

# КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ

Том 16  
5 + 2010

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

## ЗМІСТ

*Агапітов О. В., Грицай А. В., Салюк Д. А.* Великомасштабні хвилі Россбі в антарктичній стратосфері

*Дудник А. В.* Исследование радиационных поясов Земли в мае 2009 года на низкоорбитальном спутнике с помощью прибора СТЭП-Ф

*Кришталь А. Н., Герасименко С. В., Войцеховская А. Д.* О природе всплесков микроволнового излучения в петельных структурах активной области

*Гринченко С. В.* Построение профиля электронной концентрации по его геометрическим параметрам при моделировании области F2 и внешней части ионосферы

*Стоділка М. І.* Прогноз середньодобових геомагнітних збурень

*Шатикин В. Е., Семенов Л. П., Макаров А. Л., Хорoshiлов В. С., Попель В. М., Игнатович С. Р.* Анализ надежности привода солнечной батареи космического аппарата с длительным сроком жизни

*Дронь Н. М., Дубовик Л. Г., Кондратьев А. И., Хитко А. В., Хорольский П. Г.* Оценка характеристик космических мусоросборщиков с ЭРД при двух вариантах маневров их выведения на орбиту

## CONTENTS

5 *Agapitov O. V., Grytsai A. V., Salyuk D. A.* Large-scale Rossby waves in the Antarctic stratosphere

12 *Dudnik O. V.* Investigation of the Earth's radiation belts in May 2009 at the low orbit satellite with the STEP-F instrument

29 *Kryshstal A. N., Gerasimenko S. V., Voitsekhovska A. D.* On the nature of the microwave spike emission in loop structures of an active region

38 *Grinchenko S. V.* Construction of electron density profile from its geometrical parameters in simulating the F2-region and outer ionosphere

46 *Stodilka M. I.* Forecast of the daily geomagnetic perturbations

54 *Shatikhin V. E., Semenov L. P., Makarov O. L., Khoroshi-  
lov V. S., Popel' V. M., Ignatovich S. R.* Reliability analyses of solar panel drive for long lifetime spacecrafts

59 *Dron N. M., Dubovik L. G., Kondratyev A. I., Khitko A. V.,  
Horolsky P. G.* Characteristics of space debris-gatherers with electric propulsion at two variants of maneuvers for their putting into demanded orbit

<i>Вавилова И. Б., Пакуляк Л. К., Процюк Ю. И.</i> Украинская виртуальная обсерватория (УкрВО). Цель, структура и задачи	<b>62</b>	<i>Vavilova I. B., Pakuliak L. K., Protsyuk Yu. I.</i> Ukrainian Virtual Observatory (UKRVO). The goals, structure, and tasks
<i>Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В.</i> Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов	<b>71</b>	<i>Kozyryev Y. S., Sybiryakova Y. S., Shulga O. V.</i> Estimation of astrometric reduction accuracy for the combined method of celestial object observations
<i>Чеснок Н. Г.</i> Загальні властивості вибірки ізольованих галактик, що містять активні ядра	<b>77</b>	<i>Chesnok N. G.</i> General properties of a sample of isolated galaxies containing active nucleus
<b>ДІЯЧІ КОСМІЧНОЇ ГАЛУЗІ</b>		<b>FIGURES OF SPACE INDUSTRY</b>
До 70-річчя від дня народження академіка НАН України Я. С. Яцківа	<b>89</b>	70th birthday of Academician Ya. S. Yatskiv
<b>НАШІ АВТОРИ</b>	<b>91</b>	<b>OUR AUTHORS</b>

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 1232 від 2 лютого 1995 р.

---

Підписано до друку 01.11.10. Формат 84×108/16. Папір крейдований. Гарн. Ньютон. Друк офсет.  
Ум. друк. арк. 9,66. Обл.-вид. арк. 10,14. Тираж 150 прим. Зам. № 2840.

---

Оригінал-макет виготовлено та тираж видруковано Видавничим домом «Академперіодика» НАН України, 01004, Київ, вул. Терещенківська, 4

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

*29 вересня 2010 р.  
виповнилось 70 років  
академікові НАН України  
Леоніду Михайловичу ЛОБАНОВУ*

*25 жовтня 2010 р.  
виповнилось 70 років  
академікові НАН України  
доктору фізико-математичних наук  
Ярославу Степановичу ЯЦКІВУ*

*Редакційна колегія журналу сердечно вітає  
Леоніда Михайловича та Ярослава Степановича  
з ювілеєм і зичить їм міцного здоров'я та наснаги  
для здійснення всіх їхніх творчих задумів*

УДК 551.513.11:551.510.534

О. В. Агапітов, А. В. Грицай, Д. А. Салюк

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## ВЕЛИКОМАСШТАБНІ ХВИЛІ РОССБІ В АНТАРКТИЧНІЙ СТРАТОСФЕРІ

*За даними супутникових спостережень проаналізовано збурення розподілу озону в Антарктиці протягом весни. Відхилення розподілу загального вмісту озону від зонально-симетричного інтерпретуються як наслідок впливу великомасштабних хвиль Россбі, що поширюються на висотах нижньої стратосфери. Розглянуто хвилі із зональними числами 1–3, які грають найбільшу роль у високоширотній стратосфері. Показано, що спостережувана картина відповідає дисперсійному рівнянню для хвиль Россбі з урахуванням швидкості зонального вітру.*

### ВСТУП

Стратосферна циркуляція у приполярних районах протягом зимово-весняного періоду визначається полярним стратосферним вихором, відмежованим від середньоширотного повітря західним вітром зі швидкістю кілька десятків метрів за секунду — так званим зональним потоком. У південній півкулі полярний вихор існує до кінця листопада — початку грудня (кінець весни — початок літа). Протягом весни його стійкість зменшується, посилюються збурення, обумовлені великомасштабними планетарними хвилями [9]. Вони викликають відхилення форми вихору від симетричної відносно полюса. Найбільшу амплітуду в цей час мають хвилі із зональними числами (відношення довжини паралелі до довжини хвилі)  $m = 1$  та  $m = 2$  [17]. Теорія інтерпретує такі великомасштабні утворення в атмосфері Землі, як хвилі Россбі, поява яких обумовлена меридіональним градієнтом сили Коріоліса [<http://toms.gsfc.nasa.gov/ftpdata.html>, 14]. Напрямок руху хвиль показаний на рис. 1. Відзначимо, що чітко виражена хвиля із зональним числом 3 в антарктичній стратосфері з'являється значно рідше, а коротші спектральні компоненти не мають суттєвого впливу.

Структура хвиль може розглядатися не тільки з використанням полів тиску чи геопотенціаль-

них висот, а і з допомогою інших параметрів, розподіл яких є неоднорідним. Одним із таких практично важливих параметрів є загальний вміст озону. Озон ( $O_3$ ) у атмосфері Землі зосереджений переважно у нижньому стратосферному шарі (для приполярних широт це відповідає висотам 10–25 км) [12]. Характеристикою кількості озону над певною точкою поверхні є загальний вміст, який визначається сумарною кількістю молекул у стовпі атмосфери одиничного перерізу. Традиційно загальний вміст озону (ЗВО) виражають в одиницях Добсона (ОД): 1 ОД відповідає шару газу товщиною в 0.01 мм за нормальних атмосферних умов [1]. Розподіл озону є суттєво неоднорідним як у просторі, так і в часі. У середньому ЗВО  $\approx 300$  ОД. Однак регіональні та сезонні відхилення від цього значення можуть бути дуже суттєвими. Так, протягом останніх десятиліть у весняний період над Антарктикою спостерігається зниження загального вмісту озону до мінімальних величин, менших за 200 ОД, а в окремі роки і до 100 ОД [16]. Це явище було виявлене в середині 1980-х рр. [8] і відоме під назвою озонової діри. Її межа визначається рівнем ЗВО = 220 ОД [13]. Розвиток озонової діри обумовлюється, серед іншого, існуванням полярного вихору, який перешкоджає змішуванню повітряних мас, сприяючи збереженню дуже низького вмісту озону [15].

Таким чином, внутрішня частина полярного вихору виявляється суттєво збідненою озоном порівняно з помірними широтами. У зв'язку зі

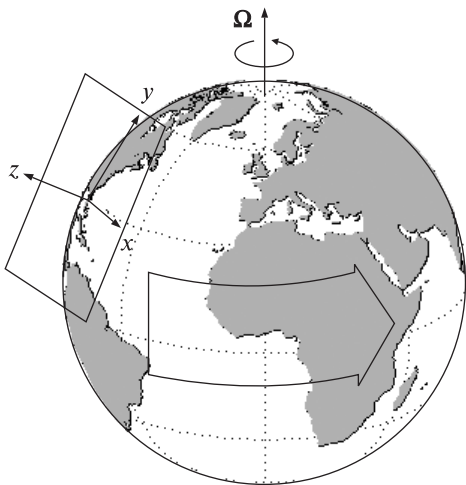


Рис. 1. Система координат в наближенні  $\beta$ -площини

збуреннями полярного вихору планетарними хвилями розподіл озону в його крайовій частині є суттєво неоднорідним не тільки у меридіональному, а й у зональному напрямі (вздовж паралелі) [4]. Дана обставина робить ЗВО зручним індикатором для фіксації хвиль Россбі, визначення їхніх фаз та співвідношень між амплітудами різних спектральних компонентів [11]. Застосування інтегральної характеристики, якою є загальний вміст, виявляється можливим через відсутність суттєвого зсуву фази з висотою для вказаного типу хвиль. Іншою важливою обставиною, що спонукає використовувати ЗВО, є наявність систематичних супутникових вимірювань, які забезпечують картографування переважної частини поверхні Землі.

Поведінка хвиль із зональними числами 1 і 2 в Антарктиці виявляється суттєво різною. Якщо фаза першої, найдовшої, відчутно не змінюється протягом кількох місяців, то друга характеризується вираженим рухом у східному напрямку відносно поверхні [10, 17]. Варто зауважити, що така біжуча хвиля при спостереженні в певній точці проявляється коливаннями ЗВО, тоді як стаціонарна може бути виявлена тільки за допомогою спостережень у рознесених уздовж паралелі точках. Важливо, що теорія лінійних хвиль Россбі без урахування зонального потоку передбачає їхній рух у західному напрямку зі швидкістю, що зменшується при збільшенні зо-

нального числа [3]. Метою даної роботи є аналіз спостережуваної поведінки хвиль із  $m = 1$  та  $m = 2$  із перевіркою їхньої відповідності дисперсійному рівнянню для хвиль Россбі з урахуванням зонального вітру.

### ТЕОРЕТИЧНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ХВИЛІ РОССБІ

Система рівнянь, яка описує хвилі в атмосфері планети, що обертається, має вигляд

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla(gH) + f[\mathbf{v}, \zeta], \quad \frac{\partial H}{\partial t} + \text{div}(\mathbf{v}H) = 0, \quad (1)$$

де  $\mathbf{v}$  — горизонтальна складова швидкості в атмосфері,  $\zeta$  — одиничний вектор у вертикальному напрямку,  $f = 2\Omega \sin \varphi$  — параметр Коріоліса,  $\varphi$  — географічна широта,  $\Omega$  — кутова частота обертання планети (див. рис. 1),  $g$  — прискорення вільного падіння,  $H$  — ефективна глибина атмосфери (у випадку атмосфери, що складається з молекул із ефективною масою  $M$  та температурою  $T$ ,  $H_0 = kT / (Mg)$ , де  $k$  — стала Больцмана. Для Землі  $H_0 \approx 8$  км, для Юпітера  $H_0 \approx 25$  км).

Рівняння (1) збігаються за формою з рівняннями, які описують рух холодних іонів у плазмі, де електрони мають розподіл Больцмана у полі з потенціалом  $H$ , коли роль сили Коріоліса грає сила Лоренца. Дисперсійне рівняння для малих коливань має вигляд

$$\omega \left( 1 + k^2 r_R^2 - \frac{\omega^2}{f^2} \right) = -k_\lambda v^*, \quad (2)$$

$$v^* = gH_0 \cos \varphi / (2\Omega R \sin^2 \varphi),$$

де  $r_R = (gH_0)^{1/2} / f$  — радіус Россбі (для Землі у помірних широтах радіус Россбі складає приблизно 1500—2500 км, для Юпітера — 6000 км),  $H_0$  — глибина однорідної атмосфери,  $v^*$  — дрейфова швидкість (швидкість Россбі),  $R$  — радіус планети,  $k_\lambda$  — проекція хвильового вектора на паралель [2]. Рівняння (2) описує дві гілки коливань. Гілка, частота якої набагато менша за  $\Omega$ , відповідає хвилям Россбі з дисперсією

$$\omega = -\frac{k_\lambda v^*}{1 + k^2 r_R^2}$$

та фазовою швидкістю

$$v_{ph} = -\frac{v^*}{1 + k^2 r_R^2}.$$

Знак «мінус» означає, що хвилі розповсюджуються на захід. Швидкість розповсюдження хвиль залежить від їхньої довжини  $l = 2\pi/k$ . При великих довжинах хвиль фазова швидкість прямує до швидкості Россбі  $v^*$ .

При частотах, набагато більших за частоту обертання планети  $\Omega$ , отримуємо гравітаційні хвилі на мілководді. Коли  $\omega \approx \Omega$ , з рівняння (2) маємо дисперсійне рівняння інерційних або гіроскопічних хвиль в тонкій атмосфері, що обертається,  $\omega = \Omega \cdot (1 + k^2 r_R^2 / 2)$  [3].

Припустимо, що  $\Omega \gg \omega$  — частоти лінійних хвиль. Це відповідає вихорам, які повільно обертаються (таке наближення називається геострофічним). Тоді з (1) можна отримати розклад у ряд по степенях відношення  $\omega/\Omega$ :

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}_1 + \dots, \quad \mathbf{v}_0 = [\zeta, \nabla(gH)]/f, \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_1 = [\zeta, (\partial/\partial t + v_0 \nabla)\mathbf{v}_0]/f, \quad (4)$$

де  $\mathbf{v}_0$  — геострофічна швидкість,  $\mathbf{v}_1$  — інерційна поправка до  $\mathbf{v}_0$ . Підставляючи (4) до (1), опускаючи квадратичні за збуренням доданки та вводячи безрозмірні змінні, отримуємо шукане рівняння відносно  $h = (H - H_0)/H_0$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(h - r_R^2 \Delta h) - \frac{V^*}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( h + \frac{h^2}{2} \right) = \Omega r_R^4 \{ \nabla h, \nabla \Delta h \}. \quad (5)$$

Теоретичні відомості про хвильові збурення в атмосфері планети, що обертається, викладено в багатьох роботах. В реальній атмосфері при обчисленні фазової швидкості хвиль Россбі необхідно враховувати меридіональний градієнт еквівалентної глибини атмосфери (або атмосферного тиску на рівні моря) та швидкості зонального потоку. Саме швидкість зонального потоку є визначальним фактором для можливості існування хвиль планетарного масштабу, а також для їхніх просторових та часових властивостей. Із дисперсійного рівняння випливає, що фазова швидкість хвиль Россбі направлена на захід. Завдяки взаємодії із зональним потоком напрямок фазової швидкості може змінюватися на протилежний і залежність швидкості від довжини хвилі виглядатиме інакше. Розглядаючи динаміку атмосферних збурень в наближенні  $\beta$ -площини (відповідно параметр Коріоліса  $f = 2\Omega \sin \varphi$  буде

представлений у формі  $f = f_0 + \beta y$ ), приходимо до безрозміреного рівняння Чарні — Обухова [5, 6]:

$$\frac{\partial(h - \Delta_{\perp} h)}{\partial t} - \beta \frac{\partial h}{\partial y} = \{h, \Delta_{\perp} h\}, \quad (6)$$

де  $\Delta_{\perp} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  — двовимірний оператор Лапласа,  $\{h, \Delta h\} = \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial \Delta h}{\partial y} - \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial \Delta h}{\partial x}$  — векторна нелінійність або дужки Пуассона. В цій моделі атмосферу представлено як нестискувану рідину глибини  $h$ .

Беручи до уваги меридіональну неоднорідність еквівалентної глибини атмосфери та наявність зонального вітру з неоднорідним меридіональним профілем, для фазової швидкості хвиль Россбі отримуємо вираз

$$V_{ph} = u + \frac{\omega}{k_{\lambda}} = u - \frac{\beta r_R^2}{1 + k^2 r_R^2}, \quad (7)$$

де  $\beta$  набуває форми (беручи до уваги меридіональні збурення еквівалентної глибини атмосфери)

$$\beta = \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{f}{H} \frac{\partial H}{\partial y}. \quad (8)$$

Таким чином, якщо швидкість зонального потоку перевищує фазову швидкість хвилі, лінійні хвилі Россбі можуть рухатись у східному напрямку, що зазвичай і спостерігається.

## ХВИЛІ РОССБІ В ЗАГАЛЬНОМУ ВМІСТІ ОЗОНУ У ПОЛЯРНІЙ АТМОСФЕРІ

Для аналізу активності хвиль планетарного масштабу у південному приполярному регіоні були використані глобальні дані вимірювань загального вмісту озону з допомогою супутникового спектрометра TOMS з розділенням  $1.25^\circ$  по довготі та  $1^\circ$  по широті, наведені в одиницях Добсона [<http://toms.gsfc.nasa.gov/ftpdata.html>]. Також були використані дані реаналізу NCEP/NCAR із просторовим розділенням  $2.5^\circ$  по широті та довготі для зонального вітру та геопотенціальних висот [<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/>]. Характер розподілу озону під впливом хвилі із зональним числом 1 проілюстровано на рис. 2.

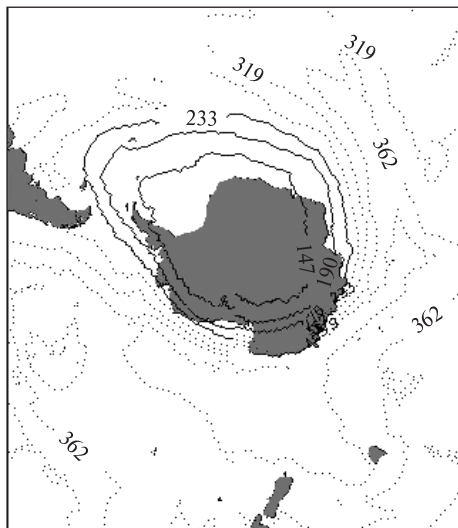


Рис. 2. Збурення антарктичної озонної діри хвилею із зональним числом  $m = 1$  (10 жовтня 2003 р.)

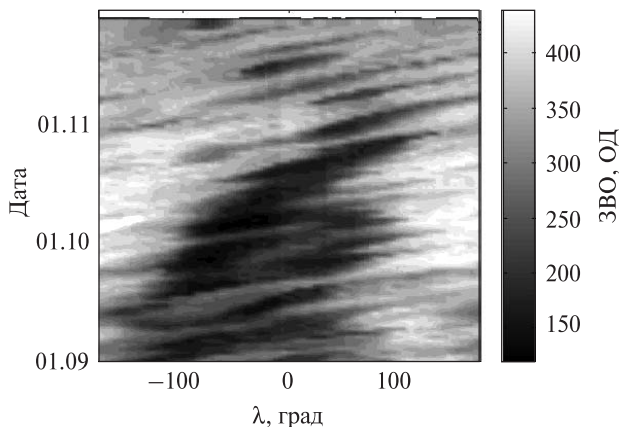


Рис. 3. Загальний вміст озону вздовж паралелі 60°S у вересні — листопаді 2003 р.

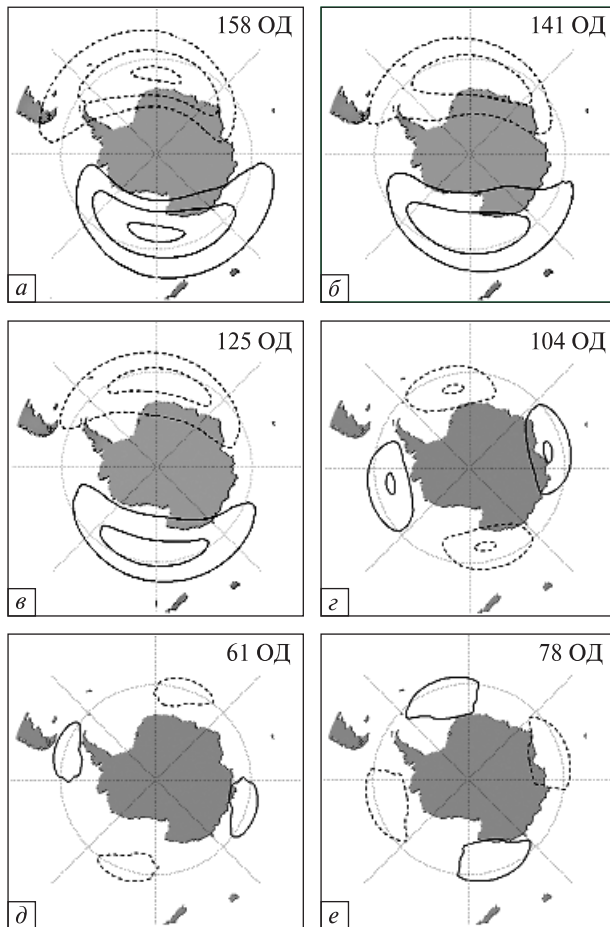


Рис. 4. Структура хвилі з  $m = 1$  для 10, 12 і 14 жовтня 2003 р. (а—в) та хвилі з  $m = 2$  для 7, 9 та 11 жовтня 1990 р. (г—е). Обчислення виконано за розподілом ЗВО із даних TOMS. Відстань між контурами становить 50 ОД; суцільні лінії відповідають додатним значенням, пунктирні — від'ємним, нульова лінія не показана; вгору — значення максимальної амплітуди

На рис. 3 показано варіації довготного розподілу ЗВО для широтного кола 60°S протягом антарктичної весни 2003 р. Часовий інтервал для аналізу вибрано з урахуванням тривалості життя озонної діри — це переважно вересень — листопад. Саме протягом цього періоду спостерігається максимальна активність хвиль у крайовій області полярного вихору.

Детально був проаналізований рух хвиль із зональними числами 1—3 у жовтні 1990 та 2003 рр., оскільки ці місяці дають зразки високої актив-

ності всіх вказаних компонентів. Динаміка хвилі 1 у жовтні 2003 р. та хвилі 2 у жовтні 1990 р. демонструється на рис. 4, а—в та рис. 4, г—е відповідно. У таблиці наведено фазові швидкості трьох зональних гармонік — як теоретично обчислені для однорідної атмосфери, так і отримані експериментально для географічної широти 60°S. Для реальних планетарних хвиль у південній приполярній області характерним є рух у східному напрямку. При цьому що менша довжина хвилі, то швидше вона рухається. Ці влас-

**Швидкості першої, другої та третьої гармонік на широті 60°S, визначені для однорідної атмосфери та з урахуванням швидкості зонального вітру**

Зональне хвильове число	1	2	3
Фазова швидкість хвилі в однорідній атмосфері, м/с	-37.6	-19.2	-10.6
Швидкість хвилі 10–20 жовтня 2003 р., м/с	2±1	10±1	14±1

тивості протилежні до дисперсійних властивостей класичних хвиль Россбі в атмосферах планет при постійній еквівалентній глибині атмосфери. Спостережені особливості можуть бути пояснені, якщо врахувати градієнт тиску та пов'язаний із ним зональний вітер. Врахувавши швидкість зонального вітру, можна відтворити дисперсійну криву для спостережуваних хвиль.

Залежність швидкості руху хвилі від номера гармоніки на широті 60° з урахуванням геострофічного вітру показана на рис. 5. Відповідно до формули (7) рух на схід є тим повільнішим, що менше зональне число. При цьому найменшою є швидкість першої гармоніки. Вона може бути навіть стаціонарною, що часто і спостерігається у південній полярній області. Застосовуючи вираз (7) до хвиль 1, 2 та 3, отримуємо систему рівнянь відносно невідомих швидкості геострофічного вітру, швидкості та радіуса Россбі:

$$\begin{cases} v_{ph1} = u - \frac{v^*}{1 + \Delta}, \\ v_{ph2} = u - \frac{v^*}{1 + 4\Delta}, \\ v_{ph3} = u - \frac{v^*}{1 + 9\Delta}, \end{cases} \quad (9)$$

де  $\Delta = \left(\frac{r_R}{R \cos \varphi}\right)^2$ ;  $v_{ph1}$ ,  $v_{ph2}$ ,  $v_{ph3}$  — фазові швидкості хвиль із  $m = 1 \dots 3$ .

Розв'язуючи наведену систему рівнянь (9) відносно радіуса Россбі  $r_R$  (параметра  $\Delta$ ), швидкості зонального вітру  $u$  та швидкості Россбі  $v^*$ , отримуємо:

$$\Delta = \frac{8v_{ph2} - 5v_{ph1} - 3v_{ph3}}{27v_{ph3} + 5v_{ph1} - 32v_{ph2}}, \quad r_R = R \cos \varphi \sqrt{\Delta},$$

$$u = \frac{(1 + 4\Delta)v_{ph2} - (1 + \Delta)v_{ph1}}{3\Delta},$$

$$v^* = (1 + \Delta)(u - v_{ph1}). \quad (10)$$

Підставляючи значення фазових швидкостей та приймаючи радіус Землі  $R = 6.37 \cdot 10^6$  м, маємо для широти  $\varphi = 60^\circ$ :  $\Delta = 0.338$ ,  $r_R = 1.85 \cdot 10^6$  м,  $u = 19.9$  м/с,  $v^* = 24.3$  м/с. Отримані з (10) параметри в межах похибки збігаються з теоретичними значеннями швидкості та радіуса Россбі, обчисленими для даної широти, та даними NCEP/NCAR (див. таблицю). Характер руху хвиль 1–3 протягом 10–30 жовтня 2003 р. відображений на рис. 6.

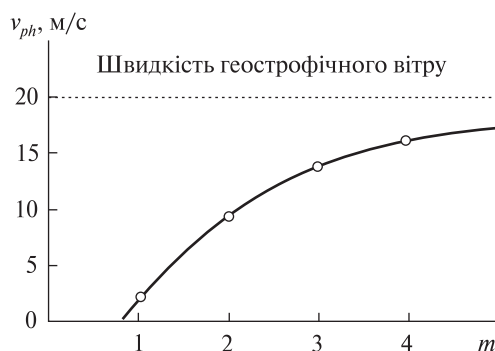


Рис. 5. Залежність швидкості  $v_{ph}$  руху хвилі від номера  $m$  гармоніки на широті 60° з урахуванням геострофічного вітру

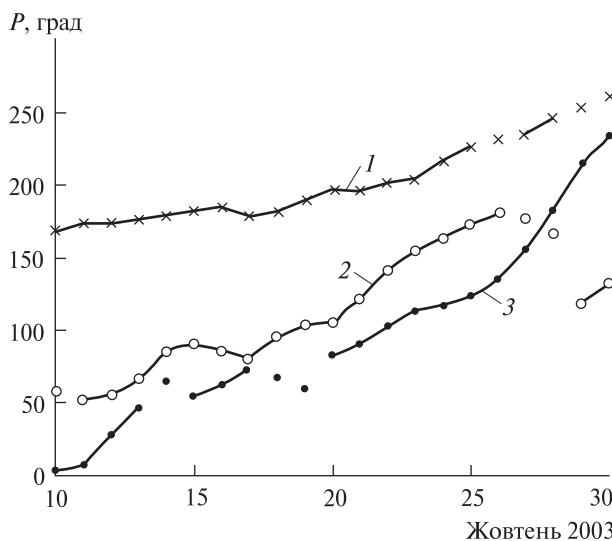


Рис. 6. Фази  $P$  хвиль із зональними числами 1–3 (числа біля кривих) протягом 10–30 жовтня 2003 р. на широті 60°S. Точки, не сполучені лініями з сусідніми, відповідають незначним амплітудам, які відрізняються від середньомісячних більш ніж на одне середнє квадратичне відхилення



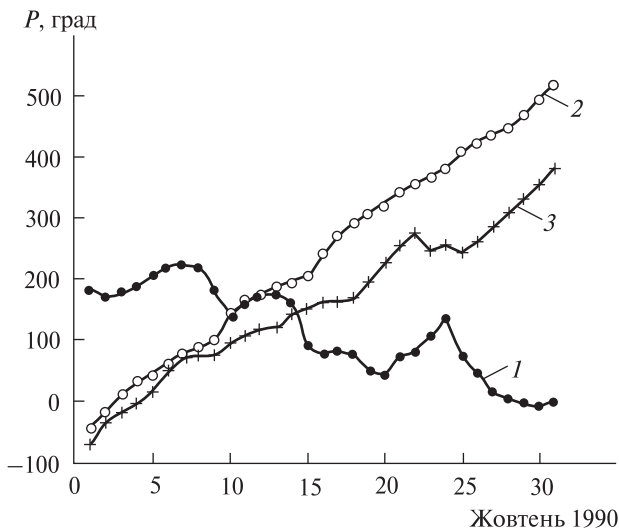


Рис. 7. Фази  $P$  хвиль із зональними числами 1—3 (числа біля кривих) у жовтні 1990 р. на широті  $65^{\circ}\text{S}$  за супутниковими даними про розподіл озону

Найбільш виразно систематичний рух реалізується для хвилі із зональним числом 2. Зокрема, у жовтні 1990 р. ця хвиля рухалася зі швидкістю близько  $20^{\circ}$  за добу на широті  $65^{\circ}\text{S}$ , що відповідає  $13\text{ м/с}$  (рис. 7). Натомість для фази хвилі із зональним числом 1 протягом вказаного місяця спостерігалися відрізки руху як у східному, так і у західному напрямку, що є природним у квазістаціонарному випадку. У підсумку дана хвиля зазнала повільного зміщення на захід.

## ВИСНОВКИ

На основі супутникових вимірювань загального вмісту озону проведено дослідження динаміки квазіперіодичних великомасштабних збурень у стратосфері південного полярного регіону. У зв'язку зі збуреннями полярного вихору планетарними хвилями розподіл озону в його крайовій частині є суттєво неоднорідним у зональному напрямі (вздовж паралелі). Відсутність суттєвого зсуву фази з висотою для вказаного типу хвиль робить можливим використання ЗВО для визначення фаз хвиль та співвідношень між амплітудами компонентів із різними довжинами. Показано, що квазіперіодичні зональні збурення ЗВО на краї антарктичного вихору є проявом

хвиль Россбі та пояснено особливості їхніх дисперсійних властивостей. Головні результати роботи є такими:

- для атмосфери планети, що обертається, визначена залежність фазової швидкості хвиль 1, 2 та 3 від широти з урахуванням неоднорідного зонального потоку;
- на основі просторового спектрального розкладу збурень ЗВО показано, що зміни зонального розподілу можна описати в рамках динаміки лінійних хвиль Россбі;
- показано, що особливості характеристик квазіперіодичних збурень ЗВО пов'язані з наявністю приполярного зонального потоку. Саме знесення хвиль Россбі зональним потоком призводить до нехарактерних фазових параметрів планетарних хвиль.

