub>©</sub>. Полярні промені на полюсах є радіальними, інші нахилені в бік екватора. Відхилення полярних променів-щіточок від радіального напрямку в бік екватора зростає із збільшенням відстані основи променя від полюса, досягаючи значень 40°–45° для найбільш віддалених від полюса променів.

Полярні променеві системи свідчать про присутність відкритих магнітних структур – полярних дір, які також простежуються за значним зниженням яскравості в полярних областях Сонця, наприклад, на знімках приладу ЕІТ у день затемнення в лінії 195 Å на борту супутника SOHO (*http://sohowww.nascom.nasa.gov*).



Рис. 1. Структура сонячної корони під час повного сонячного затемнення 29 березня 2006 р. (зліва) і 1 серпня 2008 р. (справа). Кружок пунктиром нанесений на відстані 2.5 R<sub>☉</sub>

Промінь *А* має протяжність вздовж лімба біля 45° (22°–67°) і нахилений у бік екватора на кут 25°. Ймовірно, його шоломоподібна основа знаходиться частково на видимій півсфері Сонця, а його купол частково накладається на північну полярну променеву систему у вигляді кількох скривлених променів.. Промінь *B* (67°–100°) є слабким радіальним потоком. Яскравий шоломоподібний промінь *C* (100°–155°) нахилений відносно локальної нормалі на лімбі на 16° в бік екватора. Шоломоподібні промені *D* і *E* накладаються на відстанях до 2.5  $R_{\odot}$ , разом займаючи вздовж W-лімба біля 133° (212°–345°), і нахилені в бік екватора відповідно на 2°–3° і 8°–10°. Найяскравішим на Е-лімбі є промінь *C*, на W-лімбі – промінь *E*.

Якщо порівняти корону 29 березня 2006 р. із коронами із каталогів [5] і [10] та роботи [9], то слід відзначити, що вона є подібною до корон, що спостерігалися 21.08.1914, 20.09.1922, 15.01.1925, 30.05.1965 та 26.02.1998 рр. Вказані корони також мали розвинуті полярні променеві системи і по кілька стрімерів на низьких і середніх широтах на східному і західному лімбах. Сонячна корона 1 серпня 2008 р. є подібною до корон, що спостерігалися 01.01.1889, 20.09.1922, 10.09.1923, 09.06.1945, 20.06.1955, 23.10.1976 та 03.11.1994 рр. Форма сонячної корони. Для кількісної характеристики форми сонячної корони під час затемнення і порівняння з даними для інших затемнень найчастіше використовують індекс фотометричної стиснутості корони є, введений Людендорфом у 1928 р. [11]. Він визначається як деяка функція протяжності корони у полярних і екваторіальних

напрямках за формулою  $\varepsilon = \frac{d_0 + d_1 + d_2}{D_0 + D_1 + D_2} - 1$ , де  $d_0$  – екваторіальний діаметр ізофоти (чи ізоденси),  $d_1$  і  $d_2$  – діамет-

ри ізофот на відстанях ±22.5° від  $d_0$ ,  $D_0$  – полярний діаметр ізофоти,  $D_1$  і  $D_2$  – діаметри ізофот на відстанях ±22.5° від  $D_0$ . Залежність  $\varepsilon$  від відстані від центра сонячного диска може бути апроксимована виразом  $\varepsilon = a+b(r-1)$ , де r – середній екваторіальний радіус ізофоти. При r = 2,  $\varepsilon = a+b$  і є класичним параметром Людендорфа. Для сонячної корони 29 березня 2006 р. параметр  $\varepsilon$  приблизно становить 0.17 [4], для корони 1 серпня 2008 р. –0.21 [3].

Залежність індексу фотометричної стиснутості корони від фази сонячної активності за даними для 54 повних сонячних затемнень 1893–2006 рр. показана на рис. 2. Штрихова лінія показує середній хід залежності  $\varepsilon(\Phi)$ , що описується рівнянням  $\varepsilon = 0.10 + 0.169 \cdot \cos(1.83 \cdot \Phi)$ . З рис. 2 слідує, що стиснутість сонячної корони 29 березня 2006 р. і 1 серпня 2008 р. є дещо меншою від середнього ходу  $\varepsilon(\Phi)$  за матеріалами багаторічних спостережень попередніх затемнень Сонця. Ця відмінність може бути пояснена як певним суб'єктивізмом у виборі початкової кількості точок для лінійної інтерполяції залежності  $\varepsilon$  від екваторіального радіуса ізофоти, так і можливою неточністю прийнятого значення фази сонячної активності  $\Phi$ .

Дослідження останніх років вказують на те, що корона завжди є дещо "сплюснутою" у напрямку геліомагнітного екватора, а корональні промені-стрімери розміщуються переважно вздовж лінії розділу полярностей глобального магнітного поля Сонця, утворюючи т.з. пояс корональних стрімерів (див., наприклад, [1, 13]). У такому випадку індекс фотометричної стиснутості корони є є певною мірою фіктивним індексом, хоча і досить добре відображає у першому наближенні зміну форми сонячної корони в залежності від фази сонячної активності, а видима форма корони визначається не стільки фазою сонячної активності, як взаємним розташуванням "сплюснутої" корони відносно вісі обертання Сонця і спостерігача на Землі.



Рис. 2. Залежність індексу фотометричної стиснутості корони є від фази сонячної активності Ф для 54 затемнень 1893–2008 pp.

**Моделювання магнітного поля в короні в потенціальному наближенні.** Якщо припустити, що електричні струми в сонячній короні між фотосферою і так званою поверхнею джерела сонячного вітру відсутні і електричне поле є квазістаціонарним, то компоненти магнітного поля  $(B_r, B_{\theta}, B_{\phi})$  можна розрахувати як градієнт деякого скаля-

рного магнітного потенціалу  $\psi(r, \theta, \phi)$  за формулами

$$B_{r} = -\frac{\partial \psi(r,\theta,\varphi)}{\partial r} = \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=0}^{n} \left[ (n+1)(R/r)^{n+2} + nc_{n}(r/R_{s})^{n-1} \right] \times \left( g_{n}^{m} \cos m\varphi + h_{n}^{m} \sin m\varphi \right) \times P_{n}^{m} (\cos \theta),$$
  

$$B_{\theta} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi(r,\theta,\varphi)}{\partial \theta} = -\sum_{n=1}^{N} \sum_{m=0}^{n} \left[ (R/r)^{n+2} + c_{n}(r/R_{s})^{n-1} \right] \times \left( g_{n}^{m} \cos m\varphi + h_{n}^{m} \sin m\varphi \right) \times \frac{\partial P_{n}^{m} (\cos \theta)}{\partial \theta},$$
  

$$B_{\varphi} = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \psi(r,\theta,\varphi)}{\partial \varphi} = \frac{1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=0}^{n} \left[ (R/r)^{n+2} + c_{n}(r/R_{s})^{n-1} \right] \times \left( h_{n}^{m} \cos m\varphi - g_{n}^{m} \sin m\varphi \right) \times P_{n}^{m} (\cos \theta),$$

де  $\theta$  – коширота, R – радіус Сонця,  $R_s$  – радіус поверхні джерела,  $c_n = -(R/R_s)^{n+2}$ ,  $g_n^m$  та  $h_n^m$  – гармонічні коефіцієнти, що визначають силу і орієнтацію мультиполів і обчислюються на основі виміряних фотосферних магнітних полів,  $P_n^m(\cos \theta)$  – нормовані приєднані поліноми Лежандра. Детально методика розрахунку магнітного поля в сонячній короні у потенціальному наближенні описана в роботах [6–8].



Рис. 3. Силові лінії магнітного поля в сонячній короні 26 березня 2006 р., розраховані в потенціальному радіальному (зліва) і класичному (справа) наближенні. Верхня панель – розрахунок від фотосфери до поверхні джерела, нижня – навпаки; по осях – масштаб у сонячних радіусах

Для знаходження коефіцієнтів  $g_n^m$  і  $h_n^m$  методом найменших квадратів нами були використані синоптичні спосте-

режні фотосферні магнітографічні дані обсерваторії імені Джона Вілкокса (*http://wso.stanford.edu*), радіус поверхні джерела приймався рівним 2.5 *R*, N = 9. Розрахунки були проведені в радіальному і класичному потенціальних наближеннях, поправка за насичення і поправка полярного поля не вводилися. Візуалізація силових ліній магнітного поля в короні здійснювалася за допомогою чисельного розв'язку рівняння силової лінії методом Рунге-Кутта четвертого порядку. На рис. 3 і рис. 4 відповідно показані розраховані конфігурації силових магнітних ліній між фотосферою і поверхнею джерела для затемнення 29 березня 2006 р. і затемнення 1 серпня 2008 р. Силові лінії, що починаються на видимій півсфері Сонця, показані суцільними лініями, на невидимій – штриховими, північ – вгорі, схід – зліва. Розрахунок проведено для сітки 30×30 початкових точок (по довготі і по широті).

Порівняння розрахованої конфігурації силових ліній магнітного поля із спостереженою структурою корони вказує на те, що при розрахунках без внесення поправки полярного поля і поправки за насичення краще узгодження із розташуванням магнітної нейтральної лінії на поверхні джерела і основними променями-стрімерами спостерігається для радіальної потенціальної моделі. В той же час, розрахунки в рамках класичного потенціального наближення дають дещо краще узгодження із загальним виглядом спостереженої корони.

Висновки. Досліджено форму і структуру сонячної корони, що спостерігалася під час повних сонячних затемнень 26 березня 2006 р. і 1 серпня 2008 р.

Корона 29 березня 2006 р. є короною проміжного перед-мінімального типу. Вона характеризується наявністю шести низько- та середньо-широтних променів різної яскравості та розвиненими північною і південною полярними променевими системами над полярними корональними дірами. Корона 29 березня 2006 р. є короною білямінімального типу з добре розвинутими північною і південною полярними променевими системами і кількома променями різної яскравості на середніх і низьких геліоширотах.

Досліджено фотометричну стиснутість корони в залежності від відстані від центра сонячного диска. Індекс є фотометричної стиснутості сонячної корони 29 березня 2006 р. на відстані 2  $R_{\odot}$  становить 0.17, 1 серпня 2008 р. – 0.21, що в середньому є дещо нижчим, ніж для близьких значень фази сонячної активності під час сонячних затемнень у минулому.

У потенціальному радіальному і класичному наближеннях розраховано магнітне поле у короні під час вказаних затемнень і побудовані конфігурації силових ліній магнітного поля. Розрахунки в радіальному наближенні дещо краще узгоджуються із спостереженою структурою корони під час затемнень.



Рис. 4. Силові лінії магнітного поля в сонячній короні 1 серпня 2008 р., розраховані в потенціальному радіальному (зліва) і класичному (справа) наближенні. Верхня панель – розрахунок від фотосфери до поверхні джерела, нижня – навпаки. Магнітна нейтральна лінія на поверхні джерела показана товстою лінією

1. Гуляев Р.А., Филиппов Б.П. Структура солнечной короны и гелиосферный токовый слой // Докл. АН СССР. – 1992. – Сер. А. – Т. 322, № 2. 268-271. - C.

2. Івченко В., Єфіменко В, Буромський М. та ін. Спостереження повного затемнення Сонця 29 березня 2006 року експедицією Київського національного університету імені Тараса Шевченка // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. –2006. – Т. 43. – С. 54–57. 3. *Пішкало М.І., Баранський О.Р.* Сонячна корона під час повного сонячного затемнення 1 серпня 2008 р. // Кинематика и физика небес.

тел.– 2009. – Т. 25, № 6. – С. 474–481.

4. *Пішкало М.І., Садовенко Є.В.* Структура і форма сонячної корони під час повного сонячного затемнення 29 березня 2006 р. // Кинематика и физика небес. тел. – 2008. – Т. 24, № 1. – С. 61–69

5. Солнечная корона и корпускулярное излучение в межпланетном пространстве. Под ред проф. С.К. Всехсвятского. – Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1965 - 216 c

6. Харшиладзе А.Ф., Иванов К.Г. Сферический гармонический анализ магнитного поля Солнца // Геомагнетизм и аэрономия. - 1994. - Т. 34, № 4. – C. 22–27

7. Altschuler M.D., Newkirk G., Jr. Magnetic fields and structure of the solar corona // Solar Phys. – 1969. – Vol. 9, N 1. – P. 131–149.
 8. Altschuler M.D., Levine R.H., Stix M., Harvey J. Hight resolution mapping of the magnetic field of the solar corona // Solar Phys. – 1977. – Vol. 51,

N 2. – P -375

9. Bělik M., Marková E., Rušin V. White-light coronal structures during the 1988–1998 eclipses // Contrib. Astron. Obs. Skalnate Pleso. – 1999. – Vol. 28, N3 - P 230-236

10. Loucif M.L., Koutchmy S. Solar cycle variations of coronal structures // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. - 1989. - Vol. 77. - P. 45-66. 11. Ludendorff H. Über die Abhängigkeit der Form der Sonnenkorona von der Sonnenfleckenhäufigkeit // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Phys.-Math. Klasse. - 1928. - T. 16. - P. 185-192.

 Schatter K.H., Wilcox J.M., Ness N.F. A model of interplanetary and coronal magnetic fields // Solar Phys. – 1969. – Vol. 6, N 2. – P. 442–455.
 Sýkora J., Badalyan O.G., Obridko V.N. Connections between the white-light eclipse corona and magnetic fields over the solar cycle // Solar Phys. - 2003. - Vol. 212, N 2. - P. 301-318.

Надійшла до редколегії 18.05.09

#### УДК 524.7

С. Парновський

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ КОЛЕКТИВНИХ РУХІВ ГАЛАКТИК НА ОСНОВІ КАТАЛОГУ RFGC

Розповідь про історію та результати дослідження великомасштабних колективних рухів галактик в астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка – від створення каталогів плоских галактик FGC та RFGC до отриманих результатів.

A brief account of history and results of investigation of large-scale collective galaxy motions at the Astronomical observatory of Kyiv Taras Shevchenko National University – from flat galaxies catalogues building to results obtained/

Вступ. У роботі [13] І.Д. Караченцевим було показано, що спіральні галактики пізніх типів, що видимі з ребра (плоскі галактики), є зручними тестовими частинками для дослідження великомасштабних пекулярних рухів. Серед причин можна назвати такі:

- Існує тісна кореляція між лінійним діаметром і шириною лінії водню для тонких безбалджових галактик. Це дозволяє визначати відстані без даних фотометрії.
- Плоскі галактики добре ідентифікуються за відношенням осей.
- плоскі галактики добре детектуються в лінії водню.
- Плоскі галактики уникають скупчень, тому їх форма не спотворена впливом інших галактик і плоскі галактики не взаємодіють з міжгалактичним газом скупчень.

• Пекулярні швидкості ізольованих плоских галактик не зазнають збурень від сусідніх галактик.За пропозицією І.Д.Караченцева, в АО КНУ та САО РАН було створено каталог плоских спіральних галактик, видимих з ребра (Flat Galaxy Catalog, FGC [14]; друга, ревізована, версія цього каталогу – RFGC [16]). Вибір об'єктів для цього каталогу обумовлений їх перевагами з точки зору дослідження великомасштабних течій галактик, котрі перелічені вище. Каталог FGC був складений на основі візуального перегляду О і Е пластинок Паломарського огляду неба (POSS) – власне каталог FGC, і J і R плівок огляду Південної Європейської обсерваторії ESO/SERC – продовження FGC у південній півкулі, FGCE. Спостереження на О-пластинках і J-плівках виконувалися в синьому фотометричному діапазоні, а на Е-пластинках і R-плівках – у червоному. FGC охоплює діапазон схилень від -20° до +90°, а FGCE – решту неба. До каталогу були включені 4455 галактик, що були відібрані за двома критеріями:

- Відношення осей а/b≥7.
- Великий діаметр у синьому фільтрі а<sub>b</sub>> 0.6'.

Більше половини плоских галактик було каталогізовано вперше. FGC містить 2573 галактики, а FGCE – 1872. Середня гранична поверхнева яскравість галактик, виміряних на O і E картах POSS дорівнює 25 mag/□ ". Система діаметрів цих галактик називається P-системою. Середня гранична поверхнева яскравість галактик, виміряних на J і R плівках ESO/SERC дорівнює 25.5 mag/□ ". Система діаметрів цих галактик називається E-системою. Була побудована функція діаметрів плоских галактик. Діаметри галактик FGCE були приведені до P-системи, яка виявилася близькою до системи *а*<sub>25</sub> каталогу RC3. Каталог плоских галактик однорідний до діаметра *a*=0.'9 (за тестом Шмідта) і повний до такого ж діаметру за аналізом залежності IgN(Iga).

Після створення каталогу FGC деякий час проводилось вивчення властивостей каталогу та його об'єктів. Вони описані, зокрема, у статтях [1, 3–7, 15, 19].

Відзначимо дослідження розподілу відношення осей галактик [5]. Видиме відношення осей а/b є важливою характеристикою, оскільки використовується при редукції за нахил галактики практично всіх спостережних величин: діаметра, зоряної величини, ширини лінії водню, від яких залежить оцінка маси та світності галактики. При дослідженні розподілу галактик каталогу за морфологічними типами та відношенням осей були отримані такі результати:

- значення a/b та морфологічні типи, що наведено в обох частинах каталогу, добре узгоджуються між собою та з даними основних каталогів галактик RC3 та UGC;
- значення a/b у середньому не залежать від відстані та світності галактики, що свідчить про відсутність значущих ефектів селекції у каталозі;
- плоскі галактики, що орієнтовані з ребра, відповідають загальній залежності "стиснення морфологічний тип", яку було встановлено для галактик з довільною орієнтацією.

Для теорії утворення та стійкості форм спіральних галактик принциповим є питання про максимально допустимі значення істинних відношень осей. Найбільш надійними є статистичні оцінки максимальних стислостей, що ґрунтуються на дослідженнях поведінки функції розподілу в області великих стислостей. Шляхом переходу від розподілу плоских галактик за видимими стислостями до розподілу за істинними стислостями було показано, що максимальне значення істинного відношення *а/b* становить 25.8.

Подальші дослідження призвели до створення нової, доповненої і виправленої версії каталогу плоских галактик RFGC. Основними обставинами, що зумовили побудову RFGC були:

- 1. можливість перевимірювання координат плоских галактик з використанням Palomar Digital Sky Survey з точністю приблизно 3 arcsec;
- 2. включення даних про "червоні" діаметри деяких галактик, що були відсутні в FGC через брак фотографічного матеріалу;
- необхідність зведення систем діаметрів FGC та FGCE у єдину систему: приведення діаметрів, виміряних на J та R плівках ESO/SERC, до P-системи, що зменшує різницю у фотографічній глибині двох частин каталогу;
- 4. обчислення інтегральних видимих величин із середньоквадратичним відхиленням 0.25 зоряної величини для всіх плоских галактик, ґрунтуючись на кутових розмірах, поверхневій яскравості та інших параметрах;
- 5. можливість визначення галактичного поглинання в напрямі на кожну галактику;
- 6. необхідність виправлення деяких помилок, виявлених під час роботи з дослідження каталогу FGC. На основі цих каталогів було уточнено характеристики нехаблівських течій на масштабі 100 Мпк. Ці дослідження необхідні для визначення розподілів маси, зокрема, їх можна застосовувати для оцінки параметрів великих концентрацій маси типу Великого Атрактора.

Колективні рухи плоских галактик на масштабах 100 Мпк. Роботи цього напрямку пов'язані з дослідженням колективних нехабблівских рухів галактик, що спостерігаються з ребра та входять у каталог RFGC. Для вивчення нехабблівских рухів і поля пекулярних швидкостей галактик на різних масштабах потрібні великі вибірки галактик з відомими променевими швидкостями  $V_h$  і незалежними оцінками відстаней. Каталог плоских галактик RFGC є однорідною вибіркою 4236 спіральних галактик, видимих із ребра, що охоплює досить рівномірно все небо. Починаючи зі створення першої версії FGC, автори збирали дані про променеві швидкості і ширини лінії HI для галактик каталогу. У 1995 р. за даними спостережень приблизно 800 FGC-галактик одержано в дипольному наближенні оцінку модуля швидкості й апекса колективного руху плоских галактик V = 260 км/с, I = 319°, b = +28°, використовуючи пряму залежність Таллі-Фішера [17]. На наступному етапі для незалежної оцінки відстаней приблизно 1000 плоских галактик була використана узагальнена багатопараметрична залежність Таллі-Фішера та у дипольному наближенні були отримані значення V = 300 км/с, I = 328°, b = +7° [2], що добре узгоджується з результатом, отриманим для галактик каталогу Mark III, V = 370 км/с, I = 305°, b = +14°.

На 2000 рік були зібрані 5 вибірок даних по променевих швидкостях і ширинах НІ:

- 1. Вибірка 490 плоских галактик, які спостерігалися на телескопі Аресібо.
- 2. Для 300 галактик були проведені спостереження оптичних кривих обертання на 6-метровому телескопі САО РАН. Максимальні швидкості обертання були переведені в значення ширини лінії водню *W*.
- 3. Дані про ширини лінії водню для 167 галактик були взяті з каталогу RC3.
- 4. Були використані дані про ширини лінії водню, отримані на 64-м Паркському радіотелескопі і про оптичні криві обертання, отримані на 2.3-м телескопі Сайдінг Спрінг. До цієї підвибірки увійшов список 177 галактик.
- 5.193 галактики з даними про ширини лінії водню, отриманими на радіотелескопах Нансі і Грін Бенк.

Зібрані спостережні дані по променевих швидкостях і ширинах HI для 1300 RFGC-галактик дали змогу визначення параметрів колективного руху плоских галактик у різних варіантах колективного руху: в дипольній (D), квадрупольній (DQ) та октупольній (DQO) моделі [8]. D-модель розглядає тільки дипольну складову руху, у DQ-моделі і DQOмоделі додається відповідно квадрупольна і квадрупольна+октупольна компоненти.

Для визначення відстаней до галактик була використана багатопараметрична залежність Таллі-Фішера, що враховує амплітуду обертання галактики, її синій і червоний кутовий діаметр, поверхневу яскравість і морфологічний тип. Параметри цієї залежності разом із параметрами моделі руху (від 3 до 18) визначаються методом найменших квадратів для підвибірок з обмеженням максимальної відстані до галактик R<sub>max</sub>.

Після виходу з друку статті [8] робота була продовжена. При підготовки статті [9] були додані дані про 216 нових галактик, що ввійшли до нової вибірки. Вони мають середні скоректовані величини ширини <*W*>=295 км/с, швидкості у системі реліктового випромінювання <*V*<sub>3K</sub>> = 5152 км/с, <*a*<sub>b</sub>> = 1.32', <*a*<sub>c</sub>> = 1.25'. Для 34 галактик, дані про які змінилися в порівнянні з попередньою вибіркою, середні скоректовані розміри рівні <*a*<sub>b</sub>> = 1.16', <*a*<sub>c</sub>> = 1.07'. Аналіз отриманих результатів свідчить, що:

- Параметри багатопараметричної регресії Талі-Фішера добре співпадають для всіх розглянутих варіантів. Усі відхилення лежать у межах похибок.
- Апекси дипольної складової колективної швидкості близькі для всіх моделей і підвибірок, а також до раніше визначеного в роботі [19] І = 328°±15°, b = 7°±15°. Додавання квадруполя практично не позначається на модулі дипольної швидкості при всіх R<sub>max</sub>. Однак при 7000 км/с < R<sub>max</sub>< 9000 км/с додавання октуполя приводить до істотного зменшення модуля дипольної складової швидкості. Опрацювання тих самих даних однаковим методом, але для моделей з октупольною складової і без неї, приводить до якісно різних виводів про розмір швидкості колективного руху.</li>
- Квадрупольні й октупольні складові є статистично значущими. Перша з них приводить до невеликої (5-8% на характерному масштабі R<sub>max</sub>=(6000-10000) км/с) анізотропії розбігу галактик, що можна описати, увівши залежну від напрямку тензорну "постійну Хабла". У межах Місцевого надскупчення (R<sub>max</sub>=3000 км/с) амплітуда квадруполя досягає ~20%. Врахування октупольної складової приводить до зменшення амплітуди диполя до (134±111) км/с на масштабі ~8000 км/с. Найбільше примітною особливістю поля пекулярних швидкостей галактик при R<sub>max</sub>=8000 км/с є зона мінімуму з центром І=80<sup>°</sup>, b= 0<sup>°</sup> (сузір'я Лебедя), амплітуда якої досягає -18% від середньої хабблівской швидкості. Відзначимо, що аналіз тих самих спостережних даних без врахування або з врахуванням октуполя може призводити до істотно різних виводів про сталість або зменшення амплітуди дипольної складових колективних рухів галактик із зростанням об'єму вибірки.

На відстанях, що відповідають хаблівській швидкості біля 6000 км/с, внески дипольної, квадрупольної і октупольної складової є порівняні за величиною. Цю відстань можна вважати характерним масштабом неоднорідностей поля швидкостей у розглянутих моделях. На менших відстанях основний внесок у колективний рух галактик вносить дипольна компонента швидкості.

На основі результатів роботи [9] було складено новий список пекулярних швидкостей [21] (перший список пекулярних швидкостей [18] базувався на результатах роботи [8]). За його допомогою були отримані нові результати у двох дуже важливих напрямках позагалактичної астрономії та астрофізики. Перший з них – космографія, тобто відновлення розподілу густини матерії, включаючи темну, а також тривимірного векторного поля швидкостей колективних рухів галактик за його однією радіальною складовою. Для відстаней до 100 Мпк це було зроблено в роботі [12] за допомогою метода POTENT. Було показано, що просторовий розподіл темної матерії на великих масштабах приблизно відповідає розподілу світної матерії, встановленому за розподілом джерел IRAS. Також було оцінено надлишкові маси основних надскупчень – Великого Атрактора, надскупчення Персей-Риби, тощо.

Другий напрямок, в якому були застосовані дані про пекулярні швидкості RFGC-галактик – це космологія. В роботах [10, 20] були знайдено оцінка двох космологічних параметрів –  $\Omega_m$  та  $\sigma_8$ . Оскільки довірчі інтервали їх спільного розподілу обмежені дуже витягненою границею, комбінації цих параметрів виду  $\sigma_8 \Omega_m^{\alpha}$  мають менші похибки, ніж самі параметри окремо. Значення та похибки таких комбінацій при різних значеннях параметру  $\alpha$  були знайдені та порівняні зі спостережними даними в роботі [11]. Було виявлено, що найкраще обмеження дає значення параметру  $\alpha$ =0,37. Воно має вигляд ( $\Omega_m/0.3$ )<sup>0.37</sup>  $\sigma_8$  =0.92±0.05.

За п'ять років, що минуло з часу виходу з друку роботи [9], у вибірку даних по променевих швидкостях і ширинах НІ для RFGC-галактик були додані дані приблизно 200 галактик. У 2009 р. передбачається подати до друку результати опрацювання цієї нової вибірки.

 Кудря Ю.Н., Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Парновский С.Л. Общие свойства каталога плоских галактик. Видимые сжатия и морфологические типы // Письма в Астрон. журн. – 1997. – Т. 23, №9. – С. 652–658.

<sup>1.</sup> *Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Кудря Ю.Н., Парновский С.Л.* Двухточечная угловая корреляционная функция плоских галактик // Письма в Астрон. журн. – 1996. – Т. 22, №5. – С. 330–336.

<sup>2.</sup> Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Кудря Ю.Н., Парновский С.Л. Коллективные движения галактик из каталога FGC на масштабах 100 Мпк // Астрон. журн – 2000. – Т. 77. – С. 175–187.

<sup>3.</sup> Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Кудря Ю.Н. Некоторые свойства плоских галактик из каталога FGC // Письма в Астрон. журн. – 1999. – Т. 25, №1. – С. 3–9.

<sup>4.</sup> *Кудря Ю.Н., Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Парновский С.Л.* Общие свойства каталога плоских галактик. Функция диаметров // Письма в Астрон. журн. – 1997. – Т. 23, №1. – С. 15–23.

<sup>5.</sup> Кудря Ю.Н., Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Парновский С.Л. .Максимальные видимые и истинные сжатия плоских галактик // Письма в Астрон. журн. – 1994. – Т. 20, №1. – С.13-17.