*Дані реаналізу NCEP/NCAR отримано з сайту NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado [http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/]. Щодобові дані вимірювань загального вмісту озону з допомогою спектрометрів TOMS отримано із сайту NASA [http://toms.gsfc.nasa.gov/ftpdata.html].*

1. Александров Э. Л., Израэль Ю. А., Кароль И. Л., Хргиан А. Х. Озонный щит Земли и его изменения. — Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1992. — 288 с.
2. Монин А. С., Жихарев Г. М. Океанские вихри // Успехи физ. наук. — 1990. — **160**, вып. 5. — С. 1—47.
3. Незлин М. В. Солитоны Россби // Успехи физ. наук. — 1986. — **150**, № 1. — С. 3—60.
4. Нерушев А. Ф. Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой Земли. — Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2003. — 221 с.
5. Петвиашвили В. И., Похотелов О. А. Уединенные волны в плазме и атмосфере. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 200 с.
6. Петвиашвили В. И., Похотелов О. А. Уединенные вихри в плазме // Физика плазмы. — 1986. — **12**. — С. 1127—1144.
7. Engelen R. J. The effect of planetary waves on the total ozone zonal deviations in the presence of a persistent blocking anticyclone system // J. Geophys. Res. — 1996. — **101 D**, N. 22. — P. 28775—28784.
8. Farman J. C., Gardiner B. G., Shanklin J. D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction // Nature. — 1985. — **315**. — P. 207—210.
9. Hio Y., Hirota I. Interannual variations of planetary waves in the Southern Hemisphere stratosphere // J. Met. Soc. Jap. — 2002. — **80**, N 4B. — P. 1013—1027.

10. Hio Y., Yoden S. Quasi-periodic variations of the polar vortex in the Southern Hemisphere stratosphere due to wave-wave interaction // J. Atmos. Sci. — 2004. — **61**, N 21. — P. 2510—2527.
11. Randel W. J. Global normal-mode Rossby waves observed in stratospheric ozone data // J. Atmos. Sci. — 1993. — **50**, N 3. — P. 406—420.
12. Salby M. L., Callaghan P. F. Fluctuations of total ozone and their relationship to stratospheric air motions // J. Geophys. Res. — 1993. — **98** D, N 2. — P. 2715—2727.
13. Scientific assessment of ozone depletion: 2006. — Geneva: World Meteorological Organization, 2007. — Report N 50.
14. Scott P. K., Dritschel D. G., Polvani L. M., Waugh D. W. Enhancement of Rossby wave breaking by steep potential vorticity gradients in the winter stratosphere // J. Atmos. Sci. — 2004. — **61**, N 8. — P. 904—918.
15. Shepherd T. G. Large-scale atmospheric dynamics for atmospheric chemists // Chem. Rev. — 2003. — **103**, N 12. — P. 4509—4531.
16. Stolarski R. S., McPeters R. D., Newman P. A. The ozone hole of 2002 as measured by TOMS // J. Atmos. Sci. — 2005. — **62**, N 3. — P. 716—720.
17. Wirth V. Quasi-stationary planetary waves in total ozone and their correlation with lower stratospheric temperature // J. Geophys. Res. — 1993. — **98** D, N 5. — P. 8873—8882.

Надійшла до редакції 07.07.10

*O. V. Agapitov, A. V. Grytsai, D. A. Salyuk*

#### LARGE-SCALE ROSSBY WAVES IN THE ANTARCTIC STRATOSPHERE

Spring variations in the Antarctic total ozone content are analysed basing on satellite observation data. Deviations of the total ozone content distribution from zonally-symmetrical one are explained as the impact of large-scale Rossby waves propagating at the lower stratosphere heights. We consider the waves with zonal numbers 1—3 which play a leading part in the high-latitude stratosphere. It is shown that the observed pattern corresponds to the Rossby wave dispersion relation with allowance made for zonal wind velocity.

УДК 523.4-854

**А. В. Дудник**

Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ В МАЕ 2009 ГОДА НА НИЗКООРБИТАЛЬНОМ СПУТНИКЕ С ПОМОЩЬЮ ПРИБОРА СТЭП-Ф**

---

*Аналізуються варіації потоків електронів у радіаційних поясах Землі у травні 2009 р., виміряних супутниковим телескопом електронів і протонів СТЭП-Ф комплексу наукової апаратури ФОТОН космічного апарата КОРОНАС-ФОТОН. Досліджується взаємозв'язок змін інтенсивності часток в поясах біля основи дрейфових оболонок з різними фазами слабкої магнітної бурі 8 травня, а також з динамікою параметрів високошвидкісного потоку сонячного вітру, що передувала цій магнітній бурі. Визначаються емпіричні значення часу життя електронів з різними енергіями у основному внутрішньому і зовнішньому радіаційних поясах. Досліджується частота появи і залежність від геомагнітної активності додаткового внутрішнього радіаційного поясу, що виникає спорадично.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Научный эксперимент с использованием спутникового телескопа электронов и протонов СТЭП-Ф проводился в 2009 г. в составе комплекса научной аппаратуры ФОТОН на борту российского научного специализированного спутника КОРОНАС-ФОТОН. Прибор СТЭП-Ф создан на основе договора о научно-техническом сотрудничестве между Харьковским автономным исследовательским национальным университетом имени В. Н. Каразина и национальным исследовательским ядерным университетом «Московский инженерно-физический институт». Основаниями для реализации эксперимента были также решения четырехсторонних совещаний полномочных представителей академий наук и космических агентств России и Украины. Научный эксперимент КОРОНАС-ФОТОН — один из немногих научных спутниковых проектов, входящих в совместную программу Российской академии наук, Национальной академии наук Украины и космических агентств обеих стран по фундаментальным космическим исследованиям с использованием автоматических космических аппаратов [1].

Спутниковый телескоп электронов и протонов СТЭП-Ф создан Харьковским национальным университетом им. В. Н. Каразина Министерства образования и науки Украины в кооперации с ОАО «АО Институт радиотехнических измерений» (г. Харьков), Институтом сцинтилляционных материалов (г. Харьков) и НИИ микроприборов Национальной академии наук Украины (г. Киев). Главными задачами проведения эксперимента на борту космического аппарата КОРОНАС-ФОТОН были изучение динамики солнечных космических лучей и радиационных поясов Земли на этапе роста 24-го цикла солнечной активности.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Одной из задач эксперимента с прибором СТЭП-Ф на борту космического аппарата (КА) КОРОНАС-ФОТОН было изучение динамики частиц разных сортов в магнитосфере Земли в различных ее слоях как результат воздействия солнечных вспышек и других проявлений солнечной активности. Ввиду низкой орбиты спутника потоки частиц, регистрируемые с помощью прибора СТЭП-Ф, были либо высыпавшимися в атмосферу Земли, или же квазизахваченными. Процентное соотношение захваченных частиц с

Автор благодарит коллектив Института Астрофизики национального исследовательского ядерного университета МИФИ за помощь в обеспечении научными и служебными данными с прибора СТЭП-Ф и космического аппарата в целом, И. Н. Мякову за полезные обсуждения, Е. В. Курбатова за наземное техническое сопровождение летных испытаний прибора СТЭП-Ф. Работа выполнена при частичной поддержке Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина.

1. Дудник А. В., Гока Т., Матsumото Х. и др. Разработка спутникового спектрометра-телескопа энергичных заряженных частиц СТЭП-Ф для космического проекта «Коронас-Фотон» и его тестирование на ионном циклотронном ускорителе RIKEN, Япония // Сб. тез. 3-й Украинской конф. по перспективным космическим исследованиям. — 2003. — С. 37.
2. Дудник А. В., Залобовский И. И. Научные задачи международного космического эксперимента КОРОНАС-ФОТОН // Космічна наука і технологія. — 2000. — 6. — № 2/3. — С. 3—12.
3. Дудник А. В., Малыгина Т. В. Компьютерное моделирование поглощенной энергии и пробегов частиц в спектрометре СТЭП космического проекта «Попередження» // Космічна наука і технологія. — 2003. — 9, № 1. — С. 15—21.
4. Дудник А. В., Персиков В. К., Бошер Д. и др. Экспериментальные возможности спектрометра-телескопа СТЭП-Ф и первые результаты радиационного картографирования // Первые этапы летных испытаний и выполнение программы научных исследований по проекту КОРОНАС-ФОТОН: Тр. рабочего совещания. — М., 2010. — С. 217—228.
5. Baker D. N., Kanekal S. G., Horne R. B., et al. Low-altitude measurements of 2–6 MeV electron trapping lifetimes at  $1.5 \leq L \leq 2.5$  // Geophys. Res. Lett. — 2007. — 34 (20). — P. L20110.5, doi: 10.1029/2007GL031007.
6. Dudnik O. V., Goka T., Matsumoto H., et al. Computer simulation and calibration of the charge particle spec-

trogram- telescope STEP-F // Adv. Space Res. — 2003. — 32, N 11. — P. 2367—2372.

7. Frolov O. S., Dudnik A. V., Sadovnichiy A. A., et al. Development of silicon matrixes and channels of amplification of signals for a telescope — spectrometer of charged particles // Proceedings of Intern. Cosmic Ray Conf., August, 2001, Hamburg, Germany, Copernicus Gesellschaft, — P. 2305—2308.
8. Jian L. K., Russell C. T., Luhmann J. G., et al. Ion cyclotron waves in the solar wind observed by STEREO near 1 AU // Astrophys. J. Lett. — 2009. — 701, N 2. — doi: 10.1088/0004-637X/701/2/L105.
9. Narita Y., Glassmeier K. H., Sahraoui F., Goldstein M. L. Wave-vector dependence of magnetic-turbulence spectra in the solar wind // Phys. Rev. Lett. — 2010. — 104, N 17. — doi: 10.1103/PhysRevLett.104.171101.
10. Obara T., Nagatsuma T., Den M., et al. Main-phase creation of “seed” electrons in the outer radiation belt // Earth Planets Space. — 2000. — 52. — P. 41—47.

Надійшла до редакції 30.08.10

O. V. Dudnik

#### INVESTIGATION OF THE EARTH'S RADIATION BELTS IN MAY 2009 AT THE LOW ORBIT SATELLITE WITH THE STEP-F INSTRUMENT

An analysis of electron flux variations in the Earth's radiation belts in May 2009 is performed on the basis of the data obtained from the satellite telescope of electrons and protons STEP-F as a part of scientific apparatus complex PHOTON aboard the spacecraft CORONAS-PHOTON. We investigate the temporal connection of particle intensity changes that were detected by the view cone of the device in the radiation belts at the bases of drift shells with various phases of the weak magnetic storm on 8 May, as well as with parameters of high speed solar wind streams. The empirical values of various energy electron life times in the basic inner and outer radiation belts are determined. The appearance frequency and dependence on the geomagnetic activity of the additional inner radiation belt appearing sporadically are studied.

УДК 523.98

А. Н. Кришталь, С. В. Герасименко, А. Д. Войцеховская

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

## О ПРИРОДЕ ВСПЛЕСКОВ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЕТЕЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

*Досліджено стійкість першої гармоніки чисто електронних нахилених бернштейнівських мод, модифікованих врахуванням кулонівських зіткнень та наявністю слабого великомасштабного електричного поля у петлі. Передбачалось, що основні характеристики магнітоактивної плазми в основі петельної структури на ділянці, що відповідає нижній хромосфері активної області, визначаються за допомогою напівемпіричної моделі сонячної атмосфери Фонтенлі — Авретта — Льюзера (FAL). Як основна причина виникнення та розвитку нестійкості розглядалась сукупна дія таких факторів, як наявність субдрейсерівського електричного поля, амплітуда якого адіабатично повільно збільшується в ході розвитку спалахового процесу, врахування парних кулонівських зіткнень та мале відхилення напрямку розповсюдження збурення від чисто перпендикулярного по відношенню до магнітного поля петлі. Дослідження інкремента розвитку нестійкості показало, що використання моделі FAL замість моделей атмосфери MAVN та VAL, які були використані раніше, призводить до суттєвого зниження порогу нестійкості за амплітудою субдрейсерівського електричного поля. Випромінювання в сантиметрово-міліметровому діапазоні може виникнути за сприятливих умов унаслідок розпаду хвилі, яка генерується, на кінетичну альвенівську та звичайну електромагнітну хвилі.*

### ВВЕДЕНИЕ

Теоретический анализ процессов в плазме атмосферы активной области на Солнце, проведенный целым рядом исследователей еще в начале 80-х годов прошлого века (см. [3]), указал на принципиальную возможность регистрации отдельных циклотронных линий на гармониках электронной гирочастоты. Как отмечалось в работе [3], для корональной области атмосферы активной области (АО) формирование циклотронных особенностей может происходить в источниках микроволнового излучения с самыми различными типами распределений плотности, температуры и магнитного поля. Это могут быть и нейтральные токовые слои, и силовые трубки магнитного поля, заполненные «горячими» электронами, и так называемые «рентгеновские ядра», ответственные за элементарные вспышечные всплески [19]. Так, наблюдения [3] активной области АО 7962 на РАТАН-600 в период с 10 по 12 мая 1996 г. позволили на фоне

гладкого частотного спектра локального источника выделить узкополосную деталь на волне  $\lambda \approx 8.5$  см. Сопоставление с картами радиотелескопа в Нобеяма на волне  $\lambda \approx 1.7$  см допускает наличие как теплового циклотронного излучения из компактного источника, содержащего плотную горячую плазму, на третьей гармонике электронной гирочастоты, а соответствующее высокочастотное излучение может быть объяснено тепловым тормозным механизмом [3]. Анализ полученных данных позволяет провести (на уровне оценок) диагностику магнитного поля, кинетической температуры и электронной концентрации в источнике излучения (в короне). Следует отметить, что подобный подход, основанный на диагностике вспышечной (или послевспышечной) плазмы по характеристикам всплесков микроволнового излучения из петельных структур АО получил достаточно широкое распространение в последние годы [2, 3, 5, 8, 10, 11, 18, 19]. Действительно, радиоизлучение позволяет получить информацию из слоев солнечной атмосферы, зачастую недоступных другим методам наблюдений. Отдельную группу исследований представляют собой наблюдения с

высокой разрешающей способностью развитых петельных структур и отдельных вспышечных петель в АО на самых ранних стадиях развития вспышечного процесса, включая (что особенно ценно) и предвспышечное их состояние [2, 6, 7, 9, 18]. Наблюдения проводились на радиогелиографах ССРТ и NoRH на частотах 5.7, 17 и 34 ГГц. Кроме диагностики основных характеристик плазмы в петлях, особое внимание уделялось исследованию радиояркости сантиметрово-миллиметрового излучения. Полученные результаты по его распределению вдоль петли позволили сделать вывод о том, что чаще всего встречающаяся максимальная радиояркость в вершине петли обусловлена скоплением там высокоэнергичных электронов, вызванным, в свою очередь, неустойчивостью обратного конуса потерь частиц в магнитной ловушке [18, 19]. При этом предполагается, что дефицит высокоэнергичных частиц в основаниях петлеобразных источников микроволнового излучения вызван потерями их энергии либо на кулоновских столкновениях, либо на пульсациях турбулентности в более плотных слоях плазмы [18, 19]. Однако нельзя не отметить, что в ряде случаев максимальная радиояркость наблюдалась в «ногах» петель [18]. В работе [18] получено, что это может быть следствием усиленной инжекции частиц в эту область на определенном этапе вспышечного процесса. В любом случае это подтверждает справедливость концепции М. Ашвандена [12], особо выделяющей роль переходного слоя и вообще хромосферы в процессе обмена энергией между фотосферой и короной. Применительно к проблеме микроволнового излучения можно ожидать, что в вышеупомянутом случае максимальной радиояркости вблизи «ноги» петлеобразного источника генерация на гармониках циклотронной частоты возможна в этой области благодаря традиционному механизму, предложенному в работе [3]. Вместе с тем в работах [4, 16] было показано, что и в противоположной, гораздо чаще встречающейся ситуации, когда максимальная радиояркость наблюдается вблизи вершины петли, а на ее «хромосферном» участке имеет место дефицит высокоэнергичных частиц, электромагнитное излучение может ге-

нерироваться на близких частотах. Так происходит потому, что предположение о наличии в петле электрического поля, которое проявляет себя в дополнительном штарковском уширении линий бальмеровской серии с большими номерами ( $N \geq 8$ ) [14, 19] может в принципе привести к существенным изменениям в ходе вспышечного процесса. Даже если так называемые «нескомпенсированные» токи текут не во всем контуре петли, а лишь на хромосферном участке [12, 15, 20], то сам факт наличия такого поля, получившего название «субдрейсеровского» [19], в предвспышечной фазе будет иметь своим следствием появление различных низкопороговых плазменных неустойчивостей, как низко-, так и высокочастотных [4, 16]. Опираясь на модель взаимодействующих магнитных потоков [15] (теория вспышки Хейвертса — Приста — Раста) и постулируя тот факт, что интенсивность взаимодействия «старого» и «нового» потоков нарастает по мере развития вспышечного процесса, удалось показать [4, 16], что все эти неустойчивости возникают при очень малых значениях приведенной амплитуды субдрейсеровского поля  $\varepsilon_R$ , т. е. при

$$\varepsilon_R \ll 1, \quad (1)$$

где

$$\varepsilon_R = \frac{E_0}{E_D} \equiv \frac{E_0}{(m/e)v_{Te}v_{ei}}. \quad (2)$$

Здесь  $E_0$  — размерная амплитуда стационарного электрического поля,  $E_D$  — размерная амплитуда локального дрейсеровского поля,  $m$  и  $e$  — масса и заряд электрона [1],  $v_{Te}$  — его тепловая скорость,  $v_{ei}$  — частота электронно-ионных столкновений. Нетрудно убедиться в том, что потоковая скорость электронов [1]

$$u = \frac{eE_0}{mv_{ei}} \quad (3)$$

в этом случае намного меньше их тепловой скорости, т. е.

$$u \ll v_{Te}. \quad (4)$$

В то же время согласно теории ХПП [15] во время фазы предварительного нагрева, которая предшествует импульсной фазе вспышки, основную роль в развитии вспышечного процесса играет

бунемановская неустойчивость, которая появляется и развивается при

$$u \gg v_{Te}. \quad (5)$$

Таким образом, к моменту начала фазы «предварительного нагрева» целый ряд неустойчивостей может успеть развиваться, а при наличии соответствующих достаточных условий и перевести плазму в состояние турбулентности. При этом исследования показали [4, 16], что скорость роста возмущений, т. е. инкремент нарастания неустойчивости, весьма чувствительна к изменениям амплитуд внешних полей, плотности и температуры плазмы.

### КВАЗИБЕРНШТЕЙНОВСКИЕ МОДЫ В СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

Обычные бернштейновские моды, как известно, распространяются строго перпендикулярно к внешнему магнитному полю в плазме и по определению являются незатухающими [1]. Термин «квазибернштейновские моды» [4, 16] употребляется не часто, поэтому требует некоторых пояснений. «Квазибернштейновскими» будем называть такие бернштейновские моды, которые имеют малую, но отличную от нуля составляющую  $k_z$  волнового вектора, направленную вдоль внешнего магнитного поля  $\mathbf{B}_0$ . В этом смысле такие волны подобны хорошо известным «нейтрализованным модам Бернштейна» [1] с малым  $k_z \neq 0$ . С одной стороны, эта малая добавка позволяет электронам перетекать вдоль силовых линий магнитного поля, компенсируя разделение зарядов и обеспечивая выполнение условия квазинейтральности [1]

$$n_e = n_i. \quad (6)$$

С другой стороны, она является причиной появления затухания Ландау. К нему еще добавляется затухание на парных кулоновских столкновениях, что продиктовано необходимостью учета специфики процесса распространения плазменных волн в хромосферной части петельных структур в АО. И если эти два фактора являются причиной возникновения затухания у изначально незатухающих волн, то наличие в петлях субдрейсеровского электрического поля  $\mathbf{E}_0$  приводит к расщепке неустойчивости исследуемых волн,

и следовательно, к их генерации [4]. С учетом трех перечисленных выше факторов из обычных бернштейновских мод получают квазибернштейновские. Модель плазмы и используемые приближения были подробно рассмотрены в [4, 16]. Отдельно отметим, что и модель, и приближения “хорошо работают” для ограниченного интервала высот в петле, приблизительно соответствующего средненижней хромосфере

$$600 \text{ км} \leq h \leq 1800 \text{ км} \quad (7)$$

при условии наличия там килогауссовых (по терминологии [20]) магнитных полей. Указанный интервал в основном выбирался таким образом, чтобы на нижней его границе выполнялось соотношение

$$v_{ei} \gg v_{0e}, v_{0i}, \quad (8)$$

где  $v_{0e}$  и  $v_{0i}$  — частоты столкновений заряженных частиц с нейтралами [1]. Верхняя граница приблизительно определялась соотношением (4). Для описания парных кулоновских столкновений заряженных частиц в работе использовался модельный интеграл Батнагара — Гросса — Крука (БГК) для полностью ионизованной плазмы [1], в котором частота электронно-ионных столкновений  $v_{ei}$  была заменена эффективной частотой  $v_{ei}^*$  столкновений этих частиц в случае высокочастотных ленгмюровских колебаний:

$$v_{ei}^* = \frac{1}{16\pi\epsilon_0^2} \frac{Ze^4 \ln \Lambda}{T_e^{3/2} \sqrt{2\pi m_e}} n_i, \quad (9)$$

где  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума в системе СИ,  $\ln \Lambda$  — кулоновский логарифм. всюду в расчетах полагалось, что  $Z = 1$  (однозарядные ионы), а  $\ln \Lambda = 9.8$ . Вклад взаимных столкновений заряженных частиц одного знака в интеграл БГК учитывался на феноменологическом уровне введением безразмерного множителя  $\sigma$  перед  $v_{ei}^*$ , изменявшегося в пределах

$$1 \leq \sigma \leq 6. \quad (10)$$

При этом случай  $\sigma = 1$  соответствовал чисто гипотетической ситуации полного доминирования электронно-ионных столкновений, а при  $\sigma = 6$  парные кулоновские столкновения полностью гасили развитие неустойчивости. Как и обычные бернштейновские, так и квазибернштейновские электронные моды нечувствительны к отноше-

нию электронной и ионной температур, поэтому всюду в расчетах предполагалось, что  $T_e = T_i$ .

Использовались следующие физические приближения [4, 16].

1. Адиабатическое приближение для изменений амплитуды квазистатического субдрейсеровского [19] электрического поля  $|\mathbf{E}_0|$ , т. е. за время линейной стадии развития неустойчивости амплитуда поля  $E_0(t)$  изменяется пренебрежимо мало:

$$\left| \frac{1}{E_0} \frac{\partial E_0(t)}{\partial t} \right| \ll \frac{1}{t_{\text{неуст}}} \approx \gamma, \quad (11)$$

где  $t_{\text{неуст}}$  — время развития неустойчивости,  $\gamma$  — ее инкремент.

2. «Слабость» субдрейсеровского поля, когда работа, совершаемая полем  $E_0$  по перемещению заряда  $e$  на пути, равном продольной длине волны возмущения, намного меньше тепловой энергии плазмы:

$$\frac{e|E_0|}{k_z k_B T} \ll 1, \quad (12)$$

где  $T$  — температура плазмы  $T_e = T_i = T$ ,  $k_z$  — продольная (вдоль  $\mathbf{B}_0$ ) составляющая волнового вектора возмущения  $k^2 \equiv k_\perp^2 + k_z^2$ ,  $k_B$  — константа Больцмана.

3. «Разреженность» плазмы:

$$\frac{m_e}{m_i} \ll \beta = \frac{8\pi n k_B T}{B_0^2} \ll 1, \quad (13)$$

где  $B_0$  — напряженность «внешнего» магнитного поля в петле.

4. Приближение Михайловского [1] (пренебрежение влиянием границ области, занимаемой плазмой с заданным «уравнением состояния» на процесс развития неустойчивости), которое можно записать в виде

$$\frac{1}{k_\perp L} \ll \left( \frac{m_e}{m_i \beta} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

где  $L$  — характерный размер неоднородности плазмы,  $k_\perp$  — поперечная составляющая волнового вектора возмущения,  $\beta$  — стандартное «плазменное бэта» (13).

5. Малость поправок, вносимых учетом столкновений:

$$\frac{v_{ei}^*}{\Omega_e} \ll 1, \quad (15)$$

$$\Omega_e = \frac{eB_0}{m_e c}, \quad (16)$$

где  $\Omega_e$  — электронная циклотронная частота,  $c$  — скорость света в вакууме.

6. Квазипоперечность возмущений:

$$k_* \equiv k_z / k_\perp \ll 1. \quad (17)$$

7. Длинноволновое приближение:

$$z_e \equiv \frac{k_\perp^2 v_{Te}^2}{\Omega_e^2} \ll 1. \quad (18)$$

8. Пренебрежение влиянием «шира», т. е. кривизны и кручения магнитных силовых линий [4], которое можно описать с помощью соотношения

$$\beta \epsilon_R \ll \sqrt{\frac{m_e}{m_i}} z_e \cdot |k_*|. \quad (19)$$

При выводе последнего соотношения предполагалось, что напряженность магнитного поля с высотой изменяется медленнее, чем изменяются плотность и температура плазмы [12, 13, 15]. Очевидно, что такое возможно только в том случае, когда поле  $\mathbf{B}_0$  является крупномасштабным, и его «источник» находится вне рассматриваемого нижнехромосферного участка токового контура петли.

9. Приближение «ограничивающей невязки» [4, 16], которое ограничивает величину  $k_*$ . Оно получается из того естественного требования, чтобы поправки, вносимые в точное дисперсионное уравнение (ДУ) учетом членов с  $k_* \neq 0$  ( $k_* \ll 1$ ), были ограничены сверху величиной соответствующей невязки. Последняя появляется тогда, когда в точное ДУ для соответствующей электронной бернштейновской гармоники подставляется известное приближенное решение вида [1]

$$\omega^2 = m^2 \Omega_e^2 (1 + \alpha_m), \quad (20)$$

где  $m = 1, 2, 3, \dots$  — номер гармоники,

$$\alpha_m \equiv 2\omega_*^2 z_e^{-1} I_m(z_e) \exp(-z_e), \quad (21)$$

$$\omega_*^2 \equiv \frac{\omega_{pe}^2}{\Omega_e^2}, \quad (22)$$



а  $I_m(z_e)$  — присоединенный полином Лежандра  $m$ -го порядка. В выражении (22)  $\omega_{pe}$  есть плазменная («электронная») частота. При  $\varepsilon_R \neq 0$  частота  $\omega$  в (20) заменяется на  $\omega'$ , где

$$\omega' \equiv \omega - k_z u_e \equiv \omega - k_z \varepsilon_R v_{Te}. \quad (23)$$

Для используемой в данной работе модели плазмы максимальный угол отклонения вектора  $\mathbf{k}$  от поперечного к  $\mathbf{B}_0$  направления определяется известным соотношением [1]

$$\Theta_{\max} = \sqrt{\frac{m_e}{m_p}} \approx 0.023, \quad (24)$$

где  $m_p$  — масса протона. Учитывая (17), можно записать

$$\text{tg} \Theta_{\max} \approx \Theta_{\max} \approx (k_*)_{\max}. \quad (25)$$

Более точное условие можно получить из вышеупомянутого приближения «ограничивающей невязки» [4, 16]. Для первой квазибернштейновской гармоники с  $m = 1$  оно имеет вид [4]

$$(k_*)_{\max} = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{1}{3} z_e e^{-z_e}} \cdot \frac{\omega_*^2}{\left(1 + \frac{9}{4} \omega_*^2 e^{-z_e}\right)}. \quad (26)$$

Величина  $\mu$  представляет собой свободный параметр. При  $\mu = \mu_{\min} = 1$  максимально допустимый угол наклона будет наибольшим. При выполнении условий (15), (17), (18) первая квазибернштейновская гармоника с  $m = 1$  практически совпадает с верхнегибридной частотой

$$\omega_{Br}^2 = \omega_{pe}^2 + \Omega_e^2. \quad (27)$$

Закон дисперсии для гармоники с  $m = 1$  имеет вид

$$\omega_1^2 \equiv \omega'^2 = \Omega_e^2 \left[1 + \omega_*^2 \exp(-z_e)\right]. \quad (28)$$

### ИНКРЕМЕНТ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕДВСПЫШЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Выражение для инкремента развития неустойчивости первой квазибернштейновской гармоники впервые было получено в работе [4]. При этом ДУ, не возмущенное влиянием столкновений, субдрейсеровского электрического поля и затухания Ландау, было получено с помощью выделения резонансного члена в «точном» ДУ для бернштейновских мод [1]. При использовании

этой стандартной методики добавки, вносимые учетом вышеперечисленных факторов в закон дисперсии (28) для исследуемой моды, оказываются более высокого порядка, чем соответствующие члены в выражении для инкремента, если выполняются условия (1), (12)—(15) и (17)—(19). Если «возмущенное» ДУ записать в виде

$$D(\omega, \mathbf{k}) = \text{Re} D(\omega, \mathbf{k}) + i \text{Im} D(\omega, \mathbf{k}) = 0, \quad (29)$$

то выражение для инкремента  $\gamma$  получается по известной схеме [1]:

$$\gamma_{\omega k} \equiv - \left. \frac{\text{Im} D(\omega, \mathbf{k})}{\frac{\partial}{\partial \omega} \text{Re} D(\omega, \mathbf{k})} \right|_{\omega=\omega_k}, \quad (30)$$

где  $\omega = \omega(\mathbf{k})$  — закон дисперсии для действительной части частоты. В данном конкретном случае  $\omega(\mathbf{k})$  описывается соотношением (28).