Кудря Ю.Н., Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Парновский С.Л. Видимые величины и диаграмма Талли-Фишера для галактик FGC каталога // Письма в Астрон. журн. – 1997. – Т. 23, №10. – С. 730–735.
 Парновский С.Л., Кудря Ю.Н., Караченцева В.Е., Караченцев И.Д. Коллективное движение плоских галактик на масштабах 100 Мпк в квадрупольном и октупольном приближениях // Письма в Астрон. журн. – 2001. – Т. 27, №12. – С. 890–900.
 Парновский С.Л., Тугай А.В. Коллективные движения галактик на масштабе 100 Мпк с использованием новых данных // Письма в Астрон.

журн. – 2004. – Т. 30, №6. – С. 403–413.

10. Парновский С.Л., Гайдамака О.З., Шаров П.Ю. Оценка космологических параметров по пекулярным скоростям плоских галактик каталога RFGC // Кинематика и физика небес. тел.– 2004.– Т. 20, № 2.– С. 112–117.

 Парновский С.Л. Определение комбинации космологических параметров Ω<sub>m</sub><sup>a</sup>σ<sub>8</sub> // Письма в Астрон. журн. – 2008. – Т. 34, №7. – С. 496–502. 12. Шаров П. Ю., Парновский С. Л. Распределение плотности материи на масштабах 75 Мпк, полученное методом POTENT по коллективным движениям RFGC галактик // Письма в Астрон. журн. – 2006. – Т. 32, №5. – С. 323–332.

13. Karachentsev I.D. Thin edge-on galaxies as a tool for the investigation of large-scale streaming motions in the universe // Astron. J.–1989.–Vol. 97, №6. – P. 1566–1576.

Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Parnovsky S.L. Flat Galaxy Catalogue // Astron. Nachr. – 1993. – Vol. 314, №3. – P. 97–222.
 Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Kudrya Yu.N., Parnovsky S.L. "DISKOTEKA" – a new catalog of thin edge-on galaxies // Astron. Astrophys.

Transactions. - 1995. - Vol.4. - P.143-151.

16. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E, Kudrya, Yu. N., Sharina, M. E., Parnovsky S.L. The Revised Flat Galaxy Catalogue. // Bull. SAO - 1999. - Vol. 47. - P.5-185. 17. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E, Kudrya, Yu. N., Parnovsky S.L. Large-scale streaming of flat galaxies // Astron. Nachr. - 1995. - Vol. 316,

№6. – P.369-380. 18. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E, Kudrya, Yu. N., Makarov, D. I., Parnovsky S.L. A list of peculiar velocities of galaxies from the RFGC cata-logue. // Bull. SAO – 2000. – Vol. 50. – P. 5–38.

19. Parnovsky S.L., Karachentsev I.D., Karachentseva V.E. Global anisotropy of galaxy orientations // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. - 1994. - Vol. 268. - P. 665-680.

20. Parnovsky S. L., Sharov P. Yu., Gaydamaka O. Z. Estimation of cosmological parameters from peculiar velocities of flat edge-on galaxies// Astro-phys. Space Sci. – 2006. – Vol. 302, № 1-4. – Р. 207–211. 21. Parnovsky S. L., Tugay A. V. Description of the new list of peculiar velocities of RFGC galaxies // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія – 2006. – Вип. 43.

- C. 51-54.

Надійшла до редколегії 13.05.09

УДК 524.8

С. Хміль

#### СПОСТЕРЕЖНІ ОБМЕЖЕННЯ НА КОСМОЛОГІЧНУ СТАЛУ

Подано короткий огляд основних методів визначення космологічної сталої Л із спостережень.

#### A short rewiev of the principal methods for determination of the cosmological constant $\Lambda$ is given.

Вступ. З історичної точки зору космологічна стала  $\Lambda$  – це додатковий член у рівняннях загальної теорії відносності, який був введений Айнштайном чисто формально для забезпечення існування статичних космологічних моделей [10]. Коли в кінці 20-х рр. минулого століття було виявлено, що Всесвіт є нестаціонарним, зникла потреба у збереженні цієї сталої, і про неї згадували лише принагідно, як про штучний засіб узгодження теорії та спостережень. Проте у другій половині ХХ ст., внаслідок швидкого накопичення спостережних даних та під впливом досягнень квантової теорії поля, поступово стала викристалізовуватись думка, що ця стала може репрезентувати фізичні властивості вакууму. Ця точка зору узгоджується з твердженням загальної теорії відносності про те, що всі форми енергії та матерії мусять впливати на кривину простору-часу. Особлива зацікавленість у визначенні величини космологічної сталої з'явилась у 1990-х рр. у зв'язку з відкриттям прискореного розширення Всесвіту.

Ненульова космологічна стала Л впливає на багато космологічних параметрів і характеристик. Найголовніші серед них такі: динаміка розширення, вік Всесвіту, міри віддалей, супутня густина об'єктів, зростання лінійних збурень, імовірності гравітаційного лінзування (більш детальний виклад див., наприклад, в огляді [4]). Іншими словами, як просторова геометрія, так і еволюція Всесвіту в минулому можуть значно змінитися за наявності космологічної сталої. Існують декілька методів спостереженого визначення величини  $\Lambda$ . Найважливіші з цих методів та результати їх застосування подані у цьому короткому огляді.

Зауважимо, що при аналізі спостережень звичайно використовують замість космологічної сталої Л безрозмірний параметр  $\Omega_{\Lambda} = \Lambda / 3 H_0^2$ , де  $H_0$  – стала Хаббла. Для густини матерії  $\rho_M$  використовується аналогічний параметр  $\Omega_M = 8\pi G \rho_M / 3H_0^2$  Причому у простово-плоскому Всесвіті  $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$  (докладніше див. [4]). Рівняння стану

вакууму має досить незвичний вигляд:  $p_{\Lambda} = w \rho_{\Lambda}$ , де w = -1, тобто вакуум має негативний тиск. Величина параметра *w* також може бути визначена із спостережень.

Загальні міркування щодо величини космологічної сталої. Виявляється, що можна встановити обмеження на величину космологічної сталої, користуючись загальними відомостями про Всесвіт. Розглянемо деякі з них.

1. Об'єкти з великим червоним зміщенням. Наявність цих об'єктів однозначно виключає деякі екзотичні всесвіти з параметром космологічної сталої  $\Omega_{\Lambda} > 1$ . Існування квазарів з великими червоними зміщеннями (z > 5) та

космічного мікрохвильового фонового випромінювання (КМФ) при *z* ~ 1000 унеможливлює моделі Всесвіту, в яких відсутній Великий Вибух (інколи їх називають всесвітами з відскоком, "bouncing" universes). Для того, щоб очікувати на відскок при досить малому масштабному факторі, який би відповідав червоному зміщенню КМФ, наш Всесвіт мусив би мати дуже низький вміст матерії ( $\Omega_{_M} < 10^{-9}$  проти спостережного  $\Omega_{_M} \approx 0.3$ ). Сповільнені всесвіти продуку-

ють різноманіття незвичних спостережних ефектів і виключаються завдяки наявності гравітаційно-лінзованих квазарів з великим червоним зміщенням (див. [12, 13]).

2. Проблема віку. Одним з найбільш нездоланних свідоцтв на користь існування космологічної сталої вважався факт, що вік Всесвіту без космологічної сталої менший за вік найстаріших зірок, що спостерігаються у кульових скупченнях нашої галактики Чумацького Шляху та інших галактик.

Відповідно до [5], дослідження з нуклеохронології показують, що найстаріші зірки мають вік 15.2 ± 3.7 мільярдів років. Криві охолодження білих карликів вказують на мінімальний вік найстаріших зірок у 8 мільярдів років. Найкраща оцінка віку найстаріших зірок базується на абсолютній зоряній величині точки повороту головної послідовності у кульових скупченнях. Найбільш старі кульові скупчення мають вік 11.5±1.3 мільярдів років, звідки випливає, що мінімальний вік Всесвіту складає *T* ≥ 9.5 мільярдів років на рівні достовірності 95%. Вивчення космічного мікрохвильового фонового випромінювання дозволило визначити вік Всесвіту у 14.0±0.5 мільярдів років [18].

Якщо припустити, що Всесвіт складається виключно з матерії (світної та темної), яку ми можемо знайти (Ω<sub>M</sub> ≈ 0.3), тоді вік Всесвіту налічує від 10 до 13 мільярдів років. Ситуація значно погіршується, якщо вимагати, щоб Всесвіт був плоским з домінуванням матерії (Ω<sub>M</sub> = 1); тоді його вік був би лише 8–11 мільярдів років. Проте плоский Всесвіт з матерією на спостережному рівні (Ω<sub>M</sub> ≈ 0.3) та з космологічною сталою має вік 12–16 мільярдів років, сумісний з віком найстаріших зірок.

Зауважимо, що "проблема віку" втратила свій вирішальний характер завдяки результатам, отриманим на супутнику *Hipparcos* [6]. Відомо, що і вік кульових скупчень, і вік Всесвіту (через сталу Хаббла  $H_0$ ) залежать від шкали віддалей, що використовується. Вимірювання паралаксів декількох найближчих цефеїд на супутнику *Hipparcos* привело до перегляду шкали віддалей. В результаті цього перегляду значення сталої Хаббла наблизилося до рівня біля  $60 \ \kappa M \cdot c^{-1} \cdot Mn\kappa^{-1}$ , що надало змогу повернутися до величин віку відкритої та плоскої моделей Всесвіту з домі-

нуванням матерії, вказаних вище (відповідно  $13 \cdot 10^9$  та  $11 \cdot 10^9$  років). Перегляд також вніс поправки до віку найстаріших кульових скупчень, знизивши його до 10 – 14 мільярдів років. Таким чином, на думку багатьох авторів, "проблема віку" Всесвіту більше не є основним приводом для розгляду ненульової космологічної сталої (див., наприклад, [3, 6, 20]).

Після цих загальних зауважень перейдемо до розгляду спостережних методів визначення величини космологічної сталої Л.

Статистика гравітаційного лінзування. Світло від об'єктів з високим червоним зміщенням може лінзуватися великими концентраціями маси, такими як галактики або скупчення галактик. Це лінзування приводить до появи на небі декількох зображень одного і того самого об'єкта. Космологічна стала впливає на геометрію й еволюцію Всесвіту, таким чином роблячи статистику гравітаційного лінзування потужним засобом визначення меж значень космологічної сталої у нашому Всесвіті. Зокрема, до статистичного аналізу можна залучити спостережне число лінзованих джерел, червоні зміщення лінз та джерел, зоряні величини джерел, кутові розділення між парами зображень. Квазари з великим червоним зміщенням є хорошими джерелами випромінювання для вивчення гравітаційного лінзування, оскільки вони знаходяться на космологічних віддалях, а еліптичні галактики – хорошими лінзами. Хоча лінзування чутливе до значення космологічної сталої, існують певні невизначеності стосовно конкретних чисел та певна специфіка у кожній заданій космологічній моделі. Для того, щоб акуратно розрахувати "оптичну товщу" для лінзування фонового джерела, необхідно знати розподіл галактик-лінз, їхню просторову густину, розподіл гравітаційних потенціалів в лінзах, еволюцію параметрів в залежності від червоного зміщення. Існують також спостережні ефекти селекції, які треба враховувати кожного разу при розгляді певної вибірки джерел (наприклад, більш близькі лінзи легше ототожнити, ніж віддалені). Загалом, у теоретичних передбаченнях про гравітаційне лінзування ці невизначеності можуть приводити до похибки на рівні множника 2. Проте це не так погано, оскільки відносні передбачення для різних космологічних моделей можуть різнитися порядком величини: у випадку плоских моделей, всесвіт з  $\Omega_{\Lambda} = 1$  міс-

тить у 10 разів більше лінз, ніж всесвіт з  $\Omega_{\Lambda} = 0$  [15]. Кінець кінцем, оскільки більші значення  $\Omega_{\Lambda}$  відповідають більшій кількості гравітаційних лінз, цей метод надає життєздатний шлях визначення верхньої межі значення космологічної сталої.

Кочанек [16] виконав ретельний аналіз статистики гравітаційного лінзування, включаючи кількість лінз, їхні червоні зміщення, зоряні величини та кутові розділення пар зображень. Він дослідив різні моделі лінз та прийняв до уваги статистичні невизначеності числа лінз, галактик та квазарів, а також параметрів, що пов'язують світності галактик з їхніми динамічними характеристиками. В результаті цієї копіткої роботи він знайшов верхню межу космологічної сталої  $\Omega_{\Lambda} < 0.66$  на рівні достовірності 95%. Для моделей Весвіту з  $\Omega_{\Lambda} = 0$  він показав, що  $\Omega_M > 0.2$  з рівнем достовірності 90%.

Інші дослідники [23] використали вибірку із 7 лінзованих квазарів з метою тестування різних космологічних моделей. Для визначення  $\Omega_{\Lambda}$  і  $\Omega_{M}$  вони використовували комбіновані ймовірності того, що лінзовані системи мають спостережне розділення зображень, спостережні червоні зміщення лінзи та джерела і спостережні зоряні величини лінз. Для плоского Всесвіту вони знайшли, що  $\Omega_{\Lambda} = 0.64_{-0.26}^{+0.15}$ . Вони також встановили, що Всесвіт з  $\Omega_{M} = 1$  можна виключити на рівні достовірності у 97% і що відкриті моделі з домінуванням матерії є менш вірогідними, ніж плоскі моделі з ненульовою космологічною сталою.

Японські науковці виконали аналіз статистики лінз, використовуючи заново переглянуті дані про функцію світності та про внутрішні дисперсії швидкостей у галактиках, пов'язані із розподілом гравітаційного потенціалу [7]. Вони порівняли свої нові теоретичні передбачення повного числа лінз та розділень зображень з величинами, отриманими на космічному телескопі *Hubble* за програмою *Hubble Space Telescope Snapshot Lens Survey*. В результаті виявилося, що спостереження найкраще узгоджуються з плоскою моделлю Всесвіту, в якій Ω<sub>Λ</sub> ≈ 0.8. В подальшій роботі цих же авторів [8] подані нові обмеження на космологічну сталу, побудовані на переглянутих відомостях про функцію світності та внутрішню динаміку галактик типів E/S0. Порявняння моделей з існуючими оглядами лінз дозволило

їм зробити висновок, що найбільшу перевагу має плоска модель Всесвіту з  $\Omega_{\Lambda}=0.7^{+0.1}_{-0.2}$  .

У роботі [22] визначені межі значень Ω<sub>Λ</sub> і Ω<sub>M</sub>, що випливають із статистики лінзування. З цією метою автори використали огляд лінз всього неба *CLASS* (*Cosmic Lens All-Sky Survey*) та Слоунівський огляд *SDSS* (*Sloan Digital Sky Survey*) і провели аналіз даних про локальну функцію розподілу дисперсії швидкостей в галактиках типу E/S0. Для плоского Всесвіту автори знайшли, що Ω<sub>Λ</sub> = 0.74<sup>+0.09</sup><sub>-0.11</sub>, якщо 10 з 13 лінз огляду *CLASS* завдячують своїй появі

галактикам-лінзам ранніх типів, або  $\Omega_{\Lambda} = 0.78^{+0.07}_{-0.10}$ , якщо 12 лінз огляду – ранні галактики. Їхні результати добре узгоджуються з недавніми дослідженнями космологічної сталої за допомогою наднових зірок типу Ia, про що йтиме мова в наступному розділі.

Наднові зірки з великим червоним зміщенням. Один з впливів космологічної сталої полягає у зміні зв'язку між космологічною віддаллю та червоним зміщенням. В принципі, якщо є набір об'єктів які мають або стандартний власний розмір або стандартну власну світність, можна визначити космологічні віддалі до цих об'єктів. Якщо червоні зміщення цих об'єктів відомі, можна однозначно визначити космологічні параметри: сталу Хаббла  $H_0$  і параметри

густини  $\Omega_M$  та  $\Omega_\Lambda$ . Однак на практиці дуже важко знайти набір об'єктів, який би не потерпав від ефектів еволюції, тобто щоб всі його члени мали один і той самий розмір або одну й ту саму світність при всіх червоних зміщеннях. Проте виявилося що принаймі один такий набір, вільний від еволюційних ефектів, здається існує, і цей набір – наднові зорі типу Іа. Головна особливість поведінки цих наднових у тому, що їхня абсолютна зоряна величина, а значить і віддаль до них, може бути визначена за формою їхніх кривих блиску та за їхніми спектрами, що змінюються у часі.

У 1997 р. Перлматтер та інші [25] повідомили про те, що вони виділили перші 7 наднових зір типу la із загальної кількості 28 об'єктів, знайдених за програмою пошуку наднових з великим червоним зміщенням *Supernova Cosmology Project*. Для Всесвіту, що містить матерію і космологічну сталу, вони знайшли, що  $\Omega_{\Lambda} = 0.06^{+0.28}_{-0.34}$  або що відповідна верхня межа становить  $\Omega_{\Lambda} < 0.51$  (рівень достовірності 95%). Якщо у Всесвіті повністю домінує матерія, тоді  $\Omega_{M} = 0.88^{+0.69}_{-0.60}$ . Хоча цей результат ніби свідчив на користь того, що космологічна стала відсутня, проте великий рівень похибок не дозволив авторам зробити остаточний висновок. В подальшому, за рахунок накопичення все нових спостережних даних, величини похибок були суттєво зменшені, демонструючи неабияку могутність методу над-

нових зірок у питанні визначення космологічної сталої. В роботі [27] був використаний набір з 16 наднових з великим червоним зміщенням, знайдених за проектом *Highz Supernova Search*, і додатково набір з 34 близьких наднових з метою визначення обмежень на величину сталої Хаббла, густину маси, космологічну сталу, параметр сповільнення та динамічний вік Всесвіту. Використавши два різних методи підгонки кривих блиску наднових, у випадку плоского Всесвіту автори знайшли, що  $\Omega_{\Lambda} = 0.68 \pm 0.10$  і

 $\Omega_{\Lambda} = 0.84 \pm 0.09$ . Якщо не вимагати, що Всесвіт є просторово плоским, тоді  $\Omega_{\Lambda} > 0$  на рівні достовірності 98%.

У 1999 Перлматтер і його співпрацівники сповістили про результати аналізу спостережень 42 наднових зірок, відкритих за програмою *Supernova Cosmology Project* [26]. Вони знайшли, що у плоскому Всесвіті  $\Omega_{\Lambda} = 0.71^{+0.08}_{-0.09}$ . Якщо

ж відмовитись від умови  $\Omega_{_M} + \Omega_{_\Lambda} = 1$ , тоді з достовірністю 99% необхідно, щоб  $\Omega_{_\Lambda} > 0$ .

Тонрі та інші відкрили і проспостерігали 8 нових наднових зірок в інтервалі червоних зміщень z = 0.3 - 1.2 [30]. Ці незалежні спостереження, виконані схожим, але іншим методом, підтвердили результати про те, що фотометричні віддалі до наднових зірок свідчать на користь прискореного розширення Всесвіту. Якщо параметр у рівнянні стану темної енергії w = -1, тобто вона описується космологічною сталою, тоді  $\Omega_{\Lambda} - 1.4\Omega_{M} = 0.35 \pm 0.14$ . Якщо обмежитись розглядом плоского Всесвіту, тоді, незалежно від будь-яких вимірів великомасштабної структури,  $\Omega_{M} = 0.28 \pm 0.05$  або ж  $\Omega_{\Lambda} = 0.72$ .

Учасники групи *Supernova Cosmology Project* доповіли про виміри космологічних параметрів за даними про 11 наднових з червоними зміщеннями z = 0.36 - 0.86 [17]. Відповідні високоякісні криві блиску були отримані за допомогою фотометра WFPC2, встановленого на орбітальному телескопі *Hubble*. Припускаючи, що Всесвіт є плоским, а параметр рівняння стану темної енергії має стале значення w = -1, вони знайшли, що  $\Omega_{\Lambda} = 0.75^{+0.06}_{-0.07}$  (статистична похибка)  $\pm 0.04$  (ідентифіковані систематичні похибки).

Ще один результат, опублікований в [28], базується на відкритті та спостереженнях 16 наднових зірок на орбітальному телескопі *Hubble*. Припускаючи, що Всесвіт є плоским з космологічною сталою, було визначено, що  $\Omega_{\Lambda} = 0.71^{+0.05}_{-0.03}$ . Подальша робота в цьому напрямку дозволила авторам збільшити вибірку наднових зірок до 23 [29] і підтвердити оцінки, отримані в попередній роботі. Аналогічні висновки та результати містяться також у [9].

Космічне мікрохвильове фонове випромінювання. Кутовий спектр потужності анізотропії температури КМФ строго залежить від значень більшості космологічних параметрів та від фізичних процесів у ранньому Всесвіті. Таким чином, вивчення цього спектру є ефективним знаряддям для визначення обмежень на вибір реалістичних космологічних моделей (див., наприклад, огляд [14] та подані там посилання) і може допомогти у розв'язку питання про існування космологічної сталої кількома шляхами. ~ 32 ~

Наприклад, якщо адіабатичні збурення відповідають за великомасштабну структуру, тоді положення першого акустичного піку в спектрі КМФ може бути використане як модельно-незалежний зонд для визначення повної густини  $\Omega = \Omega_M + \Omega_\Lambda$ . На відміну від цього, діаграма Хаббла для наднових зірок з великими червоними зміщеннями дозволяє визначити головним чином параметр сповільнення  $q_0 = \Omega_M/2 - \Omega_\Lambda$ . Тому об'єднання цих двох вимірів може

надати тісні обмеження окремо на  $\Omega_{_M}$  та  $\Omega_{_\Lambda}$ .

Присутність космологічної сталої можна також вирізнити за допомогою КМФ через додаткову велико-кутову анізотропію, яка продукується цією сталою за рахунок раннього, інтегрованого в часі ефекту Сакса-Вольфа, викликаного збуреннями густини при червоних зміщеннях, менших за декілька одиниць. Якщо космологічна стала існує, повинна існувати певна взаємна кореляція між температурою КМФ і деякими індикаторами розподілу мас, наприклад позагалактичним рентгенівським фоном або слабким лінзуванням при цих червоних зміщеннях.

Балбі та інші [1] одними з перших застосували кутовий спектр потужності, отриманий під час першого польоту зонду *MAXIMA* (*Millimeter-wave Anisotropy Experiment Imaging Array*), для визначення найбільш вірогідних значень космологічних параметрів, максимізуючи правдоподібність спостережних даних. В результаті на рівні достовірності 95% вони отримали такі межі:  $0.45 < \Omega_{\Lambda} < 0.75$  і  $0.25 < \Omega_{M} < 0.50$ .

Нокс із співробітниками [18] використали комбінацію вимірів анізотропії космічного мікрохвильового фонового випромінювання із значенням сталої Хаббла  $H_0 = 72 \pm 8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ , отриманого за проектом *Hubble Space Tele*-

*scope Key Project* [11], і знайшли, що у плоскому Всесвіті  $\Omega_{\Lambda} > 0.4$  з достовірністю 95%.

Щоб зняти виродження стосовно вибору космологічної моделі, Мелькіоррі та інші [21] комбінували найбільш свіжі дані вимірів анізотропії КМФ із обмеженнями, які були отримані з функції мас скупчень галактик, визначеної завдяки даним Слоунівського огляду *SDSS* [2]. Це дозволило знайти значення низки космологічних параметрів, зокрема величину параметра густини матерії:  $\Omega_M = 0.26^{+0.06}_{-0.07}$ .

Одні з найбіль надійних оцінок космологічної сталої отримані за проектом *WMAP* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*). Вже дані першого року спостережень за цим проектом [24] дали всі підстави стверджувати, що ми живемо у плоскому Всесвіті, в якому домінує космологічна стала Λ та є певна кількість холодної темної матерії (скорочено, так званий ΛCDM-Всесвіт), а саме  $\Omega_{\Lambda} \approx 0.73$ ,  $\Omega_{M} \approx 0.27$ . Припускаючи плоску ΛCDM-космологію, вони знайшли

 $\Omega_{\Lambda} > 0$  (з рівнем достовірності 95%, тільки статистичні похибки) з піком правдоподібності при  $\Omega_{\Lambda} = 0.68$ . Спостереження за цим проектом тривають до сьогодні. Останні результати, що базуються на 5-річних спостереженнях і враховують також дослідження баріонних акустичних осциляцій та фотометрію наднових зірок, опубліковані в [19]. Якщо Всесвіт є просторово-плоским, тоді  $\Omega_{\Lambda} = 0.726 \pm 0.015$ . На сьогодні ця оцінка вважається найкращою і переконливо засвідчує наявність темної енергії у Всесвіті, яку репрезентує космологічна стала.

1. Balbi A., Ade P., Bock J. et al. Constraints on Cosmological Parameters from MAXIMA-1 // Astrophys. J. – 2000. – Vol. 545, No. 1. – P. L1–L4.

 Bahcall N. A., Dong F., Bode P. et al. The Cluster Mass Function from Early Sloan Digital Sky Survey Data: Cosmological Implications // Astrophys. J. -2003. – Vol. 585, No.1. – P. 182–190.

3. Carretta E., Gratton R. G., Clementini G., Fusi Pecci F. Distances, Ages, and Epoch of Formation of Globular Clusters // Astrophys. J. – 2000. – Vol. 533, No. 1. – P. 215–235.

4. Carroll S. M., Press W. H., Turner E. L. The Cosmological Constant // Ann. Rev. Astron. Astrophys. - 1992. - Vol. 30. - P. 499-542.

5. Chaboyer B. The Age of the Universe // Phys. Rept. - 1998. - Vol. 307, No. 1. - P. 23-30.

6. Chaboyer B., Demarque P., Keman P. J., Krauss L. M. The Age of Globular Clusters in Light of Hipparcos: Resolving the Age Problem? // Astrophys. J. – 1998. – Vol. 494, No. 1. – P. 96–110.

7. Chiba M., Yoshii Y. Do Lensing Statistics Rule Out a Cosmological Constant? // Astrophys. J. – 1997. – Vol. 489, No. 485–488.

Chiba M. Yoshii Y. New Limits on a Cosmological Constant from Statistics of Gravitational Lensing // Astrophys. J. – 1999. – Vol. 510, No. 1. – P. 42–53.
 9. Clocchiatti A., Schmidt B.P.; Filippenko A.V. et al. Hubble Space Telescope and Ground-based Observations of Type Ia Supernovae at Redshift 0.5:

Cosmological Implications // Astrophys. J. – 2006. – Vol. 642, No. 1. – P. 1–21.
 10. Einstein A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie // Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss. – 1917. – Vol. 1, No. 1. – S.

142-152. 14 Freedman W | Madore B E Gibson B K et al. Astronomy | Final Results from the Hubble Snace Telescone Key Project to Measure the Hubble

11. Freedman W. L., Madore B. F., Gibson B. K. et al. Astrophys. J. Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant // Astrophys. J. – 2001. – Vol. 553, No.1. – P. 47–72.

12. Gott J. R., Park M. G., Lee H. M. Setting Limits on  $q_0$  from Gravitational Lensing // Astrophys. J. – 1987. – Vol. 338, No. 1. – P. 1–12.

13. Gott J. R., Rees M. J. Astronomical constraints on a string-dominated universe // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. - 1987. - Vol. 227, No. 2. - P. 453-459.

14. Kamionkowski M., Kosowsky A. The Cosmic Microwave Background and Particle Physics // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. – 1999. – Vol. 49. – P. 77–123.

15. Kochanek C. S. Do the Redshifts of Gravitational Lens Galaxies Rule out a Large Cosmological Constant? // Astrophys. J. - 1992. - Vol. 384, No. 1. - P. 1-11.

16. Kochanek C. S. Is There a Cosmological Constant? // Astrophys. J. - 1996. Vol. 466, No. 2. - P. 638-659.

17. Knop R. A., Aldering G., Amanullah R. et al. Constraints on  $\Omega_M$ ,  $\Omega_\Lambda$ , and w from an Independent Set of 11 High-Redshift Supernovae Observed with the Hubble Space Telescope // Astrophys. J. – 2003. Vol. 598, No. 1. – P. 102–137.

18. Knox L., Christensen N., Skordis C. The Age of the Universe and the Cosmological Constant Determined from Cosmic Microwave Background Anisotropy Measurements // Astrophys. J. – 2001. – Vol. 563, No. 2. – P. L95-L98.

19. Komatsu E., Dunkley J., Nolta M. R. et al. Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Cosmological Interpretation // Astrophys. J. Supplement. – 2009. – Vol. 180, No. 2. – P. 330–376.