Выражение для приведенного (т. е. нормированного на  $\Omega_e$ ) инкремента из [4] можно записать в виде:

$$\Gamma_1 \equiv \frac{\gamma}{\Omega_e} \Big|_{\omega=\omega_1} = - \frac{C_1 + C_2}{D_1 + D_2}, \quad (31)$$

где

$$\begin{aligned} C_1 &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(1-k_*^2)}{z_e} \exp(-z_e) S \times \\ &\times \left[ \frac{\omega_*^2}{k_*} \sqrt{\frac{1+\omega_*^2}{z_e}} - \frac{\varepsilon_R \sigma v^2}{8\omega_*^2} \left( \frac{\omega_*^2}{z_e k_*^2} \right) \exp(-z_e) \right], \\ C_2 &= -\frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\mu} k_* v \varepsilon_R \frac{\sqrt{z_e}}{\omega_*^2} Q_1 - 2\sigma v Q_2 \right], \\ D_1 &= Q_3 - \frac{32}{\mu} k_* \sigma v^2 \frac{\varepsilon_R}{\sqrt{z_e} \omega_*^{10}} Q_4, \\ D_2 &= \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{(1-k_*^2)}{\sqrt{z_e} z_e^3} \frac{\sqrt{1+\omega_*^2}}{k_*^2} \exp(-z_e) S \omega_*^2 \times \\ &\times \left[ \frac{v \varepsilon_R}{\sqrt{z_e} k_*} - \frac{\sigma v}{4} \omega_*^4 \exp(-z_e) \right]. \end{aligned}$$

Здесь использованы обозначения

$$S \equiv \frac{z_e}{2} \exp \left[ -\frac{\tau \omega_*^2}{4 z_e^2 k_*^2} \right], \quad \tau \equiv \frac{z_e}{4} \omega_*^2 \exp(-z_e),$$

$$Q_1 \equiv 4 + 8z_e + (3 - z_e)\omega_*^2 - \frac{4z_e}{\omega_*^4} \left( 7\sigma^2 v^2 + \frac{18}{\mu^2} k_*^2 \right),$$

$$Q_2 \equiv 1 + \frac{z_e}{2} - \frac{\omega_*^2}{2} + 2z_e \frac{\sigma^2 v^2}{\omega_*^4} - 2 \frac{z_e k_*^2}{\mu^2 \omega_*^4} \left( 1 + \frac{\omega_*^2}{z_e} \right),$$

$$Q_3 \equiv 1 + z_e - \frac{\omega_*^2}{2} + 12z_e \frac{\sigma^2 v^2}{\omega_*^4} + \frac{4}{\mu^2} z_e k_*^2 \omega_*^6 (1 + 2z_e) [3(1 + 2z_e) + 4\omega_*^2],$$

$$Q_4 \equiv 2 + z_e (8 + 7z_e) - (3 + 14z_e)\omega_*^2 - 20z_e \frac{\sigma^2 v^2}{\omega_*^4}.$$

Численные значения приведенного инкремента (31) были получены для трех различных полуэмпирических моделей солнечной атмосферы: MAVN [17], VAL [21] и FAL [13]. Поскольку в первых двух моделях формально не учитывается процесс диффузии гелия на хромосферных высотах в атмосфере АО, то использование «связанных пар» значений плотности и температуры

плазмы на определенной высоте над уровнем фотосферы, взятых из третьей модели [13], позволяет косвенно оценить влияние вышеупомянутой диффузии на процесс развития неустойчивости. Ранее проведенные исследования [4, 16] позволили выделить высоты  $h = 675$  и  $1380$  км как нижнюю и верхнюю границу интервала, внутри которого справедливы все используемые приближения, прежде всего соотношения (4), (8), (13) и (19). Поскольку «разметки высот» в моделях MAVN, VAL и FAL чаще всего не совпадают, то в расчетах использовались ближайшие соседние значения высоты  $h$ . Модель FAL использовалась в двух своих крайних модификациях: А и Р. На одной и той же высоте  $h$  первая из них дает наименьшие значения температуры и плотности плазмы, а вторая — наибольшие [13]. Основные физические характеристики плазмы, использованные в расчетах, приведены в табл. 1.

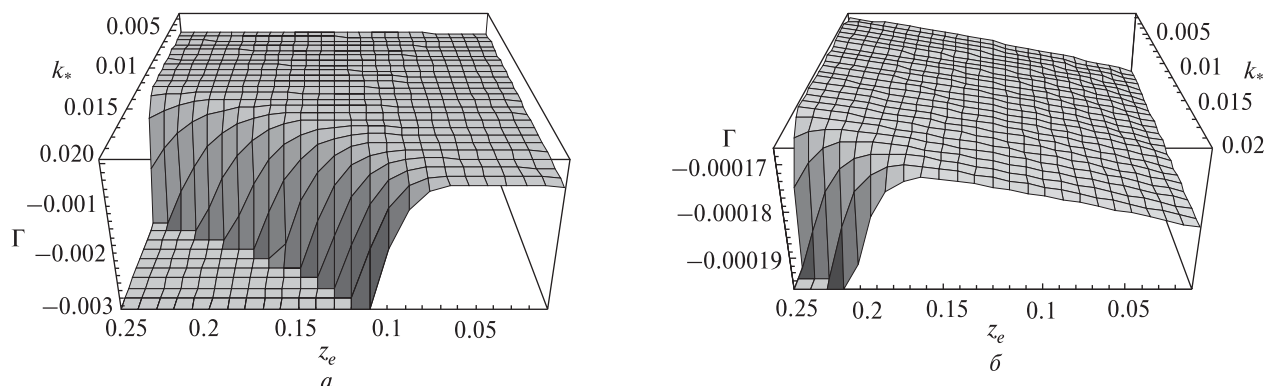
Как было отмечено ранее [4], вблизи нижней границы выбранного интервала высот большинство исследованных возмущений первой

Таблица 1. Основные физические характеристики предвспышечной плазмы на хромосферном участке токового контура петли в АО

Модель атмосферы	Модификация	$n_e, 10^{11} \text{ см}^{-3}$	$T_e = T_p, \text{ К}$	$B_0, \text{ мТл}$	$h, \text{ км}$	$\omega_{pe}, 10^{10} \text{ с}^{-1}$	$\Omega_e, 10^{10} \text{ с}^{-1}$	$v_{ei}^*, 10^7 \text{ с}^{-1}$
MAVN F1	F1	3.58	5620	321	675	3.37	5.64	3.29
FAL F1 (1) <sub>p</sub>	P	2.50	5220	321	650	2.81	5.64	2.560
FAL F1 (2) <sub>p</sub>	P	3.02	5480	321	700	3.10	5.64	2.891
FAL F1 (1) <sub>A</sub>	A	0.714	4390	321	650	1.51	5.64	0.949
FAL F1 (2) <sub>A</sub>	A	0.468	4510	321	700	1.22	5.64	0.601
VAL E	E	1.05	6500	145	1380	1.78	2.56	0.776
FAL E (1) <sub>p</sub>	P	4.79	7420	145	1380	3.80	2.56	1.226
FAL E (2) <sub>p</sub>	A	0.31	6150	145	1375	0.97	2.56	0.093

Таблица 2. Граничные значения основных характеристик неустойчивости первой квазибернштейновской гармоник

Модель атмосферы	Модификация	$(\epsilon_R)_{\text{гр}}, 10^{-3}$	$(k_*)_{\text{гр}}$	$\Gamma_{(+)\text{min}}$ (или $\Gamma_{(-)\text{max}}$ )	$h, \text{ км}$
MAVN F1	F1	0.11	0.020	-0.0026	675
FAL F1 (1) <sub>p</sub>	P	0.10	0.020	-0.0020	650
FAL F1 (2) <sub>p</sub>	P	0.10	0.021	-0.0023	700
FAL F1 (1) <sub>A</sub>	A	11	0.015	$1.42 \cdot 10^{-5}$	650
FAL F1 (2) <sub>A</sub>	A	10	0.018	$4.81 \cdot 10^{-5}$	700
VAL E	E	0.107	0.020	-0.4013	1380
FAL E (1) <sub>p</sub>	P	0.10	0.0012	$4.32 \cdot 10^{-6}$	1380
FAL E (2) <sub>p</sub>	A	0.10	0.0012	$4.27 \cdot 10^{-6}$	1375



Приведенный инкремент неустойчивости первой гармоники:  $a$  — для модели атмосферы FAL E(1)<sub>p</sub> при  $(z_e)_{\text{гп}} = 0.2$ ;  $v_{ei}^*/\Omega_e = 4.77 \cdot 10^{-4}$ ,  $b$  — для модели атмосферы FAL E(1)<sub>A</sub> при  $(z_e)_{\text{гп}} = 0.15$ ;  $v_{ei}^*/\Omega_e = 0.37 \cdot 10^{-4}$

квазибернштейновской гармоники являются «подкритическими», т. е. имеют очень малый отрицательный инкремент (тут уже — декремент), и следовательно, являются слабозатухающими. Вместе с тем, как показали вычисления, приведенный инкремент (31) оказался весьма чувствительным к изменениям температуры и плотности плазмы практически на тех же высотах. Как видно из данных, приведенных в табл. 2, переход от модели FAL F1 (1)<sub>p</sub> к FAL F1 (1)<sub>A</sub> и от FAL F1 (2)<sub>p</sub> к FAL F1(2)<sub>A</sub> сопровождается сменой знака приведенного инкремента  $\Gamma$ , когда затухание сменяется раскачкой неустойчивости, а поверхность приведенного инкремента  $\Gamma = \Gamma(z_e, k_*)$  из отрицательного полупространства переходит в положительное. Особо отметим, что волновые возмущения на линии  $\Gamma = 0$  являются по определению незатухающими.

В табл. 2  $(\epsilon_R)_{\text{гп}}$  и  $(k_*)_{\text{гп}}$  есть значения параметров  $\epsilon_R$  и  $k_*$  соответственно, при которых возникает неустойчивость. Видно, что по данным параметрам ни одна из неустойчивостей не является маргинальной, т. е. не попадает на границу исследуемого интервала. Напомним, что должны выполняться условия (1) и (24). Символами  $\Gamma_{(+)\text{min}}$  и  $\Gamma_{(-)\text{max}}$  обозначены первое положительное значение приведенного инкремента в полупространстве  $\Gamma \geq 0$  и наибольшее значение приведенного декремента в полупространстве  $\Gamma \leq 0$ . Видно, что и затухание, и процесс раскачки неустойчивости являются высокодобротными, что и позволяет идентифицировать их именно как отчетливо выраженные волновые

процессы. Исследованные неустойчивости не являются маргинальными и по параметру  $z_e$ , который изменяется в пределах

$$0.01 \leq z_e \leq 0.25. \quad (32)$$

Граничные значения  $(z_e)_{\text{гп}}$  приведены на рисунке.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали проведенные исследования, при переходе от моделей атмосферы MAVN [17] и VAL [21] к модели FAL [13] качественная картина развития неустойчивости первой квазибернштейновской гармоники в основном остается неизменной. Так, по-прежнему имеется значительное число «подкритических» неустойчивостей с очень малым декрементом затухания и высокой добротностью, а поверхности приведенного инкремента  $\Gamma = \Gamma(z_e, k_*)$ , выходящие в полупространство с  $\Gamma \geq 0$ , проходят через линию  $\Gamma = 0$ , что свидетельствует о наличии незатухающих колебаний. Все имеющиеся неустойчивости являются немаргинальными, а форма поверхности приведенного инкремента  $\Gamma = \Gamma(z_e, k_*)$  изменяется незначительно. Одновременный переход к модели FAL и использование в расчетах эффективной частоты столкновений  $v_{ei}^*$  (9) вместо стандартной частоты  $v_{ei}$  [1] электронно-ионных столкновений привели, с одной стороны, к увеличению числа «подкритических» неустойчивостей в области температурного минимума ( $600 \text{ км} \leq h \leq 800 \text{ км}$ ), а с другой стороны — к существенному повышению порога неустойчивости по амплитуде электрического поля для тех

неустойчивостей, которые все-таки могут появиться в этой области. Можно утверждать, что в данном интервале высот в рамках модели атмосферы FAL, учитывающей влияние процесса диффузии гелия, процесс развития неустойчивости затруднен. Обратная картина наблюдается на верхней границе интервала высот при  $1300 \text{ км} \leq h \leq 1500 \text{ км}$ : переход от модели VAL к модели FAL сопровождается появлением неустойчивостей в той области, где их раньше не было [4, 16], причем появлением с высокой добротностью и в немаргинальном виде. Здесь подобный переход «облегчает» процесс появления и развития неустойчивости первой гармоники. Учитывая близость ее частоты с частотой ВГВ (верхнегибридной волны) и принципиальную возможность [22] ее распада на кинетическую альвеновскую волну и обычную электромагнитную волну — в атмосфере АО, можно ожидать появления всплесков (в частности, миллисекундных) микроволнового излучения в предвспышечной плазме.

1. Александров А. Ф., Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Основы электродинамики плазмы. — М.: Высш. шк., 1989. — 424 с.
2. Бакунина И. А., Мельников В. Ф., Яркина Е. Ю. Долгоживущие межпятенные микроволновые источники // Физика плазмы в солнечной системе: Сб. тез. конф., Москва, ИКИ РАН, 5–8 февраля 2008 г. — М., 2008. — С. 17.
3. Богод В. М., Гараимов В. И., Железняков В. В., Злотник Е. Я. Обнаружение циклотронной линии в спектре микроволнового излучения активной области на Солнце и ее интерпретация // Астрон. журн. — 2000. — 77, № 4. — С. 313–320.
4. Кришталь А. Н. Наклонные бернштейновские моды в солнечной атмосфере: неустойчивость первой гармоники // Кинематика и физика небес. тел. — 1997. — 13, № 1. — С. 24–36.
5. Кузнецов С. А., Мельников В. Ф. Влияние высокой плотности плазмы на спектральную эволюцию микроволнового излучения // Тез. науч. конф. памяти М. Т. Греховой (Нижний Новгород, 7 мая 2007 г.). — ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет», УНЦ «Фундаментальная радиофизика». — 2007. — С. 13–14.
6. Мельников В. Ф., Горбиков С. П., Пятаков Н. П. Формирование анизотропных распределений энергичных электронов во вспышечных петлях // Физика плазмы в солнечной системе: Сб. тез. конф., Москва, ИКИ РАН, 5–8 февраля 2008 г. — М., 2008. — С. 10.
7. Резникова В. Э., Мельников В. Ф., Горбиков С. П., Шибасаки К. Динамика распределения радиояркости вдоль вспышечной петли // Физика плазмы в солнечной системе: Сб. тез. конф., Москва, ИКИ РАН, 5–8 февраля 2008 г. — М., 2008. — С. 17.
8. Резникова В. Э., Мельников В. Ф., Накаряков В. М., Шибасаки К. Радиальные БМЗ колебания солнечной вспышечной арки // Тез. науч. конф. памяти М. Т. Греховой (Нижний Новгород, 7 мая 2007 г.). — ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет», УНЦ «Фундаментальная радиофизика». — 2007. — С. 15–16.
9. Резникова В. Э., Мельников В. Ф., Шибасаки К. Эволюция распределения радиояркости вдоль протяженных вспышечных петель // Тез. науч. конф. памяти М. Т. Греховой (Нижний Новгород, 7 мая 2007 г.). — ГОУ ВПО «Нижегородский государственный университет», УНЦ «Фундаментальная радиофизика». — 2007. — С. 17–18.
10. Степанов А. В., Копылова Ю. Г., Цап Ю. Т. и др. Пульсации микроволнового излучения и диагностика вспышечной плазмы // Письма в Астрон. журн. — 2004. — 30, № 7. — С. 530–539.
11. Шейнер О. А., Фридман В. М. Структура микроволнового излучения с точки зрения диагностики плазмы солнечной атмосферы // Физика плазмы в солнечной системе: Сб. тез. конф., Москва, ИКИ РАН, 5–8 февраля 2008 г. — М., 2008. — С. 10.
12. Aschwanden M. I. An evaluation of coronal heating models for active region based on Yohkoh, SOHO and TRACE observations // Astrophys. J. — 2001. — 560. — P. 1035–1043.
13. Fontela J. M., Avrett E. H., Loeser R. Energy balance in the solar transition region. III. Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion // Astrophys. J. — 1993. — 406. — P. 319–345.
14. Foukal P., Hinata S. Electric fields in the solar atmosphere: a review // Solar Phys. — 1991. — 132, N 2. — P. 307–334.
15. Heywaerts J., Priest E., Rust D. M. Models of solar flares // Astrophys. J. — 1977. — 216, N 1. — P. 213–231.
16. Kryshnal A. N. Bernstein wave instability in a collisional plasma with a quasistatic electric field // J. Plasma Phys. — 1998. — 60, part 3. — P. 469–484.
17. Machado M. E., Avrett E. H., Vernazza J. E., Noyes R. W. Semiepirical models of chromospheric flare regions // Astrophys. J. — 1980. — 242, N 1. — P. 336–351.
18. Melnikov V. F., Shibasaki K., Reznikova V. E. Loop-top nonthermal microwave source in extended solar flaring loops // Astrophys. J. — 2002. — 580. — P. L185–L188.
19. Miller J. A., Cargill P. I., Emslie A. G., et al. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares // J. Geophys. Res. — 1997. — 102, N A7. — P. 14631–14659.

20. *Solanki S. K.* Small-scale solar magnetic fields: an overview // *Space Sci. Rev.* — 1993. — **63**. — P. 1–188.
21. *Vernazza J. E., Avrett E. H., Loeser R.* Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet Sun // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* — 1981. — **45**, N 1. — P. 635–725.
22. *Yukhimuk A. K., Yukhimuk V. A., Sirenko O. K., Voitenko Yu. M.* Parametric excitation of electromagnetic waves in a magnetized plasma // *J. Plasma. Phys.* — 1999. — **62**, part 1. — P. 53–64.

*Надійшла до редакції 19.07.10*

*A. N. Kryshchal, S. V. Gerasimenko, A. D. Voitsekhovska*

ON THE NATURE OF THE MICROWAVE  
SPIKE EMISSION IN LOOP STRUCTURES  
OF AN ACTIVE REGION

We investigated the stability of the first harmonics of pure electron oblique Bernstein modes which are modified by taking into account the influence of pair Coulomb collisions and

by the existence of the weak large-scale electric field in a loop. It is assumed that the main characteristics of magnetoactive plasma at the loop footpoint in the part of current circuit of the loop which corresponds to the lower chromosphere of a solar active region can be obtained from the Fontela, Avrett, and Loeser (FAL) semiempirical model for the solar atmosphere. As the main reasons of instability rise and development the following effects are considered: a) the existence of subdrifter electric field with the amplitude which adiabatically grows slow during the flare process activation; b) dissipation of energy due to pair collisions; c) direction of the perturbation propagation, which is not pure perpendicular to the loop magnetic field. Our investigation of the instability growth rate showed that the use of the FAL model instead of the models MAVN and VAL used before leads to the decrease of the instability threshold as a function of subdrifter field amplitude. Some emission in the centimetre-millimetre range can arise under the favourable conditions due to the separation of the generated wave into the kinetic Alfvén wave and ordinary electromagnetic wave.

УДК 550.388.2

**С. В. Гринченко**

Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

## ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЛАСТИ F2 И ВНЕШНЕЙ ЧАСТИ ИОНОСФЕРЫ

---

*Запропоновано алгоритм побудови профілю електронної концентрації за його характеристиками (висотою головного максимуму, значенням електронної концентрації в максимумі шару F2, верхньою і нижньою півтовщинами, значенням електронної концентрації і шкалою висот на 1000 км). Зроблено огляд виразів, які використовуються для опису висотного профілю електронної концентрації. Показано перевагу запропонованого автором алгоритму побудови профілю електронної концентрації. Проілюстровано результати розрахунків профілю при варіаціях його характеристик. Запропонований алгоритм використано для розв'язання конкретної задачі теоретичного моделювання області F2 іоносфери.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

**Понятие ионосферной модели.** Основными физическими параметрами, характеризующими состояние ионосферы, являются концентрация электронов, ионный состав, температуры электронов и ионов, скорость движения ионосферной плазмы, частоты соударений нейтральных и заряженных частиц. Все эти параметры позволяют измерять метод некогерентного рассеяния [8, 11, 12].

Для решения многих прикладных задач, в частности для задач, связанных с распространением радиоволн, используются модели, описывающие состояние ионосферы. Суть таких моделей — определение зависимости физических характеристик ионосферной плазмы (являющихся выходными параметрами моделей) от некоторой совокупности величин (входных параметров), описывающих распределение характеристик состояния ионосферы во времени и пространстве, а также ионизирующее воздействие солнечного излучения и состояние магнитного поля Земли.

Входными величинами, определяющими распределение ионосферных характеристик во

времени, являются местное время и порядковый номер текущих суток в году. Распределение ионосферных параметров в пространстве описывают географическими (или геомагнитными) координатами и высотой над уровнем земной поверхности.

Таким образом, для любого параметра ионосферы (обозначим его буквой  $p$ ), ионосферная модель определяет функциональную зависимость  $p = p(t, d, h, \varphi, \lambda; k_c, k_z)$ , где  $t$  — местное время,  $d$  — порядковый номер суток в годичной последовательности,  $h$  — высота,  $\varphi$  — широта,  $\lambda$  — долгота;  $k_c$  — индекс (или набор таковых) солнечной активности,  $k_z$  — индекс (или набор их) геомагнитной активности.

За несколько десятилетий регулярных измерений параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния, проводимых на радаре Института ионосферы, собран массив экспериментальных данных, позволяющий строить модельные зависимости характеристик ионосферы для координат радара (так называемые региональные модели) [1, 2, 5, 6, 10]. Построенные по данным радара эмпирические модели электронной концентрации, температуры ионов и электронов представлены в виде таблиц. Естественно, представляет интерес построение компьютерной версии эмпирической модели, которая мо-

жет быть адаптивной, т. е. учитывающей помимо основного статистического массива данных результаты текущих измерений.

Глобальное распределение концентрации электронов выше главного максимума F2 изучено в меньшей степени, чем в слоях, лежащих ниже. Прямые спутниковые измерения дают только одну точку высотного профиля. Измерения с помощью геофизических ракет дают результаты в непродолжительном интервале времени. Поэтому особо ценными представляются данные, получаемые на комплексах некогерентного рассеяния, дающие полный высотный профиль измерений в течение длительного времени.

**Методологические основы моделирования ионосферы.** Модели ионосферы принято делить на три категории: теоретические, эмпирические и полуэмпирические (гибридные).

Теоретическое содержание физических процессов, происходящих в ионосфере, в основном состоит из описания фотохимического баланса (ионизации нейтральных молекул, ионно-молекулярного обмена, рекомбинации ионов) и диффузии плазмы. Естественно, необходимо проводить расчёты параметров нейтральной среды, интенсивности ультрафиолетового излучения Солнца. При таком подходе приходится решать систему уравнений различного типа с некоторыми краевыми условиями. Решение системы даёт распределение параметров ионосферы, т. е. задаёт её состояние. Основные трудности на пути построения теоретических моделей связаны со сложностью (и некоторой неопределённостью) физических процессов, определяющих состояние ионосферы. Например, при теоретическом описании ионизирующего воздействия Солнца некоторым исследователям приходилось корректировать используемые зависимости интенсивности ультрафиолетового излучения от индекса  $F_{10.7}$  солнечной активности до 1.5 раз. Поэтому сложно говорить о высокой точности теоретических расчётов ионосферных параметров. Теоретические расчёты имеют практическое применение для установления взаимосвязи параметров ионосферы [3], подтверждения экспериментальных результатов измерений ионосферных параметров [4].

Возможен принципиально иной подход к моделированию ионосферы. При наличии обширной и разнообразной информации об ионосферных параметрах, получаемой на радарх некогерентного рассеяния, станциях вертикального зондирования, в результате спутниковых и ракетных измерений, проводится статистический анализ экспериментального материала. В результате устанавливается связь между величинами, характеризующими состояние ионосферы, и параметрами, определяющими изменения этих величин, т. е. находится эмпирическое распределение  $p = p(t, d, h, \varphi, \lambda; k_e, k_3)$  для каждого физического параметра  $p$  ионосферы. Построенная таким способом модель называется эмпирической.

В полуэмпирических (гибридных) моделях комбинируются методы теоретического и эмпирического моделирования. Например, в качестве реперной точки высотного профиля электронной концентрации берётся точка максимума профиля, задаваемая какой-либо эмпирической моделью максимума слоя F2, а остальная часть профиля моделируется теоретически.

**Обзор формул, используемых для описания высотного профиля электронной концентрации.** На рис. 1 изображены типичные профили электронной концентрации для магнитоспокойных условий равноденствия в дневное и ночное время.

В достаточно малых интервалах высот, исключая окрестности экстремумов, любой учас-

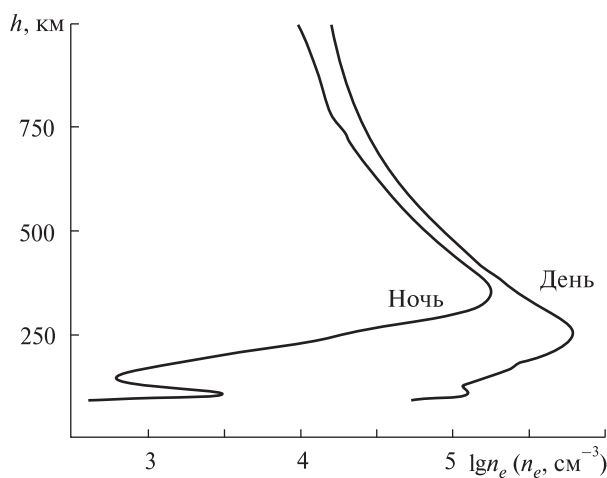


Рис. 1. Структура высотных профилей электронной концентрации

ток профиля электронной концентрации можно аппроксимировать линейным участком вида [7]:  $n_e - n_{e0} = \alpha(h - h_0)$ , где  $\alpha$  — градиент электронной концентрации,  $n_{e0}$  — концентрация электронов на высоте  $h_0$ . На практике линейное приближение может оказаться полезным, поскольку любой реальный профиль  $n_e(h)$  можно разбить на большое число линейных частей.

Для аппроксимации электронной концентрации на больших высотах используется уравнение экспоненциального слоя [7]:

$$n_e(h) = n_e(h_0) e^{-\frac{h-h_0}{H}}, \text{ т. е. } \ln n_e(h) = \ln n_e(h_0) - \frac{h-h_0}{H},$$

где  $H$  — шкала высот. Это уравнение можно использовать для описания внешней части профиля.

При описании профиля около максимума электронной концентрации часто используют уравнение параболического слоя [7]:

$$n_e(h) = n_{e\max} \left[ 1 - \left( \frac{h-h_{\max}}{H} \right)^2 \right],$$

где  $H$  — полутолщина параболы, т. е. половина расстояния между высотами, на которых электронная концентрация равна нулю;  $h_{\max}$  — высота максимума слоя F2;  $n_{e\max} = n_e(h_{\max})$ .

В работе [15] диапазон высот внешней ионосферы разбивается на два интервала:  $2h_{\max} - h_1 \leq h \leq h_1$  и  $h > h_1$ . Высота  $h_1$  определяется равенством  $n_e(h_1) = 0.9 \cdot n_{e\max}$ . На первом участке профиль описывается параболой  $n_e(h) = -Ah(h-B) = Ah(B-h)$ . Так как  $n_e(h_{\max}) = Ah_{\max}(B-h_{\max}) = n_{e\max}$ , то  $A = \frac{n_{e\max}}{h_{\max}(B-h_{\max})}$ . Поэтому аналитическая формула для аппроксимации профиля  $n_e(h)$  на рассматриваемом высотном интервале принимает вид  $n_e(h) = \frac{n_{e\max} h(B-h)}{h_{\max}(B-h_{\max})}$ . На втором участке профиль описывается экспоненциальной зависимостью  $n_e(h) = 0.9 n_{e\max} e^{-p(h-h_1)}$ .

Широко известна модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere), построенная на основании обобщения эмпирических данных [13]. Модель реализует вычисление четырёх главных характеристик ионосферы: электронной концентрации, температуры ионов, температуры электронов, ионного состава. Для анали-

тического описания профиля  $n_e(h)$  диапазон высот ( $h \leq 1000$  км) разделён на шесть частей, в каждой из которых используются свои аналитические зависимости. Первая версия программы модели IRI-78 была реализована на языке MS Fortran (работающая в операционной системе DOS). Практически каждый год выходят новые модификации программы. Последние версии программы выполнены в Visual Fortran. Хотя в опубликованных работах не приводятся аналитические зависимости  $n_e(h)$ , из анализа фортрановского кода видно, что при описании профиля электронной концентрации в районе области F2 и выше используется зависимость вида  $\lg n_e(h) = -Kh + L - A \lg(B + e^{Ch}) - D \lg(E + e^{Fh})$ , где  $K, L, A, B, C, D, E, F$  — некоторые числовые коэффициенты.

В Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН) Российской академии наук создана модель трёхмерного распределения электронной концентрации внешней ионосферы по данным зондирования со спутников [14]. Для описания профиля электронной концентрации использована формула:

$$n_e(h) = 4n_{e\max} \frac{e^{-\frac{h-h_{\max}}{B}}}{\left(1 + e^{-\frac{h-h_{\max}}{B}}\right)^2},$$

где  $B = B_0 + k(h - h_{\max})$ . Видно, что  $n_e(h_{\max}) = n_{e\max}$ , при этом  $n_e(h \pm B) = 4n_{e\max} \frac{e}{(1+e)^2} \approx 0.7864 \cdot n_{e\max}$ .

Величину  $B$  называют параметром толщины слоя F2. Однако это представляется некорректным, так как  $B$  — функция высоты, а не постоянная величина, характеризующая толщину конкретного высотного профиля  $n_e(h)$ . Эта формула учитывает изменение шкалы высот профиля электронной концентрации с высотой. Заметим, что представленная формула имеет четыре параметра:  $h_{\max}$ ,  $n_{e\max}$ ,  $B_0$  и  $k$ . Параметры  $h_{\max}$  и  $n_{e\max}$  задают точку главного максимума, а параметры  $B_0$  и  $k$  определяют характер высотного профиля  $n_e(h)$  выше максимума. Использование только двух величин для характеристики профиля электронной концентрации в интервале высот от 250 до



1000 км представляется недостаточным для корректного описания профиля в интервале около 750 км.

### ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ЭМПИРИЧЕСКОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Геометрические параметры профиля электронной концентрации.** Для использования в эмпирическом моделировании электронной концентрации желательно иметь в распоряжении формулу  $n_e(h)$ , имеющую в качестве параметров величины, которые наглядно характеризовали профиль. Такими величинами в приведенных выше формулах являются  $n_{e\max}$  и  $h_{\max}$ . Изменение формы профиля при вариации остальных числовых коэффициентов без вычислений непредсказуемо. Поэтому была поставлена задача создания алгоритма построения высотного профиля электронной концентрации по геометрическим параметрам профиля, которые визуально легко снимались бы с графического изображения профиля. К геометрическим параметрам относятся, в частности, величины  $n_{e\max}$  и  $h_{\max}$ .

Для описания профиля  $\lg n_e(h)$  будем использовать следующие параметры:  $q = \lg n_{e\max}$  — значение логарифма электронной концентрации в максимуме слоя F2;  $p = h_{\max}$  — высота максимума слоя F2;  $t_u$  — верхняя полутолщина слоя F2, под которой будем понимать изменение высоты вверх от  $h_{\max}$ , при котором концентрация электронов уменьшается в два раза;  $t_l$  — нижняя полутолщина;  $g = \lg n_e(h = 1000 \text{ км})$  — значение логарифма электронной концентрации на высоте 1000 км;  $s$  — величина, равная перепаду высоты, при котором концентрация электронов при экспоненциальном распределении, характерном для высоты 1000 км, уменьшается в десять раз (тогда величина  $-1/s$  есть угловой коэффициент касательной прямой, проведенной к кривой профиля  $\lg n_e(h)$  в точке (1000 км;  $g$ )).

Величина  $s$  — это по существу «десятичная» шкала высот  $H_{10}$ , которая характеризует функцию  $n_e = n_{e0} \cdot 10^{-h/H_{10}}$  (более привычная «натуральная» шкала высот  $H$  характеризует зависимость  $n_e = n_{e0} \cdot e^{-h/H}$ ).

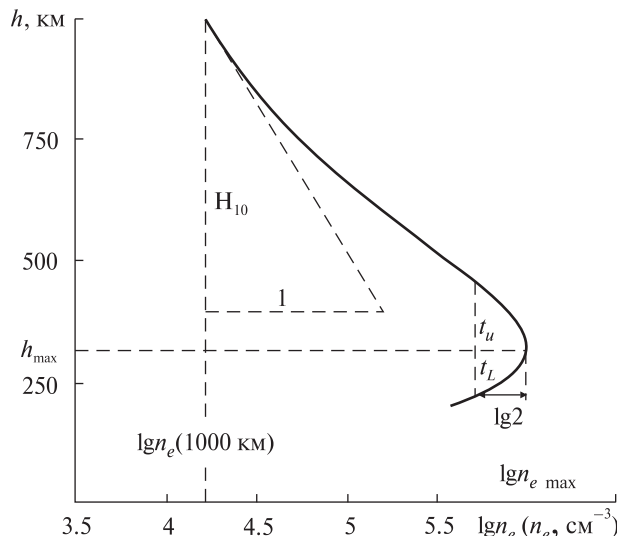


Рис. 2. Геометрические параметры профиля электронной концентрации

Таким образом, для описания профиля электронной концентрации будем использовать шесть параметров:  $q = \lg n_{e\max}$ ,  $p = h_{\max}$ ,  $t_u$ ,  $t_l$ ,  $g = \lg n_e(1000 \text{ км})$  и  $H_{10}$ . Рис. 2 иллюстрирует перечисленные параметры.

**Построение профиля электронной концентрации по его геометрическим параметрам.** Для построения профиля электронной концентрации при  $h \geq h_{\max}$  используем формулу вида  $\lg n_e(h) = (Ah + B)e^{-Dh} - Ch + E$ , где  $A, B, C, D, E$  — некоторые коэффициенты. Для вычисления перечисленных коэффициентов требуется решить систему уравнений

$$\begin{cases} \lg n_e(p) = q, \\ \frac{d}{dh} \lg n_e(h) \Big|_{h=p} = 0, \\ \lg n_e(p + t_u) = q - \lg 2, \\ \lg n_e(h_1) = g, \\ \frac{d}{dh} \lg n_e(h) \Big|_{h=h_1} = -\frac{1}{s}, \end{cases}$$

где  $h_1 = 1000 \text{ км}$ .

Учитывая, что  $\frac{d}{dh} \lg n_e(h) = (A - DAh - DB) \times e^{-Dh} - C$ , приведем систему к виду

$$\begin{cases} (Ap + B)e^{-Dp} - Cp + E = q, \\ (A - DAp - DB)e^{-Dp} - C = 0, \\ (Ar + B)e^{-Dr} - Cr + E = q - \lg 2, \\ (Ah_1 + B)e^{-Dh_1} - Ch_1 + E = g, \\ (A - DAh_1 - DB)e^{-Dh_1} - C = -\frac{1}{s}, \end{cases}$$

где  $r = p + t_u$ .

Полученную систему пяти уравнений с пятью неизвестными можно решить методом Ньютона для векторных уравнений  $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = 0$ , в котором последовательные приближения решения находятся из уравнения

$$\frac{d\mathbf{F}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k} \cdot (\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k) = -\mathbf{F}(\mathbf{x}_k).$$

Здесь  $\mathbf{x} = (A, B, D, C, E)^T$ ,

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} (Ap + B)e^{-Dp} - Cp + E - q \\ (A - DAp - DB)e^{-Dp} - C \\ (Ar + B)e^{-Dr} - Cr + E - q + \lg 2 \\ (Ah_1 + B)e^{-Dh_1} - Ch_1 + E - g \\ (A - DAh_1 - DB)e^{-Dh_1} - C + \frac{1}{s} \end{pmatrix},$$

$$\frac{d\mathbf{F}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} pe^{-Dp} & e^{-Dp} & -p(Ap + B)e^{-Dp} & -p & 1 \\ (1 - Dp)e^{Dp} & -De^{-Dp} & (-2Ap - B + DAp^2 + DBp)e^{-Dp} & -1 & 0 \\ re^{-Dr} & e^{-Dr} & -r(Ar + B)e^{-Dr} & -r & 1 \\ h_1e^{-Dh_1} & e^{-Dh_1} & -h_1(Ah_1 + B)e^{-Dh_1} & -h_1 & 1 \\ (1 - Dh_1)e^{Dh_1} & -De^{-Dh_1} & (-2Ah_1 - B + DAh_1^2 + DBh_1)e^{-Dh_1} & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Нулевое приближение можно найти из «упрощённой» системы уравнений

$$\begin{cases} (Ap + B)e^{-Dp} - Cp + E = q, \\ (A - DAp - DB)e^{-Dp} - C = 0, \\ (Ar + B)e^{-Dr} - Cr + E = q - \lg 2, \\ -Ch_1 + E = g, \\ -C = -\frac{1}{s}. \end{cases}$$

Геометрический смысл упрощения уравнений для нахождения нулевого приближения решения

исходной системы уравнений состоит в том, что на высоте  $h_1 = 1000$  км  $\lg n_e(h) \approx -Ch_1 + E$ . Последнюю систему уравнений можно свести к одному уравнению с одним неизвестным.

Профиль электронной концентрации при  $h \leq h_{\max}$  зададим с помощью параболы  $\lg n_e(h) = -Ah \times (h - 2B) + C$ . Коэффициенты  $A, B, C$  находятся из системы уравнений

$$\begin{cases} \lg n_e(p) = q, \\ \frac{d}{dh} \lg n_e(h) \Big|_{h=p} = 0, \\ \lg n_e(r) = q - \lg 2, \end{cases}$$

где  $r = p - t_r$ .

Рис. 3, 4 иллюстрируют построение профиля электронной концентрации.

На рис. 3, а приведены профили  $n_e(h)$  при вариации параметра  $q = \lg n_{e\max}$ :  $q = 5.75, 6.0, 6.25$  для фиксированных значений  $p = h_{\max} = 320$  км,  $t_u = 140$  км,  $t_l = 100$  км,  $g = \lg n_e(1000 \text{ км}) = 4.2$  и  $H_{10} = 600$  км.

На рис. 3, б приведены профили  $n_e(h)$  при изменении параметра  $g = \lg n_e(1000 \text{ км})$ :  $g = 4.0, 4.2, 4.4$  для постоянных  $q = 6.0, p = 320$  км,  $t_u = 140$  км,  $t_l = 100$  км,  $H_{10} = 600$  км.

На рис. 4, а представлена серия профилей электронной концентрации при изменении верхней полутолщины:  $t_u = 120, 140, 160$  км. Профили  $n_e(h)$ , изображённые на рис. 4, б, соответствующие значениям  $H_{10} = 400, 600, 900$  км.

**Использование сглаженных экспериментальных профилей электронной концентрации для теоретического расчёта скорости движения плазмы.**

Приведенный алгоритм построения высотного профиля электронной концентрации удобно использовать для сглаживания экспериментальных профилей  $n_e(h)$  при проведении расчётов, когда электронная концентрация используется в качестве входных данных. Для теоретического расчёта необходим гладкий профиль  $n_e(h)$  с непрерывными производными по высоте и имеющий заданные параметры слоя F2 ( $\lg n_{e\max}, h_{\max}$  и др.). Высотный профиль  $n_e(h)$ , построенный рассмотренным способом, удовлетворяет этим требованиям.

Актуальной задачей является теоретический расчёт скорости переноса плазмы по данным

измерений методом некогерентного рассеяния электронной концентрации [3]. Сравнение теоретического профиля вертикальной составляющей скорости движения плазмы  $v_z(h)$  и непосредственно измеренного методом некогерентного рассеяния позволило бы сделать вывод о согласованности измеряемых параметров ( $n_e(h)$  и  $v_z(h)$ ) в рамках аэрономической теории области F2. Это подтверждало бы правильность измерения указанных ионосферных параметров методом некогерентного рассеяния.

Анализ уравнения непрерывности  $\frac{\partial n_i}{\partial t} = q - L - \frac{\partial(n_i v_z)}{\partial h}$  пространственно-временного распределения ионов  $O^+$  позволяет по известным температурам ионов  $T_i$  и электронов  $T_e$  и электронной концентрации  $n_e(h)$  вычислять скорость движения плазмы  $v_z(h)$ . Концентрация  $n_i$  ионов  $O^+$  вычисляется из электронной концентрации  $n_e$ , исходя из баланса ионно-молекулярных реакций области F2 [9]. Скорость ионизации  $q$  и рекомбинации  $L$  определяются из соответствующих модельных представлений химических реакций, спектра солнечного ультрафиолета, параметров нейтральной атмосферы. В околополуденное время, когда  $\frac{\partial n_i}{\partial t} = 0$ , решение уравнения

непрерывности  $q - L - \frac{d(n_i v_z)}{dh} = 0$  задаётся формулой

$$v_z(h) = \frac{1}{n_i(h)} \left( \Phi_a - \int_h^h (q - L) dh \right), \text{ где } \Phi_a =$$

$= 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  — поток ионов  $O^+$  на верхней границе ( $h_a = 600 \text{ км}$ ) рассматриваемого интервала высот.

Для вычисления высотного профиля скорости движения плазмы воспользуемся экспериментальными данными  $T_i(h)$ ,  $T_e(h)$ ,  $n_e(h)$  для местного времени LT = 12 ч 21 сентября 2006 г. [6]. На рис. 5 представлен сглаженный профиль электронной концентрации (рис. 5, а), характеризующийся следующими значениями геометрических параметров:  $q = \lg n_{e\text{max}} = 5.72$  ( $n_e, \text{см}^{-3}$ ),  $p = h_{\text{max}} = 220 \text{ км}$ ,  $t_u = 83 \text{ км}$ ,  $t_l = 47 \text{ км}$ ,  $g = \lg n_e(600 \text{ км}) = 4.6$  и  $H_{10}(600 \text{ км}) = 530 \text{ км}$  и теоретически вычисленный по указанным эксперимен-

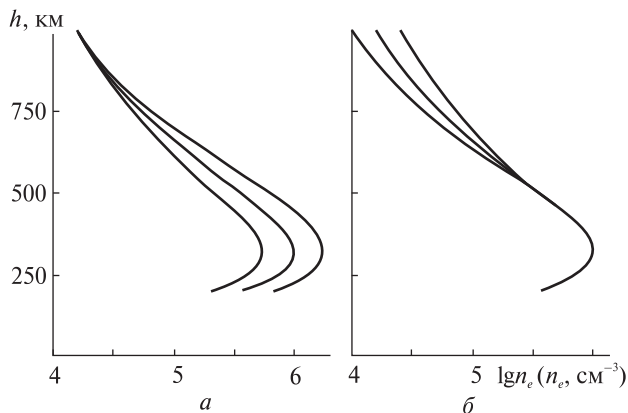


Рис. 3. Построение профилей электронной концентрации при вариации параметров  $q = \lg n_{e\text{max}}$  и  $g = \lg n_e(1000 \text{ км})$

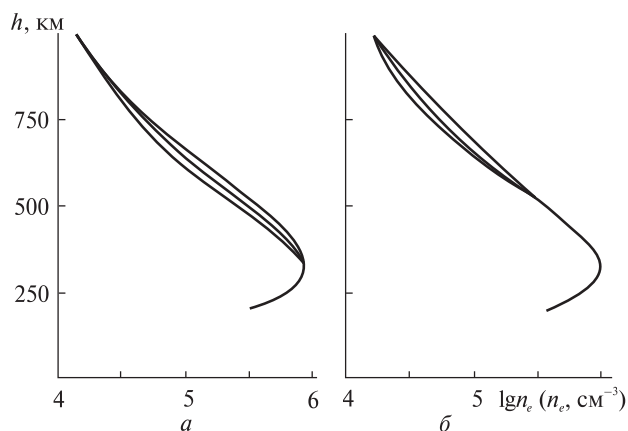


Рис. 4. Построение профилей электронной концентрации при вариации параметров  $t_u$  и  $H_{10}$

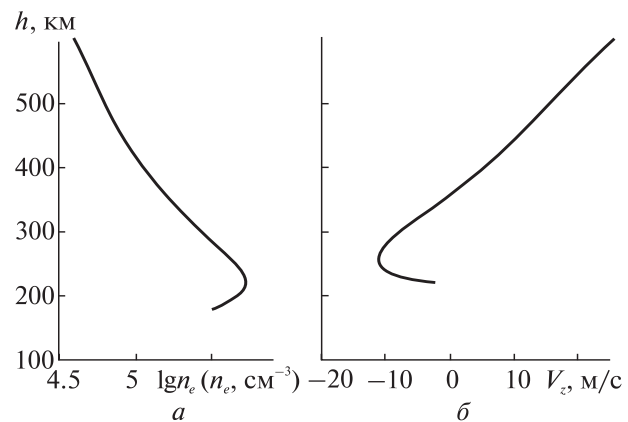


Рис. 5. Экспериментальный профиль электронной концентрации и соответствующий ему теоретически вычисленный профиль скорости движения плазмы

тальным данным высотный профиль вертикальной составляющей скорости движения плазмы (рис. 5, б).

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенный алгоритм построения высотного профиля электронной концентрации удобно использовать при создании компьютерной версии региональной модели по экспериментальным данным радара некогерентного рассеяния. Представляется возможным предварительно произвести моделирование геометрических параметров профиля, и уже по смоделированным параметрам восстановить профиль концентрации.

Все упомянутые геометрические параметры профиля имеют физический смысл, в отличие от числовых коэффициентов, входящих в математические выражения для  $n_e(h)$  в других исследованиях.

Даже отдельные подпрограммы моделирования электронной концентрации максимума слоя F2, высоты максимума, полутолщин, значения электронной концентрации на высоте 1000 км, шкалы высот электронной концентрации представляли бы теоретический и практический интерес. Кстати, привязка к высоте 1000 км при построении профиля электронной концентрации вовсе необязательна.

При таком подходе к построению модельного профиля электронной концентрации возможна корректировка модели в сторону изменения того или иного геометрического параметра профиля.

Описанный алгоритм построения профиля электронной концентрации можно использовать для сглаживания экспериментального профиля  $n_e(h)$  при теоретических расчётах ионосферных процессов, при теоретическом моделировании различных радиофизических процессов (например, при расчёте влияния изменения формы профиля  $n_e(h)$  на вид ионограмм вертикального зондирования).

Планируется создание алгоритма построения профиля электронной концентрации по геометрическим параметрам и для высот областей E и F1.

1. Григоренко Е. И. Об уточнении эмпирической модели среднеширотной ионосферы, полученной в Харьковском политехническом институте // *Ионосфера*. — 1991. — Вып. 1. — С. 16—24.
2. Григоренко Е. И., Боговский В. К., Пуляев В. А. и др. Вариации параметров ионосферы в периоды высокой и низкой солнечной активности // *Геоматизм и аэрномия*. — 2001. — **41**, № 2. — С. 199—203.
3. Гринченко С. В. Связь скорости переноса плазмы и электронной концентрации области F2 околорассеянной ионосферы // *Геоматизм и аэрномия*. — 1992. — **32**, № 4. — С. 136—138.
4. Гринченко С. В., Емельянов Л. Я., Лысенко В. Н. Сезонные вариации скорости переноса плазмы околорассеянной ионосферы по данным некогерентного рассеяния // *Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. науч. тр. ХГПУ. Харьк. гос. политехн. ун-т*. — 1999. — Вып. 7, ч. 3. — С. 337—339.
5. Дзюбанов Д. А. Вариации параметров F-области ионосферы средних широт по результатам измерения методом некогерентного рассеяния: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / АН СССР. Сиб. отделение. Сиб. ин-т земного магнетизма и распространения радиоволн. — Харьков, 1987. — 18 с.
6. Дзюбанов Д. А., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности // *Космічна наука і технологія*. — 2008. — **14**, № 1. — С. 44—56.
7. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере: Пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 504 с.
8. Емельянов Л. Я., Григоренко Е. И., Скляров И. Б. Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F ионосферы на Харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Радиотехника*. — 2004. — Вып. 136. — С. 102—108.
9. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 190 с.
10. Ляшенко М. В. Регіональна модель іоносфери за даними Харківського радара некогерентного розсіяння: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук / НАН України. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова. — Харків: Стиль-издат, 2008. — 20 с.
11. Таран В. И. Наблюдения ионосферы с помощью метода некогерентного рассеяния. Сообщение 1. Основные предпосылки и экспериментальные результаты // *Вест. Харьков. политехн. ин-та: Исследования*

- ние ионосферы методом некогерентного рассеяния. — 1979. — № 155, вып. 1. — С. 3—11.
12. *Эванс. Дж.* Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // Тр. ин-та инженеров электротехники и радиоэлектроники. — 1969. — 57, № 4. — С. 139—175.
  13. *Bilitza D.* International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci. — 2001. — 36, N 9. — P. 261—275.
  14. *Depuev V. H., Pulinets S. A.* A global empirical model of the ionospheric topside electron density // Adv. Space Res. — 2004. — 34, N 9. — P. 2016—2020.
  15. *Serafimov K.B.* Methods for determining a standard ionospheric topside profile by single measurements // Докл. Болгарской акад. наук. — 1976. — 29, № 29. — С. 1613—1615.

*Надійшла до редакції 17.05.10*

*S. V. Grinchenko*

#### CONSTRUCTION OF ELECTRON DENSITY PROFILE FROM ITS GEOMETRICAL PARAMETERS IN SIMULATING THE F2-REGION AND OUTER IONOSPHERE

We propose an algorithm for the construction of electron density profile with the use of its characteristics, namely, the main maximum height, the value of electron density in the layer F2 maximum, upper and lower semi-thickness, the value of electron density and scale of heights at 1000 km. The existing expressions for the description of altitudinal electron density profile are reviewed. Some advantages of our algorithm for the construction of electron density profile are shown. Our results of profile numerical calculations for some variations of profile characteristics are given. Our algorithm is used to solve the concrete problem of theoretical simulation of the ionosphere F2-region.

УДК 523.98+550.38

**М. І. Стоділка**

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка, Львів

## ПРОГНОЗ СЕРЕДНЬОДОБОВИХ ГЕОМАГНІТНИХ ЗБУРЕНЬ

---

*Побудовано та протестовано модель стійкого прогнозу геомагнітних збурень, окреслено шляхи покращення якості прогнозу. Коефіцієнт кореляції між середньодобовими спостережуваними та спрогнозованими значеннями перевищив 0.9. Розроблену методіку можна використовувати для прогнозу середньодобового геомагнітного та планетарного індексів як у періоди помірної, так і надвисокої активності Сонця.*

---

### ВСТУП

Однією з важливих прикладних проблем сонячно-земної фізики є визначення електромагнітної обстановки в космічному просторі (космічна погода) залежно від параметрів сонячного вітру. Основна проблема зв'язку між сонячними і земними явищами — це виявлення залежності геофізичних явищ від проявів сонячної активності з подальшим передбаченням земних збурень на основі спостережень Сонця.

Космічні шторми, викликані сонячною активністю, зумовлюють потужні геомагнітні бурі. Під час таких бур виникають сильні флуктуації горизонтальної складової магнітного поля Землі, для опису яких використовується індекс  $D_{st}$  (disturbance storm time).

Зв'язки між викидами корональних мас, міжпланетною плазмою і геомагнітними штормами вивчались у роботах [7–9, 14, 21].

Дослідження проблем сонячно-земних зв'язків поряд із теоретичним аспектом має ще й прикладне значення — використання наявної інформації та бази даних для прогнозу космічної погоди. Передбачення космічної погоди, тобто прогнозування явищ на Сонці та Землі, є водночас однією з головних задач сучасних космічних досліджень. В основі таких прогнозів лежать здебільшого емпіричні правила і закономірності.

В задачах прогнозу космічної погоди використовують різні підходи [10, 15].

1. Морфологічний аналіз. Він має низьку ефективність прогнозу, до того ж точність прогнозу важко оцінити.

2. Визначення довгоперіодичних збурень сонячного вітру [5, 6]. Завчасність такого прогнозу становить декілька днів, метод дає поганий прогноз потужних геомагнітних штормів.

3. Емпіричні моделі [4, 13, 16, 18] — дають короткий час прогнозу, точність прогнозу посередня. В цих моделях поряд із параметрами, які мають фізичний зміст, вводяться параметри підгонки, що дозволяють проводити налаштування алгоритму прогнозу. Як правило, в закономірностях процесів, які вивчаються, відбуваються певні зміни, а апіорна інформація про характер таких змін здебільшого відсутня. В таких випадках використовуються адаптивні моделі, які здатні враховувати еволюцію динамічних характеристик системи. Для побудови емпіричних моделей часто використовують кореляційний аналіз. Зокрема, в роботах [17, 19] були розроблені відповідні емпіричні моделі для прогнозу індексів  $D_{st}$  на основі вимірювань міжпланетного магнітного поля і параметрів плазми сонячного вітру.

4. Глобальні МНД-симуляції (динамічні моделі) — числове моделювання фізичних процесів в системі Сонце — міжпланетне середовище — Земля. Завчасність прогнозу — декілька днів, але точність прогнозу значно змінюється, оскільки є проблема коректного опису процесів у плазмі.

5. Багатовимірний аналіз часових рядів — завчасність прогнозу до декількох годин, а точність прогнозу не гірша від 80 %. Статистичний аналіз

часових рядів параметрів сонячної активності та геомагнітних індексів залишається ефективним методом одержання інформації про зв'язок між ними. Популярним методом прогнозування часових рядів є звичайне експоненціальне згладжування; цей підхід виправдовує себе при дослідженні процесів із постійним чи лінійним трендом, рядів із сезонною складовою. Експоненціальне згладжування дуже часто використовують в адаптивних моделях прогнозування та при аналізі різних процесів.

Однією із різновидностей аналізу часових рядів є використання штучних нейронних сіток та кореляційний аналіз. В роботах [12, 20] на основі штучних нейронних сіток були розроблені відповідні моделі для прогнозу індексів  $D_{st}$ . Основним недоліком згаданих методів прогнозу є використання параметрів плазми сонячного вітру — адже ж відомо, що під час сильних сонячних спалахів відповідні вимірювальні прилади на космічних апаратах «зашкалюють», що унеможливує сам прогноз. В роботі [14] запропоновано алгоритм прогнозу  $D_{st}$ -індексів на базі нейронних сіток із використанням даних тільки про міжпланетне магнітне поле; такий підхід є ефективним за умов сильно підвищеної сонячної активності.

Регресійне моделювання — новий підхід у аналізі багатовимірних часових рядів, розроблений О. С. Парновським [15]; завчасність прогнозу — до шести годин, точність прогнозу 90 %. Значення параметру, який прогнозується, шукають у вигляді лінійної комбінації регресорів, які представляють вхідні величини, функції від вхідних величин та їхні комбінації.

Як бачимо, при прогнозі геомагнітних збурень найчастіше використовується індекс  $D_{st}$ . Справа не тільки у інформативності цього індексу, а й у тому, що він добре надається прогнозу. Гірше прогнозується геомагнітний індекс  $AE$ , який слугує оцінкою повного горизонтального струму. Його перша складова зумовлена сонячним вітром, а друга пов'язана з процесом вивільнення енергії, накопиченої в шлейфі геомагнітного поля. В роботі [3] показано, що відносно легко прогнозувати першу складову, тоді як другу практично неможливо відтворити за параметрами тільки сонячного вітру.

Таким чином, більшість підходів дає хороший прогноз геомагнітних збурень із завчасністю до кількох годин. Використовуючи підхід, аналогічний підходу [15], ми спробуємо на основі середньодобових показників сонячної активності та геомагнітних збурень побудувати модель стійкого прогнозу геомагнітних збурень із завчасністю, не меншою від однієї доби, провести відповідне тестування моделі прогнозу, окреслити шляхи покращення якості прогнозу.

## СПОСТЕРЕЖНІ ДАНІ

Іоносферні та геомагнітні збурення можуть бути спричинені як сплесками випромінювання Сонця, так і корпускулярними потоками. Перші дають практично миттєві ефекти на Землі, тоді як корпускулярні потоки досягають Землі через деякий проміжок часу і зумовлюють тривалі магнітні бурі та полярні саява. Тому для модельних розрахунків будемо використовувати такі доступні нам часові ряди даних за 23-й цикл сонячної активності [[www.swpc.noaa.gov/ftpdir/warehouse](http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/warehouse), [www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/)]:

- радіопотік на довжині хвилі 10.7 см,
- числа Вольфа,
- площі сонячних плям,
- рентгенівський потік (фон + спалах),
- потік протонів з енергією понад 1 MeV (GOES-8),
- потік електронів з енергією понад 0.6 MeV (GOES-8),
- значення міжпланетного магнітного поля (середнє значення та середнє квадратичне відхилення) в точці Лагранжа  $L1$  (прилад MAG на космічному апараті ACE).

Для опису геомагнітних збурень ми брали часові ряди таких індексів ([www.swpc.noaa.gov/ftpdir/warehouse](http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/warehouse), <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae>):

- планетарний  $A_p$ -індекс (індекс  $A_p$  є середнім значенням індекса  $a_p$  за добу; він характеризує стан іоносфери та відображає рівень активності магнітного поля Землі — вищі значення індексу відповідають сильнішому поглинанню радіосигналу).
- середньодобовий геомагнітний  $D_{st}$ -індекс (вираховується на основі щогодинних вимірювань чотирьох наземних магнітометричних станцій на низьких та середніх широтах).

Використано часові ряди з 1 січня 1996 р. по 31 грудня 2008 р.; ряд значень міжпланетного магнітного поля з 2 вересня 1997 р.

### ЕМПІРИЧНА МОДЕЛЬ

В нашій моделі будемо використовувати тільки регресори, які відповідають фізичним параметрам. Вважаємо, що збурення певного геомагнітного індексу, для якого робиться прогноз, на даний момент часу (добу) визначається параметрами сонячної активності та значеннями цього індексу за попередні моменти часу (середньодобові значення). Надалі будемо використовувати центровані та безрозмірні (нормовані на середнє квадратичне відхилення) фізичні параметри  $x$ , тоді рівняння регресії прогностичної моделі матиме вигляд

$$x_k(i + \tau) = \sum_{n=1}^N c_n x_1(i - n + 1) + \sum_{n=1}^N c_{n+N} x_2(i - n + 1) + \dots + \sum_{n=1}^N c_{n+(K-1)N} x_K(i - n + 1),$$

$$i = N, I - \tau - N + 1,$$

де  $\tau$  — період прогнозу (проміжок часу, на який розробляється прогноз),  $K$  — число параметрів,  $N$  — період передісторії (проміжок часу, за який використовують інформацію для розробки прогнозу),  $I$  — довжина ряду значень фізичних параметрів.  $K$ -й параметр відповідає за відповідний геомагнітний індекс. В роботі [14] запропоновано поряд з регресорами  $x$  використовувати степеневі функції від них. У випадку авторегресії коефіцієнти  $c_n$  повинні задовільняти умову (при наявності постійних регресорів шукане рівняння повинно дати те саме значення):

$$\sum_{n=1}^N c_n = 1.$$

Записані рівняння дозволяють при відомих значеннях параметрів  $x$  підібрати такі невідомі коефіцієнти  $c_n$ , які дають найменшу похибку прогнозу. Отриману систему рівнянь запишемо у матричному представленні:

$$y = Xc,$$

де  $y$  — відомі значення геомагнітного індекса, за якими підбираються коефіцієнти прогностичної

моделі із заданою завчасністю. Система має  $I - \tau - N + 1$  рівняння з  $KN$  невідомими. Оскільки, як правило,  $I - \tau - N + 1 > KN$ , то систему рівнянь будемо розв'язувати методом нев'язки — розв'язок шукаємо як елемент лінійного простору, що мінімізує квадратичну форму  $\Phi$ :

$$\Phi(c) = (Xc - y)^T (Xc - y) + \alpha \cdot c^T c.$$

Перший доданок описує нев'язку системи рівнянь, другий є стабілізатором Тихонова [1], який задає певні обмеження на шуканий розв'язок,  $\alpha$  — параметр регуляризації. Взавши похідну від  $\Phi$  по  $c$  і прирівнявши її до нуля, отримуємо

$$c = (X^T \cdot X + \alpha)^{-1} \cdot X^T \cdot y.$$

Отримані коефіцієнти  $c_n$  визначають прогностичну модель із завчасністю  $\tau$ , не меншою за одну добу; зазначимо, що значення коефіцієнтів прогностичної моделі залежать від завчасності прогнозу. Введення стабілізатора  $\alpha \cdot c^T c$  обмежує варіації коефіцієнтів  $c$ , що часто забезпечує додаткову стійкість прогнозу. Параметр регуляризації  $\alpha$  визначається на тестовій вибірці.

Отримавши таким чином коефіцієнти моделі, ми можемо робити прогноз на  $\tau$  діб наперед відносно поточних (за останню добу) та попередніх значень регресорів. Звичайно, ми мусимо вважати, що коефіцієнти моделі не будуть при цьому суттєво змінюватись.

### ТЕСТУВАННЯ

Є два підходи до тестування прогностичних можливостей моделей: прогнозування рядів за минулі проміжки часу та звичайна дослідна експлуатація. Ми обмежимося першим підходом — модель будемо не по всій наявній вибірці, а на так званій навчальній вибірці, з якої вилучаються декілька останніх точок (тестова вибірка). Модель «не знає» про наявність цих останніх даних. Виходячи з моделі, ми робили прогноз на відповідні інтервали часу, на які припадає тестова вибірка, і на основі різниці між фактичними та спрогнозованими значеннями отримували оцінку прогностичних можливостей нашої моделі. За період передісторії  $N$  ми брали такі його значення, для яких похибка прогнозу близька до найменшого значення. Крім цього, при зменшенні довжини ряду значень вхідних параметрів



рів, по яких проводиться “навчання” алгоритму, похибка прогнозу має тенденцію до збільшення. В нашому випадку: період передісторії  $N \sim 10 \dots 40$ , довжина ряду значень фізичних параметрів  $I \sim 4000$ , число параметрів  $K \approx 5$ .

Результати, отримані за допомогою наявної моделі, можуть бути представлені у вигляді точкового, або ж інтервального прогнозу. Точковий прогноз — це одне значення відповідного параметра на певний момент часу. При цьому під похибкою прогнозу розуміють міру відхилення прогнозу від справжнього значення відповідного параметра, у більшості випадків — це залишкове середнє квадратичне відхилення  $rms$ , хоча для порівняння різних методів зручніше користуватись критеріями якості прогнозу у відносних одиницях: коефіцієнт кореляції  $r$  між спрогнозованими та істинними значеннями та ефективність передбачення  $pe = 1 - (rms)^2/\sigma^2$ . Інтервальный прогноз задає верхню і нижню границю прогнозу (довірчий інтервал) для певного моменту часу та відповідну довірку ймовірність попадання в цей інтервал. Отже, в цьому випадку точність прогнозу задається оцінкою довірного інтервалу прогнозу для заданої ймовірності його справджування, а достовірність прогнозу — оцінкою ймовірності здійснення прогнозу для заданого довірного інтервалу.

В нашому дослідженні ми обмежимося точковим прогнозом.

## ФІЛЬТРАЦІЯ ВХІДНИХ ДАНИХ І ЯКІСТЬ ПРОГНОЗУ

У часових рядах вхідних фізичних параметрів наявна квазідобова складова, яка погано відтворюється в рамках нашої моделі; її ми надалі будемо називати шумовою. Шумова складова зумовлена як самою природою даних: нерегулярність, просторова неоднорідність (індекс вираховується за даними невеликого числа наземних магнітометричних станцій), так і методикою їхнього отримання: інструментальною похибкою (нею можна знехтувати), часовим усередненням (середньодобові значення отримують шляхом усереднення вимірювань на менших часових інтервалах, при цьому варіації на дрібних

часових масштабах подавлюються, а квазідобова шумова складова залишається) [11]. Такі шуми можна частково врахувати, наприклад ввівши в модель автокореляційні залишки. Згадані шуми мають вагомий вплив на результати прогнозу, коли мова йде про його високу якість. А тому вхідні дані (часові ряди середньодобових значень) були пропущені через відповідні низькочастотні фільтри Ланцоша [2], які подавлювали високочастотні шуми. Як прогнозанти ми брали часові ряди таких фізичних параметрів: радіопотік на довжині хвилі 10.7 см, числа Вольфа, площі сонячних плям, рентгенівський потік (фон+спалах), потік протонів, потік електронів, значення міжпланетного магнітного поля, середньодобовий  $D_{st}$ -індекс. Але радіопотік, числа Вольфа та площі сонячних плям сильно корелюють між собою; крім того, тільки три параметри — потік протонів, середнє значення міжпланетного магнітного поля та геомагнітні збурення ( $D_{st}$  та  $A_p$  індекси) є головними прогнозантами, які надалі будуть використовуватись нами для прогнозу. Вклад решти параметрів при прогнозі середньодобових значень є незначним: внесення будь-якого із цих параметрів дає покращення коефіцієнта кореляції не більше ніж на 0.001 або ж погіршує кореляцію. При сильних магнітних бурях вклад потоку протонів у кореляцію більший від вкладу міжпланетного магнітного поля.

У рамках розробленої нами прогностичної моделі ми розглянули прогноз із різною завчасністю: 1 доба, 2 доби, 3 доби. Для кожного випадку ми вибирали такі значення довжини навчальної вибірки  $N$ , частоти зрізу низькочастотного фільтра  $f_s$  та коефіцієнта регуляризації  $\alpha$ , які дають найбільший коефіцієнт кореляції для тестової вибірки, тобто забезпечують найкращий прогноз. Зазначимо, що визначення кількості регресорів за допомогою статистичного критерію Фішера дає подібні значення передісторії параметрів  $N$ . Оцінка якості прогнозу зроблена за результатами 100 послідовних точкових прогнозів.

У таблиці приведено отримані значення коефіцієнта кореляції  $r$  між спрогнозованими та спостережними значеннями індексу  $D_{st}$  (модель побудована за фільтрованими значеннями), зна-

чення коефіцієнта кореляції  $r_0$  (у дужках) для випадку найпростішого прогнозу — «завтра чи післязавтра буде так, як сьогодні»; значення відношення  $\sigma_{rms}/\sigma_0$  залишкового (між спрогнозованими та спостережуваними значеннями індексу  $D_{st}$ ) середнього квадратичного відхилення до середнього квадратичного відхилення центрованих значень індексу  $D_{st}$ , частоти  $f_s$  зрізу цифрового фільтра та відповідного часового інтервалу  $\Delta t$  (у дужках) між відліками, ефективності передбачення  $pe$ . У двох останніх графах приведено параметр регуляризації  $\alpha$  та загальне число  $KN$  регресорів.

У перших трьох випадках модель побудовано за фільтрованими регресорами. У нижньому рядку приведено результати прогнозу з використанням нефільтрованих даних для побудови моделі прогнозу; частота Найквіста становить 0.5, їй відповідає період 2 доби, коли розглядаються середньодобові значення. Як бачимо, для оптимального прогнозу із завчасністю 1 доба слід будувати модель по середньопівторадобових значеннях, із завчасністю 2 доби — по середньодвобових значеннях, із завчасністю 3 доби — по майже середньотридобових значеннях.

Як бачимо, подавлення високочастотних шумів суттєво покращує якість прогнозу із різною завчасністю: так, при прогнозі із завчасністю 1 доба коефіцієнт кореляції збільшується від 0.87 до 0.97. А із збільшенням завчасності прогнозу коефіцієнт кореляції та ефективність прогнозу зменшуються.

Зазначимо, що збільшення числа прогнозантів ( $KN \geq 9$ ) при використанні нефільтрованих даних не призводить до покращення прогнозу, оскільки вклад шумів прогнозантів за останні дві-три доби перевищує внесок значень решти прогнозантів.

Маючи оцінки якості прогнозу згаданого найпростішого підходу, можна говорити про ефективність роботи нашого алгоритму: так, запропонований підхід дає збільшення коефіцієнта кореляції на 0.15 порівняно з найпростішим підходом вже у випадку нефільтрованих даних (нижній рядок таблиці), а фільтрація часових рядів прогнозантів додатково збільшує  $r$  ще на кілька десятих.

### ВЕРИФІКАЦІЯ ПРОГНОЗУ

Оскільки ми розглядаємо процес, що відбувається в реальному масштабі часу, то для фільтрації часових рядів найкраще підходять фільтри реального часу. До такого класу фільтрів належать рекурсивні фільтри, зокрема фільтри Баттерворта, Бесселя, Чебишева [2]. Недоліком такого класу фільтрів є внесення від'ємного фазового зсуву при фільтрації в реальному часі; до того ж цей зсув залежить від частоти, що сильно деформує форму сигналу при фільтрації.

Єдиний вихід — фільтрація часового ряду у прямому та зворотному напрямках, однак це породжує на краях часового ряду участки нефільтрованих значень, ширина яких визначається порядком фільтра. Тобто, при використанні рекурсивних фільтрів реального часу виникають труднощі, притаманні для нерекурсивних фільтрів: для того щоб отримати відфільтроване значення в даний момент часу, необхідні значення часового ряду як у попередні, так і у наступні моменти часу (ширина вікна фільтра також визначається порядком фільтра). А це означає, що в разі використання відфільтрованих даних ми повинні робити прогноз із завчасністю, більшою за півширину фільтра. Зокрема, якщо ширина вікна фільтра  $2k + 1$ , то прогноз із завчасністю

**Вплив фільтрації вхідних даних на якість прогнозу індексу  $D_{st}$**

Завчасність, діб	$r(r_0)$	$\sigma_{rms}/\sigma_0$	$pe$	$f_s(\Delta t, \text{діб})$	$\alpha$	$KN$
1	0.97 (0.72)	0.23	0.94	0.33 (1.5)	0.04	60
2	0.94 (0.36)	0.33	0.88	0.25 (2)	0.001	60
3	0.91 (0.21)	0.40	0.83	0.18 (2.8)	0.001	45
1	0.87 (0.72)	0.48	0.76	0.5 (1)	0	9

$k + \tau$  дає реальну завчасність  $\tau$ . Згідно із проведеними тестуваннями фільтри Ланцоша забезпечують кращу якість прогнозу, ніж рекурсивні фільтри. А тому надалі при фільтрації будемо використовувати виключно фільтри Ланцоша. Однак за умов реального прогнозу, коли часовий ряд обірваний справа, збільшення ширини вікна (при цьому покращується частотна характеристика фільтра) вимагає, як вже було зазначено, збільшення завчасності прогнозу. При цьому ми маємо покращення результатів самої фільтрації з одного боку, та погіршення якості прогнозу, з іншого. Виявляється, що в даній ситуації оптимальними є фільтри другого порядку: при ширині вікна, що дорівнює 3, прогнозу із завчасністю 2 доби відповідає реальне випередження, рівне 1 добі.

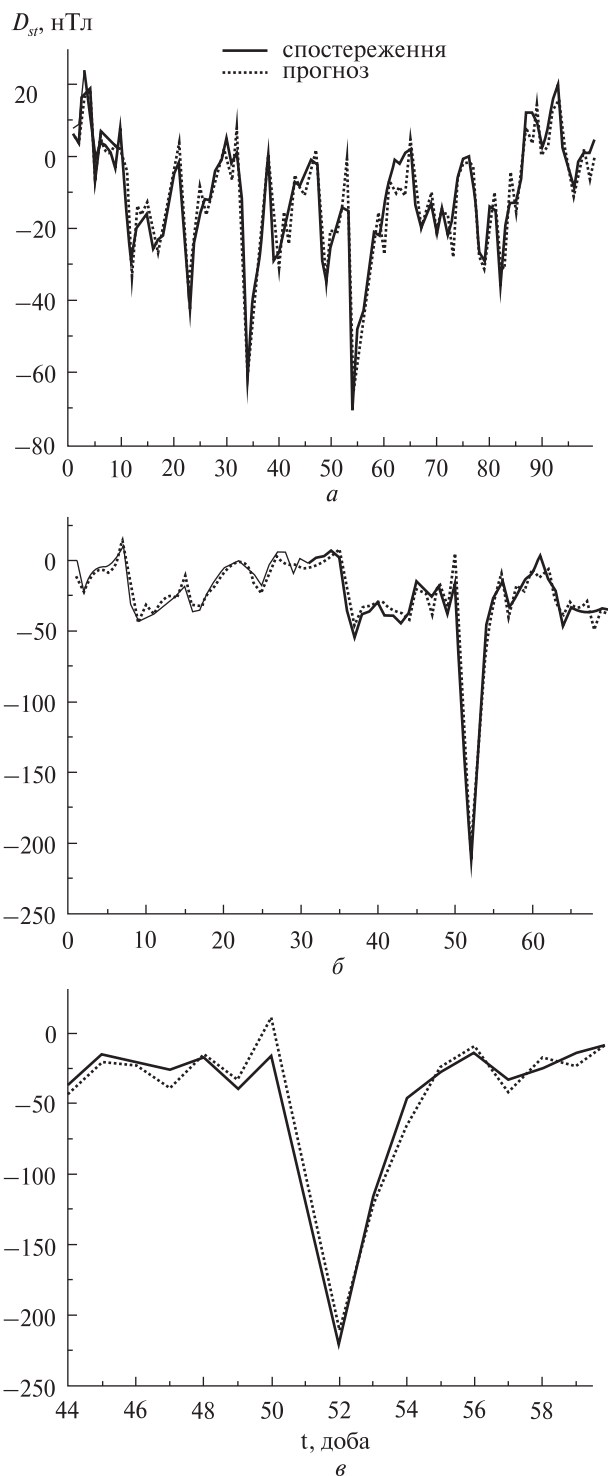
Розглянемо детальніше отримані ряди прогнозів геомагнітних індексів. Ми вибрали два інтервали активного та надактивного Сонця у 23-му циклі сонячної активності:

- 1) кінець гілки росту (перед першим максимумом), початок — 19 грудня 1999 р.;
- 2) середина гілки спаду, початок — 8 вересня 2003 р. (цей інтервал включає надпотужний сонячний спалах 28 жовтня 2003 р.).

Результати прогнозу середньодобового індексу  $D_{st}$  представлені на рисунку ( $a$  — на першому,  $b$  — на другому інтервалі,  $\epsilon$  — окремо виділений у більшому часовому масштабі Хелоуїнський супершторм).

Коефіцієнт кореляції між спостережуваними індексами та спрогнозованими індексами (прогностична модель побудована за фільтрованими даними) становить 0.94 для першого участку та 0.96 для другого. Авторегресія також дає високий коефіцієнт кореляції: 0.925 та 0.94 для відповідних участків. Як бачимо, запропонований алгоритм прогнозу менш чутливий до малих геомагнітних збурень. Цей підхід дає непоганий прогноз великих збурень: як їхніх значень, так і моментів їхньої появи (рисунок,  $\epsilon$  — Хелоуїнський супершторм).

Ми зробили аналогічно прогноз планетарного  $A_p$ -індексу. Цей індекс важче прогнозувати, а тому якість прогнозу дещо нижча: для першого



Прогноз геомагнітного індекса  $D_{st}$  (завчасність прогнозу 2 доби, реальна заздалегідність 1 доба):  $a$  — на першому інтервалі,  $b$  — на другому інтервалі,  $\epsilon$  — Хелоуїнський супершторм (другий інтервал)

участку коефіцієнт кореляції становить 0.90, для другого — 0.93.

Подібні, але дещо гірші результати прогнозу отримуються при фільтрації даних із вікном  $2k + 1 = 5$ , але реальній завчасності прогнозу 1 доба відповідає тепер завчасність 3 доби.

Зазначимо, що реальна завчасність прогнозу 2 доби накладає більші вимоги до фільтрів. На жаль, використовувані нами фільтри не можуть забезпечити необхідну фільтрацію вхідних даних, що унеможливує якісний прогноз геомагнітних збурень із реальною завчасністю, більшою від однієї доби. Для цього потрібні досконаліші фільтри.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено методику прогнозу середньодобових геомагнітних збурень — збурення геомагнітного індексу  $D_{st}$  та планетарного індексу  $A_p$ , визначаються потоком протонів, значенням міжпланетного магнітного поля та передісторією індексу, який прогнозують. Модель прогнозу — лінійна, робастність прогнозу забезпечує стабілізатор Тихонова, що накладає обмеження на розбаланс коефіцієнтів моделі.

2. Показано, що подавлення високочастотних шумів суттєво покращує якість прогнозу середньодобового геомагнітного та планетарного індексів. А тому коефіцієнти моделі необхідно шукати за відфільтрованими значеннями часових рядів.

3. Якість прогнозу визначається граничною частотою пропускання низькочастотного фільтра, довжиною навчальної вибірки, коефіцієнтом регуляризації. Коефіцієнт кореляції між спостережуваними нефільтрованими та спрогнозованими індексами більший від 0.9, тоді як використання найпростіших підходів дає коефіцієнт кореляції, на декілька десятків нижчий.

4. Розроблену методику можна використовувати для прогнозу середньодобового геомагнітного та планетарного індексів як у періоди помірної, так і надвисокої активності Сонця.

*Автор щиро вдячний центрам даних SPDF, NSSDC та WDC-B за можливість доступу до різних даних, зокрема до каталогу OMNI2.*

1. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1979. — 142 с.
2. Хемминг П. В. Цифровые фильтры. — М.: Сов. радио, 1980. — 224 с.
3. Amata E., Consolini G., Pallochia G., Marcucci M. ANN forecast of hourly averaged AE index based on L1 IMF and plasma measurements // Acta Geophysica. — 2009. — **57**, N 1. — P. 185—196.
4. Cid C., Saiz E., Cerrato Y. Physical models to forecast the Dst index: A comparison of results // Solar Wind 11 / SOHO 16, Workshop “Connecting Sun and Heliosphere”. — 2005. — P. 601—604.
5. Eselevich V. G., Fainshtein V. G. An investigation of the relationship between the magnetic storm Dst-index and different types of solar wind streams // Ann. Geophys. — 1993. — **11**, N. 8. — P. 678—684.
6. Eselevich V. G., Fainshtein V. G., Rudenko G. V., et al. Forecasting the velocity of quasi-stationary solar wind and the intensity of geomagnetic disturbances produced by it // Cosmic Res. — 2009. — **47**, N 2. — P. 95—113.
7. Gonzalez W. D., Echer E. A study on the peak Dst and peaknegative Bz relationship during intense geomagnetic storms // Geophys. Res. Lett. — 2005. — **32**. — P. 18103—18106.
8. Gonzalez W. D., Tsurutani B. T., Gonzalez A. L. Interplanetary origin of geomagnetic storms // Space Sci. Rev. — 1999. — **88**. — P. 529—562.
9. Kane R. P. How good is the relationship of solar and interplanetary plasma parameters with geomagnetic storms? // J. Geophys. Res. — 2005. — **110**. — P. 2213—2215.
10. Khabarova O. V. Current problems of magnetic storm prediction and possible ways of their solving // Sun and Geosphere. — 2007. — **2**, N 1. — P. 33—38.
11. King J. H., Papitashvili N. E. Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data // J. Geophys. Res. — 2005. — **110A**, N 2. — P. A02104—A02111.
12. Lundstedt H., Gleisner H., Wintoft P. Operational forecasts of the geomagnetic Dst index // Geophys. Res. Lett. — 2002. — **29**, N 24. — P. 2181—2184.
13. O'Brien T. P., McPherron R. L. Forecasting the ring current index Dst in real time // J. Atmos. Terr. Phys. — 2000. — **62**. — P. 1295—1299.
14. Pallochia G., Amata E., Consolini G., et al. Geomagnetic Dst index forecast based on IMF data only // Ann. Geophys. — 2006. — **24**. — P. 989—999.
15. Parnowski A. S. Regression modeling method of space weather prediction // Astrophys. and Space Sci. — 2009. — **323**, N 2. — P. 169—180.
16. Siscoe G., McPherron R. L., Liemohn M. W., et al. Reconciling prediction algorithms for Dst // J. Geophys. Res. — 2005. — **110A**, N 2. — P. A02215—A02222.

17. *Temerin M., Li X.* A new model for the prediction of Dst on the basis of the solar wind // *J. Geophys. Res.* — 2002. — **107A**, N 12. — P. 1472—1479.
18. *Temerin M., Li X.* Dst model for 1995—2002 // *J. Geophys. Res.* — 2006. — **111A**, N 4. — P. A04221 — A04231.
19. *Wang C. B., Chao J. K., Lin C. H.* Influence of the solar wind dynamic pressure on the decay and injection of the ring current // *J. Geophys. Res.* — 2003. — **108A**, N 9. — P. 1341—1351.
20. *Wu J., Lundstedt H.* Geomagnetic storm predictions from solar wind data with the use of dynamic neural networks // *J. Geophys. Res.* — 1997. — **102A**, N 7. — P. 14255—14268.
21. *Yermolaev Y. I., Yermolaev M. Y., Zastenker G. N., et al. A.* Statistical studies of geomagnetic storm dependencies on

solar and interplanetary events: a review // *Planet. Space Sci.* — 2005. — **53**. — P. 189—196.

*Надійшла до редакції 21.05.10*

*M. I. Stodilka*

#### FORECAST OF THE DAILY GEOMAGNETIC PERTURBATIONS

A model of the robust forecast of geomagnetic perturbations is constructed and tested. Some ways to improve the forecast are considered. The correlation coefficient between daily observed and forecasted data is greater than 0.9. Our procedure can be used to perform the forecast of the daily geomagnetic and planetary indices during both moderate and superhigh solar activity.

УДК 729.68

**В. Е. Шатихин<sup>1</sup>, Л. П. Семенов<sup>1</sup>, А. Л. Макаров<sup>2</sup>,  
В. С. Хорошилов<sup>2</sup>, В. М. Попель<sup>2</sup>, С. Р. Игнатович<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Національне космічне агентство України, Київ

<sup>2</sup> Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» імені М. К. Янгеля», Дніпропетровськ

<sup>3</sup> Національний авіаційний університет – Аерокосмічний інститут, Київ

## АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ПРИВОДА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ДЛИТЕЛЬНОМ СРОКОМ ЖИЗНИ

*Розглядається метод прогнозування ймовірності безвідмовної роботи приводу сонячних батарей космічного апарата на етапі його проектування. Використовується регресійна модель, у якій за регресор вибрано величину динамічного опору приводу сонячної батареї. Встановлено аналітичні співвідношення між динамічним опором та ймовірністю безвідмовної роботи механічної частини приводу сонячних батарей, побудовано відповідні регресійні залежності.*

В настоящее время в связи с увеличением срока жизни, расширением спектра решаемых задач космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) более актуальной становится задача прогнозирования надежности его бортовых агрегатов.

Сопутствующими факторами длительной эксплуатации КА ДЗЗ, оказывающими влияние на надежность узлов и подсистем КА, являются, в частности, изнашивание трущихся деталей и узлов, изменение физико-механических свойств углепластиковых фермовых выносных конструкций под действием временного фактора и факторов космического пространства (ФКП).

Указанные факторы в общем виде разделяют на факторы, обусловленные воздействием внешних сил и сил внутреннего взаимодействия. Краткая классификация сил и вызываемые ими воздействия приведены на рис. 1.

Указанные воздействия приводят к увеличению вынужденных колебаний (вибраций) КА, что вызывает уменьшение надежности КА ДЗЗ. Одним из наиболее виброактивных устройств КА ДЗЗ является привод солнечной батареи (ПСБ).

Предлагается метод прогнозирования вероятности  $P$  безотказной работы ПСБ на этапе

его проектирования с использованием регрессионного анализа, в качестве регрессора служит динамическое сопротивление  $R$ , что позволяет оценить эволюцию величины  $P$  привода солнечной батареи в течение срока активной эксплуатации КА.

Суть метода состоит в том, что под суммарным воздействием внешних и внутренних возмущений каркасы панелей СБ приобретают линейные и угловые перемещения, что вызывает изменение момента инерции ПСБ  $J$ , и следовательно, изменение динамического момента ПСБ  $M_{\text{дин}}$ :

$$M_{\text{дин}} = J \varepsilon_{\text{max}},$$

где  $\varepsilon_{\text{max}}$  — максимальное ускорение выходного вала ПСБ.

Вследствие линейных и угловых перемещений каркасов панелей СБ величина  $J$  увеличивается. Необходимо отметить, что  $\varepsilon_{\text{max}}$  также увеличивается вследствие эволюции погрешностей изготовления элементов зубчатого зацепления редуктора, вызванной изнашиванием. В общем виде эволюция  $\varepsilon_{\text{max}}$  может быть представлена следующим образом [2]:

$$\varepsilon_{\text{max}} = \varepsilon_{\text{в}} i, \quad i = i_0 \left( 1 + \sum_1^n \Delta i_l \cos \Theta_l t \right),$$

где  $i$  и  $i_0$  — текущее и начальное передаточное соотношение зубчатой передачи; — соотношение зубчатой передачи;  $\varepsilon_{\text{в}}$  — ускорение входного

вала ПСБ;  $n$  — количество валов и зацеплений в кинематической схеме ПСБ;  $l$  — количество видов погрешностей в кинематической схеме ПСБ;  $\Theta$  — спектр частот возмущений передаточного соотношения ПСБ, обусловленный различными видами погрешностей.

Динамическое сопротивление  $M_{\text{дин}}$  и статическое сопротивление  $M_{\text{ст}}$  нагрузки составляют полный момент сопротивления нагрузки, для преодоления которого двигателю ПСБ необходимо создать соответствующий вращающий момент  $M_{\text{вр}}$ :

$$M_{\text{вр}} \geq M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}.$$

Привод солнечных батарей большинства современных КА дистанционного зондирования Земли относится к устройствам, у которых преобладает динамическое сопротивление над статическим вследствие минимальных значений ускорения свободного падения на высотах полета КА, что обуславливает незначительные весовые составляющие  $M_{\text{ст}}$ . Еще одним показателем наличия большого значения  $M_{\text{дин}}$  является высокое значение коэффициента динамичности

$$K_d = \frac{\varepsilon_{\text{max}}}{\varepsilon_c} > 2,$$

где  $\varepsilon_c$  — среднее ускорение выходного вала ПСБ.

Увеличение  $M_{\text{дин}}$  вызывает более интенсивный износ сопряженных деталей и узлов ПСБ, и следовательно, уменьшение значения  $P$ . Поэтому исследование динамического сопротивления актуально для прогноза показателя вероятности безотказной работы ПСБ.

Предложенный метод наиболее целесообразен при следующих условиях:

- значительная масса КА (>2 т);
- большая площадь каркасов панелей СБ (>30 м<sup>2</sup>);
- длительный срок жизни (>5 лет);
- наличие редуктора ПСБ;
- значительное превышение  $M_{\text{дин}}$  ПСБ над  $M_{\text{ст}}$  (более чем в четыре раза);
- существенный коэффициент динамичности ПСБ (>2).

Проведено математическое моделирование эволюции  $M_{\text{дин}}$  в течение 15 лет для КА ДЗЗ массой 6 тонн с номинальным значением  $M_{\text{дин}} = 2000 \text{ кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$  и площадью углепластиковых



Рис. 1. Схема изменения динамического сопротивления бортовых агрегатов

каркасов панелей СБ в 100 м<sup>2</sup> с учетом влияния потери массы от воздействия вакуума, температуры и атомарного кислорода, а также изменения жесткости каркасов в течение 15 лет эксплуатации. Методика моделирования изложена в работах [5, 7].

В основных постулатах математическая модель определения надежности для ПСБ с зубчатым редуктором представляется в виде таблицы [5—7].

В таблице  $A^e$  — работа внешних сил, действующих на ПСБ;  $A^i$  — работа внутренних сил ПСБ;  $\rho^*$  — погонная масса каркаса панели СБ;  $\rho$  — плотность материала каркаса панели СБ;  $P_z$  — интегральная силовая составляющая внешних сил;  $m_z$  — интегральная моментная составляющая внешних сил;  $T^z$  — результирующая сил внутреннего взаимодействия;  $M_{Cz}$  — результирующий момент сил внутреннего взаимодействия;  $P_H$  — нормальная составляющая силы зацепления;  $k_z^*$  — орт системы отсчета размещенной на деформированном каркасе панели СБ;  $K_{Cz}$  — кинетический момент отдельного элемента каркаса СБ;  $u_0$  — линейная деформация фрагмента каркаса панели СБ;  $\Omega_0$  — угловая деформация каркаса панели СБ;  $l$  — длина каркаса;  $dz$  — виртуальное перемещение фрагмента каркаса панели ПСБ в направлении оси  $z$ ;  $\Delta a, b, c$  — изменение геометрических размеров сторон

каркаса панели СБ под воздействием ФКП;  $B$  — ширина венца зубчатого колеса;  $\alpha$  — угол зацепления зубчатого колеса редуктора ПСБ;  $R_1, R_2$  — радиусы зубчатых колес (ведущего и ведомого выходной ступени редуктора);  $J_1, J_2$  — моменты инерции зубчатых колес;  $k$  — коэффициент износостойкости;  $n$  — число оборотов зубчатой передачи;  $i$  — передаточное отношение зубчатой передачи;  $\delta_{\text{СМАХ}}$  — максимальный зазор (люфт)

выходной ступени без учета износа;  $w_{\text{уд}}$  — скорость удара зубьев выходного звена редуктора ПСБ;  $H_C$  — толщина зуба;  $p_1, p_2$  — погрешности в люфтах опор;  $f_a$  — допуск на граничное межосевое расстояние;  $\chi$  — коэффициент, учитывающий связь между величиной износа зуба и его толщиной;  $U_{\text{МАХ}}$  — максимальное изнашивание зуба;  $T$  — срок эксплуатации ПСБ;  $\Phi$  — нормированная функция Лапласа;  $M_{H0}$  — математи-

**Основные уравнения математической модели прогнозирования надежности ПСБ**

Назначение	Аналитические выражения
<p>Определение линейных и угловых перемещений каркасов панелей СБ с помощью принципа малых перемещений (метода конечных элементов и др.)</p>	$\delta A^e = \delta A^i,$ $\delta A^e = \int_0^l \mathbf{p}_z \delta \mathbf{u}_0 dz + \int_0^l \mathbf{m}_z \delta \Omega_0 dz - \int_0^l \rho^* \frac{\partial^2 \mathbf{u}_0^2}{\partial t^2} \delta \mathbf{u}_0 dz + \int_0^l \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{K}_{c_i} \delta \Omega_0 dz,$ $\delta A^i = \int_0^l \mathbf{T}^z \frac{\partial}{\partial z} \delta \mathbf{u}_0 dz + \int_0^l \mathbf{M}_{c_z} \frac{\partial}{\partial z} \delta \Omega_0 dz - \int_0^l (\mathbf{T}^z \times \mathbf{k}_z^*) \delta \Omega_0 dz + \int_0^l (\mathbf{r}_{c_z} \times \mathbf{T}^z) \delta \Omega_0 dz$
<p>Определение изменения момента инерции каркаса панелей СБ (для математической модели в виде пластины)</p>	$\Delta J_{\text{ПСБ}} = \frac{\rho \Delta abc}{12} (a^2 + u_0^2)$
<p>Определение динамического сопротивления ПСБ</p>	$M_{\text{дин}} = J_{\text{ПСБ}} \varepsilon$
<p>Определение силы нормального зацепления выходного зубчатого колеса</p>	$P_H = \frac{M_{\text{дин}} + M_{\text{СТАТ}} + S}{R_1}$
<p>Определение изнашивания зубчатого <math>J</math>-го колеса редуктора</p>	$U_J = k \frac{P_H}{B} \left[ \left( 1 - \frac{R_1}{R_2} \right) \right] \frac{i+1}{i} n$
<p>Определение суммарного мертвого хода зубчатой передачи с учетом изнашивания зубчатых колес.</p>	$\Delta \delta_{\text{СМАХ}\Sigma} = \sum_{j=1}^{2J} \left( \frac{0.25}{\text{tg}^2 \alpha} \right) \frac{H_{Cj} U_j \chi_j + H_{Cj+1} U_{j+1} \chi_{j+1}}{\sqrt{\frac{0.25}{\text{tg}^2 \alpha} (H_{Cj}^2 + H_{Cj+1}^2 + 2f_a^2 + p_1^2 + p_2^2)}}$
<p>Определение скорости удара зубчатых колес выходного звена</p>	$w_{\text{уд}} = \sqrt{2\varepsilon_B (\delta_{\text{СМАХ}} + \Delta \delta_{\text{СМАХ}\Sigma})}$
<p>Определение ударной силы, действующей на ПСБ и учет ее в силе нормального зацепления</p>	$S = J_1 J_2 \frac{w_{\text{уд}} R_1 - w_{\text{уд}} R_2}{J_1 R_2^2 + J_2 R_1^2}$
<p>Определение вероятности безотказной работы ступени редуктора</p>	$P_C = 0.5 + \Phi \left( \frac{U_{\text{JМАХ}} M_{H0} - v_{\text{CP}} T}{\sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_v^2 T^2}} \right)$
<p>Определение вероятности безотказной работы редуктора (механической части) ПСБ</p>	$P_P = \prod_{i=1}^M P_{C_i} P_{C_{i+1}} \dots P_{C_M}$



ческое ожидание толщины зуба;  $\sigma_H$  — среднее квадратичное отклонение толщины зуба;  $v_{CP}$  — среднее значение скорости изнашивания зуба передачи;  $\sigma_v$  — среднее квадратичное отклонение скорости изнашивания;  $P_C$  — вероятность безотказной работы ступени редуктора.