<sup>20.</sup> Krauss L. M. The End of the Age Problem, and the Case for a Cosmological Constant Revisited // Astrophys. J. - 1998. - Vol. 501, No. 2. - P. 461-466.

<sup>21.</sup> Melchiorri A., Bode P., Bahcall N. A., Silk J. Cosmological Constraints from a Combined Analysis of the Cluster Mass Function and Microwave Background Anisotropies // Astrophys. J. – 2003. – Vol. 586, No. 1. – P. L1–L4.

<sup>22.</sup> Mitchell, J. L., Keeton, C. R., Frieman, J. A., Sheth, R. K. Improved Cosmological Constraints from Gravitational Lens Statistics // Astrophys. J. – 2005. – Vol. 622, No. 1. – P. 81–98.

<sup>23.</sup> Myungshin I., Griffiths R. E., Ratnatunga K. U. A Measurement of the Cosmological Constant Using Elliptical Galaxies as Strong Gravitational Lenses // Astrophys. J. – 1997. – Vol. 475, No. 2. – P. 457–462.

24. Nolta M. R., Wright E. L., Page L. et al. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Dark Energy Induced Correlation with Radio Sources // Astrophys. J. - 2004. - Vol. 608, No. 1. - P. 10-15.

25. Perlmutter S., Gabi S., Goldhaber G. et al. Measurements of the Cosmological Parameters  $\Omega$  and  $\Lambda$  from the First Seven Supernovae at  $z \ge 0.35$  // Astrophys. J. – 1997. – Vol. 483, No. 2. – P. 565–581.

26. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae // Astrophys. J. – 1999 – Vol. 517, No. 2. – P. 565–586.

27. Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P. et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // Astron. J. – 1998. – Vol. 116, No. 3. – P. 1009–1038.

28. Riess A. G., Strolger L.-G., Tonry J. et al. Type la Supernova Discoveries at z > 1 from the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution // Astrophys. J. – 2004. – Vol. 607, No. 2. – P. 665–687.

Riess A.G., Strolger L.-G., Caserteno S. et al. New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at z ≥ 1: Narrowing Constraints on the Early Behavior of Dark Energy // Astroph. J. – 2007. – Vol. 659, No. 1. – P. 98–121.
 30. Tonry J. L., Schmidt B. P., Barris B. et al. Cosmological Results from High-z Supernovae // Astrophys. J. – 2003. – Vol. 594, No. 1. – P. 1–24.

30. Tonry J. L., Schmidt B. P., Barris B. et al. Cosmological Results from High-z Supernovae // Astrophys. J. – 2003. – Vol. 594, No. 1. – P. 1–24. Надійшла до редколегії 13.04.09

#### УДК 524.7

Б. Гнатик

### ДОСЛІДЖЕННЯ З АСТРОФІЗИКИ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Проведено огляд досліджень в галузі астрофізики високих енергій, які здійснювались останнім часом в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Розглянуто результати дослідження спектру та поширення космічних променів надвисоких енергій в міжгалактичному та галактичному магнітних полях, астрофізичні прояви космічних струн, еволюцію та жорстке рентгенівське та гама-випромінювання залишків Наднових зір, релятивістські ударні хвилі в оболонках Гіпернових зір. Дослідження проводяться в рамках програми «Космомікрофізика» з використанням спостережних даних відкритої в 2006 р. віртуальної рентгенівської та гамаобсерваторії (проект ВІРГО).

We review investigations in field of high energy astrophysics which have been made recently at the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko Kiev National University. We consider results of investigations of ultra high energy cosmic ray spectrum and their propagation in intergalactic and galactic magnetic fields, astrophysical signatures of cosmic strings, evolution and hard X-ray and gamma-ray radiation from Supernova remnants, relativistic shock waves in envelopes of Hypernova stars. Researches are curried out within the frame of the program "Kosmomikrofizyka" ("Astroparticle physics") with use of the observational data of the Virtual Roentgen- and Gamma-ray Observatory (project VIRGO) opened in 2006.

1. Вступ. Останніми десятиліттями помітно зросла доля астрономічних досліджень в області астрофізики високих енергій. Ранні етапи еволюції Всесвіту, фізичні процеси в околі релятивістських об'єктів, прискорення та нетеплове випромінювання релятивістських частинок (космічних променів) в астрофізичних умовах, природа та астрофізичні прояви темної матерії та темної енергії – неповний перелік проблем, на вирішення яких направлені значні експериментальні (космічні місії рентгенівської та гама-астрономії XMM Newton, Chandra, INTEGRAL, FERMI, наземні черенковські телескопи TeBhoro діапазону H.E.S.S., VERITAS, MAGIC, детектори гравітаційних хвиль VIRGO, LISA, космічних променів AGASA, HIRES, AUGER, нейтрино IceCube та багато інших) та теоретичні зусилля. В Україні ці дослідження проводяться відповідно до Міжгалузевого координаційного плану фундаментальних досліджень у галузі космології, релятивістської астрофізики і гравітації «Космомікрофізика», затвердженого НАН України, МОН України та Київським національним університетом мені Тараса Шевченка в 2005 р. та Цільової комплексної програми «Космомікрофізика» НАН України (2007–2009 pp.)

Суттєвому підвищенню рівня досліджень в галузі астрофізики високих енергій та залученню до них студентів сприяло відкриття на фізичному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка в 2006 р. Віртуальної рентгенівської та гамма-обсерваторії (ВІРГО)- наукового комп'ютерного центру астрофізики високих енергій для підтримки досліджень в області космомікрофізики та використання даних космічних місій в рентгенівському та гама-діапазонах, зокрема, місії INTEGRAL (обладнання закуплено на кошти гранту Женевської обсерваторії та Центру даних місії INTEGRAL) [18]. ВІРГО служить експериментальною базою досліджень з космомікрофізики, забезпечуючи науковців даними спостережень, тобто, є сучасним варіантом вирішення проблеми доступу астрономів до даних спостережень вже відпрацьованих та діючих космічних місій. В нашій роботі приведено огляд досліджень в галузі астрофізики високих енергій, які проводяться в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

**2.** Дослідження космічних променів надвисоких енергій. Однією з актуальних проблем астрофізики високих енергій залишається пояснення природи, механізмів прискорення та джерел космічних променів [12]. Спостережуваний енергетичний спектр космічних променів близький до степеневого і простягається до енергій понад 10<sup>20</sup> еВ, виявляючи ряд особливостей – укручення спектру на енергіях 10<sup>15.5</sup> еВ та 10<sup>17.8</sup> (т. зв. перше та друге коліно "knee"), виположування на енергії біля 10<sup>19</sup> еВ ( т.зв. щиколотка "ankle") та достатньо різкий обрив на енергії 10<sup>19.6</sup> еВ. Коли високоенергетичний обрив спектру космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) природно пояснюється т.зв. обрізанням Грейзена-Зацепіна-Кузьміна (ГЗК-обрізання) внаслідок взаємодії КПНВЕ з фотонами мікрохвильового випромінювання при досягненні порогу піонного народження, то прогин ("dip") в області щиколотки не має однозначного пояснення. В наших роботах [11, 13, 14] прогин пояснено взаємодією протонного компонента КПНВЕ з мікрохвильовим випромінюванням вище енергії народження електрон-позитронних пар. В такій інтерпретації протони повинні домінувати в загальному потоці КПНВЕ і положення щиколотки (максимуму прогину) в спектрі визначається тільки

перетином протон-фотонної взаємодії, який для розсіяння на фотонах мікрохвильового (реліктового) випромінювання досягає максимуму саме біля 10<sup>19</sup> еВ Цей факт ми використали для калібрування спектрів КПНВЕ, отриманих на різних детекторах і показали, що форми цих спектрів подібні між собою і відповідають енергетичній залежності перетину протон-фотонної взаємодії, а існуючі зараз розбіжності в амплітудах спектрів детекторів AGASA, Yakutsk, HiRes та AUGER пояснюються систематичними похибками цих детекторів у вимірюванні енергії КПНВЕ.

Обґрунтування протонної моделі КПНВЕ дозволило вирішити ще одну проблему фізики космічних променів – встановити область переходу від галактичного до позагалактичного компонента в загальному потоці КПНВЕ [13, 14]. В нашій моделі це відбувається в області енергій 10<sup>17.7</sup> еВ, де падаючий галактичний потік із домінуванням ядер заліза (про це свідчать дані установки KASCADE) зрівнюється з наростаючим потоком позагалактичних протонів.

На траєкторії та час руху КПНВЕ в міжгалактичному та міжзоряному середовищі нашої Галактики, а, тим самим, і на спостережуваний спектр КПНВЕ суттєво впливають магнітні поля [17]. В наших роботах [1, 6, 7] на основі чисельного моделювання поширення космічних променів (протонів та ядер) в галактичному і міжгалактичному магнітних полях досліджено вплив міжгалактичного та галактичного магнітних полів на очікувану анізотропію КПНВЕ, оцінено кореляцію напрямків приходу КПНВЕ з різними класами астрофізичних об'єктів: активних ядер галактик, надсвітних інфрачервоних галактик тощо, відмічені ймовірні джерела КПНВЕ серед близьких активних ядер галактик та надсвітних інфрачервоних галактик.

**3. Космічні струни**. Фазові переходи в ранньому Всесвіті можуть супроводжуватись виникненням т.зв. топологічних дефектів – монополів, доменних стінок, космічних струн [19]. Топологічні дефекти, зокрема, космічні струни можуть мати широкий спектр астрофізичних проявів. Перш за все, космічні струни та їх петлі можуть проявитись шляхом гравітаційного лінзування. Зокрема, в роботі [20] аномальні синхронні коливання блиску двох гравітаційнолінзованих зображень квазара Q0957+561 A,B пояснені прольотом біля осі квазар-спостерігач осцилюючої петлі космічної струни. Періодичні зміни гравітаційного поля петлі викликають синхронні зміни із цим же періодом в блиску зображень, на відміну від несинхронних неперіодичних розділених часом затримки змін блиску зображень внаслідок змінності самого квазара. Тому дослідження ефектів гравітаційного лінзування є одними з найперспективніших щодо експериментального виявлення космічних струн.

Астрофізичні прояви надпровідних космічних струн проаналізовані в [8, 9, 15, 16]. Внаслідок осциляцій в міжгалактичних магнітних полях в надпровідних петлях виникають сильні електричні струми, які породжують потужні імпульси колімованого електромагнітного випромінювання від прикаспових областей, які, в свою чергу, породжують в міжгалактичному середовищі релятивістські струмені плазми з параметрами, близькими до очікуваних в джерелах космологічних гама-спалахів. Крім гама-спалахів, в таких струменях створюються умови для прискорення КПНВЕ [15, 16].

Магнітне поле космічної струни із струмом створює циліндричний аналог магнітосфери Землі, і при русі струни в міжгалактичній плазмі із субрелятивістською швидкістю виникає головна ударна хвиля навколо магнітосфери струни, на фронті якої прискорюються заряджені частинки (космічні промені). Нетеплове випромінювання прискорених частинок – ще один астрофізичний прояв космічних струн, розрахований нами в [8,9]. Таке випромінювання (головним чином, синхротронне, обернене комптонівське на зовнішніх – реліктових, інфрачервоних та ін. фотонах, а також синхротронне само-комптонівське) має широкий спектральний інтервал – від радіо- до ТеВ-ного гамавипромінювання. Особливо потужним воно очікується від прикаспових областей, що відкриває можливості його реєстрації сучасними детекторами.

4. Залишки Наднових та галактичні космічні промені. Космічні промені з енергіями до 10<sup>17</sup>–10<sup>18</sup> еВ, як вважається, прискорюються в нашій Галактиці [18]. Найбільш ймовірними їх джерелами вважаються залишки Наднових зір. Повна енергетика та частота вибухів Наднових, наявність в залишках Наднових ударних хвиль та магнітних полів потрібної величини відповідають вимогам до джерел галактичних космічних променів. Більше того, широкосмугові (від радіо- до ТеВного діапазону) спостереження нетеплового (синхротронного та оберненого комптонівського) випромінювання залишків підтверджують наявність в них релятивістських електронів із степеневим спектром та максимальними енергіями понад 10 ТеВ. Однак переконливих доказів присутності релятивістського протонного компонента в залишках Наднових з максимальними енергіями понад 1 ПеВ (10<sup>15</sup> еВ), тобто, доказів того, що саме залишки Наднових є «космічними ПеВатронами», досі немає. Синхротронне випромінювання релятивістських протонів незначне, а зафіксоване від деяких залишків ТеВне гама-випромінювання, яке могло б свідчити про непружні протонпротонні зіткнення з народженням і подальшим розпадом нейтральних піонів, можна інтерпретувати і як обернене комптонівське випромінювання релятивістських електронів. Тільки більш детальні моделі залишків та додаткові спостереження в ГеВному діапазоні (що зараз здійснює місія FERMI) дозволять встановити ефективність прискорення адронного компонента космічних променів в залишках Наднових. В наших роботах [3-5, 21] проведено гідродинамічне моделювання еволюції залишків Наднових в неоднорідному міжзоряному середовищі і показано, що між класичними адіабатичною та радіаційною стадіями еволюції немає швидкого переходу, а, насправді, виділяється нова достатньо тривала – порядку тривалості адіабатичної стадії – перехідна стадія, під час якої суттєва частина гарячого газу в прифронтовій області залишку охолоджується і приєднується до холодної оболонки, утвореної з нагребеного газу. Внаслідок цього тиск плазми за фронтом ударної хвилі падає і швидкість хвилі на початку перехідної стадії спочатку різко зменшується приблизно вдвічі, а надалі залишається приблизно постійною, оскільки зворотна ударна хвиля всередині залишку підтримує приблизно постійний тиск охолодженого газу. Це триває до завершення перехідної стадії, тобто, до моменту припинення швидкого охолодження плазми за фронтом зворотної ударної хвилі. Надалі холодна оболонка збільшує свою масу тільки за рахунок згрібання зовнішнього до фронту міжзоряного газу і її динаміка описується рівняннями класичної радіаційної стадії.

Фізичні процеси формування холодної оболонки на перехідній стадії суттєво впливають на генерування ТеВного гама-випромінювання залишку. Разом з початково гарячим газом в новоствореній холодній оболонці опиняється і зв'язана з ним доля космічних променів. Зростання концентрації частинок-мішеней в оболонці в десятки чи навіть сотні разів приводить до пропорційного зростання частоти протон-протонних зіткнень і, тим самим, до багатократного підсилення ТеВного гама-випромінювання залишків Наднових на перехідній стадії. Додатковим фактором підсилення гама-випромінювання служить зростання ченергії космічних променів внаслідок бетатронного механізму при зростанні густини і, відповідно, напруженості магнітного поля в плазмі, що охолоджується. Нами розраховані потоки та спектри ТеВного гама-випромінювання залишків Наднових на перехідній стадії та показано, що спостерігається значне підсилення гамма-випромінювання, яке досягає максимуму на завершенні перехідної стадії. Тому «космічні ПеВатрони» можуть бути виявлені і серед залишків на перехідній стадії [4, 21], а не тільки на початку адіабатичної, як вважалось раніше.

5. Гіперонові зорі. Спостереження останніх років показали, що деякі особливо потужні спалахи наднових, класифіковані як Гіперонові, супроводжуються формуванням двох вузько колімованих релятивістських струменів, відповідальних за довготривалі гама-спалахи. В той же час збільшена енергетика вибуху (E>10<sup>52</sup> ерг) приводить до того, що сферично-симетрична ударна хвиля, яка зумовлює скинення оболонки зорі, при виході на поверхню зоріпопередника Гіпернової досягає помірно релятивістських швидкостей [22]. В наших роботах [2, 10] показано, що у випадку достатньо компактної переднаднової (з достатньо швидким падінням густити в зовнішніх шарах зорі) частинки плазми прискорених релятивістською ударною хвилею зовнішніх шарів зорі набувають релятивістських швидкостей з Лоренц-факторами до тисяч і більше. Непружні зіткнення цих релятивістських частинок (протонів та ядер) із частинками-мішенями навколозоряного середовища приводитимуть до генерування короткотривалого адронного (внаслідок розпаду нейтральних піонів) спалаху гама-випромінювання в ГеВ – ТеВ діапазоні, який супроводжуватиме початковий розвиток спалаху Гіпернової в оптичному, ультрафіолетовому та рентгенівському діапазонах. Передбачений нами спалах, на відміну від класичних колімованих гама-спалахів, породжених релятивістськими струменями, не буде колімованим, тому реєстрація таких спалахів суттєво полегшується і, в разі виявлення, допоможе уточнити природу Гіпернових та частоту пов'язаних з ними довготривалих гама-спалахів.

Робота частково підтримана програмою НАН України "Дослідження структури та складу Всесвіту, прихованої маси і темної енергії" (Космомікрофізика).

1. *Гнатик Б.І., Єлиїв А.А.* Відхилення космічних променів надвисоких енергій у магнітному полі галактики // Кинематика и физика небес. тел. – 2006. – Т. 22, № 3. – С. 204–207.

 Гнатик Б.І., Марченко В.В. Гідродинамічна колімація релятивістських струменів при спалахах Гіпернових зір // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2005. – Вип. 41. – С. 21–24.

 Снатик Б.І., Петрук О.Л., Тележинський І.О. Перехід залишків Наднових з адіабатичної до радіаційної стадії еволюції. Аналітичний опис // Кинематика и физика небес. тел. – 2007. – Т. 23, № 4. – С.195–206.
 4. Гнатик Б., Тележинський І. Гама-випромінювання постадіабатичних залишків Наднових // Журн. фізичних досліджень. – 2007. – Т. 11, № 3.

- с. 343–349.
 5. Гнатик Б./. Тележинський І.О. Несферичні радіаційні Залишки спалахів Наднових // Кинематика и физика небес. тел. – 2007. – Т. 23. № 6.

 Гнатик Б.І., Тележинськии І.О. Несферичні радіаціині Залишки спалахів Наднових // Кинематика и физика небес. тел. – 2007. – Т. 23, № 6. – С. 367–380.

6. *Єлиїв А.А., Гнатик Б.І.* Кореляція космічних променів надвисоких енергій з різними класами позагалактичних об'єктів: внесок найближчих та найяскравіших членів вибірок // Кинематика и физика небес. тел. – 2006. – Т. 22, № 4. – С. 297–307.

7. *Елиїв А.А., Гнатик Б.І.* Формування спектру космічних променів в області високих енергій: вплив міжгалактичних магнітних полів та очікуваний вклад окремих джерел // Кинематика и физика небес. тел. – 2007. – Т. 23, № 2. – С.83–94.

 Задорожна Л., Гнатик Б., Нетеплове випромінювання надпровідних космічних струн в замагніченому міжгалактичному середовищі // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2006. – Вип. 42. – С. 15–20.
 Задорожна Л.В., Гнатик Б.І. Електромагнітне випромінювання космічних струн // Український фізичний журн. – 2009. – Т. 54. – № 9.

9. Задорожна Л.В., Гнатик Б.І. Електромагнітне випромінювання космічних струн // Український фізичний журн. – 2009. – Т. 54. – № 9. – С. 1044–1052.

10. *Марченко В.В., Гнатик Б.І.* Спостережні прояви виходу релятивістської ударної хвилі на поверхню Гіпернової зорі // Кинематика и фізика небес. тел. – 2006. – Т. 22, № 2. – С.125–137.

11. Aloisio R., Berezinsky V. Blasi P. Gazizov A. Grigorieva S., Hnatyk B. A dip in the UHECR spectrum and the transition from galactic to extragalactic cosmic rays // Astroparticle Physics. – 2007. – Vol. 27, N 1. – P. 76–91.

12. Berezinsky V. Propagation and origin of ultra high-energy cosmic rays // Adv.Space Res. - Vol. 41. - N 12. - P. 2071-2078.

13. Berezinsky V. S., Grigorieva S., Hnatyk B.I. Extragalactic UHE proton spectrum and prediction for iron-nuclei flux at 10<sup>8</sup> – 10<sup>9</sup> GeV // Astroparticle Phys. – 2004. – Vol. 21, N 6. – P. 617–625.

14. Berezinsky V.S., Grigorieva S.I., Hnatyk B.I. Extragalactic UHE proton spectrum and prediction of flux of iron-nuclei at 10<sup>8</sup> – 10<sup>9</sup> GeV // Nuclear Phys. B. Proceed. Suppl. – 2006. – Vol. 151, N 1. – P. 497–500.

15. Berezinsky V., Hnatyk B., Vilenkin A. Gamma ray bursts from super conducting cosmic strings // Phys. Rev. D. – 2001. – Vol. D64. – N 4. – P. 043004-043016.

16. Berezinsky V.S., Hnatyk B.I., Vilenkin A. Superconducting Cosmic Strings as Gamma Ray Burst Engines // Baltic Astronomy. – 2004. – Vol. 13. – P. 289–292.

17. Das S., Kang H., Ryu D., Cho J. Propagation of Ultra-High-Energy Protons through the Magnetized Cosmic Web // Astrophys. J. – 2008. – Vol. 682. – N 1. – P. 29-38.

18. Hillas A. M. Cosmic Rays: Recent Progress and some Current Questions // eprint arXiv:astro-ph/0607109.-2006

19. <u>Sakellariadou M.</u> Cosmic Strings and Cosmic Superstrings // Nuclear Physics B Proceedings Supplements. – 2009. - Vol. 192. - P. 68-90.

20. Schild R., Masnyak I. S., Hnatyk B., Zhdanov V. Anomalous fluctuations in observations of Q0957+561 A,B: Smoking gun of a cosmic string? // Astronomy and Astrophysics. – 2004. – Vol. 422. – P. 477–482.

21. . Telezhinsky I., Hnatyk B. High Energy Signatures of Post-Adiabatic Supernova Remnants // Mod. Phys. Lett. A. – 2007. – Vol. 22, №35. – P. 2617–2629.

22. Wang X.-Y., Razzaque S., Mészáros P.; Dai Z.-G. High-energy cosmic rays and neutrinos from semirelativistic hypernovae // Phys. Rev. D. –2007. – Vol. 76. – N 8. – P. 083009

23. http://www.virgo.bitp.kiev.ua

УДК 520.82 + 520.86 + 521.81 + 521.95

В. Данилевський

### ВИЗНАЧЕННЯ ДІАМЕТРА СОНЦЯ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ СОНЯЧНИХ ЗАТЕМНЕНЬ

Проблема визначення діаметра сонячного диска та виявлення можливих його змін була важливою в історії науки і залишається актуальною на сучасному етапі астрономічних досліджень. У статті коротко викладені історія становлення та суть методу фотометричних спостережень затемнень Сонця, що використовується в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету для визначення діаметра сонячного диска. Наведені структурна схема та характеристики обладнання, вимоги до процедури спостережень, рівняння кривої блиску і коротко викладе но метод визначення радіуса сонячного диска. Радіус сонячного диска для відстані 1 а. о. становить 959".70±0".12 за спостереженнями затемнення 11 липня 1991 р. та 959".66±0".03" за спостереженнями затемнення 11 серпня 1999 р. Ці результати порівнюються з результатами інших методів.

Problem of solar diameter determination and its probable variations discovering was importance for science history and remains actual at present-day phase of astronomical investigations. The history of settling and content of the technique of solar eclipse photometric observations, that is used in Astronomical observatory of National Taras Shevchenko university of Kyiv for solar disk diameter determination, are stated. Structure chart and properties of equipment, requirement to observational procedure, light curve equation have been outlined and solar disk radius determination tecnique has been stated briefly. Solar disk radius at distance 1 AU is equal to 959".70±0".12 from July 11, 1991 eclipse obsrvations and 959".66±0".03 from August 11, 1999 eclipse obsrvations. The results obtained are compared with results of other techniques.

Вступ. Діаметр – один з основних параметрів, який характеризує Сонце як зорю і визначається безпосередньо з астрономічних спостережень. Моделі внутрішньої будови Сонця калібруються за його діаметром, визначеним з астрономічних спостережень у оптичному спектрі випромінювання, і похибки вимірювань діаметра видимого з Землі сонячного диска накладають обмеження на точність параметрів цих моделей [14, 16, 18]. Виявлення можливих змін діаметра Сонця на проміжках часу від 11/22-річного циклу до періодів ~10<sup>6</sup> р. та співставлення їх зі змінами його світності є однією з важливих задач при дослідженні сонячно-земних зв'язків, зокрема впливу таких змін на клімат Землі [2, 10]. Отже, визначення діаметра сонячного диска з астрономічних спостережень – це актуальна задача для астрономічної науки, і важливим при її вирішенні є створення нових методів спостережень та обробки даних, які б забезпечували точніше визначення цього параметра, зокрема за рахунок зменшення похибок від впливу земної атмосфери. У Астрономічній обсерваторії Київського національного універститету імені Тараса Шевченка для визначення діаметра Сонця використовується метод фотометричних спостережень повних сонячних затемнень, який у значній мірі вільний від впливу земної атмосфери.

Робота над визначенням діаметра Сонця у Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка була розпочата наприкінці 1980-х років як розділ програми досліджень глобальних змін параметрів Сонця, зокрема геліосейсмологічних досліджень. Програма досліджень варіацій діаметра Сонця була запланована у ГАО НАНУ та в АО КНУ як спільна робота на довгий проміжок часу (роки й десятиріччя). Про це свідчить Записка до конкурсу програм спостережень затемнення Сонця, написана 10 грудня 1990 р. завідувачем відділу фізики Сонця ГАО НАНУ Е.А. Гуртовенком й надіслана В.В. Тельнюкові-Адамчукові, тодішньому директорові АО. У Записці пропонується як перший крок використати спостереження поблизу протилежних границь смуги повного затемнення Сонця з метою визначення її ширини з високою точністю. Як вважалося, це дозволяє визначити діаметр Сонця з похибкою порядку 0".01 (для відстані в 1 а.о.), якщо використати сучасні числові теорії руху Землі й Місяця та дані про фігуру Місяця й нерівності його рельєфу у крайовій зоні. Таким методом вже користувалися на той час група дослідників з США [19], визначаючи візуально, або за допомогою відеозаписів, моменти 2-го і 3-го контактів (тобто тривалість повної фази затемнення у місцях спостережень). Київські ж вчені для спостережень затемнень Сонця з метою визначення діаметра Сонця вирішили використати фотометричний метод. В АО КНУ були сконструйовані та виготовлені спеціальні експедиційні фотометри [1]. Вперше з цими фотометрами були виконані спостереження затемнення 11 липня 1991 р. у Мексиці з трьох місць поблизу північної межі смуги повного затемнення (район міста Вілла Інсургентес, південна Каліфорнія) та у одному поблизу центральної лінії у м. Ла Пас. Е.А. Гуртовенком, В.В. Тельнюком-Адамчуком та П.О. Олійником (АО Львівського ун-ту) за допомогою двох аматорів зі США [3, 8] Спосіб опрацювання даних цих спостережень та результати викладені у публікаціях [4, 5, 17].

Метод визначення діаметра Сонця за фотометричними спостереженнями сонячних затемнень та одержані результати. Метод визначення діаметра сонячного диска за цими спостереженнями полягає у тому, що до кожної зі спостережних кривих блиску сонячного серпа за методом найменших квадратів підбирається модельна крива блиску, описана інтегральним рівнянням, одним з параметрів якого є радіус видимого сонячного диска. Це рівняння має такий вигляд [7]:

$$F(t) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{S_{ph}(\lambda) \cdot p(\lambda, t) \cdot B_0(\lambda)}{D^2(t)} \times \left\{ \int_{R_M(t) - \Delta(t)}^{R_S(t) + H_{Chr}} b(\lambda, r) \cdot 2r \cdot \operatorname{arcCos}\left[\frac{R_M^2(t) - r^2 - \Delta^2(t)}{2r \cdot \Delta(t)}\right] \cdot dr + J_{ML}(\lambda, t) \right\} \cdot d\lambda + F_{tph}(t)$$

де  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – межі спектральної чутливості фотометра; D(t) – відстань від місця спостережень до Сонця на час t;  $S_{ph}(\lambda)$  – спектральна чутливість фотометра;  $p(\lambda, t)$  – прозорість земної атмосфери у місці спостережень на час затемнення;  $R_S(t)$ ,  $R_M(t)$  – відповідно топоцентричні радіуси видимих дисків Сонця та Місяця;  $\Delta(t)$  – кутова топоцентрична від-

стань між їхніми центрами на момент спостережень;  $H_{Chr}$  – висота хромосфери за межами видимого диска Сонця;  $B_0(\lambda)$  – спектральна яскравість центра сонячного диска;  $b(\lambda,r)$  – радіально-симетрична функція розподілу спектральної яскравості по сонячному диску відносно яскравості у його центрі;  $J_{ML}(t)$  – поправка до блиску сонячного серпа за рахунок нерівностей краю місячного диска, обчислена за картами Ватса рельєфу Місяця поблизу краю його диска. Така процедура визначення параметрів моделі полягає у розв'язанні некоректно поставленої задачі, для якої похибка результату розв'язку може набагато перевищувати похибки окремої кривої блиску, одержаної зі спостережень. Тому для підвищення достовірності радіус сонячного диска визначається як середнє із його значень, знайдених за кожною з декількох кривих блиску, побудованих для даного затемнення.