Параметры линейной регрессии  $P = aR + b$ , где  $R$  — динамическое сопротивление ПСБ и  $P$  — вероятность безотказной работы ПСБ, находятся решением следующей системы уравнений [3]:

$$\sum_{i=1}^n P_i = Na + b \left( \sum_{i=1}^n R_i \right), \quad \sum_{i=1}^n R_i P_i = a \left( \sum_{i=1}^n R_i \right) + b \left( \sum_{i=1}^n R_i^2 \right),$$

где  $n = 15$  — число наблюдений, соответствующих количеству годов эксплуатации КА.

По данным вычислений изменений динамического сопротивления от 2000 до 2160 кг·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> и  $P$  от 0.98 до 0.83 в течение 15 лет эксплуатации КА (см. рис. 2) получено уравнение регрессии  $P = 2.8593 - 0.00094R$ . При этом коэффициенты детерминации  $D^2$ , эластичности  $K$  и корреляции  $r$  составили

$$D^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{15} (P_i - \hat{P}_i)^2}{\sum_{i=1}^{15} (P_i - \bar{P})^2} = 0.99, \quad K = b \frac{\bar{R}}{\bar{P}} = 2.03, \quad r = 0.91,$$

где  $P_i$  — действительные значения вероятности безотказной работы,  $\hat{P}_i$  — полученные расчетные значения вероятности безотказной работы с помощью регрессии,  $\bar{R}$ ,  $\bar{P}$  — средние.

Проверка с помощью  $t$ -критерия Стьюдента и  $F$ -критерия Фишера показала, что гипотезы о наличии корреляции и достоверности уравнения в целом принимаются для уровня значимости  $\alpha = 0.05$ .

Точечное прогнозирование, которое выполняется с помощью уравнения регрессии, дополняется расчетом стандартной ошибки  $S$  и интервальной оценкой прогнозного значения  $P$ :

$$S(\hat{P}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \hat{P}_i)^2}{n-2} \left( 1 + \frac{1}{n} + \frac{(R - \bar{R})^2}{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \right)},$$

$$\hat{P} - t_{\alpha} S(\hat{P}) \leq P_{np} \leq \hat{P} + t_{\alpha} S(\hat{P}).$$

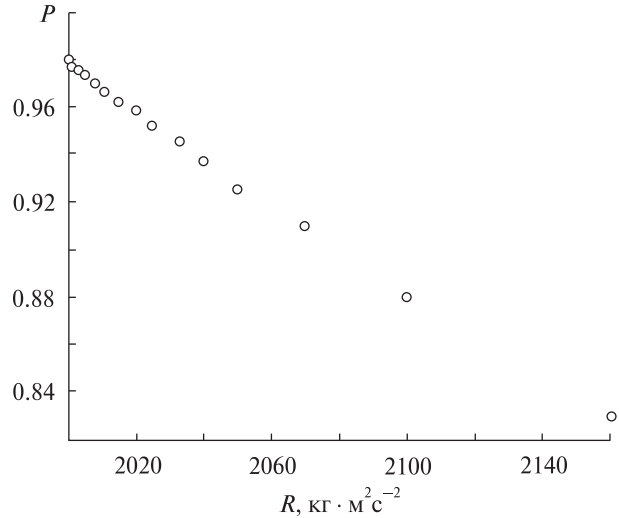


Рис. 2. Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  от динамического сопротивления  $R$  привода солнечной батареи

Например, для динамического сопротивления  $R = 2120$  кг·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> получим  $P = 0.8665 \pm 0.010$  при уровне значимости  $\alpha = 0.05$ .

## ВЫВОДЫ

1. Использование на этапе проектирования КА в качестве регрессора динамического сопротивления ПСБ позволяет осуществить с использованием регрессионного анализа предварительную оценку вероятности безотказной работы механической части ПСБ при условии значительного превышения динамического сопротивления ПСБ над статическим.

2. В качестве критерия целесообразности применения предложенного метода для прогнозирования надежности ПСБ рекомендуется использовать коэффициент динамичности.

3. Использование регрессионного анализа позволит с указанной достоверностью произвести оценку вероятности безотказной работы ПСБ КА в течение его срока активного существования.

4. Предложенный метод можно использовать для прогнозирования вероятности безотказной работы других бортовых агрегатов КА ДЗЗ, в частности спецпанелей и конструкции антенн.

1. Вульфсон И. И., Ерихов М. Л., Коловский М. З. Механика машин. — М.: Высшая школа, 1996. — 510 с.
2. Гаврилов В. А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи. — М.: Машиностроение, 1963. — 432 с.
3. Приходько А. И. Практикум по эконометрике. Регрессионный анализ средствами Excel. — Ростов-на-Дону: Феникс, 2007. — 250 с.
4. Слюдилов М. Н. Надежность и точность механизмов приводов систем управления летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1984. — 350 с.
5. Шатихин В. Е., Борисенко В. М., Федоренко В. А. и др. Условия кинематического контакта в задаче об обтекании несущих поверхностей летательного аппарата // Технологические системы. — 2005. — № 3. — С. 66–70.
6. Шатихин В. Е., Семенов Л. П., Артеменко Ю. Г. и др. Визначення динамічних характеристик каркасів сонячних батарей методом можливих переміщень // Технологические системы. — 2006. — № 4. — С. 26–31.
7. Шатихин В. Е., Семенов Л. П., Хорошилов В. С. и др. Врахування зносу зубчатих передач при оцінюванні динамічних характеристик приводу сонячних батарей // Космічна наука і технологія. — 2006. — **12**, № 4. — С. 33–37.

*Надійшла до редакції 01.10.10*

*V. E. Shatikhin, L. P. Semenov, O. L. Makarov,  
V. S. Khoroshilov, V. M. Popel', S. R. Ignatovich*

#### RELIABILITY ANALYSES OF SOLAR PANEL DRIVE FOR LONG LIFETIME SPACECRAFTS

We consider the prediction method of reliability probability for solar panel drive design using regression analyses. We deduced analytical relations between dynamical resistance and reliability probability of mechanical unit of solar panel drive for large Earth observation satellites. The relative regression functions are constructed.

УДК 629.78

Н. М. Дронь, Л. Г. Дубовик, А. И. Кондратьев, А. В. Хитько, П. Г. Хорольский

Дніпропетровський національний університет ім. Олесь Гончара

## ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ МУСОРОСБОРЩИКОВ С ЭРД ПРИ ДВУХ ВАРИАНТАХ МАНЕВРОВ ИХ ВЫВЕДЕНИЯ НА ОРБИТУ

---

*Розглянуто два варіанти маневрів виведення на потрібну орбіту космічних сміттєзбирачів з електрореактивним двигуном, оснащених системою уловлювання дрібного космічного сміття: ракетою-носієм (РН) за допомогою розгінного блоку і безпосередньо РН. Для кожного варіанту приведено основні характеристики космічних сміттєзбирачів та представлено їхні порівняльні оцінки. Для ряду найпотужніших ракет-носіїв розраховано масу і радіус сферичного пасивного уловлювального елемента сміттєзбирача, якого можна вивести на орбіту.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

По оценкам специалистов в настоящее время в космосе находится более 10 тысяч летательных аппаратов и спутников Земли, при этом функционируют из них около 6 %, остальные образуют т.н. космический мусор (КМ). Из-за регулярного выхода из строя действующих космических объектов плотность КМ на орбите ежегодно увеличивается на 4 %.

Способствуют увеличению космического мусора и разгонные блоки ракет, с помощью которых спутники выводятся на геостационарную орбиту. В их баках остается примерно 5–10 % топлива, которое весьма летуче и легко превращается в пар, что нередко приводит к мощным взрывам. После нескольких лет пребывания в космосе отслужившие ступени ракет разлетаются на куски, разбрасывая вокруг себя множество мелких осколков. В связи с этим есть высокая вероятность столкновений с отработанными космическими объектами как функционирующих, так и вновь запускаемых космических аппаратов. Не исключается возможность падения несгоревших остатков крупногабаритного мусора и на Землю. Все это указывает на то, что задача очистки космического пространства от КМ с целью обеспечения безопасности космических

полетов и снижения опасности для Земли является весьма актуальной.

### РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В основном космический мусор сконцентрирован на высотах от 850 до 1500 км и от 30000 до 40000 км [2]. Для очистки низких околоземных орбит от мусора может быть рассмотрен специальный мусорособирающий космический аппарат — космический мусоросборщик (КМС), оснащенный эффективной системой для сбора и удаления мелкого космического мусора с использованием электроракетных двигателей (ЭРД). Принцип работы КМС состоит в следующем. Мусоросборщик выводится на наиболее засоренную космическим мусором орбиту высотой 1200 км [2], разворачивается пассивный элемент для улавливания мелких частиц космического мусора (ПУЭ), включается тормозная электроракетная двигательная установка (ЭРДУ), вследствие чего высота орбиты уменьшается, и по мере ее уменьшения улавливатель захватывает мусор или снижает его скорость. После снижения скорости КМ переводится на более низкую орбиту (около 500 км) и сгорает в атмосфере Земли. Благодаря низкой тяге ЭРДУ движение КМС происходит медленно и очень долго, поэтому целевая эффективность рассмотренного способа улавливания мусора ожидается высокой из-за большого времени пребывания в зоне возможного контакта с космическим мусором.

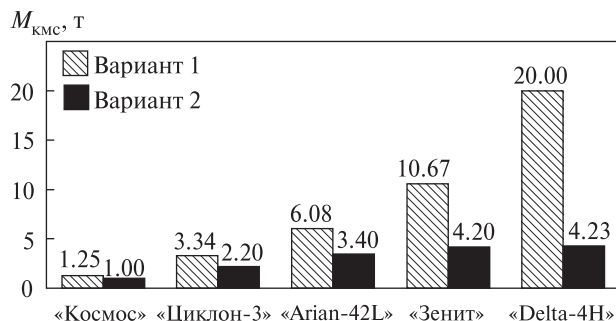


Рис. 1. Масса космического мусоросборщика для двух вариантов маневров выведения и эксплуатации: штрихованные столбцы — вариант 1, черные — вариант 2

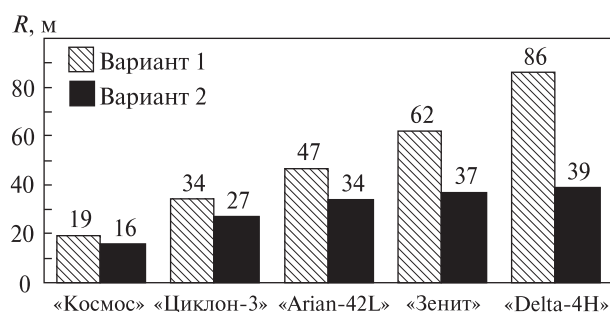


Рис. 2. Радиус ПУЭ для двух вариантов маневров выведения и эксплуатации

Как показали предварительные расчеты, массовая эффективность предлагаемого космического мусоросборщика зависит от маневра его выведения на требуемую орбиту, поэтому целью данной работы является сравнительная оценка характеристик мусоросборщика при различных вариантах маневров его выведения и эксплуатации на орбите.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении сравнительной оценки были рассмотрены два варианта маневров выведения и эксплуатации КМС для улавливания мелкого космического мусора.

**Вариант 1.** Вывод КМС с помощью ракеты-носителя на промежуточную орбиту высотой 200 км, довыведение КМС на требуемую орбиту около 1200 км посредством разгонного блока (РБ) и перевод на орбиту высотой 500 км с помощью ЭРДУ. Разгонный блок и обтекатель от КМС не отделяются, чтобы не добавлять в космосе крупногабаритного мусора, их пассивная

масса после выработки топлива ЖРДУ учитывается при снижении КМС от 1200 до 500 км.

**Вариант 2.** Вывод КМС ракетой-носителем непосредственно на орбиту 1200 км и перевод на орбиту высотой 500 км с помощью ЭРДУ.

Время работы ЭРДУ для перевода КМС с высоты 1200 км на высоту 500 км для определенности задавалось равным полгоду. Расчеты проводились для ряда наиболее мощных ракет-носителей [4], которые можно использовать для выведения КМС на необходимую орбиту. Основные их характеристики приведены в таблице.

В качестве полезной нагрузки (ПН) для определенности была выбрана система, состоящая из ПУЭ с устройствами крепления, развертывания в космосе и удержания его при эксплуатации КМС в космосе. ПУЭ представлен в виде сферы радиусом  $R$ . Рассматривался гипотетический случай, когда масса вышеупомянутых устройств включена в массу ПУЭ. Масса ПУЭ определялась из предположения, что масса единицы поверхности сферы составляет  $0.2 \text{ кг/м}^2$  [3].

Оценка массовых характеристик КМС проводилась в зависимости от маневра его выведения на требуемую орбиту.

В первом варианте при использовании РН с РБ масса КМС определялась из выражения

$$M_{\text{КМС}} = M_0 - M_{\text{ТЖРД}} - M_{\text{РБсух}},$$

где  $M_0$  — грузоподъемность РН на круговой орбите высотой 200 км,  $M_{\text{ТЖРД}}$  — запас топлива ЖРД, расходуемого на переход с орбиты высотой 200 км на орбиту высотой 1200 км,  $M_{\text{РБсух}}$  — масса обтекателя и сухая масса РБ.

Во втором варианте для определения массы КМС на орбите высотой 1200 км использовались

### Характеристики ракет-носителей

Название РН	Страна-разработчик	Грузоподъемность на круговой орбите высотой 200 км, т	Грузоподъемность на круговой орбите высотой 1200 км, т
«Дельта-4H»	США	24	4.23
«Протон-М»	Россия	21	данных нет
«Зенит-2»	Украина	13	4.2
«Ариан-42L»	Франция	7.3	3.4
«Циклон-3»	Украина	4	2.2
«Космос»	Россия	1.4	1

справочные данные [4] при предположении, что масса КМС равна грузоподъемности РН на высоте 1200 км.

Масса полезной нагрузки  $M_{\text{ПН}}$  определялась из уравнения баланса массы КМС [1]:

$$M_{\text{КМС}} = M_{\text{СПУ}} + M_{\text{Д}} + M_{\text{СА}} + M_{\text{ЭУ}} + \\ + M_{\text{СХПТ}} + M_{\text{К}} + M_{\text{Т}} + M_{\text{ПН}},$$

где  $M_{\text{Т}}$  складывается из массы топлива на перевод КМС на орбиту 1200 км и торможение до высоты 500 км.

Значения постоянных членов в уравнении баланса принимались следующими: масса системы преобразования и управления  $M_{\text{СПУ}} = 10$  кг; масса двигателей  $M_{\text{Д}} = 10$  кг; масса служебной аппаратуры  $M_{\text{СА}} = 260$  кг [5]. Значения переменных членов определялись по следующим формулам: масса энергоустановки  $M_{\text{ЭУ}} = \alpha_{\text{ЭУ}} N$ , где  $\alpha_{\text{ЭУ}} = 50$  кг/кВт — удельная масса,  $N$  — мощность, потребляемая двигателями ЭРДУ; масса системы хранения и подачи топлива в ЭРДУ  $M_{\text{СХПТ}} = \alpha_6 \cdot M_{\text{ТЭРД}}$ , где коэффициент  $\alpha_6$  принимался равным 0.15,  $M_{\text{ТЭРД}}$  — масса рабочего тела ЭРД; масса элементов конструкции мусоросборщика  $M_{\text{К}} = 0.1(M_{\text{Д}} + M_{\text{СХПТ}} + M_{\text{ЭУ}} + M_{\text{СПУ}})$ .

При задании ПУЭ в виде сферы радиусом  $R$  масса  $M_{\text{ПН}}$  определяется массой улавливателя  $M_{\text{ПУЭ}}$  и массой  $M_{\text{ЭЛ}}$  элементов крепления ПУЭ, его развертывания и удержания на орбите:

$$M_{\text{ПН}} = M_{\text{ПУЭ}} + M_{\text{ЭЛ}}.$$

В гипотетическом случае, когда  $M_{\text{ЭЛ}} = 0$ ,

$$M_{\text{ПН}} = M_{\text{ПУЭ}} = 4\pi R^2 \delta,$$

отсюда  $R = \sqrt{M_{\text{ПН}} / (4\pi\delta)}$ , где  $\delta$  — плотность оболочки сферы (задавалась равной 0.2 кг/м<sup>2</sup> согласно [3]).

На рис. 1 приведены массы космических мусоросборщиков для различных маневров их выведения и эксплуатации на орбите, а на рис. 2 — радиусы их ПУЭ. Как видно из приведенных диаграмм, наиболее предпочтительным из рассмотренных вариантов маневров выведения и эксплуатации КМС является вариант с использованием РН и РБ (вариант 1). В этом варианте одной и той же РН на орбиту можно вывести КМС, массой в 1.3—4.7 раза большей, чем в варианте 2. Это позволит обеспечить и больший

радиус ПУЭ (от 19 до 86 м в первом варианте по сравнению с 16 до 39 м — во втором). Для варианта 2 следует также отметить слабую зависимость массы КМС (а следовательно, и радиуса ПУЭ) от типа некоторых используемых РН.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из двух рассмотренных вариантов выведения космического мусоросборщика на требуемую орбиту рациональнее использовать вариант маневра РН с помощью разгонного блока. Однако для окончательных выводов необходимо учесть и стоимостные характеристики созданных КМС.

1. Кондратьев А. И., Хорольский П. Г., Дубовик Л. Г. Методика расчета тяговых и энергомассовых характеристик мусорособирающего космического аппарата с электродвигательной установкой // Авиационно-космическая техника и технология. — 2009. — № 10 (67). — С. 82—84.
2. Микуша А. Н., Рыхлова Л. В., Смирнов М. А. Загрязнение космоса // Вестник РАН. — 2001. — 71, № 1. — С. 26—31.
3. Alpatov A. P., Gusyning V. P., Slyunyayev N. N., Khitko A. V. Space vehicle with electric thruster for gathering fine space debris // Proc. 50-th Int. Astronautical congress. — Glasgow, Scotland, 2008.
4. Isakowitz S. J. International reference guide to space launch systems: Second Ed. — Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1991. — 341 p.
5. Konstantinov M. The analysis of influence of electrical propulsion characteristics on efficiency of transport maneuvers // The 30-th International Electrical Propulsion Conference, 17—20 September 2007. — Florence, Italy, 2007. — JEP-2007-212. — 18 p.

Надійшла до редакції 26.01.10

N. M. Dron, L. G. Dubovik, A. I. Kondratyev,  
A. V. Khitko, P. G. Horolsky

## CHARACTERISTICS OF SPACE DEBRIS-GATHERERS WITH ELECTRIC PROPULSION AT TWO VARIANTS OF MANEUVERS FOR THEIR PUTTING INTO DEMANDED ORBIT

We consider two variants of maneuvers for putting into a demanded orbit space debris-gatherers (SDG) with the electric propulsion, equipped with the system of catching small space debris. One of the variants uses a carrier rocket with the acceleration block and another variant uses directly a carrier rocket. For each variant, the basic characteristics of SDG are resulted and their comparative estimation is presented. As the criterion for the estimation of these characteristics, we consider the weight and radius of spherical passive catching element of the debris-gatherer, calculated for a number of the most powerful carrier rockets which can be used in putting SDG into a demanded orbit.

УДК [520.8+002.53]:004

**И. Б. Вавилова<sup>1</sup>, Л. К. Пакуляк<sup>1</sup>, Ю. И. Процюк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

<sup>2</sup> Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

## **УКРАИНСКАЯ ВИРТУАЛЬНАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ (УкрВО). ЦЕЛЬ, СТРУКТУРА И ЗАДАЧИ**

---

*Наведено основні положення концепції Української астрономічної віртуальної обсерваторії (УкрВО). Викладено мету її створення, організаційну структуру у вигляді консорціуму обсерваторій України — власників унікальних колекцій астрономічних даних, а також обговорюється місце і роль віртуальних обсерваторій у системі зв'язку «дані космічних місій — наземні телескопи». Описано головні складові наукового астроінформаційного ресурсу: архіви фотографічних (зокрема унікальні, 1890—1945 рр.) і спектральних ПЗЗ-спостережень небесних об'єктів; каталоги та бази даних, отримані за допомогою наземних телескопів, і дані космічних місій, оброблені в обсерваторіях України. Визначено першорядні завдання з формування УкрВО як національного центру астрокосмічних даних у структурі Міжнародного альянсу віртуальних обсерваторій, які вимагають нових підходів до ІТ-підтримки УкрВО і розвитку її освітянського ресурсу.*

---

### **ВВЕДЕНИЕ**

Виртуальная обсерватория — новая информационная технология в астрономии, возникшая в результате беспрецедентного ускорения темпов накопления научно-значимых астрономических данных, объем которых измеряется уже петабайтами (ПБ). По некоторым оценкам в ближайшие годы скорость пополнения астроинформации составит 2—4 ПБ/год. В первую очередь это связано с космическими миссиями, завершившими свои исследования, или работающими сейчас, а также планируемыми к запуску. Они генерируют не только колоссальную по объемам, но и сложную по своей структуре и требующую новых принципов подхода к хранению и обработке совокупность данных. В то же время за более чем столетнюю историю наблюдений на наземных телескопах в обсерваториях мира накоплены огромные архивы данных, часто недоступные как в силу рассредоточенности и разрозненности астроинформации, так и отсутствия этого материала в оцифрованном виде в единой виртуальной среде. Задача эффективного использования этих данных требует применения и разработки нового поколения как аппаратных (компьютерные

мощности, накопители данных, каналы связи, сети и т. д.), так и программных (базы данных, интерфейсы, протоколы, приложения, стандарты, языки запросов, алгоритмы поиска и т. д.) средств. «Отсутствие этих ресурсов является «бутылочным горлышком» астрономии: данные есть, средств извлечения из них знаний нет» [3].

Научный потенциал объемных массивов данных космических миссий и наземных наблюдений не ограничивается узкоспециализированными задачами, ставившимися во время их подготовки, поскольку до последнего десятилетия не было технических возможностей для совокупного анализа разнородных наборов данных. При этом данные, полученные с помощью наземных телескопов, используются для постановки задач космических миссий, а данные, полученные в результате работы космических обсерваторий, используются в проектах для наземных телескопов. Новое качество современной астрономии состоит в том, что она стала «всеволновой», а в области использования и предложения новых информационных технологий — наукой, определяющей прогресс знаний. Современное состояние информационных технологий в астрономии предоставляет аппаратное обеспечение, способное справиться с совместной обработкой терабайтных объемов данных, — ком-

бинации наблюдений в радио-, инфракрасных, ультрафиолетовых, оптических, рентгеновских и гамма-диапазонах электромагнитного спектра, представленных прямыми изображениями, спектрами, таблицами и пр., увеличивая тем самым научный потенциал полученных и получаемых данных [4]. В связи с этим возникает закономерный интерес к оцифровке архивов астрономических данных прошлых лет, задающих дополнительный и важный временной вектор к спектрально-многовекторному полю астрономической информации.

Поэтому связь «**данные космических миссий — наземные наблюдения**» не является однонаправленной: совокупная обработка данных во всем спектре наблюдений в рамках решения конкретных задач позволяет выделить те участки астроинформации, для которых нет наблюдательных данных или они недостаточны, что дает возможность оптимально планировать будущие космические миссии, а также корректировать программы наблюдений наземных телескопов.

Приведем несколько примеров тесной взаимосвязи данных наземных и космических телескопов:

а) анализ фотометрических и спектральных наблюдений галактик, полученных с помощью наземных оптических и радиотелескопов как в результате мониторинга, так и для составления каталогов этих небесных объектов, в современной астрономии дополняется данными космических миссий в инфракрасном, рентгеновском и гамма-диапазоне, что важно для понимания формирования и эволюции этих небесных объектов;

б) факты обнаружения космическими обсерваториями, ведущими поиск гамма- и рентгеновских всплесков космических событий во Вселенной, в соответствии с принятым международным астрономическим сообществом «alert»- принципом должны немедленно сопровождаться поиском их оптических аналогов, что возможно только с учетом всех баз данных наземных наблюдений, полученных на протяжении длительных временных интервалов;

в) выполнение и постановка задач космических миссий по исследованию астероидов, в том числе тех, которые сближаются с Землей, невоз-

можны без использования всех накопленных за последнюю сотню лет наблюдательных данных, многие из которых все еще «похоронены» в обширных архивах фотографических и спектральных наблюдений;

г) осуществление таких масштабных космических миссий, как HIPPARCOS и планируемая «Gaia», было бы невозможно без использования массивов данных звездных каталогов, полученных на основе многолетних наземных наблюдений.

Сложность астроинформационного поля диктует новые современные подходы к решению задач по управлению и обработке этими гигантскими массивами данных. Виртуальная обсерватория, предлагающая средства решения этих задач, не может быть создана одной обсерваторией или даже страной. Виртуальная обсерватория является предложением международного астрономического сообщества по демократизации информации, которая ее средствами может быть сделана доступной, в том числе и смежным областям исследований, например для метеорологии, геофизики, астробиологии, космических наук, для установления новых взаимосвязей и обмена методами и технологиями научных исследований.

Общая концепция *астрономической виртуальной обсерватории (ВО)*, которая обсуждалась на Генеральных ассамблеях МАС, начиная с 2000 г. в Манчестере, направлена, с одной стороны, на создание прозрачной «бесшовной связи» [<http://www.ivoa.net/Documents/Notes/IVOA/IVOA-Participation-20060817.html>] между используемыми ресурсами интероперабельных астрономических данных различных организаций на национальном и международном уровнях, а с другой — на создание удобных средств хранения, управления, организации равноуровневого доступа к этим данным наряду с разработкой средств глубокого поиска научно значимой информации и проведения на их основе научных исследований. Организационная структура ВО направлена на то, чтобы обеспечить любому провайдеру астрономических данных средства их публикации и распространения в общей сети, каковой является ВО, путем использования реестров астрономических ресурсов и обширного перечня сервисов, решающих эти задачи [5].

Из целей и задач ВО вытекают несколько непреложных требований, согласия с которыми потребуется от любой организации, выразившей желание публиковать свои данные в рамках ВО. Основное из них — это использование стандартов, протоколов и форматов представления, хранения и передачи данных, разработанных международным астрономическим сообществом виртуальных обсерваторий [7]. Это требование гарантирует корректность и доступность публикуемых данных при совместном использовании их в различных программных продуктах ВО. Еще одним важным требованием является поддержка открытости данных и обмена данными и разрабатываемыми в рамках ВО программными средствами на некоммерческой основе, но с учетом проприетарных прав периода запуска новых проектов.

Создание национальных ВО, входящих в состав международного сообщества ВО, представленного международным Альянсом ВО (IVOA), возможно в случае наличия в стране-участнице крупных астрономических центров данных, особенно связанных с функционированием космических миссий, либо больших национальных астрономических проектов, поддерживаемых на государственном уровне. В IVOA [<http://www.ivoa.net>] в настоящий момент входят Австралия, Великобритания, Армения, Индия, Испания, Италия, Канада, Китай, Германия, Южная Корея, Россия, США, Венгрия, Франция, Япония, Бразилия и объединенная Европейская Виртуальная Обсерватория [6]. Отметим, что создание международной ВО является одним из самых важных проектов астрономического сообщества XXI ст.

Гигантские базы данных не под силу использовать одной отдельно взятой организации, такие возможности предоставляет международное сотрудничество и организация широкого доступа к накопленным данным. Одним из решений по управлению астроинформационными ресурсами стала разработка несколькими странами в рамках ВО архивов и баз данных, позволяющих формировать подвыборки данных согласно параметрам поставленных научных задач. Среди таких архивов можно назвать широко используемые SkyView, SIMBAD, NED и другие. Создание ВО является длительным процессом и требует

усилий как по упорядочению данных прошлых лет, так и разработки стандартов для архивации данных, которые будут получены в будущем. При этом уникальность средств ВО состоит в том, что появляется возможность одновременного использования данных миллионов небесных объектов во всех диапазонах электромагнитного излучения. Как следствие — новые перспективы комплексного исследования Вселенной и комплексного понимания астрофизических явлений.