Однак при використанні такої методики криві блиску повинні бути прокалібровані за блиском цілого сонячного серпа з метою виключення коефіцієнта прозорості земної атмосфери у місці спостережень та абсолютної чутливості фотометрів на час затемнення. Для цього крім блиску сонячного серпа під час затемнення необхідно було також реєструвати сигнал кожного фотометра від Сонця протягом тривалого часу (близько 2-х годин) до та після затемнення, а потім інтерполювати за цими даними сигнал фотометра на час затемнення. На жаль, під час спостережень затемнення 11 липня 1991 р. такі вимірювання не були виконані, тому радіус Сонця за цими даними був визначений з відносно невисокою точністю і становив 959".70±0".12 для відстані 1 а. о. [4, 5, 17].

Повністю зазначену методику вдалося реалізувати під час повного затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. Спостереження цього затемнення були успішно виконані експедицією КНУ імені Тараса Шевченка в Румунії у 6-ти місцях [12]. Під час підготовки до спостережень цього затемнення конструкція фотометрів була удосконалена (структурна схема апаратури показана на рис. 1), що підвищило точність фотометрування та забезпечило можливість встановлення зв'язку внутрішньої шкали часу фотометра зі шкалою UTC з похибкою, не більшою за 1 с. Після спостережень були старанно виміряні спектральні криві чутливості фотометрів та їхні фотометричні шкали у всьому динамічному діапазоні, який складає приблизно 5·10<sup>6</sup>, і дало можливість визначити точність калібрування кривих блиску (середньоквадратичні похибки не перевищують ± 8%) [6]. За цими даними радіус сонячного диска був визначений зі значно вищою точністю, ніж для попереднього затемнення: 959".66±0".03 [7].



Рис. 1. Схема фотометричної апаратури, використаної для спостережень затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. R – опори зворотнього зв'язку, К – перемикач коефіцієнта зворотнього зв'язку (піддіапазонів чутливості), БПС – блок перетворення сигналу, UTC – кнопка для звірки шкали часу фотометра зі шкалою Всесвітнього часу UTC

Також за зазначеною методикою були виконані експедицією КНУ імені Тараса Шевченка фотометричні спостереження повного затемнення Сонця 29 березня 2006 р. в Туреччині, поблизу міст Анталія (північна межа смуги повного затемнення) та Аланія (південна межа) [9]. Під час цих спостережень сигнали фотометрів реєструвалися за допомогою портативних комп'ютерів – ноутбуків. Це дозволило розширити динамічний діапазон зареєстрованих кривих блиску та значно підвищити точність їхнього хронометрування шляхом використання GPS-приймачів. Проте ці спостереження виявилися не настільки успішними, як у 1999 р. – криві блиску цього затемнення були зареєстровані лише у 5-ти місцях – у 3-х біля південної та у 2-х біля північної межі смуги повного затемнення. Зокрема, через складний рельєф місцевості поблизу Анталії не вдалося найкращим чином вибрати місця для спостережень. Дані цих спостережень ще опрацьовуються.

Уявлення про якість та достовірність результатів, одержаних за нашим методом, дає рис. 2. Тут нанесені результати визначення радіуса сонячного диска для відстані 1 а.о., одержані за найпоширенішими сучасними методами протягом останніх приблизно 40-ти років. Як видно, результати методу фотометричних спостережень сонячних затемнень дуже добре узгоджуються з результатами, одержаними зі спостережень поблизу країв смуги таких затемнень іншим методом (реєстрування моментів 2-го і 3-го контактів з портативними телескопами візуально або запис перебігу затемнення поблизу повної фази з відеокамерами), та з класичним результатом Ауверса, одержаним за більш як 3000 вимірювань діаметра сонячного диска, виконаними з геліометрами більш як 100 років тому [13]. Близькі результати одержані також так званим методом дрейфового сканування за допомогою сонячного телескопа та ПЗЗ-камери [20] та за спостереженнями протягом 80-х років 20-го ст. з монітором сонячного диска – спеціальним приладом, створеним у США [15]. Результати ж інших методів показують істотні розбіжності як між собою, так і з зазначеними даними. Слід зазначити проте, що на рис.2 нанесені лише дані, які з достатньою точністю можуть бути прив'язані до певної епохи, тобто або одержані під час спостережень в цю епоху, або ж усереднені за порівняно невеликий проміжок часу спостережень (щонайбільше 5-6 років, як для монітора сонячного диска або спостережень з астролябіями). Однак діаметр сонячного диска визначається і як середнє значення на проміжку часу в декілька сторіч, зокрема за спостереженнями проходжень Меркурія перед сонячним диском. Ряд таких спостережень охоплює більше як три сторіччя, і останній аналіз цих даних з метою визначення радіуса сонячного диска та його можливих варіацій був виконаний у [11].



Рис. 2. Порівняння значень радіуса сонячного диска для відстані 1 а. о., одержаних різними методами: 1 – стандартний радіус сонячного диска за Ауверсом; 2 – за фотометричними спостереженнями поблизу країв смуги повного затемнення (АО КНУ); 3 – за візуальними та відео-спостереженнями поблизу країв смуги затемнень Сонця; 4 – за спектрокінематографічними спостерженнями затемнень Сонця; 5 – візуальні вимірювання з астролябією (Чилі); 6 – вимірювання з сонячною астролябією з ССD-детектором (Салерн, Франція); 7 – вимірювання з сонячною астролябією з ССD – детектором (Бразилія); 8 – вимірювання з сонячною астролябією з ССD-детектором (Анталія, Туреччина); 9 – вимірювання методом дрейфового сканування (візуальні спостереження); 10 – метод дрейфового сканування з ССD-детектором; 11 – вимірювання з приладом "Монітор сонячного диска" (SDM), США

Висновки. Визначення діаметра Сонця, пошуки його варіацій на різних часових проміжках та виявлення пов'язаних з цим змін світності Сонця і клімату Землі завжди будуть актуальними для науки. Результати таких досліджень досі не дають достовірних висновків щодо існування та амплітуд таких змін, а тому потрібно продовжувати докладати зусилля для удосконалення вже випробуваних та пошуки нових методів визначення розмірів, форми і світності сонячного диска щоб підвищити точність визначення цих параметрів. Одним з перспективних методів є метод фотометричних спостережень затемнень Сонця, напрацьований у Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Обидва результати, одержані для відстані 1 а. о. цим методом за спостереженнями повних затемнень Сонця 11 липня 1991 р. (959".70±0".12) та 11 серпня 1999 р. (959".66±0".03), узгоджуються з результатами більшості інших сучасних методів та близькі до класичного результату Ауверса. Звичайно, недоліком цього методу є істотна залежність ймовірності успішних спостережень від погодних умов та розташування смуги затемнення на земній поверхні, одначе перші результати вказують на його достатньо адекватну точність та на можливі резерви її підвищення. Зокрема, сучасні засоби пересування дозволяють виконувати такі спостереження навіть у віддалених та важкодоступних раніше місцях на земній поверхні.

1. *Буздуган Ю. О., Окулов С. М., Клещонок В. В.* Експедиційний фотометр для спостереження сонячного затемнення // Вісн. Київ. ун-ту. Фіз.-мат. науки. – 1992. – № 6. – С. 92–95.

3. Гуртовенко Э. А., Тельнюк-Адамчук В. В., Окулов С. М., Буздуган Ю. А., Олийнык П. А. Наблюдения солнечного затмения 11 июля 1991 г. в Мексике с целью определения солнечного диаметра // Астрон. циркуляр. – 1991. – № 1550. – С. 29–30.

8. Дзюбенко М.І., Курочка Л.М., Тельнюк-Адамчук В.В. Спостереження сонячного затемнення 11 липня 1991 р. експедицією Київського університету // Вісн. Київ. ун-ту. Фіз.-мат. науки. – 1992. – № 6. – С. 100–102.

<sup>2.</sup> Вариации глобальных характеристик Солнца //Атрощенко И. Н., Гадун А. С., Гопасюк С. И. и др. / Отв. ред. Гуртовенко Э. А. – К.: Наукова Думка, 1992. – 304 с.

<sup>4.</sup> Данилевський В. О. Обробка даних фотоелектричних спостережень та аналіз кривих блиску повного сонячного затемнення 11 липня 1991 року // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 1999. – Вип. 35. – С. 51–59.

<sup>5.</sup> Данилевський В. О. Попередні результати визначення діаметра Сонця за даними спостережень сонячного затемнення 11 липня 1991 року // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 1999. – Вип. 35. – С. 59–65.

<sup>6.</sup> Данилевський В. О. Характеристики фотометрів, використаних для спостережень повного затемнення Сонця 11 серпня 1999 р. // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2003. – Вип. 39–40. – С. 20–24.

<sup>7.</sup> Данилевський В. О. Визначення радіуса сонячного диска за фотометричними спостереженнями повного затемнення Сонця // Кинематика и физика небес. тел. – 2004. – Т.20, №2. – С. 176–188.

9. Іеченко В., Єфіменко В, Буромський М., Данилевський В., Кіліч Г., Клещонок В., Лозицький В., Тарануха Ю., Сухоруков А., Чурюмов К. Спостереження повного затемнення Сонця 29 березня 2006 року експедицією Київського національного університету імені Тараса Шевченка // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2006. – Вип. 43. – С. 61–64

10. Поток энергии Солнца и его изменения / Под ред. О Уайта. Пер. с англ. – М: Мир, 1980. – 558 с.

11. *Свешников М. Л.* Вариации радиуса Солнца из прохождений Меркурия по его диску // Письма в Астрон. журн. – 2002. – Т. 28, №2. – С. 133–139.

12. Тельнюк-Адамчук В. В., Єфіменко В. М., Данилевський В. О., Дзюбенко М. І., Курочка Л. М., Чурюмов К. І., Буромський М. І., Криводубський В. Н., Крячко І. П., Курмей М. Д., Молотай О. А., Тарануха Ю. Г. Спостереження повного сонячного затемнення 11 серпня 1999 року науковою експедицією Київського університету // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2000. – Вип. 36. – С. 41– 47.

13. Auwers A. Der Sonnendurchmesser und der Venusdurchmesser nach den Beobachtungen an den Heliometern der deutschen Venus-Expeditionen // Astron. Nachr. – 1891. – Band 128. – P. 361–376.

14. Bahcall J. N., Pinsonneault M.H., Basu S. Solar models: current epoch and time dependences, neutrinos and helioseismological properties // Astro-phys. J. - 2001. - Vol. 555. - P. 990-1012

15. Brown T. M., Christensen-Dalsgaard J. Accurate determination of the solar photospheric radius // Astrophys. J. – 1998. – Vol. 500. – P. L195–L198

16. Brun A. S., Turck-Chiezer S., Morel P. Standard solar models in the light of new helioseismic constraints // Astrophys. J. – 1998. – Vol. 506. – P. 913–925.

17. Danylevsky V. O. The solar diameter determination from data of the 1991 July 11 solar eclipse photoelectric observations // Contribs Astron. Observ. Skalnate Pleso. – 1999. – Vol. 28, N 3. – P. 201–209.

Morel P., Provost J., Berthomieu G. Updated solar models // Astron. Astrophys. – 1997. – Vol. 327. – P. 349–360.
 Sofia S., Dunham D., Fiala A. D. Determination of variations of the solar radius from solar eclipse observations // The Ancient Sun / Eds. Pepin R. O., Eddy J.A., Merill R.B. – Pergamon Press, 1980. – P. 147–157

20. Wittman A. D. CCD-drift scan measurements of the solar diameter: method and first results // Solar Phys. - 1997. - Vol. 171. - P. 231-237

Надійшла до редколегії 30.04.09

УДК 521.182; 523.44

А. Казанцев, Ф. Кравцов, І. Лук'яник, Л. Казанцева

#### МИНУЛЕ ТА СЬОГОДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ АСТЕРОЇДІВ У КИЄВІ

Наведено коротку історичну довідку про дослідження астероїдів в астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Також коротко описані основні напрямки вивчення астероїдів на сьогодні. Наведені головні результати, отримані в останнє десятиріччя. До таких результатів можна віднести: 1) розробку та реалізацію методу чисельного інтегрування рівнянь руху тіл Сонячної системи; 2) виявлення нового негравітаційного ефекту, що спричиняє просторове розділення астероїдів з різними альбедо; 3) реалізацію методу часової розгортки для спостережень покрить зір астероїдами.

A short historical reference about asteroid investigation in Astronomical Observatory of Kyiv Taras Shevchenko National University is presented. The main lines of asteroid investigation to date are shortly described as well. There are pointed the main results, which had been obtained during the last decade. These are: 1) development of a method for numerical integration of equations of movement for Solar system bodies; 2) revealing of a new non-gravitational effect, which causes a spatial separation for asteroids with different albedos; 3) the time-base method realization for observations of asteroid occultations.

Історія дослідження астероїдів в Обсерваторії у минулому. Певного системного характеру дослідження малих тіл в нашій обсерваторії набули за директорства С.Д.Чорного (1921–1939 рр.). Сам С.Д.Чорний більше часу приділяв теоретичним роботам з питань руху комет. Хоча за період 1925–1938 рр. опубліковано 34 роботи С.Д.Чорного за результатами спостережень малих тіл. в різних журналах («Astronomische Nachrihhten», «Astronomical Journal», «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society» та ін.). Близько половини цих публікацій присвячено спостереженням астероїдів. Крім С.Д. Чорного спостереження астероїдів в цей період вели М.Диченко, М.Шилова, І.І.Путілін.

Головним предметом дослідження співробітника обсерваторії тих часів І.І.Путіліна були астероїди. Він активно проводив спостереження малих планет та займався розрахунками їх орбіт. Особливу увагу він приділяв побудові чисельної теорії руху астероїда Ганімед. Цей астероїд відноситься до класу астероїдів, що наближаються до Землі (АНЗ), які в останні роки активно досліджуються з погляду на проблему астероїдної небезпеки. На той час ця проблема, як окреме питання не розглядалася. Але астероїди з такими орбітами привертали увагу дослідників. За період з 1934 р по 1947 р. І.І.Путілін опублікував з різних виданнях 39 статей з тематики астероїдів, з низ 16 присвячено Ганімеду. Головним результатом його роботи стала монографія «Малые планеты», яка вийшла з друку в 1953 р. і протягом десятиліть була навчальною книгою для дослідників астероїдів в СРСР [13].

З приходом С.К.Всехсвятського до керівництва обсерваторією в 1939 р. дослідження малих тіл Сонячної системи стали одним із головних наукових напрямків. Щоправда, першорядна увага приділялася кометами. Після того, як I.І.Путілін в 1947р. залишив роботу в обсерваторії, теоретичні роботи з астероїдної тематики на обсерваторії припинилися, однак спостереження малих планет продовжувалися. Такі спостереження проводив сам директор обсерваторії С.К.Всехсвятський, а також Е.Сандакова, В.П.Конопльова, Н.Хінкулова. Результати спостережень друкувалися в Астрономічному циркулярі АН СРСР під стандартною назвою «Наблюдения астероидов на Киевской астрономической обсерватории» або «Наблюдения малых планет на Киевской астрономической обсерватории».

Пожвавлення астероїдної тематики в Обсерваторії відбулося в середині 70-х років минулого століття. Тоді у співавторстві з А.М.Симоненко (Астрорада АН СРСР) почалися дослідження орбіт астероїдів в зонах сумірностей з Юпітером. В цих зонах періоди обертання астероїдів та Юпітера навколо Сонця відносяться як цілі числа. Це спричиняє явище орбітального резонансу, яке супроводжується збільшенням ексцентриситету орбіти астероїда без зміни середнього значення великої півосі. На сьогодні остаточно встановлено, що саме зони сумірностей в головному поясі астероїдів є поставниками переважної більшості астероїдів у внутрішні зони планетної системи, в тому числі, й АНЗ.

Дані дослідження проводилися на основі чисельних розрахунків еволюції орбіт за програмою, підготовленою Л.М.Шербаум. Крім неї цими питаннями займався і В.Г.Кручиненко. Пізніше на цю тематику перейшов А.М.Казанцев. В обсерваторії на основі аналізу еволюції орбіт астероїдів в сумірностях з Юпітером був розроблений механізм виходу астероїдів на ексцентричні орбіти. Подібні механізми були запропоновані іншими дослідниками, але окремі особливості такого виходу були вперше зазначені в нашій Обсерваторії [1, 2, 14]. За отриманими тут результатами істотне збільшення ексцентриситетів відбувається для тих орбіт астероїдів, для яких амплітуда коливань аргументу лібрації о знаходиться в певному вузькому діапазоні. Наприклад, в сумірності 3:1 такий діапазон становить 100° – 130° (увесь діапазон – 0°–180°). Пізніше це висновок був підтверджений більш точними розрахунками [16].

Еволюція орбіт астероїдів, що наближаються до Землі. З 90-х років головна увага перейшла до проблеми АНЗ. Ця тематика безпосередньо пов'язана із проблемою астроїдної небезпеки, що в той період активно обговорювалася в багатьох наукових установах світу. Для розрахунків еволюції орбіт астероїдів в Обсерваторії був запропонований новий метод чисельного інтегрування рівнянь руху тіл Сонячної системи [5]. Суть методу полягає в тому, що інтегрування виконується лише для збурень, а гравітаційний вплив Сонця повністю враховується за формулами незбуреного руху. Такий підхід дозволяє істотно збільшувати крок інтегрування, що підвищує точність обчислень. Недоліком методу є необхідність виконання переходу від координат до елементів в кожному кроці. Однак, це позначається лише на збільшенні часу розрахунків, а не на їх точності. При сучасних обчислювальних засобах цей недолік практично не проявляється. Переваги даного методу порівняно з іншими особливо помітні при обчисленні еволюції орбіт тіл з малими перигелійними відстанями.

За цим методом була створена програма та обчислені умови зближень із Землею всіх відомих нумерованих астероїдів в наступні 100 років. За отриманими результатами були визначені потенційно небезпечні тіла, як такі, що можуть зближуватися із Землею на відстань менше 0.02 а.о. (табл. 1). Таблиця містить дані про 46 зближень нумерованих астероїдів, відомих на травень 2009 р. Тут можна зазначити, що іще 8 років тому така таблиця містила дані лише про 10 зближень. Розширення даних обумовлено значним зростанням числа відкритих астероїдів за минулі роки. У таблиці наведені дати зближень, номери астероїдів, їх абсолютні зоряні величини *H* та мінімальні геоцентричні відстані при зближеннях *Δ*. Значення *H* може служити орієнтовною величиною розміру астероїда. Зрозуміло, що розміри астероїдів визначаються як величиною *H*, так і альбедо, яке для більшості астероїдів на сьогодні невідоме. Однак, наближені оцінки розмірів можна робити користуючись певним середнім значенням альбедо. Так значенню *H* = 18.0<sup>m</sup> відповідає розмір астероїда біля 1 км. Найбільші розміри серед наведених в таблиці мають астероїди 4179 та 159857 (біля 3 км), найменший розмір у астероїда 54509 (біля 100 м).

					-		
Дата	Номер	Н	∆ (a.o.)	Дата	Номер	Н	Δ (a.o.)
10.06.2009	136617	17.7	0.01685	05.11.2069	4179	15.3	0.01985
22.10.2017	171576	18.5	0.01483	06.06.2070	163348 20.0		0.01016
22.12.2018	163899	16.8	0.01893	21.12.2070	163899	16.8	0.01818
18.01.2022	7482	16.8	0.01324	04.02.2071	4660	18.2	0.01469
27.06.2026	152637	18.0	0.01714	30.10.2071	154276	17.6	0.00931
07.08.2027	137108	17.9	0.00265	29.04.2073	164121	16.2	0.01134
26.06.2028	153814	18.3	0.00169	15.04.2075	143404	16.7	0.01953
26.10.2028	35396	16.9	0.00634	06.12.2076	162173	19.2	0.01042
14.04.2029	99942	19.2	0.00024	13.04.2078	163243	16.3	0.01907
24.06.2033	172678	18.7	0.01680	16.04.2079	52768	15.9	0.01181
25.05.2036	66391	16.5	0.01570	31.08.2080	163132	18.3	0.00425
01.10.2038	41429	20.7	0.01640	21.09.2080	101955	20.9	0.01388
16.11.2038	159857	15.5	0.01983	21.10.2086	2340	19.2	0.00556
12.10.2040	162120	20.6	0.01303	22.10.2086	171576	18.5	0.00766
07.11.2041	144898	18.9	0.01303	26.09.2087	101955	20.9	0.01941
28.02.2048	162162	19.9	0.00650	11.08.2091	163373	19.0	0.01400
24.03.2051	4581	20.4	0.01211	13.08.2093	65679	19.4	0.01423
11.08.2051	162422	20.2	0.01243	01.12.2093	153201	19.3	0.00834
19.12.2054	33342	17.9	0.01439	27.06.2100	170086	18.1	0.01715
12.10.2057	162120	20.6	0.01139	10.07.2102	2101	18.7	0.01948
14.02.2060	4660	18.2	0.00799	02.01.2104	54509	22.7	0.00532
23.09.2060	101955	20.9	0.00501	18.01.2105	7482	16.8	0.01607
21.10.2069	2340	19.2	0.00656	21.04.2106	162416	21.7	0.00949

Таблиця 1. Обставини зближень із Землею потенційно небезпечних астероїдів в наступні сто років

4.0

3.0

2.0

1.0

0.0

40.0

Окремо слід відзначити зближення із астероїдом 99942 (Apophis) у квітні 2029 р. [8]. Цей астероїд має пройти від поверхні Землі на відстані меншій, ніж рухаються геостаціонарні супутники. На сьогодні ця майбутня подія привертає максимальну увагу як вчених, так і громадськості.

Оцінка числа та напрямки пошуку нових АНЗ. Останні два десятки років принесли дуже багато нових даних про малі тіла Сонячної системи. Напевне найбільш визначним можна назвати відкриття поясу Койпера за орбітою Нептуна. Це привело до позбавлення Плутона статусу повноцінної планети та введення поняття «карликових планет».

Розширення засобів спостережень, в тому числі, і з космосу, істотно збільшило масив спостережних даних про астероїди. Дуже вагомим є каталог альбедо астероїдів за даними супутника IRAS, перший варіант якого вийшов в 1992 р. [17]. У 2002 р. опубліковано новий (виправлений та доповнений) варіант цього каталогу, який містить альбедо та розміри 2228 астероїдів [18]. Цей каталог дав можливість отримувати нові характеристики та особливості всього комплексу малих планет.

В нашій обсерваторії на основі даних IRAS було уточнено параметри розподілу астероїдів за розмірами [6,10]. Зазвичай такий розподіл подається у вигляді степеневої залежності



де dN(D) – число астероїдів у вузькому інтервалі розмірів dD), k та b – деякі постійні параметри. Використовуючи каталог [18], було отримано значення параметрів k та b для астероїдів головного поясу (ГПА) в окремих вузьких діапазонах розмірів. Як виявилось, існує характерна залежність показника степеня b від середнього значення параметра b для в діапазоні розмірів 1 – 10 км має бути близько 4. Тіл з розмірами D > 1 км в ГПА має бути біля  $1.4 \times 10^7$ . Залежність на рис. 1 потребує пояснення в рамках механізму походження ГПА.

Окремо було проаналізовано розподіл за розмірами відкритих АНЗ. Наша вибірка АНЗ (на травень 2009р.) налічувала 55 тіл з розмірами від 3 до 10 км. Для середнього значення розмірів (6.5 км) даної вибірки були отримані параметри *b* та *k*. Значення параметра *b* при різних розбиттях діапазону на ділянки було в межах 3.9–4.2. Це добре узгоджується із залежністю *b*(*D*) для ГПА, що й має бути, оскільки АНЗ переходять у внутрішні зони саме із ГПА. Отримані значення параметрів *b* і *k* дозволяють стверджувати, що число астероїдів з розмірами більше 1 км серед АНЗ має становити від 2000 до 2500. Зауважимо, що враховуючи спостережну селекцію, це значення можна розглядати як мінімальне. Отримана величина в 1.5–2 рази пере-

вищує попередні оцінки кількості існуючих АНЗ таких розмірів.

80.0

Ds, км

Рис. 1. Залежність параметра b від розміру

120.0

160.0

В каталозі міжнародного центру малих планет (MPC) на травень 2009 р. налічується 960 орбіт АНЗ з *H* < 18<sup>m</sup> (розмірами більше 1 км). Тобто, частка відкритих тіл такого класу складає менше половини існуючих. Що стосується АНЗ менших розмірів, то частка таких відкритих тіл зовсім невелика. Для пошуків нових

АНЗ корисно знати їх розподіл у біляземному просторі. Нами було проаналізовано такий розподіл і виявлено чітку неоднорідність концентрації перигеліїв орбіт АНЗ поблизу Землі в залежності від екліптичної довготи  $\lambda_E$  [3]. При  $\lambda_E = 350^\circ - 30^\circ$  біляземний простір перетинає найбільша кількість орбіт астероїдів. Ця кількість на 30–50% перевищує відповідне значення в мінімумі розподілу ( $\lambda_E = 90 - 150^\circ$ ). Даний факт пояснюється гравітаційним впливом Юпітера.. Довготи перигеліїв орбіт астероїдів концентруються поблизу значення  $\lambda_E = 15^\circ$ , яке відповідає довготі перигелію орбіти Юпітера.

Використовуючи отримані результати та оцінюючи імовірність перебування астероїда в певній точці своєї орбіти, були обчислені найбільш сприятливі періоди та зони на небесній сфері для пошуків нових АНЗ [4, 16]. В північній півкулі для пошуків АНЗ з перигелій ними відстанями *q* > 1.1а.о. найбільш сприятливим періодом є кінець вересня – жовтень. Для пошуків астероїдів, що глибоко проникають всередину орбіти Землі, таким періодом є кінець березня – квітень. Імовірність реєстрації нових АНЗ в ці періоди 1.5 рази перевищує середню імовірність протягом року.

Ефект просторового розділення астероїдів з різними альбедо. Використання каталогу альбедо астероїдів [18] та точні розрахунки еволюції їх орбіт за розробленим в Обсерваторії методом дали можливість виявити невідомий раніше негравітаційний ефект просторового розділення астероїдів з різними альбедо [7]. Спочатку була обчислена еволюція орбіт ГПА на 10 років, занесених одночасно в каталог «Эфемериды малых планет на 1996 г.» та в каталог IRAS альбедо. Результати розрахунків порівняні з каталогом орбіт на 2006 р. Виявилося, що різниця у великих півосях орбіт а між каталожними та обчисленими значеннями залежить від альбедо астероїдів *р*. Значення а орбіт каталожних астероїдів з високими *р* виявилися в середньому дещо меншими, ніж відповідні обчислені значення. А для астероїдів з низькими альбедо аналогічне порівняння показало протилежне співвідношення. Було зроблено припущення про існування певного негравітаційного ефекту, що приводить до зменшення *а* високоальбедних астероїдів, і до збільшення *а* орбіт низкоальбедних тіл.





Рис. 2. Залежність р(а) для сімейства Флори

Це припущення підтверджується розподілами p(a) від для окремих сімейств астероїдів, наприклад, Флори (рис. 2). Подібна залежність існує для сімейства Еос. Сімейств з протилежними залежностями p(a) не виявлено. Сам факт утворення сімейств астероїдів в результаті руйнування більш крупних тіл не викликає сумніву. Отже початковий розподіл альбедо астероїдів сімейства по великій півосі орбіт мав бути в середньому рівномірним. Тому такі залежності p(a), як на рис. 2, підтверджують припущення про існування негравітаційного ефекту, що викликає просторове розділення астероїдів з різними альбедо.

Зазначений ефект підтверджується також аналізом нев'язок в астероїдних каталогах [9]. Виявляється, що для орбіт з більшими нев'язками різниці між обчисленими (від 1996 р. до 2006 р.) та каталожними значеннями *а* більш помітні порівняно із аналогічними величинами для орбіт з меншими нев'язками. Так і повинно бути, якщо такі різниці викликані негравітаційним ефектом.

Виявлення такого негравітаційного ефекту дозволяє просто пояснити відомий розподіл альбедо астероїдів ГПА від великої півосі орбіт. Цей розподіл

у свій час виявився головною перепоною для пояснення утворення ГПА в результаті руйнування одного тіла. Остаточне підтвердження існування зазначеного негравітаційного ефекту має привести до перегляду домінуючих на сьогодні механізмів утворення ГПА.

Спостереження астероїдів в обсерваторії на сьогодні. Крім теоретичних досліджень обсерваторія веде спостереження астероїдів. Головними об'єктами спостережень є АНЗ та явища покрить зір астероїдами. Головним інструментом спостережень є 70-см телескоп-рефлектор АЗТ-8, оснащений ПЗЗ-камерою ST-8XME, яку в 2005 р. ЮНЕСКО безкоштовно передав обсерваторії.

З усього комплексу АНЗ спостерігаються переважно об'єкти, що підходять до Землі на дуже малі відстані. Ці тіла в моменти зближень мають дуже великі кутові швидкості і такі спостереження вести досить складно. Крім того, позиційні спостереження при малих геоцентричних відстанях мають мінімальні похибки в координатах. Тому подібні спостереження особливо цінні для уточнення орбіт та вивчення фізичних характеристик цих потенційно небезпечних для Землі тіл. Виконані спостереження опрацьовуються і відправляються до Міжнародного центру малих планет (МРС).

До таких спостережень можна віднести спостереження астероїда 2002N40Y, який 18 серпня 2002 р. проходив біля Землі на відстані 0.0035 а.о. За одну хвилину експозиції цей астероїд проходив майже половину поля ПЗЗкамери (рис. 3). Спостереження іще одного астероїда 2004X14P, що мав тісне зближення із Землею (до 0.0029 а.о.), було зроблено в липні 2006 р. Крім визначення положень, для цього астероїда було отримано криву блиску за час спостережень.

На рис. 4 наведена зміна блиску астероїда у відносних одиницях в залежності часу від початку спостережень. Крім плавної зміни блиску, яка дає можливість оцінити період обертання астероїда навколо власної осі, видно невеликий пік в максимумі блиску. Ця особливість кривої блиску може свідчити про неоднорідність альбедо на поверхні астероїда чи специфіку його форми.

За спостереженнями покриттів зір окастероїдами найбільш точно визначаються їх розміри. Тому ці спостереження дуже важливі. Але такі спостереження потребують світло-приймачів з високою часовою роздільною здатністю (0.001 с – 0.05 с) Наша ПЗЗ - камера не має таких характеристик. Однак, подібні спостереження все-таки ми можемо виконувати. Якщо реєстрацію явища вести при повільному русі телескопа по одній з координат, то зображення зір і астероїда будуть мати вигляд розтягнутих слідів. Якщо блиск зорі, що покривається помітно менший за блиск астероїда, то під час покриття слід зорі стане більш тонким. Як правило, швидкість зміщення астероїда відносно зорі мала (біля 0.01" за секунду і менше). Тому при масштабі ПЗЗ - камери 0.9" на піксель один піксель на сліді зорі буде відповідати приблизно 0.01 с часу зміщення астероїда відносно зорі. Отже ефективна часова роздільна здатність такого методу реєстрації може становити менше 0.01 с. Цей метод (метод часової розгортки) для наших умов був запропонований Ф.І.Кравцовим, який з 2005 р. веде такі спостереження з І.В. Лук'яником [11, 12]. По квітень 2009 р. було проведено 24 спостереження за ефемеридами покриттів, з них лише у двох випадках спостерігалися явища покриття зір астероїдами. Така ефективність цілком зрозуміла, оскільки похибки ефемерид значно перевищують ширину смуги покриття на поверхні Землі. Одним із цих явищ було покриття зорі ТҮС 1831-01958-1U астероїдом 712 Воliviana 11 жовтня 2005 р. Крива блиску цього явища наведена на рис. 5.

По осі Х відкладено число пікселів вздовж сліду зорі, а по осі У – блиск зорі у відносних одиницях. За тривалістю «провалу» блиску здалося оцінити розмір астероїда – 129 км (ефемеридне значення – 132 км).

На кривій добре видно зростання блиску «до» та «після» покриття. Таке зростання свідчить про реєстрацію явища дифракції, що вказує на високу часову роздільну здатність даного методу. Таким чином, подібні спостереження є досить корисними та перспективними.



Рис. 3. Зображення астероїда 2002N40Y



Рис. 5. Крива блиску покриття зорі 01958-1U астероїдом 712 Boliviana 11 жовтня 2005 р.

Рис. 4. Крива блиску астероїда 2004Х14Р

Висновки. На сьогоднішній день дослідження малих планет в астрономічні обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка успішно проводяться як теоретичними, так і спостережними методами. До головних результатів, отриманих в останні роки можна віднести наступні:

1. Запропоновано новий метод чисельного інтегрування рівнянь руху тіл Сонячної системи, який особливо ефективний при орбітах з малими перигелій ними відстанями. Обчислені умови зближень АНЗ із Землею в наступні сто років та визначені потенційно небезпечні астероїди.

 Уточнені параметри розподілу числа астероїдів за розмірами, зроблена оцінка кількості існуючих АНЗ.

3. Визначені найбільш сприятливі періоди та зони на небесній сфері для пошуків нових АНЗ.

4. Отримані результати, що вказують на дію в Сонячній системі раніше не описаного негравітаційного ефекту, що приводить до просторового розділення астероїдів з різними альбедо. Остаточне підтвердження існування цього ефекту стане основою для перегляду домінуючих на сьогодні механізмів походження ГПА.

5. Реалізовано метод часової розгортки для спостережень покрить зір астероїдами, який дозволяє

проводити спостереження з ефективною часовою роздільною здатністю менше 0.01 с. Налагоджені регулярні спостереження покрить.

1. Казанцев А.М., Шербаум Л.М. Характеристический параметр либрирующих орбит // Астрон. Вестн. – 1984. – Т. 18, №1. – С. 28– 34.

2. *Казанцев А.М., Шербаум Л.М.* Роль взаимных столкновений в формировании резонансных образований в поясе астероидов // Астрон. Вестн. – 1989. – Т.23, №3. – С. 220– 225.

3. *Казанцев А.М.* Просторовий розподіл астероїдів поблизу орбіти Землі // Кинематика и физика небес. тел. – 1998. – Т. 14, №2. – С.186-188.

 Казанцев А.М., Макарчук Р.В. Пространственное распределение и направление поиска околоземных астероидов. // Кинематика и физика небес. теп. – 2000. – Т. 16, №4. – С. 369-374.
 Казанцев А.М. Простой метод численных расчетов эволюции орбит околоземных астероидов.// Астрон. Вестн. – 2002. – Т. 36, №1. – С. 48–54.

Казанцев А.М. Простои метод численных расчетов эволюции оронт околоземных астероидов.// Астрон. Вестн. – 2002. – 1: 30, № 1. – С. 40– 34.
 Казанцев А.М. Некоторые особенности распределения числа астероидов по размерам // Кинематика и физика небес. тел. – 2002. – Т. 18, № 6.

- С. 517 – 524.
 7. Казанцев А.М. О возможном эффекте пространственного разделения светлых и темных астероидов // Кинематика и физика небес. тел. – 2007.
 - Т. 23. №6. – С. 349-358.

8. Казанцев А.М. Зближення із Землею астероїда Арорһів в наступні 100 років. // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2007. – Вип. 44. – С. 59-61.

9. Казанцев А.М., Казанцева Л.В. О невязках в астероидных каталогах и возможном негравитационном эффекте // Кинематика и физика небес. тел. – 2008. – Т. 24, №5. – С. 379-387.



10. Казанцев А.М. Уточнення розподілу астероїдів за розмірами та оцінка числа біляземних астероїдів // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2009. – Вип. 45. – С. 52–55.

11. Кравцов Ф.І., Лук'яник І.В. Спостереження покриттів зір астероїдами методом часової розгортки їхніх зображень // Кинематика и физика небес. тел. – 2008. – Т. 24, №4. – С. 291-298.

12. Кравцов Ф.І., Лук'яник І.В. Спостереження покриттів зір астероїдами за допомогою ПЗЗ-камери в 2005-2007 роках // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2009. – Вип. 45. – С. .55–60

13. Путилин И.И. Малые планеты. М.: Наука, 1953. – 354 с.

14. Шербаум Л.М., Казанцев А.М. Возможный механизм образования люков в поясе астероидов // Астрон. Вестн. – 1985. – Т. 19, №3. – С. 73–77.

15. Kazantsev A.M., Lupishko D.F. Search for Near-Earth Asteroids based on their spatial distribution // Mem. Soc. Astron. Italiana. – 2002. – Vol. 73, No. 3. – P. 751-755.

16. Kazantsev, A.M. Migration velocities of asteroids from MBA to NEA's and Centaurs // Rom. Astron. J. – 2005. – Vol. 15, Suppl. – P. 81-86.

17. Tedesco E.F., Veeder G.J. IMPS albedos and diameters catalogue (FP 102) // The IRAS Minor Planet Survey / Eds Tedesco E.F., Veeder G.J., Fowler J.W., Chillemi J.R. MA: Phillips Lab., Hanson Air Force Base., 1992. – P. 243-297.

18. Tedesco Edward F., Noah Paul V., Noah Meg, Price Stephan D. The supplemental IRAS minor planet survey // Astron. J. - 2002. - Vol. 123. - P. 1056-1085.

Надійшла до редколегії 19.05.09

УДК 521.852

В. Клещонок, М. Буромський

### РОЗВИТОК СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПОКРИТТІВ ЗІР МІСЯЦЕМ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Розглянуті етапи розвитку спостережень покриттів зір Місяцем в Астрономічній обсерваторії Київського університету. Наведені основні наукові задачі, які можна вирішувати за допомогою таких спостережень. Проаналізовано сучасний стан спостережень покриттів в Астрономічній обсерваторії Київського університету та перспективні напрямки їх розвитку.

The main development observation stages, which were carried out in Astronomical observatory of Kjiv University, of star occultations by the Moon were considered. Main scientific problems which allow resolving with the help of such observations were shown. The modern state of occultation observations and perspective direction of its progress were analyzed.

Вступ. Сучасний етап розвитку космічних досліджень характеризується відновленням уваги до природного супутника Землі – Місяця. Насамперед це пов'язано з планами створення дослідницьких станцій на Місяці. Перед такими великими проектами має бути підготовчий етап, який пов'язаний з більш поглибленим вивченням перспективних місць для побудови космічних баз. Останнім часом відбулося декілька космічних міссій для вивчення Місяця: європейській проект SMART-1, китайський Chang'e -1, індійський Чандраян-1. На всіх цих космічних апаратах стояли прилади для вивчення поверхні Місяця і його картографування. Наземні дослідження, які можуть давати точність наближену до точності досліджень з космічних апаратів – це лазерна локація та спостереження покриттів. Зокрема, вивчення профілю місячного лімба за допомогою ПЗЗ спостережень покриттів зір є одним з методів по удосконаленню карт крайової зони Місяця.

Декілька десятиліть тому, місячні покриття в основному використовувалися для дослідження обертання Місяця (вивчалась теорія руху Місяця, уточнювались параметри його орбіти і фігури, створювались карти крайової зони Місяця на основі фотографічних, геліометричних та позиційних методів) та флуктуації обертання Землі (визначались різниці між ET-UT). Виходячи з сучасного стану розвитку спостережної техніки для дослідження Місяця і його крайової зони, спостереження покриттів мають наукове значення із декількох причин:

1. Існує можливість визначати похибки власних рухів системи каталога Гіпаркос (Hipparcos Catalogue ESA 1997)[1]. Каталог Гіпаркос був створений у 1997 і його точність по відношенню до системи ICRS (International Celestial Reference System)[2] складає 0.6 маз в орієнтації і 0.25 mas/year в обертанні. При порівнянні власних рухів каталогу Гіпаркос і фундаментального FK5 виконаних Фейзелом та Мінардом [2], було знайдено різницю в 3 mas/year, яку також незалежно отримано при редукції системи VLBI [3], місячних лазерних локацій [4] і аналізом власних рухів [5]. Ці дослідження підтверджують, що система каталогу Гіпаркос має систематичні похибки. У 1997 р. Національним космічним агентством США на основі ICRS були створені нові місячні і планетні ефемериди (DE405/LE405)[6], які дозволяють використовувати і досліджувати систему каталога Гіпаркос з високою точністю за даними спостережень покриттів. Така інформація буде ще деякий час актуальна, поки у розпорядження астрономів не надійдуть дані з астрометричної місії GAIA, запуск якої намічено на кінець 2011 р.

2. Розвиток нових приймачів зображень з високою часовою роздільною здатністю, створює можливості для забезпечення високоточними даними профілю місячного лімбу. Спостереження покриттів зір Місяцем за допомогою наземних сучасних оптико-електронних астрономічних систем дозволяє створити базу даних для побудови рельєфу краєвої зони Місяця. Особливо цікаві та мало вивчені зони поблизу полюсів Місяця. Інформацію про них можна отримати із спостережень дотичних покриттів Місяця. Це підтверджується рядом фактів які наводять Д.Данхем[7], М.Сома[8], Бутнер[9] та інші: а)на сьогодні ще не має достатнього ряду спостережень дотичних покриттів та їх обробки, які дали б змогу точно і з урахуванням різних лібрацій відобразити топографію зон поблизу місячних полюсів (~±6°.5); б) результати вимірів висот місячної поверхні, які проводились за допомогою лазерної станції Климентина(1994 р.) не дають достатньо точної інформації відносно рельєфу Місяця на його полюсах, а інші висоти мають досить великі систематичні похибки; в) сучасна міжнародна програма дослідження передбачає виведення на орбіту спеціальних супутників для всебічного вивчення навколополюсних зон Місяця з метою підтвердження знаходження льоду та геометричних розмірів басейна "Південний полюс-Ейткен" самого великого кратера сонячної системи (d=2500 км, h= 7–8 км) – В.І. Чикмачев, В.В. Шевченко [10]. 3. Цінною інформацією, яку можна отримати із спостережень покриттів з високою часовою роздільною здатністю, є визначення діаметрів зір та знаходження кратних систем серед зір, які покриваються,

Спостереження покриттів зір в Київському університеті. Спостереження покриттів зір Місяцем були розпочаті в Астрономічній обсерваторії Київського університету проф. С.Д.Чорним у 1923 р. відповідно до міжнародної програми Е. Брауна [11]. Загальне число візуальних спостережень покриттів зір Місяцем, виконаних у Києві з 1923 р. по 2008 р., складає близько 3500 явищ. Спостереження проводилися за допомогою восьмидюймового астрографа (Мерц-Репсольд, D = 24 cm, F= 426 cm), та рефлектора A3T-14 (D = 48 cm, F= m). Особливу роль у вирішенні топографії мікрорельєфа місячних приполярних зон відіграють дотичні покриття зір Місяцем. Дотичні покриття зір Місяцем відрізняються від звичайних тим, що зоря не покривається місячним лімбом а, повільно рухаючись уздовж місячного краю, зникає або з'являється за його нерівностями. У 1960 р. А.О. Яковкін, відомий своїми роботами з визначення сталих фізичної лібрації Місяця, відкриттям лібраційного ефекту в місячному радіусі (1930) і дослідженням фігури місячного диску, звернув увагу на цінність дотичних покриттів. Він зазначав: «Для исследования контура Луны и либрационного эффекта в радиусе и широте большую ценность имели бы наблюдения почти касательных покрытий» [12]. Дотичні покриття є одним з основних джерел інформації про рельєф приполярних регіонів Місяця, де, як відомо, недостатня кількість прямих альтиметричних вимірювань висот. В Україні перші результативні спостереження дотичних покриттів були проведені Астрономічною обсерваторією Київського університету у 1973 р. Експедиції у складі 5-10 спостерігачів здійснювалися відповідно до наперед обчислених ефемерид у пункти з найбільш придатними умовами для спостережень. Спостерігачі розташовувалися перпендикулярно до границі тіні на відстані 200-700 м один від одного. Для спостереження використовувалися рефлектори системи Ньютона "Міцар" (D = 110 мм F = 80 cm), телеобьєктиви МТО-100 системи Максутова (D = 110 мм, F = 100 cm), рефрактори (D = 80 мм, F = 80 см; D = 80 мм, F = 60 см; D = 63 мм, F = 84 см). Моменти часу реєструвались за допомогою хронометрів, механічних та електроннних секундомірів, друкуючих хронографів. Поправки хронометрів та хронографів до шкали всесвітнього часу (UTC) визначались із прийому сигналів точного часу. За цей період проведено близько 50 експедицій по спостреженню дотичних покриттів зір Місяцем, одержано більш ніж 300 унікальних явищ покриттів зір нерівностями місячного краю. Результати спостережень попередньо опрацювались і надсилались до Міжнародного місячного центру (International Lunar Occultation Center, ILOC, Tokyo) [13]. Обробка результатів спостережень виконувалась за методом Бесселя [14] з метою уточнення карт Уотса [15]. Спостереження дотичних покриттів з застосуванням новітніх ПЗЗ комплексів дає змогу деталізувати рельєф місячних полюсів з точністю 45–50 м по висоті, що відповідає сучасним спостереженням з радарними інтерферометрами.

**Телевізійні спостереження покриттів**. Із 2003 р. в Астрономічній обсерваторії почався поступовий перехід від візуальних спостережень покриттів до спостережень із сучасними фотоприймачами. В цьому ж році був створений і почав використовуватися для спостережень покриттів телевізійний комплекс «Спалах» [16]. За період експлуатації покращена апаратна та програмна база для спостережень покриттів зір місяцем. В процесі роботи телевізійного комплексу «Спалах» було відпрацьовано програмне та апаратне забезпечення. Основним приймачем у комплексі є чутлива ПЗЗ-камера "Sanyo – ½", яка добре показала себе в процесі спостережень покриттів. Проведена модернізація телескопу АЗТ-14, на якому спостерігаються покриття, що дозволило підняти проникну здатність таких спостережень та покращити їх точність. Для цього було замінено оптичну систему телескопа з Касегрена на Ньютона. В результаті в система дозволяє спостерігати об'єкти до 14 зоряної величини в телевізійному режимі.

Для спостережень та їх обробки було розроблено програмний комплекс, який дозволив отримувати точність часової прив'язки телевізійних кадрів до 15 мс [17, 18]. В процесі спостережень така точність забезпечується власною програмою Videocap2, яка дозволяє записувати в окремий протокол системний час кожного кадру. Паралельно працює програма GPSwatch теж власної розробки, яка на протязі всієї ночі отримує сигнали точного часу з GPS приймача, та веде протокол поправок до часу UTC системного часу комп'ютера. В подальшій обробці ці поправки використовуються для визначення точного часу покриттів.

У процесі експлуатації комплексу система часу неодноразово тестувалася і проходила лабораторні випробування для перевірки її точності та стабільності. Для цього сигнали точного часу або з радіоприймача, або з GPS приймача подавалися на світлодіод і далі реєструвалися за звичайною схемою роботи телевізійного комплексу. Після обробки отримувалися поправки та досліджувалася стабільність роботи часового тракту комплексу. Ці дослідження показали, що точність оцінки часу покриття відповідає заявленим характеристикам при умові якісного сигналу з GPS приймача [19].

Для обробки спостережень використовується власна програма Occultdark1, яка дозволяє покадрово продивитися весь запис покриття та побудувати фотометричну криву покриття. Така процедура дає можливість впевнено оцінити час покриття, особливо для слабких зір, та знайти більш тонкі ефекти. Мова іде про відкриття подвійних зір та оцінку їх параметрів за фотометричною кривою покриття з проміжним рівнем інтенсивності з кількох відліків. За кількістю відліків на проміжному рівні можна оцінити спроектовану відстань між компонентами. Другий ефект – присутність на фотометричній кривій одного відліку проміжного рівня меншої інтенсивності (ефект сходинки). Він виникає тоді, коли явище покриття відбулося під час експонування кадру, що приводить до зменшення ефективної експозиції на цьому кадрі. Цей ефект дає можливість точніше визначити час покриття – до долі тривалості одного кадру.

У процесі роботи з телевізійним комплексом був створений каталог телевізійних спостережень покриттів зір Місяцем за результатами спостережень з комплексом «Спалах» [19]. Зараз продовжується робота по наповненню цього каталогу новими спостереженнями.

Тестові спостереження покриттів на Інтернет-телескопі UNIT. В 2008 році почалися тестові випробування нового Інтернет телескопу UNIT [20]. Основними його особливостями є те, що він може працювати у автоматичному режимі і може виконувати спостереження для швидкої фотометрії. Швидкісна фотометрія можлива завдяки застосуванню ПЗЗ камери нового типу Rolera MGI, яка має електронний затвор і дозволяє працювати в режимі, який наближений до телевізійного. В діючому варіанті кадри прив'язувалися за системним часом керуючого комп'ютера. Системний час комп'ютера безперервно контролювався за сигналами NTP-серверу часу рангу 1, який знаходився в одній локальній мережі з реєструючим комп'ютером, за допомогою програми *Windows Time Synchronizer* [21]. Перші спостереження показали можливість використання подібної системи для покриттів зір Місяцем. В якості ілюстрації у табл. 1 наведені результати спостережень покриттів зірок за 2 квітня 2009 р., які виконані В. Клещонком. При спостереженнях використовувався стандартний фільтр R, а електронне підсилення встановлено на 3800. Експозиція дорівнювала 30 мс. Для реєстрації виділялася ділянка розміром приблизно 70х70 пікселів. Умови спостережень: легкий серпанок, фаза Місяця – 0.52, висота над горизонтом 48°-38°. Через серпанок було застосовано фільтр та знижений коефіцієнт підсилення камери. При таких умовах чутливість системи була достатня для реєстрації покриттів зір до 9.2<sup>m</sup>.

Для обробки спостережень була використана програма OccultdarkMGI, яка є адаптованою версією програми Occultdark1. У результаті були побудовані фотометричні криві покриттів. Фотометрична крива покриття зорі SAO 79091 показана на рис. 1. Звертає на себе увагу дещо велика дисперсія вимірюваних інтенсивностей, але це може бути пов'язане з погодними умовами під час спостережень. Проте момент покриття визначається досить впевнено. На цій кривій навіть помітний ефект сходинки, аналогічний тому, що відмічався при телевізійних спостереженнях. І в цьому випадку так само можливе покращення визначення моменту покриття з врахуванням інтенсивності перехідного відліку.

Таблиця 1. Результати спостережень покриттів зір Місяцем 2 квітня 2009 р. на телескопі UNIT

No	2005	Координати зорі		m D	Ефемерид-	Пришо	Спостережний	Похибка,
IN≌	зоря	α	δ	ш, к	ний час, UTC	лвище	час, UTC	MC
1	79150	7 11 55.3	23 24 56	9.1	21 07 28	DD	21:07:27.81	27
2	79073	7 07 25.8	23 36 14	8.6	19 16 30	DD	19:16:30.22	27
3	79091	7 08 07.0	23 39 14	8.0	19 25 56	DD	19:25:55.63	27
4	79115	7 09 17.5	23 38 23	8.2	19 55 23	DD	19:55:22.25	29
5	X 98605	7 10 03.5	23 42 21	9.2	19 55 23	DD	20:15:13.72	65

Примітка: номер зорі дається за каталогом SAO [22], з поміткою Х – номер за каталогом XZ [23], DD – покриття темним краєм Місяця згідно міжнародної класифікації.



Рис. 1. Фотометрична крива покриття у відносних одиницях зорі SAO 79091, яка отримана на телескопі UNIT з швидкісною камерою Rolera MGI 2 квітня 2009 р. Точки позначають інтенсивність зорі для окремих кадрів, пунктиром позначені припустимі границі зміни яскравості в межах 20, суцільна лінія – апроксимація фотометричної кривої сходинкоподібним сигналом, кругом помічений відлік з проміжною інтенсивністю Обробка спостережень показала, що середня частота кадрів відповідає значенню періоду 42 мс, хоча експозиція кадру дорівнювала 30 мс. Це свідчить, що під час роботи телескопу система не встигала передавати (приймати) зображення за тривалість експозиції і змушена була затримувати початок наступного кадру. Для зменшення часу передачі є два шляхи:

1. Застосування об'єднання зображень на кількох пікселях (біннінг). Такий спосіб не дуже вдалий для слабких зір, розмір яких в нашому випадку наближається до одного пікселя. У разі його застосування для слабких зір співвідношення сигнал/шум в зображенні буде зменшуватися, що відобразиться на точності спостережень. Для яскравих зір розмір зображення значно більший одного пікселя і такий спосіб цілком придатний.

2. Зменшення розміру ділянки зображення, яка записується. Такий спосіб підходить для будь яких зір. Проте зменшення до розмірів менших ніж 10х10 не бажане, тому що в такому разі зменшиться точність визначення рівня фону. Крім того, при не зовсім точному веденні або за вітряної погоди, зоря може вийти з поля зору.

У подальшому на телескопі UNIT планується мати часову прив'язку кадрів за допомогою GPS приймача з точністю до

кількох мікросекунд. Плануються також спостереження з кращою роздільною здатністю по часу. Для яскравих зір подію можна буде реєструвати з роздільною здатністю краще ніж 10 мс. Це дасть можливість реєструвати дифракційну картину під час покриття. Дуже цікавими на наш погляд також мають бути синхронні спостереження покриттів в головній астрономічній обсерваторії на телескопі UNIT та в Лісниках на телескопі АЗТ-14 з телевізійним комплексом «Спалах». Ці два пункти розташовані на відстані біля 7 км приблизно на одному меридіані. Такі синхронні спостереження можуть більш впевнено визначати подвійність зір, особливо з малою відстанню між компонентами. Також це дозволить виявляти локальні особливості профілю Місяця.

**Висновки**. 1. В Астрономічній обсерваторії Київського національного університету зберігається і розвивається традиційний напрямок досліджень – спостереження покриттів зірок Місяцем.

2. Останнім часом досягнутий значний прогрес в методиці та точності спостережень покриттів зірок Місяцем за рахунок застосування нових приладів.

3. Існують принципові можливості покращення точності та інформативності результатів спостережень покриттів.

1. The Hipparcos Catalogue // 1997. - ESA SP - 1200.

- Feissel M., Mignard F. The adoption of ICRS on 1 January 1998: meaning and consequences // Astron. Astrophys. 1998. Vol. 331. L.33–L36.
   McCarty D.D., Luzum, B. J. Observations of Luni Solar and Free Core Nutation // Astron. J. 1991. Vol. 102. P. 1889–1895.
- 4. Williams J.G., Newhall X.X., Dicky J.O. Luni Solar Precession: Determination from Lunar Laser Ranges // Astron. Astrophys. 1991. Vol. 241. - P. 9-12.

5. Miyamoto M., Soma M. Is the Vorticity Vector of the Galaxy Perpenducular to the Galactic Plane. Precessional Correction and Equinoctial Motion Cor-rection to the FK5 System // Astron. J. – 1993. – Vol. 105. – P. 691–701.

6. Standish E. M. JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE405/LE405. // JPL IOM - 1998 - 312. F-98-048.

7. Dunham D. An Introduction to grazing occultation // Occultation Newsl. – 1996. – Vol. 6. – № 12. – P. 260–261.

8. Soma M. Limb Profiles of the Moon Obtained from Grazing Occultations Observations // Publ. Nat. Astron. Obs. Japan. - 1999. - Vol. 5. - P. 99-119.

9. Buttner D. New Lunar Limb Data from Occultation Observations // Occultation Newsl. - 1998. - Vol. 7, № 3. - P. 4-12.

10. *Чикмачев В.І., Шевченко В.В.* Макромодель рельефа южной полярной области Луны // Астрон. вестник. – Т. 33, №1. – С. 18–28. 11. *Brown D.* Requestfor more observations of occultations // Astron. J. – 1927. – Vol. 27, №12. – Р. 99–100. *12. Яковкин А.А.* Движение, вращение и фигура Луны / Луна. – М., 1960. – 50 с.