Концепция ВО, основанная на использовании современных IT-технологий обработки, сохранения, анализа и управления, удаленного доступа и распространения данных, позволяет унифицировать петабайтные архивы информации в каждой стране с той целью, чтобы она не осталась утраченной для постановки новых научных задач.

## **МЕЖДУНАРОДНЫЙ АЛЬЯНС ВИРТУАЛЬНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ**

Идея создания ВО возникла в 1990-х годах в связи с тем, что на протяжении XX столетия во многих обсерваториях мира был накоплен огромный объем астрономической информации в результате фотографических, ПЗС- и спектральных наблюдений небесных объектов в широком диапазоне электромагнитного спектра с помощью наземных и космических телескопов. В конце 1990-х годов началась реализация трех международных проектов по развитию современных подходов к использованию астрономических данных и созданию ВО (Astrogrid, Великобритания, Астрофизическая виртуальная обсерватория, Европа и Национальная виртуальная обсерватория, США). Поскольку решаемые в данных проектах задачи оказались одинаковыми (стандарты данных и интерфейсов доступа, программное обеспечение и так далее), возникла необходимость определить общие цели и разработать общие пути для создания ВО с глобальными возможностями. Идея объединить усилия национальных проектов и создать международную ВО обсуждалась на XXIV Генеральной ассамблее Международного астрономического союза (Манчестер, август 2000 г.), а уже в июне 2002 г. на конференции в Гаршинге (ФРГ) был создан Международный альянс виртуальных обсерваторий



(IVOA, <http://www.ivoa.net>), взаимодействующих и согласовывающих решения на регулярной основе.

На текущий момент в IVOA принимают участие 17 ВО-членов, каждый из которых предоставил в свободном доступе свои архивы и базы данных в единых форматах IVOA и разрабатываемое для работы с ними программное обеспечение<sup>1</sup>.

Главной целью IVOA является координация международного сотрудничества для развития и использования инструментария, IT-систем и организационных структур, требующихся для полноценного применения астрономических архивов, интегрированных в ВО. IVOA определяет и регулярно обновляет так называемую «дорожную карту развития» инфраструктуры [13], необходимой для совместимости национальных ВО, обеспечивающую например, открытость ресурсов, модели данных, протоколы доступа к данным, сети и сетевые сервисы, безопасность, семантику, языки запросов, визуализацию данных и т.д. Сотрудничество IVOA осуществляется путем ежегодных международных встреч, семинаров, телеконференций по различным тематическим группам. Альянс тесно сотрудничает с IAU ([www.iau.org](http://www.iau.org)), в частности с Комиссией № 5.

<sup>1</sup> ArVO (Армянская Виртуальная Обсерватория, <http://arvo.sci.am>), Astrogrid (Виртуальная Обсерватория Великобритании, <http://www.astrogrid.org/>), AUS-VO (Австралийская Виртуальная Обсерватория, <http://aus-vo.org.au/>), BRAVO (Бразильская Виртуальная Обсерватория, <http://www.lna.br/bravo/>), CHINA-VO (Китайская Виртуальная Обсерватория, <http://www.china-vo.org>), CVO (Канадская Виртуальная Обсерватория, <http://www.cadc-ccda.hia-ihp.nrc-cnrc.gc.ca/cvo/>), EURO-VO (Европейская Виртуальная Обсерватория, <http://www.euro-vo.org/>), GAVO (Немецкая Астрофизическая Виртуальная Обсерватория, <http://www.g-vo.org/>), HVO (Венгерская Виртуальная Обсерватория, <http://hvo.elte.hu/en/>), IVO (Итальянская Виртуальная Обсерватория, <http://vobs.astro.it>), JVO (Японская Виртуальная Обсерватория, <http://jvo.nao.ac.jp/>), KVO (Корейская Виртуальная Обсерватория, <http://kvo.kasi.re.kr/>), NVO (Национальная Виртуальная Обсерватория США, <http://www.us-vo.org>), RVO (Российская Виртуальная Обсерватория, <http://www.inasan.rssi.ru/eng/rvo/>), SVO (Испанская Виртуальная Обсерватория, <http://svo.laeff.inta.es/>), VO India (Виртуальная Обсерватория Индии, <http://vo.iucaa.ernet.in/%7Evoi/>), Vo-France (Французская Виртуальная Обсерватория, <http://www.france-vo.org/>).

Условия членства в Альянсе:

- создание и дальнейшее развитие ВО на национальном уровне, в т. ч. принятие решения об организационных принципах национальной ВО на государственном уровне;
- поддержка полностью открытого обмена техническими средствами и совместное открытое пользование программным обеспечением;
- участие в определении и оценке стандартов ВО и протоколов;
- поддержка открытого доступа к астрономическим данным и информационным ресурсам на национальном и международном уровне;
- регистрация данных и информационных сервисов таким образом, чтобы они могли быть выявлены и использованы ВО других стран.

Таким образом, «по аналогии с астрономическими обсерваториями, предоставляющим исследователям телескопы с набором уникальных астрономических инструментов, виртуальная обсерватория концентрирует в себе данные различных астрономических центров, каждый с уникальными коллекциями астрономических данных, программного обеспечения и технологических возможностей» [[http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual\\_Observatory](http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_Observatory)].

## ОСНОВНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ КОНЦЕПЦИИ УКРВО

Концепция астрономических ВО на национальном и международном уровнях, предложенная IVOA и его членами, будучи разнообразной по научной, организационной и IT-составляющим, может, в первую очередь, быть обобщена для УкрВО как будущего члена IVOA, так и «персонифицирована» в связи с индивидуальными (в том числе уникальными) характеристиками архивов астроинформации, накопленной в астрономических обсерваториях Украины с 1890-х годов [11, 14, 15].

Целью УкрВО является:

- создание открытого электронного реестра украинских астрономических ресурсов в стандартах IVOA;
- создание объединенного электронного архива (ОЭА) данных фотографических, ПЗС- и спектральных наблюдений небесных объектов,

накопленных в обсерваториях Украины с 1890-х годов;

- создание информационной системы управления и доступа к реестру ресурсов и ОЭА, включающей средства администрирования реестра и взаимосвязанных/объединенных баз астрономических данных, поисковые интерфейсы для удаленных пользователей, онлайн-сервисы анализа и обработки данных, средства доступа к инструментам зарубежных ВО, средства обучения приемам работы с инструментарием ВО, обеспечение общеукраинской инфраструктуры передачи данных обсерваторий в сеть интернет и т. д.;

- паспортизация и визуализация ОЭА в стандартах IVOA, благодаря которым разрозненные архивы данных обсерваторий Украины получают гомогенное представление в УкрВО;

- организация широкого доступа к астроинформационным ресурсам УкрВО на национальном/международном уровнях;

- развитие украинских астрономических образовательных ресурсов.

Вместе с решением архиважной задачи сохранения уникального астрономического достояния обсерваторий Украины и обеспечения международному астрономическому сообществу доступа к нему, создание Украинской виртуальной обсерватории позволит ей в будущем действовать как национальный центр астрокосмических данных в международной структуре Альянса виртуальных обсерваторий (вхождение в IVOA планируется в 2010—2011 гг.) и решать научные задачи с применением ОЭА УкрВО [10, 12].

**Организационная составляющая УкрВО.** Начало научных астрономических исследований на территории современной Украины восходит ко второй половине XVIII века. Они велись в Астрономической обсерватории Львовского университета (1769 г.) и Киево-Могилянской академии, где был организован астрономический кабинет (1783 г.), хотя есть сведения, подтверждающие, что в Острожской академии уже в 1620-х годах велись первые телескопические наблюдения. В XIX веке для проведения постоянных астрономических исследований и наблюдений, а также для подготовки будущих астрономов были построены Морская (Николаевская) астрономи-

ческая обсерватория (1821 г.), астрономические обсерватории при Киевском (1845 г.), Одесском (1871 г.), Харьковском (1888 г.) университетах. В XX веке были созданы новые астрономические институты: Полтавская гравиметрическая обсерватория (1926 г.), Главная астрономическая обсерватория (1944 г.) высокогорная астрономическая обсерватория на п. Терскол (1980 г., сейчас — Международный центр астрономических и медико-экологических исследований), Радиоастрономический институт (1985 г.). Крымская астрофизическая обсерватория АН СССР (1944 г.), берущая свои истоки от Симеизской обсерватории (1908 г.). Астрономические кабинеты и обсерватории были построены также при педагогических институтах в Николаеве, Киеве, Виннице и др. [9, 16].

Наблюдения за небесными объектами в этих обсерваториях велись в XX веке на различных инструментах, в разные годы, в том числе в рамках широкого спектра научных программ и космических миссий, и имеют на сегодняшний день разную степень готовности предоставления данных в стандартах IVOA (в том числе долю паспортизованных от общего количества данных), что определяет многообразие и нынешнюю гетерогенную структуру астроинформационного ресурса УкрВО.

Резолюцией VIII съезда Украинской астрономической ассоциации (УАА) от 26 июня 2009 г. создание и развитие УкрВО было определено как приоритетное направление астрономических исследований в Украине в 2009—2012 гг., а для объединения усилий в создании УкрВО в качестве *организационной составляющей УкрВО* было решено создать *консорциум обсерваторий Украины* — собственников уникальных многолетних «архивных коллекций» наблюдений, составляющих национальное астрономическое достояние Украины. Вхождение обсерваторий в данный консорциум сугубо добровольно. Каждая из организаций берет на себя, руководствуясь целью и концепцией УкрВО, обязательство подготовить архивы наблюдений по форме, позволяющей представить их в общей структуре данных УкрВО. Для подготовки концепции и решения первоочередных задач УкрВО на съезде УАА

была создана рабочая группа, в состав которой вошли представители 12 организаций-членов консорциума УкрВО, а головной организацией УкрВО определена Главная астрономическая обсерватория НАН Украины [www.mao.kiev.ua/ukrvo].

**Предлагаемая организационная структура УкрВО — консорциум членов УкрВО:**

**НАН Украины** (3 института): Главная астрономическая обсерватория (г. Киев), Международный центр астрономических и медико-экологических исследований (г. Киев, п. Терскол, Кабардино-Балкария, Россия), Радиоастрономический институт (г. Харьков).

**Государственный комитет по науке, инновациям и информатизации** (1 институт): НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» (г. Николаев).

**Министерство образования и науки** (7 институтов): Астрономическая обсерватория Киевского национального университета имени Тараса Шевченка (г. Киев), Астрономическая обсерватория Львовского национального университета имени Ивана Франко (г. Львов), Астрономическая обсерватория Николаевского государственного педагогического университета (г. Николаев), Институт астрономии Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина (г. Харьков), Лаборатория космических исследований Ужгородского национального университета (г. Ужгород), НИИ «Астрономическая обсерватория» Одесского национального университета имени И. И. Мечникова (г. Одесса), НИИ «Крымская астрофизическая обсерватория» (п. Научный, АР Крым),

**а также** Андрушевская народная обсерватория (с. Андрушевка Житомирской обл).

**Научно-астроинформационная составляющая УкрВО.** В настоящее время ядром научного астроинформационного ресурса УкрВО является создаваемый объединенный электронный архив астрономических данных, полученный в обсерваториях Украины по наблюдениям различных небесных объектов в оптическом, УФ-, радио- и гамма-диапазоне электромагнитного спектра, и информационная система управления доступом к данным. Помимо этого, базовой составляющей станет информация о каталогах и базах данных небесных объектов, созданных в обсерватори-

ях Украины [11], о монографиях и учебниках по астрономической и смежной тематикам, написанных астрономами Украины, а также о статьях, опубликованных в научных журналах, издаваемых обсерваториями Украины за все годы их существования. Последнее обстоятельство является достаточно важным в силу того, что многолетняя база данных статей в астрономических журналах Украины слабо представлена в международной информационной библиосреде (ADS, SIMBAD, NED и др.), что, в свою очередь, свидетельствует о том, что информация, касающаяся наблюдений небесных объектов и описанная в статьях, не вошедших в международную базу данных, вообще неизвестна астрономическому сообществу [2].

Концептуальное наполнение научно-астроинформационной составляющей УкрВО следующее:

- *объединенный архив данных фотографических наблюдений небесных объектов*, сохраненных в стеклянных архивах (стеклотеках) обсерваторий Украины с 1890 г. по 1990-е годы;

- *объединенный архив ПЗС-наблюдений небесных объектов* (с начала 1990-х гг.);

- *объединенный архив спектральных наблюдений небесных объектов* (в оптическом, УФ-, радио- и гамма-диапазонах, начатых с 1940-х гг.);

- *архив данных космических миссий*, в постановке и обработке результатов которых принимали участие обсерватории Украины;

- *каталоги и базы данных*, созданные в обсерваториях Украины с момента начала их деятельности;

- *научно-образовательный ресурс*, созданный астрономами Украины — библиографическая информация (монографии и учебники, а также статьи, опубликованные во всех журналах Украины, издаваемых обсерваториями за время их деятельности; онлайн-лекции и семинары, наблюдения небесных объектов при помощи интернет-телескопов и т. п.;

- *ИТ-поддержка* — сайт УкрВО (в дальнейшем — портал УкрВО как национальный модуль в рамках IVOA), обеспечивающий доступ к ОЭА УкрВО, содержащий соответствующее программное обеспечение УкрВО (интерфейс пользователя, протоколы обмена данными и форматы данных в форматах и стандартах IVOA, грид-банки данных УкрВО с ВО-инструментами пакетов

обработки и анализа этих данных), — создание портала УкрВО должно подразумевать также организацию интерфейса доступа ко всем международным базам данных и каталогам, программному обеспечению обработки и анализа данных, разработанному международным астрономическим сообществом для широкого использования профессиональными астрономами и любителями.

Краткая информация об объединенном архиве астрономических данных УкрВО представлена в таблице.

### УКРВО: ЗАДАЧИ НА 2010—2015 ГГ.

Основные задачи, которые планируется решить в 2010—2015 гг., таковы.

- Создание электронного реестра астрономических ресурсов Украины и обеспечение его информацией о каталогах и базах данных, созданных в обсерваториях Украины со времени начала их деятельности.

- Создание веб-сайта и портала УкрВО, реализующие цели и задачи УкрВО; разработка и размещение в открытом доступе форматов представления данных для публикации их в рамках УкрВО.

- Инвентаризация современного состояния архивов фотографических, ПЗС- и спектральных наблюдений, сосредоточенных в обсерваториях Украины, предоставление институтам-членам УкрВО рекомендаций для паспортизации архивов в стандартах IVOA.

- Паспортизация архивов ПЗС- и спектральных наблюдений, накопленных в астрономических учреждениях Украины.

- Создание необходимого программного обеспечения для объединенного электронного архива (ОЭА) астронегативов на основе пакетов DVGPA V2 [8], разработанного в ГАО НАН Украины, и ВО-программного пакета, разработанного в Николаевской астрономической обсерватории, и имплементирование его для создания электронных архивов ВО — членов консорциума УкрВО [1].

- Создание ОЭА астронегативов и ПЗС-наблюдений астрономических обсерваторий Украины общим объемом до 20 Тб (в первую очередь той части фотографических наблюдений 1890—1945 гг., которая представляет историческую ценность).

- Отработка на базе ГАО НАН Украины и Николаевской АО методов совместного управления

### Объединенный архив астронегативов УкрВО, полученных в 1890—1945 гг.

Обсерватория	Количество пластинок	Годы	Наблюдательные программы	Основные результаты
ГАО НАНУ	85 000	1949—1992	Галактики, QSO, ФОН, МЕГА, переменные звезды, рассеянные скопления, фундаментальные звезды, кометы, малые планеты, ИСЗ	Более 26 000 прямых снимков; $m_{pg} = 11...16^m$ ; оцифрованы 1000 полноформатных кадров и 1500 превью; онлайн доступ к архиву
АО, Николаев	8 000 16 660 CCD	1929—1931; 1961—1999 1986—2006	Звездные скопления, зодиакальные звезды, малые планеты, кометы	Доступ к архиву — онлайн и ВО-средствами; оцифровка архива — 2700 превью
КрАО		1938—1965; 1984	Галактики, звезды, кометы, малые планеты, газовые туманности	Хранятся в формате dBASE III+; $m_{pg} = 16...18^m$ ; $m_V = 12...14^m$ ;
АО КНУ	> 20 000	1895—1916 1945—1996	Фундаментальные звезды, рассеянные скопления, QSO	Оцифрованы пластинки 1895—1945 гг.
АО ЛНУ	8 000	1939—1976	Кометы, малые планеты, переменные звезды	6000 прямых изображений
АО ОНУ	10 000 10 000 84 000	1909—1954 1945—1956 1957—1998	Переменные звезды, кометы, малые планеты, ИСЗ, QSO	80 % прямых изображений (RA: 0...24 <sup>h</sup> , DEC: -15°...+90°)
Ужгород СС ИСЗ	5 000	1957—2010	ИСЗ	

мультитерабайтными массивами данных, в том числе расположенными на разных вычислительных ресурсах, с целью формализации требований (форматов хранения и обмена данными) для включения в ОЭА информационных ресурсов других организаций;

- Создание собственных онлайн-сервисов для удаленных пользователей: онлайн-сервисы каталогов, построения звездных карт, первичной обработки оцифрованных изображений и т. д. на базе ОЭА;

- Проведение научных исследований с использованием ОЭА УкрВО, в том числе начатых в предшествующие годы (поиск оптических аналогов в направлении гамма-вспышек, поиск астероидов, изучение спутников далеких планет, исследования переменных звезд, создание звездных каталогов в избранных участках и пр.);

- Разработка программы использования GRID-технологий для задач УкрВО по мере развития украинского сегмента GRID и подключения к нему новых кластеров с целью распараллеливания выполнения массивных запросов к базам данных и ускорения их обработки.

## ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены цели, задачи и структурные компоненты УкрВО главным достоянием которой является ее научно-информационный ресурс:

- около 250 тыс. астрономических фотографических пластинок, полученных с помощью оптических телескопов, представляющих собой гигантский по объему наблюдательный материал, чаще всего обработанный частично или не обработанный вообще, а также ПЗС-наблюдения небесных объектов;

- спектральные наблюдения в радио-, оптическом и гамма-диапазонах: результаты спектральных наблюдений небесных объектов в Солнечной системе и внегалактических источников, в частности полученные в декаметровом и сантиметровом диапазоне длин волн;

- иные ресурсы, которые потенциально могут быть включены в объединенный архив: лазерно-интерферометрические наблюдения, наблюдения в рамках образовательных программ на Ки-

евском интернет-телескопе, каталоги небесных объектов, базы данных, публикации и т. д.

Объемы и качество этих данных, будучи опубликованными в открытом доступе и снабженными инструментами научного анализа в рамках национальной ВО, обеспечивают им право быть включенными в функционирующую всемирную систему астрономического знания.

В июне 2009 г. на съезде Украинской астрономической ассоциации (УАА) в г. Киеве создание Украинской виртуальной обсерватории было признано приоритным направлением современного развития астрономии в Украине. Тогда же была создана рабочая группа в составе представителей организаций — региональных членов УкрВО по подготовке концепции УкрВО и разработки стандартов ВО: С. М. Андриевский, И. Л. Андронов, Н. И. Бондарь, И. Б. Вавилова (председатель), Н. В. Вирун, В. П. Епишев, Ю. Н. Иващенко, Л. В. Казанцева, Л. К. Пакуляк, Ю. И. Процюк, Т. П. Сергеева, А. В. Сергеев, И. М. Хейфец, А. А. Шляпников, представители Института астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина согласовывают свое участие в УкрВО. Также создана техническая группа для разработки стандартов и программного обеспечения УкрВО, в которую вошли представители обсерваторий, уже начавших развитие у себя виртуальных технологий и создание электронных архивов: И. Б. Вавилова, А. Э. Мажаев, Л. К. Пакуляк, Ю. И. Процюк, Т. П. Сергеева, А. А. Шляпников.

В 2010 г. работа по созданию УкрВО была частично поддержана грантом УАА «Створення бази даних астронегативів УкрВО», где, в частности, предусмотрена организация передвижного УкрВО-сканера для проведения работ по оцифровке архивов астронегативов в обсерваториях Украины. Работа по созданию УкрВО поддерживается бюджетными программами научных исследований в обсерваториях Украины — членах консорциума УкрВО, а также в рамках договора о сотрудничестве между ГАО НАН Украины и НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория».

На очереди стоит проведение работ по включению объединенных фотографических архивов обсерваторий в составе УкрВО в перечень объектов национального достояния Украины, поскольку

ку по количественному составу эти архивы занимают третье место в мире, а по своему качеству представляют ценность не только для Украины.

Проведенные и планируемые подготовительные работы (определение задач и состава УкрВО, разработка стандартов хранения и представления информации, создание астрономических архивов, баз данных и прототипа сайта УкрВО) являются необходимым условием для вхождения Украины в состав Международного альянса виртуальных обсерваторий в 2010 — 2011 гг.

*Авторы благодарят членов рабочей группы за обсуждение концепции УкрВО и работу по подготовке информации для размещения в УкрВО.*

1. *Мажжаев А. Э., Протюк Ю. И.* Астрономические базы данных как фундамент виртуальной обсерватории // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулковке. — 2009. — № 219, вып. 4. — С. 185—188.
2. *Шляпников А. А.* Проект «ЛАДАН»: концепция локального архива данных наблюдений НИИ КрАО // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории. — 2007. — **103**. — С. 142—153.
3. *Carvalho R. R., Gal R. R., Campos Velho H. F., et al.* The Brazilian Virtual Observatory — A New Paradigm for Astronomy // J. Comput. Interdisciplinary Sci. — 2010. — **1**, N 3. — P. 187—206.
4. *D'Abrusco R., Longo G., Walton N. A.* Quasar candidates selection in the Virtual Observatory // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2009. — **396**, N 1. — P. 223—262.
5. *Djorgovski S.G., Williams R.* Virtual observatory: From concept to implementation // ASP Conf. Ser. — 2005. — **345**. — P. 517—530. — (ArXiv:astro-ph/0504006v, Apr.1, 2005).
6. *Dluzhnevskaya O.B., Malkov O. Yu.* The Russian virtual observatory project // Astron. Reports. — 2005. — **49**, N 12. — P. 1028—1032.
7. *Egret D., Genova F.* Interoperability tools for the virtual observatory // Proc. SPIE. — 2001. — astro-ph/0109275.
8. *Pakulyak L. K.* MAO of NANU glass archive database search and management tools // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. — 2005. — N 5. — P. 573.
9. *Pavlenko Ya. V., Vavilova I. B., Kostiuk T.* Astronomy in Ukraine // Organizations & strategies in astronomy. — Springer-Verlag, 2006. — Vol. 7. — P. 121—146.
10. *Pinigin G., Protsyuk Yu., Shulga A.* Cooperation for common use of SEE astronomical database as a regional virtual observatory in different scientific projects // Rom. Astron. J. — 2005. — **15**, Suppl. — P. 51—56.
11. *Protsyuk Yu., Mazhaev A.* Astronomical databases of the Nikolaev Observatory // A Giant Step: From Milli- to Micro-arcsecond Astrometry: Proc. of IAU Symp. N 248, Shanghai, China, 15—19 Oct. 2007. — P. 548—551.
12. *Protsyuk Yu. I., Mazhaev A. E., Shulga A. A.* Development of the database of Nikolaev Astronomical Observatory as a unit of the International Virtual Observatory // Abstract Book of the IAU XXVIth General Assembly. — 2006. — P. 452.
13. *Quinn P. J., Barnes D. J., Csabai L., et al.* The International Virtual Observatory Alliance: recent technical developments and the road ahead // Proc. SPIE. — 2004. — **5493**. — P. 137—145. — (Optimizing Scientific Return for Astronomy through Information Technologies / Eds P. J. Quinn, A. Bridger).
14. *Sergeeva T. P., Sergeev A. V., Pakulyak L. K., et al.* Wide field plate archive of MAO NAS of Ukraine: electronic plate collection // Baltic Astron. — **13**, N 4. — 2004. — P. 677—682.
15. *Vavilova I. B.* National Ukrainian Virtual Observatory (UkrVO). Conception // Methods and instruments in astronomy: from Galileo to space projects: Abstract book of the Int. conference, Mykolaiv, May 17—20, 2010. — Mykolaiv, 2010. — P. 68—72.
16. *Vavilova I. B., Yatskiv Ya. S.* Astronomy in Ukraine: overview of the situation and strategic planning for 2004—2011 // Кинематика и физика небес. тел. — 2003. — **19**, № 6. — С. 569—573.

*Надійшла до редакції 05.08.10*

*I. B. Vavilova, L. K. Pakulyak, Yu. I. Protsyuk*

#### UKRAINIAN VIRTUAL OBSERVATORY (UKRVO). THE GOALS, STRUCTURE, AND TASKS

The main points of the conception of the Ukrainian astronomical virtual observatory (UkrVO) are presented. We consider the goal of the creation of the UkrVo and its organizational structure in the form of the Consortium of the Ukrainian observatories which are owners of the unique astronomical data collections. The place and role of virtual observatories in the «space mission data — ground-based telescopes» relation are discussed. We describe the main components of the scientific astroinformatic resource of the UkrVO, among which are photographic archives (including the unique historical archives from 1890 to 1945), archives of CCD and spectral observations of celestial bodies, catalogues and databases obtained with ground-based telescopes, and space mission data processed at Ukrainian observatories. We determine the primary problems in the creation of the UkrVO as the national center of astronomical and space data in the IVOA frame. The resolution of the problems demands new approaches to IT-support of the UkrVO and to the development of its educational subsystem.

УДК 521.95, 523.44, 521.61

Е. С. Козырев, Е. С. Сибирякова, А. В. Шульга

Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ АСТРОМЕТРИЧЕСКОЙ РЕДУКЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА НАБЛЮДЕНИЙ НЕБЕСНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Описано комбінований метод спостережень небесних об'єктів та модифікована модель редуції спостережень (ММРС). Наведено методи, використані для оцінки точності координат, отриманих за допомогою ММРС. Представлено оцінку точності спостережень АЗЗ, що наближувалися до Землі на відстані 0.009—0.045 а.е.*

### ВВЕДЕНИЕ

Комбинированный метод наблюдений (КМН) был разработан в НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория» (НИИ НАО) [2] для наблюдений объектов с эфемеридной скоростью более 10"/мин. К ним относятся космические объекты (КО) искусственного происхождения и астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), включая потенциально опасные для Земли (ПОА) [2]. Для объектов искусственного происхождения эфемеридные скорости составляют от 4"/с на геосинхронных орбитах (36000 км) до 2"/с на низких орбитах (<2500 км), для АСЗ эфемеридные скорости составляют до 10"/с. Суть КМН состоит в том, что изображения наблюдаемого объекта и опорных звезд формируются раздельно, в разных режимах работы ПЗС-камеры или с разным временем экспозиции. Использование изображений опорных звезд и объекта, полученных в разные моменты времени, делает невозможным применение классических моделей определения редуцированных постоянных [1], что потребовало разработки в НИИ НАО модифицированной модели редукиции наблюдений (ММРН) ПЗС-изображений.

В работе представлена модифицированная модель редукиции наблюдений ПЗС изображений, приведена оценка точности наблюдений.

Также была вычислена систематическая поправка для наблюдений КО, где изображения опорных звезд и объекта были получены в разных режимах работы ПЗС-камеры.

### ИНСТРУМЕНТ И МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ

В НИИ НАО наблюдения объектов с высокой эфемеридной скоростью проводятся на скоростном автоматическом комплексе [2]. Телескоп с параллактической монтировкой оснащен объективом системы Максудова ( $D = 30$  см,  $F = 1.5$  м) и ПЗС-камерой «Alta U9000» (3056 × 3056 пкл, 12 × 12 мкм). Поле зрения телескопа 83.2 × 83.2', масштаб без бинирования — 1.63"/пкл, с двойным бинированием — 3.27"/пкл. ПЗС-камера поддерживает два режима работы — режим накопления заряда и режим синхронного переноса заряда (РСПЗ) (time delay integration). В классическом применении РСПЗ экспозиция не изменяется, т. е. объект должен пройти через все поле зрения телескопа. Часто такая экспозиция не требуется, поэтому в НИИ НАО была разработана методика использования РСПЗ с изменяемой экспозицией — режим укороченного переноса заряда. Режим укороченного переноса заряда [4] заключается в том, что во время накопления изображения камера работает в РСПЗ, и после завершения экспозиции происходит считывание сигнала с ПЗС-матрицы с максимальной скоростью. Телескоп оснащен поворотной платформой [3, 4] — устройством, поворачивающим

ПЗС-камеру вокруг оси объектива. Поворотная платформа, поворачивая ПЗС-камеру, располагает столбцы ПЗС-матрицы вдоль направления движения наблюдаемого объекта. Использование поворотной платформы позволяет применять режим синхронного переноса заряда для наблюдений объектов с любым направлением движения. Привязка по времени осуществляется по синхрометру службы времени с точностью  $10^{-4}$  с. Наблюдения проводятся в автоматическом режиме.

При наблюдениях для получения изображений АСЗ используется режим укороченного переноса заряда [4]. Эффективная экспозиция рассчитывается автоматически с учетом эфемеридной скорости, углового размера поля и времени считывания кадров. Так как угол поворота ПЗС-матрицы близок к направлению суточного движения звезд, то для получения изображений опорных звезд тоже применяется режим укороченного переноса заряда, но с меньшей экспозицией. Для изображений опорных звезд экспозиция составляет 10–15 с.

При наблюдениях КО для получения изображений опорных звезд применяется режим накопления с экспозицией 0.5 с, для получения изображений КО применяется режим укороченного переноса заряда, экспозиция рассчитывается так же, как и для АСЗ.

Угол поворота ПЗС-камеры относительно небесного экватора при наблюдениях АСЗ и КО рассчитывается по формуле

$$\beta = \arctg(v_{\delta} / v_{\tau}), \quad (1)$$

где  $\beta$  — угол поворота,  $v_{\tau}$  — видимая угловая скорость по прямому восхождению,  $v_{\delta}$  — видимая угловая скорость по склонению.

При использовании КМН выполняются следующие процедуры.

1. Наведение телескопа по предварительно рассчитанным эфемеридам.
2. Поворот ПЗС-камеры по направлению движения объекта с использованием поворотной платформы.
3. Запись изображения с опорными звездами.
4. Запись одного или нескольких изображений наблюдаемого объекта.
5. Запись изображения с опорными звездами.