13. Report of Lunar Occultations observations. The observations 1994 and Their Reduction. The List of Telescopes and Observers / International Lunar Occultations Centre Geodesy and Geophysics Division Hydrographic Departament. – Tokyo, 1997. – № 15. – P. 1–5.

14. Осипов О.К., Буромський М.І. Результати спостережень дотичних покриттів зірок Місяцем у 1973 – 1988 рр. // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2002. – Вип. 38. – С. 26–30.

15. Watts C.B. The Marginal Zone of the Moon / Astronomical Papers prepared for the use of the Astronomical Ephemeris and Nautical Almanac. - 1963. Vol. XVII. - 951 p.

16. Клещонок В.В., Буромский М.І. Перші результати спостережень з астрономічним телевізійним комплексом «Спалах» // Вісн. Київ. ун-ту, Астрономія. – 2005. – Вип. 41–42. – С. 99–101.

17. Kleshchonok V.V. The "Spalakh" astronomical television system // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. – 2005. – № 5. – Р. 409–412. 18. Kleshchonok V.V., Buromsky M.I. Observations of stars occultations by the Moon with the "Spalakh" television system // Kinematics and Physics of Ce-

lestial Bodies. Suppl. – 2005. – № 5. – Р. 405–408. 19. Клещонок В.В., Буромский Н.И., Хатько И.В. Киевская электронная база данных телевизионных наблюдений покрытий звезд Луной // Кинематика и физика небес. тел. – 2008. – Т. 24, №2. – С. 158–163.

20. Kleshchonok V.V., Romanyuk Ya.O., Lukyanyk I.V., Svyatogorov O.O., Reshetnyk V.M., Danylevsky V.O. Program and hardware complex of the UNIT's telescope / Comets, Asteroids, Meteors, Meteorites, Astroblems, Craters. Memorial International Conference. Programme and Book of Abstracts. – September 28 – October 3, 2008. – Vinnytsia, 2008. – P. 76–77.

21. http://www.wintimesync.com/

22. Star Catalog Positions and Proper Motion of 258997 Stars for the Epoch and Equinox of 1950 in Four Parts / Smithsonian Astrophysical Observatory Staff. Smithsonian Institution, Washington DC, 1966(1966).

23. Schmidt R.E., Corbin T.E., Van Flandern T.C. New USNO Star Catalog (XZ) of 32221 Stars within 6° 40' of the Ecliptic // Bull. Am. Astron. Soc. – 1980. – Vol. 12.

Надійшла до редколегії 13.05.09

УДК 523.64

К. Чурюмов, В. Кручиненко, В. Клещонок, І. Лук'яник, Ф. Кравцов, Л. Чубко, О. Баранський, В. Пономаренко

#### дослідження комет

### У КИЇВСЬКОМУ НАЦІОНАЛЬНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

Наведено підсумки досліджень комет, виконаних в Астрономічній обсерваторії Київського університету імені Тараса Шевченка, протягом 1845–2009 рр. У результаті цих досліджень одержано великий обсяг комплексних фотографічних, спектральних, фотоелектричних з вузькосмуговими фільтрами, поляриметричних, телевізійних та ССД спостережень комет. На основі цих спостережень відкрито дві комети, вивчено фізичні умови в нейтральних комах та плазмових хвостах комет, відкрито світіння негативного іона вуглецю С2, розроблено нові теоретичні моделі плазмових структур комет та ін. Також здійснено комплексні спостереження та дослідження комет Галлея, Джакобіні-Цінера, Борелі, Вільда 2, Темпеля 1 та Чурюмова-Герасименко – головних цілей космічних місій «Айс», «Вега-1 та 2», «Джотто», «Діп Спейс», «Стардаст», «Діп Імпект» та «Розетта». До крижаного ядра комети 67Р/Чурюмова-Герасименко, відкритої у 1969 р. в Київському університеті імені Тараса Шевченка, 2 березня 2004 р. Європейським космічним агентством відправлено космічний апарат «Розетта» з метою дослідження первинної речовини Сонячної системи безпосередньо на ядрі цієї комети у 2014-2015 рр.

The results of the study of comets obtained at the Astronomical Observatory during 1939-2004 are given. As a result of these investigations a great number of complex photographic, spectral, photoelectric with the narrow band filters, polarimetric, TV and CCD observations of comets were obtained. On the basis of these observations two comets was discovered, physical conditions in the neutral comas and plasma tails of comets have been studied, luminosity of the negative ions of carbon  $C_2$  in the spectrum of comet (1990 VI) has been discovered, new theoretical models for the peculiar plasma structures of the comets have been worked out and some other new results were given. Also ground based observations and explorations of comets Halley, Giacobini-Zinner, Borrelly, Wild 2, Tempel 1 and Churyumov-Gerasimenko – the main targets of space missions "ICE", "Vega-1 and 2", "Giotto", "Deep Space", "Stardust", "Deep Impact" and "Rosetta" were made. To comet 67P/Churyumov-Gerasimenko icy nucleus the launch of the space mission "ROSETTA" was done on Mar. 2 2004 by the European Space Agency with the goal of investigation of relict matter in situ on the comet 67P nucleus in 2014-2015.

Вступ. Дослідження комет успішно розвиваються в Астрономічній обсерваторії Київського університету імені Тараса Шевченка з 70-х років XIX століття, коли директором обсерваторії був проф. М.Ф. Хандриков, який у 1865 р. захистив докторську дисертацію в Москві на тему "Очерк теории определения планетных и кометных орбит из трех наблюдений». Тематика кометних досліджень була значно розширена, починаючи з 1939 р., коли університетську астрономію очолив проф. С.К. Всехсвятський. Ці дослідження були в першу чергу пов'язані з поглибленим вивченням фізичної природи комет та їх важливої космогонічної ролі у Сонячній системі. Багато ідей Всехсвятського з фізики комет було розвинуто в працях астрономів обсерваторії: В.П. Конопльовою, В.І. Чередниченко, О.О. Деменко, К.І. Чурюмовим, В.П. Таращук, Ф.І. Кравцовим, В.В. Клещонком, І.В. Лук'яником, Шабас Н.Л. і Чубко Л.С. у період

© К. Чурюмов, В. Кручиненко, В. Клещонок, І. Лук'яник, Ф. Кравцов, Л. Чубко, О. Баранський, В. Пономаренко, 2010

1945-2009 pp. Дослідження комет на Обсерваторії проводилися, головним чином, за такими науковими напрямками: астрометрія та великомасштабні фотографічні спостереження комет, візуальна та фотографічна фотометрія комет, включаючи фотографічні пошуки нових об'єктів, фотоелектрична фотометрія комет з вузькосмуговими інтерференційними фільтрами, спектроскопія та спектрофотометрія комет, теоретичне моделювання великомасштабних явищ та пекулярних структур плазмових хвостів комет. У рамках цих напрямків було отримано наступні важливі результати: відкрито та досліджено дві нові комети: короткоперідичну комету Чурюмова-Герасименко (67Р) з родини Юпітера та довгоперіодичну комету Чурюмова-Солодовникова (C/1986 N1); комета Чурюмова-Герасименко за своїми орбітальними елементами виявилася унікальним космічним об'єктом, до якого в березні 2004 р. відправлено космічний апарат «Розетта» з метою посадки у 2014 р. спускного модуля (вперше в світі!) на ядро комети для дослідження реліктової речовини; протягом 1986-2009 р. отримано понад 10000 спектрів комет Галлея, Шомаса, Свіфта-Тутля, Скоритченка-Джорджа, Хякутаке, Гейла-Бопа, чотирьох комет Лінеар (С/1999 S4, С/2000 WM1, С/2001 A2 та С/2002 T7), Ікейя-Жанга, 19Р/Борелі, 9Р/Темпеля 1, Мейчхоулца С/2004 Q2, 17Р/Холмса та ін. з 6-м та 1-м телескопами – визначено фізичні параметри атмосфер цих комет; знайдено існування люмінесцентного континууму в спектрах комет Скоритченка-Джорджа, Шомаса, Гейла-Бопа, С/1999 S4, С/2001 А2, 9Р/Темпеля 1 та Мейчхоулца С/2004 Q2; за допомогою дифузійної моделі визначено параметри магнітного поля у плазмових хвостах комет Галлея, Чурюмова-Герасименко, Абе та Остина; вперше знайдено світіння негативного іона вуглецю С2 в навколоядерній області комети Скоритченка-Джорджа (1990 VI); показано, що хвильові структури в кометних плазмових хвостах можуть збуджуватись у результаті особливого режиму нестійкості Кельвіна-Гельмгольця, який реалізується поблизу порогу її збудження; запропоновано тривимірну модель променевої структури плазмового хвоста комети як результат розвитку філаментаційної нестійкості за наявності добре розвиненої іонно-звукової турбуленції у кометній плазмі при її обтіканні сонячним вітром; проведено фотоелектричні спостереження супутників Юпітера Іо, Європи та Калісто з 16 по 22 липня 1994 р. під час падіння на планету 21 вторинного ядра комети Шумейкерів-Леві 9 (1993) та зафіксовано підвищення яскравості (спалахи) Іо та Європи поблизу моментів падіння вторинних ядер А та Q2 на Юпітер, що є світловою луною від файєрболів, які утворилися в атмосфері планети-гіганта під час вибуху цих ядер, визначено параметри штучного кратера на поверхні ядра комети 9Р, проаналізовано криві блиску багатьох яскравих комет останніх років і виявлено зв'язок активності цих комет з сонячною активністю та інше. С.К. Всехсвятський за передбачення кілець у планет-гігантів і вулканічну активність супутників Юпітера одержав премію Ф.О. Бредихіна АН СРСР у 1977 р. К.І. Чурюмов за цикл робіт «Хімічний склад, морфологія і активність комет" (2004 р.) одержав премію імені Тараса Шевченка КНУ імені Тараса Шевченка та за серію робіт "Спектральні дослідження зірок і комет" (2005 р.) – одержав премію імені академіка Барабашова НАН України.

Основні результати кометних досліджень [1-16]. Нова фаза досліджень з фізики та динаміки комет почалася в університеті у 80-х роках, коли до Сонця наблизилася відома комета Галлея. У зв'язку з цією подією до ядра комети Галлея, для її дослідження, було заплановано 6 космічних місій. Для спостережень і досліджень цієї унікальної комети і наземної підтримки космічних місій, до комети Галлея було створено міжнародну Варту комети Галлея (IHW) та Радянську програму досліджень комети Галлея (РАПРОГ). С.К. Всехсвятського та К.І. Чурюмова було включено в склад координаційного комітету РАПРОГ.

Астрономічна обсерваторія активно включилася в програми ІНШ і РАПРОГ. У 1984–1987 рр. К.І. Чурюмов, В.П. Таращук та В.В.Клещонок одержали оригінальний спостережний матеріал по кометі Галлея з астрометрії, спектроскопії, візуальної фотометрії та електрофотометрії з вузькосмуговими фільтрами ІНШ, поляриметрії, великомасштабних та навколоядерних явищ. За період з 4 листопада 1984 р. по 5 липня 1986 р. одержано 214 точних положень комети Галлея за допомогою 20-см рефрактора Репсольда-Мерця Астрономічної обсерваторії Київського університету, 100-см рефлекторів Цейсса в Ассах (Казахстан) та на Санглоці (Таджикістан), 50-см рефлекторів на Каменському Плато (Казахстан) та в Кримський астрофізичній обсерваторії. Ці дані використовувалися для уточнення елементів орбіти комети Галлея та корекції траєкторій польоту космічних апаратів Вега-1, Вега-2, Джотто, Суісей та Сакегаке з метою наведення їх на ядро комети Галлея. Отримано унікальні великомасштабні фотографії комети Галлея у прямому фокусі (f = 13.3 м) 100-см рефлектора Цейсса 12, 16–17 грудня 1985 р., 7–8 січня та 11 травня 1986 р., на яких вперше в світі знайдено кільцеві структури у плазмовому хвості комети, а також зафіксовано рідкісне явище осьового відриву плазмового хвоста комети. Було виконано спектральні спостереження комети Галлея – одержано близько 350 щілинних та об'єктивних спектрограм, на деяких з них вперше в Україні виявлено емісії гідроксилу ОН; отримано спектральні розрізи голови комети Галлея у 12 фіксованих позиційних кутах.

Одночасно з виконанням програм IHW і СОПРОГ та після їх закінчення спостерігалися і вивчалися інші комети (ІРАС-Аракі-Олкока, Кромеліна, Брорзена-Меткофа, Шумейкерів-Леві 9, Хякутаке, Гейла-Бопа, Борелі, Темпеля 1, Чурюмова-Герасименко та ін.). Унікальні спектри комет Скориченка-Джорджа (1990 VI), Леві (1990 XX), Танака-Мачхолца (1991 X), Свіфта-Туттля (1992t) та Шомаса (1992х) було отримано К.І.Чурюмовим разом зі спостерігачами САО РАН за допомогою спектрального ТВ-сканера, а також спектрографа з ПЗЗ-матрицею, встановлених на найбільшому в ті часи телескопі світу - шестиметровому рефлекторі ВТА.

Унікальний спостережний матеріал – швидкісна електрофотометрія, спектри, телевізійні та ПЗЗ-зображення супутників Юпітера та нових плям в атмосфері Юпітера під час падіння на нього комети "тисячоліття" – короткоперіодичної комети Шумейкерів-Леві 9, що в 1992 р. була зруйнована припливними силами в зоні Роша Юпітера на 21

вторинне ядро, які потім через два роки протягом тижня з 16 до 22 липня 1994 р. зіткнулись з Юпітером на широті -45°.

Дослідження комет на Обсерваторії проводилися головним чином за такими науковими напрямками: астрометрія та великомасштабні фотографічні спостереження комет, візуальна та фотографічна фотометрія комет, включаючи фотографічні пошуки нових об'єктів, фотоелектрична фотометрія комет з вузькосмуговими інтерференційними фільтрами, спектроскопія та спектрофотометрія комет, теоретичне моделювання великомасштабних явищ та пекулярних структур плазмових хвостів комет. У рамках цих напрямків було отримано наступні основні результати [1–16]:

Основні результати кометних досліджень в КНУ:

- відкрито та досліджено нову короткоперіодичну комету Чурюмова-Герасименко (1969 VI) з родини Юпітера. Розроблено теорію її руху. Винайдено фазову залежність блиску комети в її появі 1982 р., що частково пояснює загадковий факт кривої блиску цієї комети - аномально велике запізнення максимуму її яскравості після перигелію. Комета виявилася унікальним космічним об'єктом, до якого в березні 2004 р. було відправлено космічний апарат «Розетта» з метою посадки у 2014 р. посадкового модуля на ядро комети для дослідження реліктової речовини;

- відкрито довгоперіодичну комету Чурюмова-Солодовникова (1986 IX). Вперше встановлено, що вона рухається за витягнутою еліптичною орбітою, визначено елементи її первинної орбіти, тобто незбуреної орбіти за межами планетної системи (за Плутоном); показано, що комета прийшла з внутрішніх областей Хмари Епіка-Оорта (з відстані приблизно 4000 а.о.);

- досліджено особливості газопродуктивності молекул CN та OH в кометі Чурюмова-Герасименко (1982 VIII) на основі ультрафіолетового спектра комети, одержаного з борту супутника IUE (Міжнародний Ультрафіолетовий Дослідник). Показано, що відношення логарифмів газопродуктивності молекул гідроксилу OH та ціану CN для цієї комети приблизно втричі більше ніж для комети Галлея, та вдвічі більше аналогічного співвідношення для "нормальної" комети;

- проведено порівняльний аналіз газопродуктивності в кометах Галлея (1986 III), Джакобіні-Цінера (1985 XIII), Хартлі-Гуда (1985 VII) та Тілє (1985 XIX). Встановлено помітну відмінність у газопродуктивності короткоперіодичної комети Джакобіні-Цінера порівняно з "нормальною" кометою та зроблено висновок про істотне еволюційне дезінтегрування її крижаного ядра або про особливість її конденсування у первинній протопланетній хмарі за умов, відмінних від умов конденсування багатьох інших комет;

- досліджено фізичні параметри навколоядерної області комети Галлея на основі щілинних спектрів, одержаних 11, 14 грудня 1985 р. та 8, 9 і 10 травня 1986 р.;

- за допомогою дифузійної моделі Шульмана визначено параметри магнітного поля у плазмовому хвості комети Галлея. Вперше знайдено ефект зменшення магнітної індукції вздовж осі хвоста, що відірвався у комети 7 та 8 січня 1986 р., та встановлено, що відрив хвоста збігся з моментом перетину кометою межі секторної структури міжпланетного магнітного поля;

- досліджено еволюцію фізичних параметрів у плазмовому хвості комети Чурюмова-Герасименко на основі оригінальних фотографічних спостережень шестиметровим телескопом ВТА 12 та 13 січня 1983 р. Оцінка індукції магнітного поля в хвості: 12.I B = 256 нТ та 13.I B = 339 нТ;

- на основі оригінальних спектрів (спектральний ТВ сканер на шестиметровому телескопі) вперше знайдено світіння негативного іона вуглецю С2<sup>-</sup> в навколоядерній області комети Скоритченка-Джорджа (1990 VI);

- ідентифіковано в спектрі комети Скоритченка-Джорджа (1990 VI) рідкісне світіння молекул чадного газу СО в смугах триплета та Асунді. На цій підставі обговорюється питання про можливість наявності в ядрі цієї комети молекул формальдегіду або поліформальдегіду.;

- висловлено гіпотезу про наявність ціанополіїнів у крижаних ядрах комет, як батьківських молекул для утворення шляхом фотодисоціації радикала ціану CN та молекули вуглецю С<sub>2</sub>;

 показано, що хвильові структури в кометних плазмових хвостах можуть збуджуватись у результаті особливого режиму нестійкості Кельвіна-Гельмгольца, який реалізується поблизу порогу її збудження та приводить до виділення із загального спектра найбільш зростаючої моди (при умові, що швидкість сонячного вітру більше альвеновської швидкості в кометній плазмі). Модель дозволяє оцінити фундаментальне співвідношення між довжиною хвилі та радіусом хвильової структури (приблизно 10–20), що підтверджується спостереженнями;

- виконано чисельне моделювання розвитку дисипативного та недисипативного режимів електромагнітної філаментаційної нестійкості в кометній плазмі. Показано, що у випадку дисипативного режиму можуть утворюватися променеві структури у хвостах комет товщиною до 3000 км, що добре узгоджується зі спостереженнями;

запропоновано тривимірну модель променевої структури плазмового хвоста комети як результат розвитку філаментаційної нестійкості за наявності добре розвиненої іонно-звукової турбуленції у кометній плазмі при її обтіканні сонячним вітром. Показано, що товщина променів циліндричної форми досягає при цьому 10<sup>3</sup> – 10<sup>4</sup> км, кількість променів у хвості досягає 30;

 - розроблено солітонну модель плазмових згущень хвостів комет І-го бредихінського типу. Модель добре пояснює фізичні параметри та просторові розміри кільцевих згущень плазмових хвостів комет;

 на основі оригінальних спостережень спектрів комети Шомаса (1992х) за допомогою шестиметрового телескопа вивчено особливості газопродуктивності в цій кометі: знайдено аномальне співвідношення швидкостей виділення молекул С<sub>3</sub> до молекул CN, яке в 4 рази перебільшує аналогічне співвідношення для "нормальної" комети;

-На основі оригінальних поляризаційних спостережень комет за допомогою 1-м рефлектора Цейса і електрополяриметра в Ассах-Тургень (Казахстан) визначено фізичні параметри пилових частинок (розмір та показник заломлення) в навколоядерних ділянках комет 1Р/Галлея та 21Р/Джакобіні-Цинера; підраховано масу пилової складової цієї ділянки для обох комет; досліджено залежність частини радіації розсіяної пилом від довжини хвилі в головах цих комет; проведено порівняльний аналіз поляризаційних особливостей комет 1Р (Галлея) і 21Р (Джакобіні-Цинера).

-проведено фотоелектричні спостереження супутників Юпітера Іо, Європи та Калісто з 16 по 22 липня 1994 р. під час падіння на планету 21 вторинного ядра комети Шумейкерів-Леві 9 (1993е) та зафіксовано підвищення яскравості (спалахи) Іо та Європи поблизу моментів падіння вторинних ядер А та Q2 на Юпітер, що є світловою луною від файєрболів, які утворилися в атмосфері планети-гіганта під час вибуху цих ядер. За параметрами спалахів визначено фізичні параметри (маси та радіуси) ядер А та Q2;

-протягом 1996-2008 pp. отримано декілька тисяч спектрів комет Хякутаке, Гейла-Бопа, чотирьох комет Лінеар (С/1999 S4, С/2000 WM1, С/2001 A2, С/2002 T7), 19Р/Борелі, С/2002 V1 (НЕАТ), 153Р/Ікейя-Жанга, 9Р/Темпеля 1, 46Р/Виртанена, 8Р/Туттля, 17Р/Холмса та С/2004 Q1 (Мейчхоульца) за допомогою 6-м та 1-м телескопів САО РАН на горі Пастухова та 2-м телескопа Цейса на піці Терскол (Центральний Кавказький хребет) Міжнародного центру

астрономо-медико-екологічних досліджень ГАО НАНУ і ІНАСАН РФ, 2-м телескопа в Азербайджані (ШАО), 2.2-м телескопа в Мексиці, 1.52-м телескопа в Чилі – визначено фізичні параметри атмосфер цих комет; знайдено існування люмінесцентного континууму в спектрах комет Гейла-Бопа, С/1999 S4, С/2001 А2, 9Р/Темпеля 1 та С/2004 Q1 (Мейчхоульца), що є індикатором присутності в атмосфера комет складних органічних молекул, що відіграють роль люмінофорів, і визначено параметри цього континууму.

-Досліджено високоякісні спектри яскравої комети С/2002 С1 (Ікейя-Жанга), отримані разом з мексиканськими астрономами 5 травня 2002 р. на обсерваторії Гільєрмо Харо за допомогою 2.12-м рефлектора і спектрографа Болера-Чивенса з довгою щілиною. За фотометричними профілями визначено швидкості та час життя молекул CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> в голові комети на геліоцентричній відстані 1.41 а.о. і геоцентричній відстані 0.42 а.о. Проведено детальне ототожнення спектрів і виявлено рідкісне світіння емісійних ліній молекули СО в спектрах у видимому діапазоні довжин хвиль для комети Ікейя-Жанга (які раніше було ототожнено лише в трьох кометах), обчислено фактори Франка-Кондона для виявлених переходів (і вперше – для високо збуджених коливних переходів) – знайдено добре узгодження з відносною інтенсивністю знайдених переходів СО. З аналізу різних фотохімічних реакцій запропоновано молекулу CO<sub>2</sub><sup>+</sup> як батьківську молекулу для утворення молекул чадного газу (СО) в оптичному діапазоні.

-Проаналізовано каталог кривих блиску комет: У результаті цього аналізу були виявлені нові, раніше невідомі явища, що сприяють кращому розумінню фізичних механізмів активності комет і їхньої еволюції.

-Розраховано нові значення фізичних параметрів нейтральних атмосфер комет: швидкості витікання молекул з ядра та час життя для комет C/2000 WM1 (ЛІНЕАР), C/2002 T7 (ЛІНЕАР), C/2002 V1 (НЕАТ), 153P/Ікейя-Жанга і швидкостей газовиділення для комет C/2000 WM1 (ЛІНЕАР) і 153P/Ікейя-Жанга за моделями Хазера та Шульмана.

-Визначено хімічний склад нейтральних атмосфер та складено детальні таблиці ототожнених емісійних ліній для комет С/2000 WM1 (ЛІНЕАР), С/2002 T7 (ЛІНЕАР), С/2002 V1 (НЕАТ) та 153Р/Ікейя-Жанга.

-Побудовано детальні (на великому інтервалі часу) криві блиску з врахуванням апертури інструмента, проведено розрахунок значень фотометричних параметрів, проведено дослідження зв'язку флуктуацій блиску із сонячною активністю для наступних комет: С/1999 S4 (ЛІНЕАР), С/2000 WM1 (ЛІНЕАР), С/2002 T7 (ЛІНЕАР), С/2002 V1 (НЕАТ), Мачхольца, Ікейя-Жанга і Темпеля 1. Запропонована класифікація кривих блиску комет на три типи за величиною запізнення максимуму яскравості відносно проходження кометою перигелію.

-За допомогою моделі Епіка було обчислено можливі розміри кратера, який утворився в результаті зіткнення з ударником. Також з використанням цієї моделі було виведено емпіричну формулу, яка зв'язує міцність на стиснення речовини поверхневого шару ядра комети 9Р/Темпель 1 з діаметром кратера. Було проведено дослідження різних літературних джерел щодо міцності речовини комет й оцінено, що нижня межа міцності повинна складати 1 кН/м<sup>2</sup>, а верхня – 100 кН/м<sup>2</sup>, що узгоджується з нашими розрахунками. В припущенні, що густина речовини кометної поверхні 0.5–1.0 г/см<sup>3</sup> (середнє значення 0.75 г/см<sup>3</sup>) розміри кратера мали б бути: глибина 4.8–5.6 м (середнє значення 5.2 м), діаметр 25–80 м (середнє 32 м). Міцність поверхневої речовини ядра комети: 1–100 кН/м<sup>2</sup> (середнє значення 50 кН/м<sup>2</sup>). На жаль, КА "Діп Імпакт" не визначив розміри кратера, оскільки кратер був заекранований хмарою дрібного пилу, що утворився при зіткненні. Але у 2011 р. КА "Стардаст" наблизиться до ядра комети Темпеля 1 з метою отримати зображення цього штучного кратера. Це дасть змогу перевірити наші припущення стосовно міцності поверхневої речовини ядра комети і обраної нами моделі обчислення геометричних розмірів штучного кратера.

- Починаючи з 2006 р. ведеться постійний моніторинг комет, астероїдів, незвичайних об'єктів зоряного неба на київській кометній станції АО КНУ (міжнародний код MPC 585) за допомогою двох телескопів АЗТ-8 та АЗТ-14 з ПЗЗкамерами. За період 2006–2009 рр. Отримано 2138 точних положень 176 комет, 302 положення 57 нумерованих астероїдів та 220 положень 30 ненумерованих малих планет. Результати спостережень в Лісниках надруковано та регулярно друкуються в міжнародному циркулярі MPC (Minor Planets Circular). Спектральний та фотометричний моніторинг комет регулярно проводиться співробітниками відділу за допомогою великих телескопів: 6-метроовому САО РАН та 2-метровому на Терсколі (ГАО НАНУ та ІНАСАН РАН).

#### Нагороди та відзнаки.

- С.К. Всехсвятського нагороджено премією імені Ф.О. Бредихіна АН СРСР, медаллю "За відкриття нових астрономічних об'єктів" за передбачення існування кілець у всіх планет-гігантів і вулканізму на їх супутниках; ЮНЕСКО оголосило 2005 рік – Роком астронома С.К. Всехсвятського.

-К.І. Чурюмова нагороджено двома медалями "За відкриття нових астрономічних об'єктів" за відкриття двох комет, двома срібними та золотою медалями павільйону "Космос" ВДНГ СРСР, Почесною Грамотою Президії Верховної Ради Калмикиї, Почесною Грамотою Президії Верховної Ради України, дипломом-сертифікатом Міжнародної Варти комети Галлея, присуджено почесне звання заслуженого працівника народної освіти України, нагороджено двома орденами України «За заслуги» 3-го та 2-го ступеня (2003 та 2009 рр.), обрано професором КНУ та членом-кореспондентом Національної Академії Наук України, включено до книг "Хто є хто в України" в 1999-2007 рр., нагороджено премією академіка М.П. Барабашова НАН України, премією імені Тараса Шевченка і Почесною грамотою Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Почесною грамотою київського Міського Голови, Почесною грамотою Президії НАН України.

-Канд. фіз.-мат. наук І.В. Лук'яник отримав стипендію Президента України.

-Іменами дослідників комет КНУ названо малі планети Сонячної системи: «Всехсвятський» (2721) на честь С.К. Всехсвятського, «Чурюмов» (2627) на честь К.І. Чурюмова, «Герасименко» (3945) на честь С.І. Герасименко, «Шульназарія» (4187) на честь Л.М. Шульмана і Г.К. Назарчук, Демалія (6129) на честь Деменко О.О., «Вератар» (4863) на честь Таращук В.П., «Кларасмі» (14699) на честь К.Є.Смірнової, «Шабас» (15427) на честь Н.Л. Шабас, «Чубко» (18735) на честь Л.С. Чубко, «Клещонок» (21945) на честь В.В.Клещонка

Верхоглядова О.П., Коцаренко Н.Я., Пасько В.П., Чурюмов К.И. Теория крупномасштабной стратификации в плазменных хвостах комет // Письма в Астрон. журн. – 1993. – Т. 19., №9. – С. 823–867.
 Чурюмов К.І. Смуги Асунді а<sup>3</sup>Σ<sup>\*</sup> – а<sup>3</sup>П, та триплету d<sup>3</sup>Δ – а<sup>3</sup>П у спектрі комети Скориченка-Джорджа // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 1992.

– Вип.3. – С. 46–49.

3. Чурюмов К.И. Эволюционные физические процессы в кометах // Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. — М., 1992. — 104 с.

4. *Чурюмов К.И., Чорный Г.Ф., Шаповалова А.И*. Открытие эмиссии отрицательного иона углерода С<sub>2</sub><sup>-</sup> в спектре кометы Скориченко-Джорджа (1990 VI) // Письма в Астрон. журн. – 1993. – Т. 19, №9. – С. 816–822.

5. Chubko L.S., Churyumov K.I., Afanasiev V.L., Lukyanyk I.V., Kleshchonok V.V. Comparison of the Spectra of the Comets 9P / Tempel 1 and C / 2004 Q2 (Machholz) // Deep Impact as a World Observatory Event: Synergies in Space, Time, and Wavelength. Proceedings of the ESO/VUB Conference held in Brussels, Belgium, 7-10 August 2006. Springer Berlin / Heidelberg, 2009. - P. 197-200

6. Churyumov K.I. Discovery, observations and investigations of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko in Kyiv // in the book "The new ROSETTA targets".

Astrophysical Library. Kluwer acad. Publ. Collangelli et al. (eds), - 2004. - p. 1–13
 *T. Churyumov K.I., Kleshchonok V.V., Vlassyuk V.V.* Spectra of comet Hale-Bopp (C/1995 O1) obtained with the 6-m BTA reflector at Mount Pastukhov.
 // Earth, Moon and Planets, - 1999, - Vol.78, №2, - P. 111–117.
 8. *Churyumov K. I., Kruchinenko V.G., Chubko L.* S. The Size of the Artificial Explosive Crater on the Nucleus of Comet 9P/Tempel // Deep Impact as a

World Observatory Event: Synergies in Space, Time, and Wavelength. Proceedings of the ESO/VUB Conference held in Brussels, Belgium, 7-10 August 2006. Springer Berlin / Heidelberg, 2009. - P. 191-196

9. Churyumov K.I., Luk'yanyk I.V., Berezhnoi A.A., Chavushyan V.H., Sandoval L., Palma A., Kleshchonok V.V., Chubko L.S. Spectral observations of the comet C/2000 WM1 (LINEAR) in Mexico // Astron. Astrophys. – 2003. – Vol. 22, No. 4-5. – P. 625–630.

10. Churyumov K.I., Lukyanyk I.V, Vlassyuk V.V., Borisov N.V. Spectra of Split Comet C/1999 S4 (LINEAR) // Earth, Moon and Planets, - 2002, - Vol. 90. - P. 141-146

Churyumov K.I, Lukyanyk I.V, Berezhnoi A.A., Chavushyan V.H., Sandoval L., Palma A. Optical Spectroscopy of Comet C/2000 WM1 (LINEAR) at the Guillermo Haro Astrophysical Observatory in Mexico // Earth, Moon and Planets, – 2002, – Vol. 90, – P. 361–368
 *Churyumov K.I., Rozenbush V.K.* Peculiarities of gas and dust production rates in comets P/Halley (1986 III), P/Giacobini-Zinner (1986 III), P/Hartley-Good (1985 VII) and P/Thiele (1985 XIX) // Astron. Nachr. – 1991. – Vol. 312. N.6. – P. 385–392.

13. Churyumov K.I., Rozenbush V.K., Rspayev F.K., Gorodetsky D.I. Some results of the narrowband photometry of comet P/Halley (1986 III)
 // Astrophys. J. – 1990. – Vol. 356. – P. 687–692.
 14. Picazio E., De Almeida A., Churyumov K.I., Andrievskii S.M., Lukyanyk I.V. The Optical Spectroscopy and Near Infrared Observations of Comet

C/2000 WM1 (Linear) in December, 2001 in Chile and Brazil // Earth, Moon and Planets, - 2002, - Vol. 90, - P. 391-400 15. Filonenko V. S. and Churyumov K. I. The Visual Brightness Behavior of Comet 9P/Tempel 1 During 1972-2005 // Deep Impact as a World

Observatory Event: Synergies in Space, Time, and Wavelength. Proceedings of the ESO/VUB Conference held in Brussels, Belgium, 7-10 August 2006. Springer Berlin / Heidelberg, 2009. – P. 73–77.

16. Lykyanyk I.V., Churyumov K.I. Observations of Comet C/2001 A2 (LINEAR) with the Multipupil Fiber Spectrograph // Earth, Moon and Planets, – 2002, – Vol. 90, – P. 177–183

Надійшла до редколегії 25.05.09

УДК 523.68

Ю. Тарануха, П. Козак, О. Рожило, В. Кручиненко

### ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ МЕТЕОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

У роботі розглядається історія та деякі результати метеорних досліджень, що проводились в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка за період 1957-2007 рр. За цей час науковцями відділу малих тіл Сонячної системи виконаний великий обсяг досліджень кінематичних та фізичних властивостей метеорних тіл. Захищено 1 докторську та 7 кандидатських дисертацій. Опубліковано більше 600 наукових праць у вітчизняних та зарубіжних журналах. Видана одна монографія.

The history and some results of meteor investigations, which were carrying out at Astronomical Observatory of National Taras Shevchenko University of Kyiv during 1957-2007 are considered in the article. For this period the scientists of department of small bodies of the solar system performed a large range of investigations of kinematical and physical properties of meteor bodies. They have defended 1 doctorate and 7 candidate's theses. More than 600 scientific works were published in native and foreign journals and 1 monograph.

1. Спостереження за допомогою фотографічних патрулів. Метеорні дослідження в Астрономічній обсерваторії Київського державного університету ім. Т.Г. Шевченка розпочалися в 1957 р. під час проведення Міжнародного геофізичного року (МГР). Міжнародний геофізичний рік був грандіозним науковим заходом. Він здійснювався силами вчених 67 країн світу впродовж 18 місяців – з 1 липня 1957 р. по 31 грудня 1958 р. Близько десяти тисяч науковців виконували великий обсяг досліджень різних геофізичних явищ в атмосфері Землі, на її поверхні, під водою та під землею. До участі в МГР було залучено 17 наукових установ України, в тому числі й Київський державний університет ім. Т.Г.Шевченка [1].

Включення цих досліджень в програму МГР не було випадковим: дослідження земної атмосфери на висотах 80-100 км, де в основному і відбуваються метеорні явища, були, і до цього часу є, важливими для розуміння різних аспектів динаміки атмосфери. Крім геофізичних актуальними були також астрономічні проблеми, пов'язані з динамікою та еволюцією малих тіл Сонячної системи. Значний науковий і практичний інтерес представляють дослідження допливу метеорної речовини на Землю, фізичних процесів руйнування як великих, так і малих тіл, що входять в атмосферу з гіперзвуковими швидкостями (11-72 км/с), а також вивчення питань, пов'язаних з безпекою космічних польотів.

Підготовчі роботи по здійсненню наукової програми МГР розпочалися раніше. В 1956-1957 рр. поблизу Києва були побудовані дві спостережні станції: одна біля с. Лісники Києво-Святошинського району, друга – біля с. Трипілля Обухівського району. Зрозуміло, що для визначення просторових координат метеора потрібно мати його зображення, отримані одночасно з двох пунктів, рознесених на десятки кілометрів.

Фотографічні спостереження метеорів проводились одночасно з двох пунктів (Лісники, Трипілля, базис 24.8 км) на установках "Метеорний патруль", виготовлених одеським заводом "Кінап". Комплект кожного агрегату мав чотири аерофотокамери НАФА-3с/25 (об'єктив "Уран-9", F = 250 мм, D : F = 1 : 2.5, поле зору 39° × 53°). Камери були орієнтовані таким чином, щоб оптичні осі відповідних камер з двох пунктів перетинались на висоті 95 км.

У зв'язку з введенням у дію Трипільської ДРЕС умови для оптичних та радіолокаційних спостережень на станції в Трипіллі значно погіршились і виникла необхідність перенести її в інше місце. Таке місце було вибране на захід від Києва поблизу с. Пилиповичі Бородянського району Київської області. Спостереження на новій станції проводяться з 1977 р. Необхідно зауважити, що велику організаційну і практичну роботу по переносу станції виконав тогочасний директор Астрономічної обсерваторії Герой Радянського Союзу доц. П.Р. Романчук.

Базисні фотографічні спостереження метеорів були новою справою не лише для нашої обсерваторії, але й для всього СРСР. Що стосується фізичної теорії метеорів, то її основа була розроблена Б.Ю. Левіним і викладена в монографії [2]. А от теорію спостережень метеорів та визначення їх орбіт потрібно було створювати самим. Крім того, самі спостереження та їх опрацювання були досить кропіткою працею. Всі ці задачі вирішували співробітники метеорного відділу Астрономічної обсерваторії КУ В.П. Конопльова, Є.В. Сандакова, О.К. Терентьєва, Ю.М. Кривуца, В.В. Бенюх, В.Г. Кручиненко, Л.М. Шербаум, Л.М. Шульман, С.С. Тряшин, О.С. Бенюх, Л.М. Кожевніков. З часом цей початковий дослідницький колектив зазнав помітних змін. На зміну старшому поколінню приходили молоді випускники Київського університету: В.В. Каленіченко, О.М. Шайдо, Ю.Г. Тарануха, А.М. Казанцев, О.О. Рожило, С.С. Єрьомін. Останнім із нині працюючих науковців прийшов в 1992 р. П.М. Козак.

2. Реєстрація метеорів телевізійним методом. Фотографічні спостереження метеорів проводились в нашій обсерваторії до середини 80-х років минулого століття. Іще раніше стало зрозуміло, що для таких спостережень потрібно впроваджувати нову техніку. Було вирішено розпочати створення комплексу високочутливої телевізійної апаратури, спираючись на досвід співробітників кафедри астрономії Київського університету [22]. Завдання було покладене на молодого випускника Університету Ю.Г. Тарануху. Дещо пізніше до цієї роботи були залучені О.О. Рожило, С.С. Єрьомін та П.М. Козак.

Для впровадження телевізійних спостережень метеорів в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету в 1986-1987 рр. на базі промислових телевізійних установок "Інтроскоп" було створено два високочутливі телевізійні комплекси [3]. Необхідно зауважити, що з метою суттєвого підвищення чутливості телевізійної установки її штатна передавальна трубка ЛІ-801 була замінена на спеціалізовану трубку ЛІ-804, обладнану в одному корпусі з додатковим підсилювачем яскравості, а саме – однокаскадним електронно-оптичним перетворювачем. Вказані телевізійні установки використовуються для спостережень метеорів до цього часу. На рис. 1 наводяться фотографічне та телевізійне зображення метеора.



Рис. 1. Фотографічне зображення метеора (зліва) та телевізійне (справа)

В якості вхідної оптики використовуються стандартні фотографічні об'єктиви – найчастіше «Юпітер-3» (F = 50 мм, D:F = 1:1.5, поле зору 28°, проникна здатність, визначена за зорями у фотометрично чисту ніч, складає 9.5<sup>m</sup>) та «Геліос-40» (F = 85 мм, D:F = 1:1.5, поле зору 18°, проникна здатність – 11.5<sup>m</sup>), де *m* – візуальна зоряна величина. Телевізійні установки розміщені на заміських спостережних станціях обсерваторії в с. Лісники, Києво-Святошинського району та в с. Пилиповичі, Бородянського району, відстань між якими складає 54 км. При спостереженнях, як правило, камера в одному з пунктів направляється в зеніт, у другому – по азимуту на перший пункт так, щоб оптичні осі перетиналися на висоті 100 км.

З середини 90-х років, з розвитком комп'ютерної техніки, у відділі розпочато використання оцифровувачів телевізійних кадрів та розробки методів та програмних алгоритмів для цифрової обробки результатів спостережень. Уточнений кутовий розмір кадру при використанні об'єктива «Юпітер-З» ≈ 23°.5×19°, розмір пікселя ≈ 4′, при використанні «Геліос-40» ≈ 13°×11°, розмір пікселя ≈ 2′.2. Було розроблено алгоритми астрометричної обробки метеорних зображень, а також алгоритми визначення параметрів траєкторії метеора в атмосфері Землі та елементів його геліоцентричної орбіти.

Окремо стояло питання фотометрії телевізійних метеорів. Досить складна система телевізійної реєстрації та візуалізації зображення метеора не була вивчена. На відміну від фотоемульсії телевізійна апаратура має певну інерційність (післясвічення), що впливає на вигляд метеорного сліду, та суттєво нелінійний відгук на задану освітленість, що значно ускладнює проведення порівняльної фотометрії стаціонарних та рухомих об'єктів. Потрібно також було визначити залежність зареєстрованого апаратного відгуку на блиск метеора від його кутової швидкості. Всі ці питання вирішувалися як експериментальним шляхом, так і теоретично. Більшість проблем було вирішено, але окремі дослідження продовжуються і зараз.

**3.** Деякі результати телевізійних спостережень слабких метеорів. Впродовж 1991-1993 рр. у відділі малих тіл Сонячної системи було проведено успішні базисні спостереження метеорного потоку Персеїд. Результати обробки цих спостережень представлені у каталозі, до якого увійшло 57 метеорів, з них 35 – Персеїди. Каталог коротко представлений в [4], а повністю опублікований в [5]. Аналіз каталогу проведено в [6]. Там же було розраховано доплив космічної речовини на Землю за власними спостереженнями у діапазоні мас 10<sup>4</sup>–1 г. Результати розраховано-го допливу спорадичного фону та метеорної речовини з потоку Персеїд були використані з даними інших авторів для оцінки імовірності зіткнення космічних апаратів з метеороїдами [7].

В рамках розробки методів цифрової обробки телевізійних спостережень метеорів проведено аналіз деяких широко вживаних в астрометрії редукційних моделей визначення ідеальних координат об'єкта у застосуванні до обробки оцифрованих телевізійних метеорних зображень. В результаті отримано розподіл похибок обчислень, а також досліджено причини, що викликають найбільше відхилення (більше двох кутових розмірів пікселя). Встановлено, що застосування функцій, які апроксимують контури зображень зір [8], підвищує точність приблизно на одну кутову мінуту. Зроблено висновок, що метод шести змінних є оптимальним в даних умовах. Максимально можлива точність визначення екваторіальних координат у оцифрованому кадрі при розмірі пікселя 4' складає приблизно 1'.5–3'.5 [9].

Розроблено метод визначення параметрів траєкторії метеороїда в атмосфері Землі і елементів його геліоцентричної орбіти. В якості основної використовується геоцентрична прямокутна система координат, що дозволяє уникнути деяких неточностей, притаманних іншим методам, та простіше провести всі необхідні обчислення. Метод побудований виключно з використанням елементів векторного аналізу та орієнтований, в основному, на застосування до обробки результатів телевізійних спостережень метеорів, з врахуванням можливостей сучасної цифрової обробки та алгоритмічних мов. В той же час цей метод може застосовуватись і для опрацювання даних, отриманих іншими спостережними засобами. Цифрова обробка передбачає такі особливості телевізійних зображень слабких метеорів як їх коротка кутова довжина, мала кількість значень координат точок голови метеора з відомими моментами часу, велика загальна кількість виміряних точок вздовж сліду метеора (в сумарному кадрі). Врахування цих особливостей значно підвищує точність обчислення координат радіанта [10]. Отримано характер залежностей та параметри статистичного розподілу похибок вимірювань екваторіальних координат точок на зображенні метеора, що дало можливість застосувати метод Монте-Карло, або статистичний метод випадкових випробовувань для визначення похибок усіх параметрів кожного індивідуального метеора. В результаті генерації випадкових чисел, відповідно до розподілів похибок вхідних даних, після кінематичної обробки можна отримати статистичні розподіли похибок усіх обчислюваних параметрів. Параметри отриманих розподілів можна використовувати для визначення фізичних характеристик метеора: середнє чи модальне значення розподілу як фізичну величину, що описується даним розподілом, а стандартне відхилення розподілу – як її довірчий інтервал. В результаті застосування цього методу до результатів телевізійних спостережень метеорів отримано наступні середні похибки, що характеризують якість спостережної апаратури та методу обробки спостережних даних: для екваторіальних координат радіанта – ±0°.1, для висоти метеора та дальності до нього від пункту спостереження – ±0.2 км, для швидкості – ±0.5–2 км/с, в залежності від умов спостережень. Точність обчислень усіх параметрів добре узгоджується з точністю, що приводиться іншими авторами [11, 12].

Розроблено методику фотометрії метеорів, яка базується на фізичних принципах випромінювання, поширення та реєстрації світлового потоку від метеора в діапазоні 450-900 нм, та включає в себе створення і абсолютну калібровку власної телевізійної фотометричної системи; розробку алгоритму коректного використання каталожних зоряних величин V чи B; врахування атмосферного поглинання світла; розробку та уточнення техніки внутрішніх фотометричної системи; обчислення та врахування фотометричної похибки поля; схему побудови та корекції калібровочних кривих за зорями порівняння. Крива спектральної чутливості телевізійної системи з врахуванням пропускання вхідної оптики  $S_{TV}(\lambda)$  була отримана експериментально та приведена в [13]. У відповідності до отриманої кривої зоряна величина обчислюється за формулою

$$m_{TV} = -2.5 \lg \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E(\lambda) S_{TV}(\lambda) d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} S_{TV}(\lambda) d\lambda} + C_{TV}$$

де  $E(\lambda)$  - розподіл енергії у спектрі об'єкта. Абсолютна калібровка фотометричної системи виконувалась шляхом чисельного інтегрування за абсолютним розподілом енергії у спектрі Веги. Обчислене значення калібровочної константи:  $C_{TV} = -21.39$ , (Дж·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>·нм<sup>-1</sup>). Перехід від каталожних візуальних чи синіх зоряних величин до телевізійної фотометричної системи також здійснюється методом чисельного інтегрування [14] з використанням відносних розподілів енергії у спектрах зір різних спектральних класів. Неврахування коефіцієнту переходу від каталожної до телевізійної системи приведе при побудові калібровочної кривої до максимальної похибки 0<sup>m</sup>.5 при використанні зоря-

них величин V та 2<sup>m</sup>.5 при використанні зоряних величин В [15]. Максимальні відхилення дають червоні зорі. Для зменшення похибки внутрішніх фотометричних вимірів в оцифрованому кадрі проводиться апроксимація вимірюваних контурів зображень метеора та зір порівняння функціями типу гаусіани чи лоренціани [8]. На основі тестів, проведених по зоряних зображеннях, встановлено, що застосування апроксимацій підвищує відносну точність фотометричних вимірів на 10-15% в середньому, та на 100-200% для гранично слабких зір. Нерівномірність чутливості телевізійної системи по полю зору – фотометрична похибка поля – розраховується експериментально під час кожних спостережень шляхом проекції певної групи зір послідовно на різні місця фотокатоду, визначенням відносного коефіцієнту чутливості по полю, та подальшим приведенням вимірів до центральної частини кадру. Розкид чутливості по кадру варіюється в межах 0<sup>m</sup>.2-0<sup>m</sup>.3 з максимальним відхиленням ~0<sup>m</sup>.4 [14];

Для порівняльної фотометрії метеора використовуються результати експерименту штучний метеор, проведеного по зорях [16]. Для цього використовувалось обертання камери з різними кутовими швидкостями, а виміри проводились для широкого діапазону зоряних величин. Динамічний діапазон для коректної фотометрії метеорів складає в середньому біля чотирьох зоряних величин: 2<sup>m</sup>.5-6<sup>m</sup>.5 для об'єктива «Юпітер-3».

Проведені спостереження унікального явища - короткочасного шторму метеорного потоку Леонід 19 листопада 2002 року. Опрацьовано 28 поточних метеорів [17, 18, 19]. Середні координати радіанта метеорного згустку під час короткочасного піку активності потоку:  $\alpha_R = 154^{\circ}.25 \pm 0^{\circ}.45$ ,  $\delta_R = 21^{\circ}.90 \pm 0^{\circ}.52$ , аргумент перигелію  $\overline{\omega} = 175^{\circ}.13 \pm 1.37$  і нахил орбіти  $\overline{i} = 162^{\circ}.62 \pm 0.61$ . Було зареєстровано два метеори з висотою появи біля 140 км і один, що з'явився на висоті більше 150 км. Отримано, що кількість метеорів з масами не менше ~  $1.5 \times 10^{-7}$  кг, які перетинають горизонтальну площадку радіуса 100 км<sup>2</sup> на висоті 100 км за одну годину при радіанті в зеніті, складала 1400 для початку піку метеорного шторму, що відповідає просторовій концентрації частинок з даними масами у метеорному рої  $1.7 \times 10^{-7}$  км<sup>-3</sup>. Усі обрахунки проводились за допомогою розробленого П.М. Козаком програмного забез-печення "Falling Star" [20].

Підводячи підсумок можна відзначити, що починаючи з 1957 р. науковцями відділу малих тіл Сонячної системи проведено значний об'єм наукових досліджень, що стосуються фізичних та динамічних властивостей метеорного комплексу. Захищено 1 докторську та 7 кандидатських дисертацій. Опубліковано більше 600 наукових праць у вітчизняних та зарубіжних журналах. Видана одна монографія [21].

1. Международный геофизический год. Инф. Бюл. 1958. №1.

2. Левин Б.Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в Солнечной системе. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. 296 с.

3. *Кручиненко В.Г., Шайдо О.М., Рожило О.О., Єрьомін С.С., Тарануха Ю.Г.* Спостереження Персеїд в 1992 р. // Вісник Київського університету. Астрономія. – 1994. Вип. 33. С. 84 - 88.

 Hajdukova M., Kruchinenko V.G., Kazantsev A.M., Taranucha Ju.G., Rozhilo A.A., Eryomin S.S., Kozak P.N. Perseid meteor stream 1991-1993 from TV observations in Kiev // Earth, Moon and Planets. – 1995. – Vol. 68. – P. 297-301.
 Kruchinenko V.G., Kazantsev A.M., Taranukha Yu.G., Kozak P.M., Yeryomin S.S., Rozhylo O.O., Smertyuk L.M. Catalogue of Perseid shower

meteors on TV observations in Kyiv during 1991-1993 // Вісник Київського університету, Астрономія. – 1997. – вип. 34. – С. 94-117.

6. Kozak P.M., Rozhilo O.O. Low-light meteor mass distribution from TV observations in Kyiv // Abstr. Int. Conf. JENAM'98. - Prague (Czech. Rep.). - 1998. - P. 79.

7. Кручиненко В.Г., Козак П.Н. Взрывные кратеры на поверхности космических аппаратов, образованные метеороидами и частицами космического мусора // Космічна наука і технологія. – 2001. – Т. 7, № 5/6. – С. 71-74.

 Козак П.Н., Рожило А.А. Астрометрическая и фотометрическая точность измерений при цифровой обработке телевизионных широкоугольных снимков астрономических объектов // Труди Другої міжнар. астрон. конф. КАММАК 2002 (під ред. проф. Чурюмова). – Вінниця (Україна). – 2003. – С. 217-221.

9. Козак П. Н. Анализ методов и точность определения экваториальных координат при цифровой обработке телевизионных наблюдений метеоров // Кинематика и физика небесных тел. – 2002. – Т. 18, № 5. – С. 471-480.

10. Козак П.Н. Векторный метод определения параметров траектории и элементов гелиоцентрической орбиты метеора для телевизионных наблюдений // Кинематика и физика небесных тел. – 2003. – Т. 19, № 1. – С. 62-76.

11. Ceplecha Z., Borovicka J., Elford G., Revelle D., Hawkes R., Porubcan V, Simek M. Meteor Phenomena and Bodies // Space Science Reviews. - 1998. - vol. 84, N 3/4. - P. 327-471.

12. Hawkes R.L., Bussey J.E., MacPhee S.L., Pollock C.S., Taggart L.W. Techniques for high resolution meteor light curve investigations // Proc. Int. Conf. Meteoroids 2001 (ed. B.Warmbein). - Kiruna (Sweden). - 2001. - P. 281-286.

13. Тарануха Ю.Г., Рожило О.О., Козак П.М. Дослідження спектральної характеристики телевізійної системи для спостережень метеорів // Вісник Київського ун-ту, Астрономія, вип. 41-42, 2005, сс. 61-63.

14. Kozak P.M., Rozhilo A.A., Taranukha Y.G. Some features of digital kinematic and photometrical processing of faint TV meteors // Proc. Int. Conf. Meteoroids 2001 (ed. B.Warmbein). - Kiruna (Sweden). - 2001. - P. 337-342.

15. Козак П.Н., Рожило А.А. О критериях подбора звезд сравнения для фотометрии телевизионных снимков метеоров // Труды междунар. конф. Физ. и динам. малых тел Солнечной сист., посв. пам. Астаповича (АИСТ'98). – Киев (Украина). – 1998. – С. 24.

16. Kozak P., Rozhilo A. The problem of Light Curves Plot at Digital Processing of Faint TV Meteors // Abstr. Int. Conf. Asteroids, Comets, Meteors (ACM'2002). – Berlin (Germany). – 2002. – P. 36.

17. *Кручиненко В.Г.* Приток космических тел на Землю в широком интервале масс // Кинематика и физика небесных тел. – 2002. – 18, № 2. – С. 114–127.

18. Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V., Kazantsev A., Taranukha Y. Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv // 35-th COSPAR Sc. Assembly, Book of Final Sc. Program & Abstracts in CD. – Paris (France). – 2004. – P. 107.

19. Kozak P., Rozhilo O., Kruchynenko V., Kazantsev A., Taranukha Y. Results of processing of Leonids-2002 meteor storm TV observations in Kyiv. – Advances in Space Research, Vol. 39, Iss. 4, 2007, pp. 619-623.

20. Kozak P. "Falling Star": Software for Processing of Double-Station TV Meteor Observations. - Earth, Moon, and Planets, Vol. 102, N 1-4, 2008, pp. 277-283.

21. Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г. Метеоры и метеорное вещество. – Киев: Наукова думка. – 1989. – 294 с.

22. Ивченко В.Н., Лазоренко П.Ф., Милиневский Г.П. Телевизионные наблюдения с широкоугольными объективами. – Проблемы космической физики, Киев, "Вища школа", 1979, вип. 14, с. 16-23.

УДК 551.510.534; 551.513.11

О. Євтушевський, А. Грицай, В. Кравченко, Г. Міліневський, З. Грицай, В. Лозицький, М. Леонов

#### ЗМІНИ ЗАГАЛЬНОГО ВМІСТУ ОЗОНУ НАД АНТАРКТИКОЮ

Розглянуто результати досліджень антарктичного озону за вимірюваннями на станції Академік Вернадський (1996-2007) та за супутниковими спостереженнями (1979-2008). Основні напрями аналізу спостережних даних: сезонні варіації щоденних і середньомісячних значень вмісту озону, багаторічні зміни, розбіжність наземних та супутникових вимірювань, планетарні хвилі в розподілі озону, передумови щорічних змін озонової діри, вплив змін озону на структуру тропопаузи, порівняння з тенденціями в арктичному регіоні.

Results of Antarctic ozone researches by the measurements at the station Akademik Vernadsky (1996–2007) and by the satellite observations (1979-2008) are considered. The main analysis directions of the observational data are: seasonal variations of daily and monthly mean total ozone values, long-term changes, difference between ground-based and satellite measurements, planetary waves in total ozone distribution, preconditions of the ozone hole interannual changes, influence of the ozone changes on the tropopause structure and comparison with the tendencies in Arctic region.

1. Вступ. У 1996 р. Великобританія передала Україні антарктичну станцію Фарадей (65°15'S, 64°15'W), де вимірювання озону проводилися з 1957 р. Українські дослідження на цій станції, яка отримала назву Академік Вернадський, продовжуються вже друге десятиріччя, і загальна тривалість рядів щоденних спостережень озону тепер перевищує півсторіччя. Станція розташована поблизу Антарктичного півострова, і з точки зору досліджень озонового шару її широтне положення вигідне тим, що припадає на край стратосферного полярного вихору, який за максимальних розмірів у зимово-весняний період досягає широти 60°S. Цей потужний зональний потік стратосферного повітря ізолює полярні повітряні маси від середньоширотних, сприяючи їх вихолодженню до -80°C і нижче. Такі низькі температури не властиві арктичному регіону, і в цьому основна відмінність, що призводить до суттєвих відмінностей двох полярних областей. Наслідком вихолодження є утворення над Антарктидою у зимові місяці полярних стратосферних хмар на площі в десятки мільйонів квадратних кілометрів, що перевищує площу самого континенту. В умовах сонячного освітлення, починаючи з серпня, акумульовані частинками стратосферних хмар хлористі сполуки вивільнюються і вступають в каталітичні реакції, результатом яких є руйнування молекул озону.

За приблизно однакового вмісту озоноруйнуючих речовин в обох півкулях, великий об'єм стратосферних хмар у південному полярному регіоні сприяв швидкому зростанню хімічних втрат озону з початку 1980-х років [1]. Максимальний дефіцит маси озону спостерігається у весняні місяці (вересень – листопад). Хімічні процеси, в яких задіяний озон, виявляються особливо чутливими до динамічних збурень, спричинених в атмосфері хвилями планетарних масштабів. В Антарктиці такі збурення активізуються в зимово-весняний період і впливають на температуру стратосфери та на просторовий розподіл малих складових атмосфери [2, 3]. Планетарні хвилі (ПХ) проникають із тропосфери у стратосферу, при цьому їх спектральний склад змінюється, оскільки умови поширення є більш сприятливими для найдовших хвиль. Зокрема, в антарктичному регіоні у стратосфері домінують квазістаціонарна хвиля (КСХ) із зональним числом (відношенням довжини паралелі до довжини хвилі) *т* = 1 та біжуча хвиля із зональним числом *т* = 2 [3, 4]. Внесена в стратосферу енергія ПХ при їх розпаді підвищує температуру стратосфери. З іншого боку, ПХ обумовлюють відхилення від зонально однорідного розподілу стратосферної циркуляції, яка за їх відсутності встановилася б залежно від широтного розподілу нагріву та сили Коріоліса. Неоднорідність розподілу озону під впливом планетарних хвиль [5] виразно проявляється в асиметрії полярного вихору відносно полюса, спричиненій хвилею з m = 1. Оскільки виміряний наземним чи супутниковим інструментом загальний вміст озону (ЗВО) у вертикальному стовпі атмосфери містить переважно стратосферний озон (до 90%), існує тісний зв'язок між варіаціями ЗВО та планетарними хвилями у стратосфері. До найважливіших результатів останнього десятиріччя можна віднести припинення швидкого зниження вмісту озону, яке тривало до середини 1990-х років, та виявлення впливу озонової діри на тропосферні процеси і клімат [6]. Тому взаємодія тропосфери і стратосфери в антарктичному регіоні відбувається в обох напрямах. Розділення ефектів, спричинених протилежно спрямованими впливами, було одним із напрямів цієї роботи.

Вимірювання ЗВО на станції Академік Вернадський здійснюються спектрофотометром Добсона. Сезон неперервних спостережень триває 10 місяців (з кінця липня до середини травня). Основні результати аналізу цих спостережень наведено в розділі 2. Систематичні супутникові вимірювання глобального розподілу ЗВО розпочато у 1978 р., і це дало можливість порівнювати незалежні дані, використовуючи мережу наземних станцій, та оцінювати похибки, з якими можна визначити тенденції у змінах ЗВО (розділ 3). В розділах 4-6 розглянуто: а) внесок планетарних хвиль у розподіл і змінність ЗВО, б) формування передумов для щорічних змін рівнів ЗВО у весняний період, в) взаємозв'язок "ЗВО – тропопауза – тропосфера" та г) основні відмінності тенденцій у південному та північному полярних регіонах.

2. Варіації і тренди ЗВО за вимірюваннями на станції Академік Вернадський. На рис. 1 показано варіації щоденних та середньомісячних значень ЗВО за дванадцятирічний період вимірювань на станції Академік Вернадський (1996-2007 рр.). Масив даних на рис. 1а дає уявлення про діапазон варіацій, а рис. 1б показує усереднений сезонний хід. Максимальна дисперсія щоденних значень припадає на вересень – листопад (дні 90-150 на рис. 1а та місяці 9-11 на рис. 1б). Це період озонової діри, і характер дисперсії пов'язаний саме з розташуванням станції у крайовій зоні діри та з постійними деформаціями краю діри планетарними хвилями.

За стандартним визначенням, озонова діра – це область, де рівень ЗВО < 220 одиниць Добсона (ОД) [6]. З рис. 1а видно, що діапазон варіацій у весняні місяці охоплює як значення, властиві для озонової діри (до 120-150 ОД у вересні – жовтні), так і високі значення (до 400 ОД), які загалом не є типовими для станції в інші сезони (280-300 ОД у грудні – квітні, рис. 1б). Наявність двох протилежних тенденцій у відхиленнях ЗВО у весняний період є проявом протилежних змін рівня ЗВО всередині та зовні стратосферного полярного вихору. Якщо всередині вихору відбувається хімічне руйнування молекул озону, то за межами вихору – їх динамічне накопичення. Меридіональний обмін повітряних мас у цей період практично відсутній, а регулярні меридіональні зміщення краю вихору (і краю озонової діри) планетарними хвилями спричинюють появу або аномально низьких (<200 ОД), або аномально високих (350-400 ОД) значень ЗВО над станцією.



Рис. 1. Варіації щоденних (а) та середньомісячних (б) значень ЗВО упродовж сезону неперервних вимірювань (липень – травень) спектрофотометром Добсона на станції Академік Вернадський (1996-2007 рр.)

Багаторічні зміни з використанням даних, одержаних на станції Фарадей у 1957-1995 рр., представлені на рис. 2. Характерними є три періоди з порівняно стійкими тенденціями (див. лінійні тренди, нанесені пунктиром на рис. 2а), властивими загалом і для змін глобального рівня ЗВО [6]. Період нормальних середньорічних рівнів ЗВО (320-330 ОД) тривав до початку 1980-х років. У наступний період, до середини 1990-х років, відбувалося швидке зниження ЗВО до ~260 ОД. Для останнього десятиріччя характерні стабілізація вмісту озону та ознаки відновлення озонового шару (див. подібні зміни для південної полярної області в [6], рис. 4-7).



Рис. 2. Зміна ЗВО над станцією Фарадей/Вернадський за останні 50 років (1957-2007 рр.): усереднені по сезонах неперервних вимірювань (а) та середньомісячні (б, січень і вересень) значення. Дані Британської антарктичної служби (http://www.antarctica.ac.uk/met/jds/ozone/#data), які з 1996 р. забезпечуються вимірюваннями на станції Академік Вернадський

З рис. 2б видно, що основний внесок у різке зниження ЗВО пов'язаний з весняним періодом. За 1981-1995 рр. зниження становило 16% за середніми по сезонах неперервних вимірювань (рис. 2а) і близько 30% у вересні (суцільна крива на рис. 2б). Літній тренд ЗВО був незначним (пунктирна крива для січня на рис. 2б), а до 1980 р. обидві криві взагалі показують однакові рівні ЗВО, тому це порівняння також чітко вказує на початок змін у весняному антарктичному озоні. Результати аналізу спостережних даних, одержаних на станції Академік Вернадський, наведено в роботах [7-11].

3. Зіставлення наземних та супутникових вимірювань. Порівняння даних наземних і супутникових спостережень ЗВО здійснювалося упродовж всього періоду вимірювань на станції Академік Вернадський [12-16]. За цей час, внаслідок врахування виявлених похибок супутникових даних, відбувся перехід від 7-ї до 8-ї версії алгоритму TOMS (2004 р.) та до емпірично скоригованого варіанту останньої (2007 р.), який запроваджено лише для періоду, коли працював спектрометр EP-TOMS (1996-2005 рр., див. [17]. Нижче наведено деякі результати порівняння наземних спостережень з цими рядами супутникових даних. Крім спостережень на станції Академік Вернадський, використовувались дані ще двох антарктичних станцій та однієї арктичної (всі оснащені спектрофотометрами Добсона) також за період 1996-2005 рр. (таблиця 1). На рис. За показано варіації щоденних значень відносної різниці супутникових та наземних вимірювань ЗВО, обчисленої за формулою:

$$\Delta 3BO = \frac{3BO_{TOMS} - 3BO_{\text{Добсон}}}{3BO_{\text{Побсон}}} \times 100\%,$$

де *ЗВО<sub>ТОМS</sub>* та *ЗВО<sub>Добсон</sub>*, відповідно, супутникові та наземні значення ЗВО. Видно, що найбільша дисперсія різниць *ДЗВО* припадає саме на період озонової діри (порівн. з рис. 1а), коли діапазон дисперсії розширюється до ±20% і більше (серпень – жовтень, дні 30-120 на рис. 3а). Це приблизно вдвічі перевищує діапазон дисперсії в наступний літній період. Помітно, що в цей же час відбувається поступове зміщення діапазону дисперсії у бік від'ємних значень різниці. Як збільшений діапазон дисперсії, так і її тренд вказують на вплив низьких рівнів озону у період озонової діри, тому було приділено увагу залежності різниці *ДЗВО* від ЗВО, як найбільш збуреного в цей період параметра.



Рис. 3. Сезонний хід відносної різниці ⊿ЗВО між супутниковими та наземними вимірюваннями (а) та залежність ⊿ЗВО від значення ЗВО за наземними даними (б) за період 1996-2005 рр.

На рис. Зб показана залежність ⊿3ВО(ЗВО<sub>Добсон</sub>) для станції Академік Вернадський. Період озонової діри з рівнем ЗВО < 220 ОД (> 220 ОД) виділено кружками (точками), а тренд ⊿ЗВО(ЗВО<sub>Добсон</sub>) апроксимовано лінійною залежністю. Середні значення ⊿ЗВО, трендів та середньоквадратичних відхилень наведено в табл. 1 (перший рядок). Порівнюючи з даними для інших станцій (другий – четвертий рядки в табл.. 1), можна відзначити, що в середньому абсолютна різниця між наземними і супутниковими даними досить мала і становить близько або менше 1% (5 значень) або майже 3% (два значення). Але залежність різниці від вмісту озону в умовах озонової діри досить значна (-5%, -5% та -7.5% на 100 ОД для станцій Вернадський, Халлі та Амундсен-Скотт, відповідно) і є статистично значущою. Ця залежність розширює діапазон дисперсії ⊿ЗВО, що зрештою знижує надійність виміряних значень ЗВО та висновків щодо їх змін. Причини існування виявленої залежності потребують подальшого вивчення, і вони можуть бути пов'язані як з супутниковими, так і з наземними вимірюваннями. Вплив хмарності на розбіжність даних та на залежність ⊿ЗВО від ЗВО, проаналізований в роботах [13, 16], вказує, що більший внесок у залежність можуть давати похибки наземних вимірювань.

Таблиця 1. Середні значення ДЗВО та середній тренд ДЗВО(ЗВО) для високоширотних станцій в умовах озонової діри
(ЗВО<220 ОД) та за її відсутності (ЗВО >220 ОД)

Станція		31	30<220 ОД	3ВО >220 ОД			
	Координати	Тренд, %/100 ОД	Середнє ⊿3ВО, %	N, днів	Тренд, %/100 ОД	Середнє ⊿3ВО, %	N, днів
		(±2 <i>o</i> )	(±1 <i>σ</i> )		(±2 <i>σ</i> )	(±1 <i>σ</i> )	
Вернадський	65°15'S, 64°16'W	-5.0±2.6	-2.6±7.3	483	1.0±0.7	-0.3±5.6	2021
Халлі	75°31'S, 26°40'W	-5.0±1.6	-0.1±6.7	755	-2.9±1.1	2.7±4.8	1352
АмСкотт	89°58'S, 24°47'W	-7.5±3.4	1.1±7.6	232	0.9±1.3	-1.1±4.3	573
Барроу	71°19'N, 156°36'W	-	-	-	0.2±0.4	0.7±3.4	953

**4.** Кліматологія планетарних хвиль в Антарктиці за супутниковими даними про розподіл озону. Регулярні супутникові спостереження протягом трьох десятиліть дозволяють визначити як загальну картину еволюції планетарних хвиль в розподілі ЗВО над антарктичним регіоном, так і дослідити спричинені ними аномалії. Із завершенням сезону спостережень 2008 р. стало можливим створення 30-річної кліматології планетарних хвиль у розподілі озону за період 1979-2008 рр. Основну частину спостережної бази, використаної в цій роботі, становлять спостереження, виконані з допомогою приладів TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), встановлених на борту супутників Nimbus-7 (1979-1992) та Earth Probe (1996-2005), а для 2006-2008 рр. використані дані OMI (Ozone Monitoring Instrument), який працює на космічній платформі Aura (http://toms.gsfc.nasa.gov). Прогалину, що існує в даних TOMS/OMI (1993-1995 рр.) заповнено за результатами реаналізу (*http://www.temis.nl/protocols/o3field/o3field\_msr.php*), де використано дані супутника NOAA (спектрометр SBUV/2, Solar Backscattered Ultraviolet Radiometer, Version 2). Дискретність даних становить 1° по широті та 1°-1.5° по довготі.

Через переважання зонального характеру циркуляції в антарктичній стратосфері, основним проявом ПХ тут є меридіональні збурення зонального розподілу параметрів стратосфери. Вміст озону характеризує шар нижньої стратосфери (10-25 км), і для кількісного опису ПХ застосовано методику побудови довготних профілів ЗВО [18]. Основними результатами для широтного інтервалу 50°S-80°S є встановлення рівня асиметрії ЗВО та її змін, зокрема дрейфу на схід зонального мінімуму як нової кліматологічної характеристики розподілу ЗВО в Антарктиці. На рис. 4 представлено ілюстрації цих результатів, повніше освітлених у роботах [11, 18, 19]. Аналіз 30-річного ряду вмісту озону вказує на 1) статистично достовірне зростання амплітуди КСХ (максимальний тренд 8.5±2.5 ОД за десятиліття на широті 65°S, p = 0.05); 2) зсув зонального мінімуму ЗВО у східному напрямку (13-20° за десятиліття при загальному, широтно залежному, зсуві 40°–60° від Антарктичного півострова в бік нульового меридіана; 3) домінування КСХ-1 (квазістаціонарної хвилі із зональним числом m = 1) при амплітуді КСХ-2 у весняні місяці на рівні 0.11 від амплітуди КСХ-1.

Важливо відзначити, що дані [19] певною мірою привернули увагу до ролі асиметрії в антарктичному озоні та в атмосфері регіону в цілому. Про це свідчать, наприклад, останні роботи [20-22]. Моделювання з урахуванням асиметрії показало, що асиметрія озону та її зміни (а не лише весняні втрати антарктичного озону) впливають на клімат південної півкулі і впливатимуть у майбутньому [21]. Сучасні моделі будуються здебільшого на зонально симетричному розподілі, і для адекватного відтворення кліматичних змін поблизу поверхні необхідно реалістичніше моделювати стратосферний клімат [22].



Рис. 4. Квазістаціонарний довготний розподіл ЗВО у вересні — листопаді 1979-2008 рр. (а), кліматологічні значення ЗВО в зональному максимумі та мінімумі (б) та зміни довготного положення екстремумів квазістаціонарної хвилі (в)

5. Зимові передумови весняного зниження ЗВО. Проаналізовано передумови міжрічних варіацій вмісту озону над південним полярним регіоном у весняні місяці [19]. Оскільки в антарктичній стратосфері переважає КСХ-1, вона спричинює зміщення полярного вихору в цілому відносно полюса. Зміщення може досягати ~1000 км, тому асиметрична зональна циркуляція сприяє потраплянню тепліших мас повітря з нижчих широт (60°S-65°S) у вищі (70°S-75°S), що унеможливлює формування стратосферних хмар в частині полярного регіону. Рівень асиметрії вихору у серпні, таким чином, визначає рівень втрат озону у весняні місяці. Як показав кореляційний аналіз, чутливим індикатором втрат озону є серпнева амплітуда КСХ в розподілі стратосферної температури як міра асиметрії полярного вихору. Варіації амплітуди КСХ корелюють з площею озонової діри та ЗВО над південним полюсом з коефіцієнтами до -0.7 та 0.7, відповідно (рис. 5). Кореляція з середнім зональним значенням ЗВО на полярних широтах 70°S та 80°S досягає 0.8 (p < 0.01). Це свідчить про суттєвий внесок серпневої КСХ у перебіг процесів, які визначають сезонну еволюцію озонової діри. Виявлено два максимуми кореляційної залежності від амплітуди КСХ – на рівні нижньої (100-150 гПа) та середньої (10 гПа) стратосфери. В нижній стратосфері ефект від КСХ пов'язаний із асиметрією вихору та площею стратосферних хмар, а в середній стратосфері, найімовірніше, з меридіональним транспортом та заповненням озонової діри багатим на озон середньоширотним повітрям. В обох випадках посилення активності КСХ протидіє зниженню вмісту озону у вертикальному стовпі атмосфери: в першому випадку це відбувається за рахунок зменшення незворотних втрат озону, а в другому – шляхом просторового перерозподілу озону, тобто з переважним внеском хімічного та динамічного механізмів впливу на ЗВО, відповідно.



Рис. 5. Широтний розподіл кореляції між амплітудою КСХ у серпні на рівні тиску 10 гПа та площею озонової діри у жовтні (а) і загальним вмістом озону над південним полюсом за вимірюваннями на станції Амундсен-Скотт у листопаді (б). Показано інтервали середньоквадратичного відхилення коефіцієнта кореляції

6. Зональна асиметрія ЗВО та структура антарктичної тропопаузи. Зменшення вмісту озону у весняній антарктичній стратосфері впливає на її тепловий режим, оскільки поглинання тепла молекулами озону визначає температуру стратосфери, особливо на висотах максимуму озону 15-25 км [3]. Порівняння розподілу ЗВО, температури у нижній стратосфері (100 гПа, або приблизно 16 км) та висоти тропопаузи показало, що при охолодженні нижньої стратосфери внаслідок весняних втрат озону, "точка холоду" піднімається в нижню стратосферу, піднімаючи і тропопаузу при одночасному зниженні її чіткості [23]. Це свідчить про переважний вплив нижньої стратосфери на тропопаузу, який зменшує роль тропопаузи як бар'єра для обміну повітряних мас між тропосферою і стратосферою та збільшує вертикальну протяжність тропосферного шару, що фактично означає вплив стратосфери на клімат. У зимові місяці відбувається схоже підняття тропопаузи внаслідок охолодження нижньої стратосфери, але воно зумовлене різким сезонним зниженням температури в області стратосферного полярного вихору. Аномальне підняття тропопаузи в районі моря Ведделла відбувається до 13-14 км (порівняно з типовими значеннями 9-10 км, рис. 6). Встановлено також, що на зимову тропопаузу існує асиметричний вплив із тропосфери, де наявний різкий східнозахідний контраст температури, і тропопауза найнижча над холодним антарктичним континентом. Перехід до стратосферного впливу на асиметрію тропопаузи відбувається у вересні, коли площа озонової діри найбільша. В наступний літньо-осінній період висота тропопаузи над полярною областю найменша, ~9 км, що, враховуючи середню висоту антарктичного плато ~3 км, означає існування найтоншого в регіоні шару тропосфери – близько 6 км. Тому, завдяки поєднанню впливу тропосфери і стратосфери, антарктична тропопауза дуже неоднорідна і впродовж року зазнає значних змін висоти (на 4-5 км) переважно над західною Антарктикою (рис. 6). Нижня стратосфера в Арктиці у зимові місяці тепліша приблизно на 10°С, ніж в Антарктиці, через більший вплив планетарних хвиль на полярний вихор. У весняні місяці вона не охолоджується так, як над Антарктидою, через відсутність озонової діри. Тому структура арктичної тропопаузи перебуває під переважним впливом тропосфери [23].

Цікавим є й інший наслідок регіонального підняття антарктичної тропопаузи – виникнення меридіонального градієнту висоти тропопаузи у зимово-весняний період на широтах 50°S-80°S (рис. 6, ліва частина), що створює умови не лише для вертикального, а й горизонтального переносу малих складових атмосфери через тропопаузу. Тропосферні ефекти асиметрії тропопаузи, пов'язані зі зростанням висотної протяжності тропосфери та існуванням меридіонального градієнту тропопаузи можуть бути причетними до регіональних змін клімату, як і розглянута вище асиметрія в озоні.



Рис. 6. Меридіональні профілі тропопаузи "екватор – полюс – екватор" у південній півкулі вздовж осі зональної асиметрії 45 W – 135 🖻 для чотирьох сезонів 2005 р. У літньо-осінній період антарктична тропопауза формується під переважним впливом тропосфери (зниження температури в бік полюса, криві XII-II та III-V), а в зимово-весняний період переважає підняття тропопаузи під впливом стратосфери (сезонний мінімум температури в зимові місяці, крива VI-VIII, та охолодження нижньої стратосфери через втрати озону у весняні, крива IX-XI)

7. Висновки. У змінах ЗВО в Антарктиці виявлено нові тенденції, які свідчать про значний вплив планетарних хвиль. Це, зокрема, зміни зональної асиметрії ЗВО, формування передумов для міжрічних варіацій весняного зниження ЗВО та зв'язки ЗВО – тропопауза – тропосфера, причетні до регіональних змін клімату.

Роботи виконувалися в рамках наукових тем Київського національного університету імені Тараса Шевченка 01БФ051-14 і 06БФ051-12 та Міністерства освіти і науки України М/86-2006. Дослідження здійснювалися за участі в програмах ORACLE-O3 та SCAR ICESTAR в рамках проведення Міжнародного полярного року 2007/2008.

1. Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal CIOx/NOx interaction // Nature. - 1985. - Vol. 315. – P. 207–210

2. Mechoso C.R., Hartmann D.L. An observational study of traveling planetary waves in the Southern Hemisphere // J. Atm. Sci. - 1982. - Vol. 39, No. 9. - P. 1921-1935.

3. Wirth V. Quasi-stationary planetary waves in total ozone and their correlation with lower stratospheric temperature // J. Geophys. Res. - 1993. - Vol. 98, No. D5. - P. 8873-8882

4. Quintanar A.I., Mechoso C.R. Quasi-stationary waves in the Southern Hemisphere. Part I: Observational data // J. Climate. - 1995. - Vol. 8, No. 11. - P. 2659-2672

5. Salby M.L., Callaghan P.F. Fluctuations of total ozone and their relationship to stratospheric air motions // J. Geoph. Res. - 1993. - Vol. 98, No. D2 – P 2715–2727

6. Scientific assessment of ozone depletion: 2006. World Meteorological Organization. Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 50. - Geneva, Switzerland, 2007. - 572 pp.

7. Міліневський Г.П., Леонов М.А., Грицай З.І. та ін. Вимірювання озону на антарктичній станції Академік Вернадський у 1996-2000 роках // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2002. – Вип. 38. – С. 63–69. 8. Grytsai Z.I., Evtushevsky A.M. et al. Traveling planetary waves in ozone layer over Antarctic Peninsula // Ukr. Antarctic J. - 2004. - Vol.

- P. 105–110. 9. Грицай А.В., Свтушевський О.М., Міліневський Г.П. Планетарні хвилі в озоновому шарі над Антарктичним півостровом у 1999 і 2002 роках

// Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2005. – Вип. 41-42. – С. 63-67.

10. Грицай А.В., Свтушевський О.М, Міліневський Г.П. Зміни загального вмісту озону над Антарктичним півостровом // VI Міжнародна наукова конференція "Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища". – 6-8 жовтня 2005, Київ, Україна. – Матеріали конф. – C. 113–115.

11. Грицай А.В. Планетарні хвилі у розподілі загального вмісту озону над Антарктикою // Дис. ... канд. фіз.-мат. наук: 04.00.22. – Київ, 2007. – 180 c.

12. Грицай З.И., Евтушевский А.М., Кравченко В.А. и др. Сопоставление наземных и спутниковых измерений общего содержания озона по данным антарктической станции Академик Вернадский и обсерватории Лесники // Бюлл. Укр. антаркт. центра. – 1998. – Вып. 2. – С. 44-49

13. Kulinich B.V., Evtushevsky A.M., Leonov N.A., Milinevsky G.P. Seasonal change of difference between the ground-based and EP-TOMS satellite ozone measurements // Ukr. Antarctic J. – 2005 – Βμπ. 3. – C. 5–9.

14. Gritsai Z.I., Evtushevsky A.M., Leonov N.A., Milinevsky G.P. Comparison of ground-based and TOMS-EP total ozone data for Antarctica and northern midlatitude stations (1996-1999) // Phys. Chem. Earth (B). – Vol. 25 – 2000. – P. 459–461.

15. Кравченко В.О. Зіставлення наземних та супутникових вимірювань загального вмісту озону над антарктичними станціями // Укр. антаркт. журнал. – 2007/2008. – № 6–7. – С. 135–142.

Hall: - 2007/2000. - Nº Gort. - C. 135-142.
16. Evtushevsky O., Milinevsky G., Grytsai A. et al. Comparison of ground-based Dobson and satellite EP-TOMS total ozone measurements over Vernadsky station, Antarctica, 1996-2005 // Int. J. Remote Sensing. - 2008. - Vol. 29, No. 9. - P. 2675-2683.
17. McPeters R., Taylor S., Jaross G. et al. Empirically corrected TOMS Earth Probe dataset. - http://toms.gsfc.nasa.gov. - December 20, 2007. - 13 p. 18. Grytsai A., Grytsai A., Grytsai Z., Evtushevsky A., Milinevsky G. Interannual variability of planetary waves in the ozone layer at 65°S // Int. J. Remote Sensing. - 2005. - Vol. 26, No. 16. - P. 3377-3387.
10. Cartasi A., Evtushevsky O.M. Acapatien O.V. et al. Structure and long term change in the zonal asymptotic in Antarctic total ozone during apring.

2005. - V0I. 20, NO. 10. - P. 35/(-3387.
 19. Grytsai A.V., Evtushevsky O.M., Agaptov O.V. et al. Structure and long-term change in the zonal asymmetry in Antarctic total ozone during spring // Ann. Geophys. - 2007. - Vol. 25, No. 2. - P. 361-374.
 20. Crook J.A., Gillett N.P., Keeley S.P.E. Sensitivity of Southern Hemisphere climate to zonal asymmetry in ozone // Geophys. Res. Lett. - 2008. - Vol. 35. - L07806, doi:10.1029/2007GL032698.
 21. Neff W., Perlwitz J., Hoerling M. Observational evidence for asymmetric changes in tropospheric heights over Antarctica on decadal time scales

// Geophys. Res. Lett. - 2008. - Vol. 35. - L18703, doi:10.1029/2008GL035074.

Weare B.C. Dynamical modes associated with the Antarctic ozone hole // Atmos. Chem. Phys. Discuss. – 2009. – Vol. 9. – P. 5055–5086.
 Evtushevsky O.M., Grytsai A.V., Klekociuk A.R., Milinevsky G.P. Total ozone and tropopause zonal asymmetry during the Antarctic spring // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113, D00B06, doi:10.1029/2008JD009881.

#### Надійшла до редколегії 28.05.09

#### Наукове видання



## ВІСНИК

### КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

## АСТРОНОМІЯ

Випуск 46

Друкується за авторською редакцією

Оригінал-макет виготовлено М. І. Пішкалом, Астрономічна обсерваторія

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 дискети не повертаються.



Підписано до друку 29.03.10. Формат 60×84<sup>1/8</sup>. Вид. № 1. Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Наклад 300. Ум. друк. арк. 10,0. Зам. № 210-5205.

> Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет" 01601, Київ, б-р Т. Шевченка, 14, кімн. 43 會 (044) 239 32 22; факс (044) 239 31 28 Свідоцтво внесено до Державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02