Во время наблюдения телескоп остается неподвижным. Наблюдения КО проводятся с двойным бинированием для повышения проникающей способности. Запись изображений АСЗ производится без бинирования для получения высокой точности.

## МОДИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ РЕДУКЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ

Обработка данных, полученных с использованием КМН, включает четыре этапа:

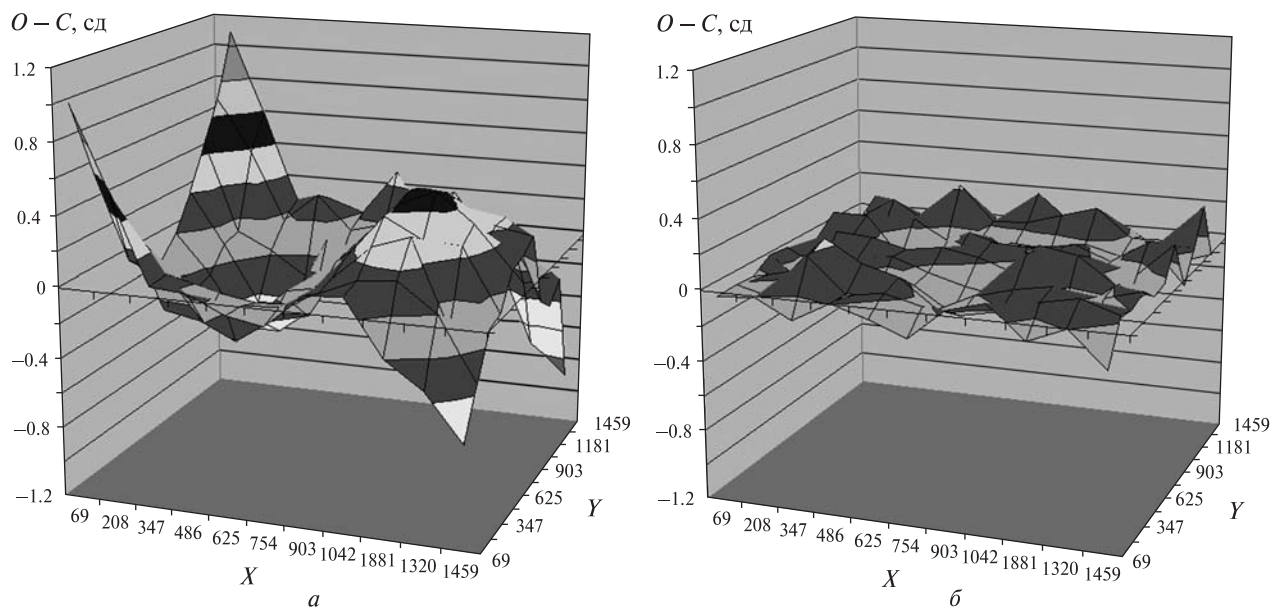
- 1) первичная обработка изображений (фильтрация);
- 2) вычисление прямоугольных координат объектов в системе ПЗС-матрицы, отождествление опорных звезд и расчет редуцированных постоянных;
- 3) пересчет редуцированных постоянных и экваториальных координат центра изображения на время наблюдения объекта;
- 4) вычисление экваториальных координат наблюдаемого объекта с учетом систематических поправок.

Первичная обработка изображений заключается в постолбцовом и построчном выравнивании фона изображения.

Прямоугольные координаты опорных звезд в системе ПЗС-матрицы определяются с использованием аппроксимации симметричным распределением Гаусса. Задача перехода от прямоугольных координат в системе матрицы к экваториальным решается путем введения идеальных координат  $\xi$ ,  $\eta$ . Переход от прямоугольных координат в системе матрицы к идеальным осуществляется с помощью кубической модели редукции. Опорные звезды отождествляются в системе каталога UCAC2.

Для выбора модели редукции наблюдений, выполненных с применением КМН, проведены исследования влияния модели редукции на значение  $O - C$  для опорных звезд. На телескопе САК были проведены наблюдения 10 кадров в режиме накопления заряда с экспозицией 0.5 с. Далее с применением линейной, квадратичной и кубической моделей редукции были получены экваториальные координаты звезд и разности  $O - C$  с каталогом UCAC2. Используя результаты вычислений, по каждому кадру построены трех-





**Рис. 1.** Распределение  $O - C$  по полю ПЗС-матрицы: *a* — для линейной модели редукции, *b* — для кубической модели редукции. Соседние градации серого соответствуют различию на 0.2 сд (секунд дуги)

мерные распределения  $O - C$  по прямоугольным координатам. Для линейной и квадратичной моделей редукции была выявлена неравномерность распределений  $O - C$  по прямому восхождению и склонению (рис. 1, *a*). Кубическая модель редукции позволила получать равномерное распределение  $O - C$  по полю ПЗС-матрицы (рис. 1, *b*).

Неравномерное распределение  $O - C$  вызвано несовершенством оптической системы. Как видно из рис. 1, *a*, изображение искажено дисторсией и кривизной поля. Использование кубической модели редукции наблюдений позволяет убрать влияние искажений оптической системы.

Использование кубической модели редукции также позволило улучшить среднее квадратичное отклонение (СКО) положений опорных звезд. Для различных моделей редукции СКО положений приведены в табл. 1. Использование кубической модели редукции позволяет улучшить точность определения положений звезд в 1.4 раза.

Учитывая то, что при использовании КМН изображения опорных звезд и наблюдаемого объекта получают в разные моменты времени,

необходимо найти редукционные постоянные кадра с изображением объекта. Первым этапом является вычисление редукционных постоянных кадров опорных звезд, записанных до и после кадра с изображением объекта. Для этого составляется система кубических уравнений, которая решается методом наименьших квадратов. Для вычисления редукционных постоянных кадра с изображением объекта проводится линейная интерполяция редукционных постоянных и экваториальных координат центров ПЗС-кадров с изображением опорных звезд на момент времени наблюдения объекта. Далее, используя редукционные постоянные кадра с

**Таблица 1.** Значение средних квадратичных отклонений положений опорных звезд для разных моделей редукции

Модель редукции	СКО <sub><math>\alpha</math></sub>	СКО <sub><math>\delta</math></sub>
<i>Наблюдения без бинирования</i>		
Линейная, квадратичная	0.33"	0.32"
Кубическая	0.24"	0.22"
<i>Наблюдения с двойным бинированием</i>		
Линейная, квадратичная	0.39"	0.37"
Кубическая	0.29"	0.27"

объектом и прямоугольные координаты объекта, определяются экваториальные координаты наблюдаемого объекта. Выбор линейной интерполяции обусловлен тем, что при применении квадратичной коэффициенты второй степени несут незначительную погрешность, и в конечном итоге квадратичная интерполяция не повышает точность вычислений.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ МОДЕЛИ РЕДУКЦИИ НАБЛЮДЕНИЙ

Оценка точности ММРН при использовании КМН проводилась тремя способами:

1) проведение тестовых наблюдений звезд в разных режимах работы ПЗС-камеры и с разным временем экспозиции;

2) сравнение экваториальных координат АСЗ с эфемеридой, рассчитанной программой Horizons [<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>] на моменты времени наблюдений;

3) сравнение координат навигационных ИСЗ, оснащенных уголковыми отражателями, с эфемеридой ILRS.

**Проведение тестовых наблюдений звезд.** Тестовые наблюдения звезд с применением КМН проводились в положении поворотной платформы, соответствующей направлению суточного движения звезд, при этом последовательность режимов работы ПЗС-камеры и экспозиций имитировала этапы наблюдения АСЗ или КО.

Проведены тестовые наблюдения с использованием разных экспозиций как при наблюдениях АСЗ (режим укороченного переноса заряда («полоса») с экспозицией 15 с для опорных звезд и режим укороченного переноса заряда («полоса») с экспозицией, соответствующей наблюде-

нию АСЗ). Экваториальные координаты звезд на «полосах», имитирующих наблюдения АСЗ, были получены как классическим методом редукции, так и ММРН. Проведено сравнение координат, полученных двумя методами редукции. Сравнение не показало систематической разности по обеим координатам. Случайная ошибка одного наблюдения звезд 9—14<sup>м</sup> составляла  $\pm 0.3''$ , что соответствует случайной ошибке классической редукции опорных звезд с использованием программы «Astrometrica» [<http://www.astrometrica.at/>].

Также были проведены тестовые наблюдения с чередованием режимов работы ПЗС-камеры, как при наблюдениях КО (режим накопления («кадр») с экспозицией 0.5 с для опорных звезд и режим укороченного переноса заряда («полоса») с экспозицией, соответствующей наблюдению КО). Экваториальные координаты звезд на «полосах», имитирующих наблюдения КО, были получены как классическим методом редукции, так и ММРН. Сравнение показало наличие систематической разности по прямому восхождению, которая составила  $1.1'' \text{sec} \delta$ . По склонению систематической разности не обнаружено. Тестовые наблюдения проводились сериями по семь «кадров»/«полос» для склонений от  $-20^\circ$  до  $+60^\circ$  с шагом  $20^\circ$ , для часовых углов от  $-30^\circ$  до  $+60^\circ$  с шагом  $30^\circ$  и разного бинирования.

В случае применения одинаковых режимов работы ПЗС-камеры для записи изображений опорных звезд и объектов систематической ошибки не выявлено. Учитывая вышесказанное, можно предположить, что причиной систематической ошибки в прямом восхождении при наблюдениях в разных режимах работы ПЗС-камеры является различие в регистрации време-

Таблица 2. Сравнения координат АСЗ, полученных в НИИ НАО, с эфемеридой

Номер АСЗ	Скорость, "/мин		Звездная величина	Расстояние до Земли, а. е.	Количество кадров	Среднее $O - C$ , град		СКО $O - C$ , град	
	$\alpha$	$\delta$				$\alpha$	$\delta$	$\alpha$	$\delta$
2005RC34	6.5	21.1	14.4	0.037	179	-0.109	-0.117	0.416	0.315
2008TT26	28.8	-36.0	14.7	0.010	75	0.037	0.008	0.410	0.230
2008SV11	15.0	-19.4	12.8	0.045	22	-0.248	-0.183	0.267	0.152
2005YU55	-61.2	21.5	15.3	0.016	29	0.028	-0.095	0.229	0.259
2010JO33	68.3	4.6	15.9	0.009	29	0.102	-0.201	0.377	0.264

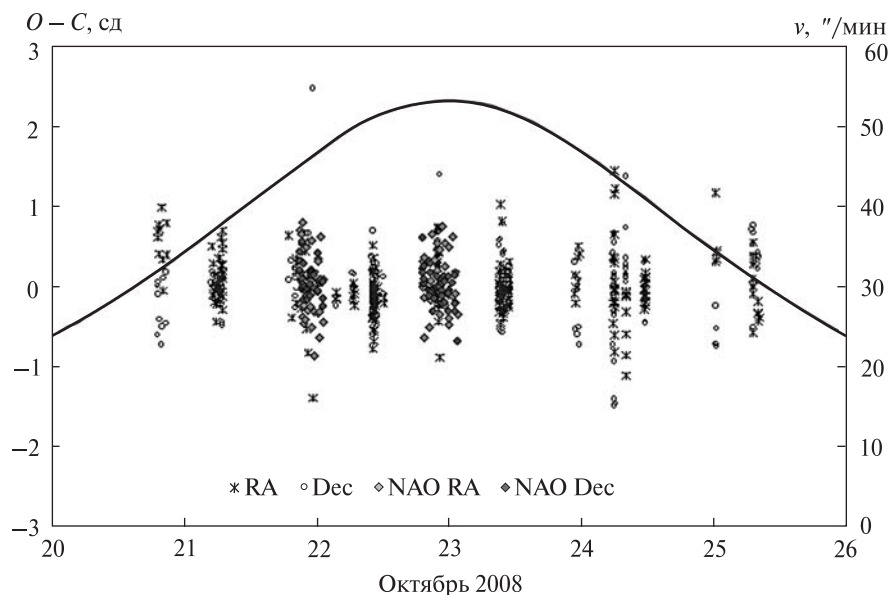


Рис. 2. Значения  $O - C$  для АСЗ 2008ТТ26 (октябрь 2008 г.)

ни изображения. Полученная систематическая ошибка учитывается на этапе вычисления экваториальных координат КО.

**Сравнение координат АСЗ.** В 2008—2010 гг. на телескопе САК проводились наблюдения АСЗ на расстояниях 0.009 — 0.045 а. е. от Земли. Для наблюдений АСЗ и опорных звезд применяется режим укороченного переноса заряда. На основе этих наблюдений было проведено сравнение экваториальных координат, полученных из наблюдений с применением КМН и ММРН, с эфемеридами, рассчитанными программой Horizons [<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>]. Результаты сравнения приведены в табл. 2.

Результаты, представленные в табл. 2, в систематическом и случайном отношении соответствуют точности наблюдений других обсерваторий, участвующих в программе астероидно-кометной опасности NEODys. Как пример, для АСЗ 2008ТТ26 на момент сближения с Землей с сайта NEODys [<http://newton.dm.unipi.it/neodys/>] были получены результаты наблюдений разных обсерваторий [<http://newton.dm.unipi.it/neodys/index.php?pc=1.1.7.1&n=2008TT26&ab=1>]. Наблюдения проводились с 21 по 23 октября 2008 г., в период времени, когда АСЗ 2008ТТ26 находился на расстоянии порядка 0.0091 — 0.0103 а. е. от Земли. Сравнения значений  $O - C$  для

наблюдений НИИ НАО и других обсерваторий представлены на рис. 2. Линией представлено значение эфемеридной скорости АСЗ 2008ТТ26 в наблюдаемый период.

**Сравнение координат навигационных ИСЗ.** Для проверки точности учета систематической поправки в случае наблюдения опорных звезд и объектов в разных режимах работы ПЗС-камеры (объект — режим укороченного переноса заряда; опорные звезды — режим накопления), проведено сравнение полученных координат навигационных ИСЗ с эфемеридой ILRS. Наблюдения проводились в течении трех ночей, получено 141 положение пяти навигационных ИСЗ. Среднее значение  $O - C$  для наблюдений ИСЗ без учета систематической поправки составило 6.6" (СКО = 21.4") по прямому восхождению и 18.9" (СКО = 22.9") по склонению. С учетом систематической поправки среднее значение  $O - C$  составило 0.05" (СКО = 0.5") и 0.04" (СКО = 0.6") соответственно. На рис. 3 представлены значения  $O - C$  для ИСЗ «Глонасс-102» до (рис. 3, а) и после (рис 3, б) учета систематической поправки в прямом восхождении. Среднее значение  $O - C$  для ИСЗ «Глонасс-102» для наблюдений ИСЗ без учета систематической поправки составило 15.11" по прямому восхождению и 15.21" по склонению (СКО = 19.98" и 16.21").

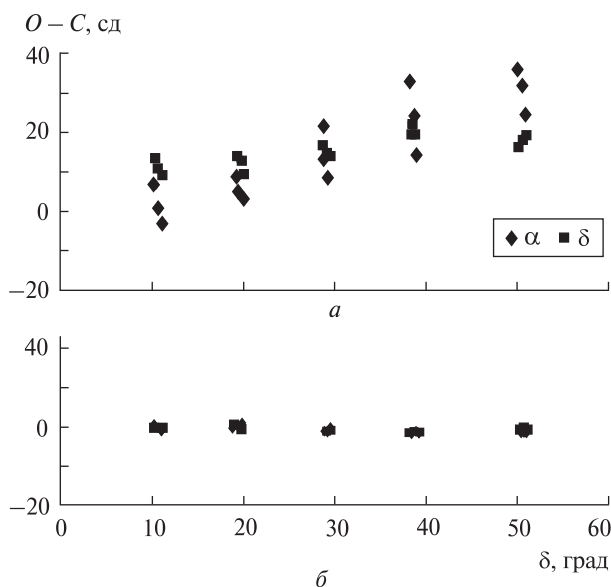


Рис. 3. Значения  $O - C$  для ИСЗ «Глонасс-102»:  $a$  — без учета систематической поправки,  $b$  — с учетом систематической поправки

Значения  $O - C$ , полученные без учета систематической поправки, соответствуют значению видимой скорости навигационных ИСЗ на момент наблюдений. После учета систематической ошибки среднее значение  $O - C$  составило  $0.04''$  и  $0.09''$  соответственно, при СКО по прямому восхождению  $0.27''$  и  $0.30''$  по склонению, что подтверждает правильность определения и учета систематической поправки.

## ВЫВОДЫ

Разработана модифицированная модель редукции постоянных ПЗС-изображений, обеспечивающая астрометрическую обработку наблюдений, полученных комбинированным методом. Разработан и опробован способ определения систематических поправок при наблюдениях комбинированным методом с режимами работы ПЗС камеры «полоса» — «полоса» и «кадр» — «полоса». При использовании одинаковых режимов работы ПЗС-камеры с разными экспозициями систематической ошибки не выявлено. Получена систематическая поправка в  $1.1''$ secδ в прямом восхождении при использовании разных режимов работы ПЗС-камеры. Проведено

сравнение экваториальных координат навигационных ИСЗ с эфемеридой IIRS с учетом и без учета систематической ошибки. Сравнение показало улучшение значений  $O - C$ , что подтверждает правильность определения систематической поправки. Полученная систематическая поправка учитывается на этапе вычисления экваториальных координат КО. ММРН применён для редукции наблюдений АСЗ, которые наблюдались комбинированным методом на расстояниях от Земли менее  $0.05$  а. е. Точность полученных координат соответствует мировому уровню точности для такого рода наблюдений.

Авторы благодарны И. В. Каре за предоставленное программное обеспечение для сравнения наблюдений ИСЗ с эфемеридой IIRS.

1. Дума Д. П. Загальна астрометрія: Навчальний посібник. — Київ: Наук. думка, 2007. — 600 с.
2. Ковальчук А. Н., Пинигин Г. И., Шульга А. В. Скоростной автоматический комплекс для регистрации небесных объектов естественного и искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве // Околоземная астрономия и проблемы изучения малых тел Солнечной системы. — Москва: ИНАСАН, 2000. — С. 361—371.
3. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Применение поворотной платформы для наблюдений объектов околоземного пространства комбинированным методом // Околоземная астрономия 2007: Сб. тр. конф. — Нальчик, 2008. — С. 288—292.
4. Kozryev Y., Shulga O., Sibiryakova Y. Observation of fast NEA objects with prolonged exposure // A Giant Step: From Milli- to Micro-arcsecond Astrometry: Proc. of IAU Symposium N 248, China, 15—19 Oct. — Shanghai, 2007. — P. 128—129.

Надійшла до редакції 13.07.10

Y. S. Kozryev, Y. S. Sibiryakova, O. V. Shulga

## ESTIMATION OF ASTROMETRIC REDUCTION ACCURACY FOR THE COMBINED METHOD OF CELESTIAL OBJECT OBSERVATIONS

The combined method for observations and the modified model of observation reduction are described. We present the methods for the estimation of the coordinate accuracy of coordinates which were obtained with the use of the modified model of observation reduction. The accuracy of observations of the NEOs during their approaches to the Earth for distances from  $0.009$  to  $0.045$  AU is estimated.

УДК 524.7+524.8

**Н. Г. Чеснок**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ

## **ЗАГАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИБІРКИ ІЗОЛЬОВАНИХ ГАЛАКТИК, ЩО МІСТЯТЬ АКТИВНІ ЯДРА**

---

*Досліджено загальні властивості 62 ізольованих галактик, що містять активні ядра, відібраних з каталогу 2MIG і каталогу Veron+2010, та приведено основні характеристики розподілу цих об'єктів. Запропонована нами вибірка може бути включена до наукової програми досліджень КА «Радіоастрон».*

---

### **ВСТУП**

Метою Каталогу 2MIG (2MASS Isolated Galaxies) [10] було створення нового каталогу ізольованих галактик на основі переваг фотометрично однорідного огляду 2MASS, який охоплює все небо. До складу каталогу 2MIG увійшло 3227 галактик (середня променева швидкість 6470 км/с). В результаті крос-кореляційного аналізу 3227 ізольованих галактик каталогу 2MIG та 169000 галактик каталогу Veron+2010, було отримано вибірку 62 ізольованих галактик, що містять активні ядра (2.2 % від загальної кількості галактик каталогу 2MIG). Метою роботи є дослідження фізичних властивостей галактик цієї вибірки та пошук основних характеристик розподілу цих об'єктів. Дані про галактики, що містять активні ядра (АЯГ), з цієї вибірки отримані за допомогою наземних і космічних телескопів.

Зважаючи на особливий інтерес до вивчення АЯГ, запропонована нами вибірка ізольованих 62 АЯГ близького Всесвіту, тобто таких, що не мали гравітаційного впливу оточення упродовж 1-2 млрд років, може бути включена до наукової програми досліджень КА «Радіоастрон», що планується до запуску у 2010 р.

Однією з основних відмінностей між нормальними галактиками та галактиками з активними ядрами вважається наявність у ядерних областях цих галактик великої кількості пилу та газу. Під дією гравітаційного поля надмасивного цент-

рального об'єкта (найбільш ймовірно, надмасивної чорної діри) з цієї речовини утворюється акреційний диск, з якого відбувається падіння речовини на чорну діру. За рахунок в'язкого тертя у диску виділяється величезна кількість випромінювання з максимумом у УФ-діапазоні. Вивчення властивостей ізольованих АЯГ дозволяє оцінити вплив оточення на формування акреційного диску, характеристики випромінювання, морфологію та інші властивості АЯГ.

У більшості випадків основна увага приділяється дослідженню властивостей ядер АЯГ [5]. Це пов'язано з надмірною потужністю випромінювання їхніх ядер в усіх діапазонах електромагнітного спектру. Менше уваги надається дослідженням батьківських галактик АЯГ та їхньому оточенню. Зокрема в роботі [17] показано, що для спіральних галактик більш ранніх типів, ніж Sc, характерна надмірна активність ядер, а для галактик морфологічних типів пізніших, ніж Sc, властивий вищий темп зореутворення [6]. Вважається, що галактики з високим темпом зореутворення або активністю ядра часто перебувають у гравітаційній взаємодії [13, 14]. Було знайдено, що при порівнянні вмісту АЯГ або галактик з підвищеним темпом зореутворення, що належать до компактних груп Хіксона, та тих, що належать до навколишнього середовища, їхній вміст практично однаковий [18]. Тобто, лише гравітаційна взаємодія з навколишніми галактиками не може пояснювати активність їхніх ядер. Тому створення і дослідження однорідної вибірки ізольованих АЯГ є актуальною задачею,

що дозволить виявити ті властивості АЯГ, на формування яких не впливало оточення.

Одним із результатів сучасних досліджень великомасштабної структури Всесвіту є висновок, що близько 50 % галактик містяться у малонаселених групах, 25 % — у розріджених хмарах, 5—10 % у щільних віріалізованих скупченнях галактик, стільки ж — у їхньому невіріалізованому оточенні, і 5—10 % галактик — у загальному міжгалактичному середовищі. При цьому частка, яку у цьому розподілі займають істинно ізольовані галактики, залишається невідомою. Увага до досліджень ізольованих галактик пояснюється тим, що ізольовані галактики не зазнавали гравітаційного впливу сусідніх систем; їхній розвиток визначається лише початковими умовами при утворенні та фізичними процесами, що відбуваються в цих галактиках. Вибірка ізольованих галактик необхідна для перевірки моделей формування та еволюції галактик, а також як опорна вибірка при вивченні властивостей галактик у парах, групах, скупченнях — для розуміння впливу оточення на морфологію, вміст газу та пилу, хімічний склад галактик тощо.

### ВИБІРКА ІЗОЛЬОВАНИХ ГАЛАКТИК, ЩО МІСТЯТЬ АКТИВНІ ЯДРА

Для створення вибірки та дослідження властивостей ізольованих АЯГ нами було використано каталог ізольованих галактик 2MIG [10], каталог АЯГ Veron+2010 [23], а також бази даних NED [<http://nedwww.ipac.caltech.edu/>] та HYPERLEDA [<http://leda.univ-lyon1.fr>]. Параметри ізольованих АЯГ визначено за спостереженнями наземних телескопів та космічних місій (Hubble Space Telescope, Chandra, ROSAT та ін.).

**Каталог 2MIG.** При складанні каталогу 2MIG використовувався фотометрично однорідний огляд 2MASS [<http://www.ipac.caltech.edu/2mass/>] (1640000 об'єктів), котрий охоплює північну та південну півкулі. Головною перевагою огляду у близькому ІЧ-діапазоні є його слабка залежність від галактичного поглинання, а недоліком — слабка чутливість до об'єктів низької яскравості. За критерій ізольованості при складанні каталогу 2MIG взято емпіричне співвідношення [10]

$$X_{1i} / a_i \geq s = 30, \quad 4 \geq a_i / a_1 \geq 1/4,$$

де  $a_1$  — кутовий діаметр «ізольованої» галактики,  $a_i$  — кутовий діаметр  $i$ -ї сусідньої галактики,  $X_{1i}$  — кутова відстань від фіксованої галактики до  $i$ -ї сусідньої галактики.

Було прийнято обмеження на значення зоряної величини  $K_s$  та кутового діаметра  $a_K$ :

$$4.0^m < K_s \leq 12.0^m, \quad a_K \geq 30'' ,$$

де  $a_K \equiv 2r_{20fe}$  — ізофотний  $K$ -діаметр,  $K_s \equiv K_{20fe}$ .

У каталозі 2MIG міститься 3227 об'єктів. Ефективна глибина каталогу 2MIG  $z = 0.02$ , а максимальне значення  $z \approx 0.8$ .

**Каталог Veron+2010.** Перша версія каталогу активних ядер галактик і квазарів нараховувала 202 об'єкти (1971 р.). Найновіша 13-та версія каталогу нараховує 130843 квазарів, 36724 АЯГ (серед яких 17446 галактик Сейферта типу 1s) та 1374 об'єкти типу BL Lac [23].

При складанні каталогу Veron+2010 було прийнято визначення квазара як зореподібного об'єкта або об'єкта з зореподібним ядром, широкими емісійними лініями у спектрі та з абсолютною зоряною величиною  $M_B < -23^m$ . Для кожного об'єкта у каталозі приведено значення видимої зоряної величини у смузі  $B$ .

Як АЯГ-об'єкти до каталогу Veron+2010 увійшли галактики Сейферта типу 1s та 2s, об'єкти LINERS з абсолютною зоряною величиною  $M_B > -23^m$  та галактики з областями H II (використано класифікацію галактик Сейферта, введено Вінклером у 1992 р. [24]). Ефективна глибина каталогу Veron+2010  $z = 0.2$ , а максимальне значення  $z \approx 5.8$  (рис. 1).

**Вибірка ізольованих АЯГ.** Для побудови вибірки ізольованих АЯГ ми виконали крос-кореляційний аналіз об'єктів каталогу 2MIG [10] з об'єктами останньої версії каталогу Veron+2010 [23].

Для приведення вибірки ізольованих АЯГ до однакової глибини каталогів по  $z$  при умові  $z < 0.8$  для каталогу Veron+2010 ми відібрали 33803 із 36724 АЯГ, 13573 із 130843 квазарів та 670 із 1374 об'єктів типу BL Lac. Вивчення крос-кореляції галактик каталогів 2MIG і Veron+2010 дало можливість сформувати вибірку із 69 ізольованих АЯГ та одного квазара (NGC 0157). Після додаткового дослідження спектральних характеристик отриманої вибірки було виявлено, що вісім галактик (NGC 0625, PGC 86000,

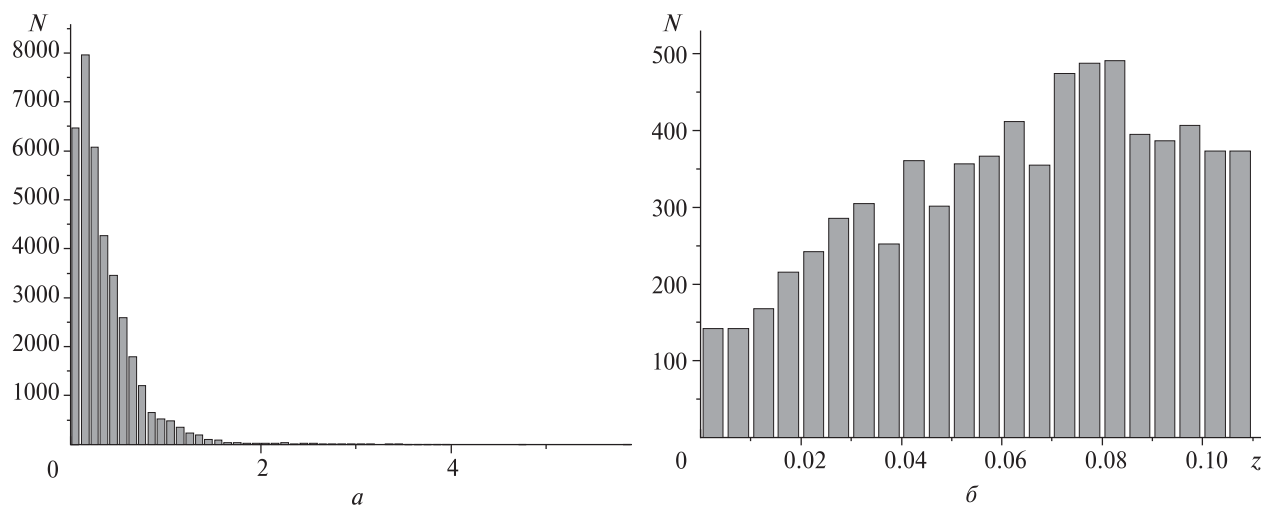


Рис. 1. Розподіл АЯГ каталогу Veron+2010 по значенню  $z$  (а) та розподіл АЯГ каталогу Veron+2010, приведенного до тієї ж глибини, що і каталог 2MIG, по значенню  $z$  (б)

NGC 2718, NGC 2989, NGC 3353, NGC 4152, NGC 4385, NGC 0157) не містять активних ядер. Їхня активність пов'язана з зореутворенням. У табл. 1 приведено основні характеристики галактик досліджуваної вибірки за даними каталогів 2MIG, Veron+2010 та баз даних NED та LEDA. Приведено порядковий номер та ім'я об'єкта у каталозі 2MIG (зірочкою позначено об'єкти, що не були виявлені в радіодіапазоні з каталогу Veron+2010); екваторіальні координати  $\alpha$ ,  $\delta$  з каталогу 2MIG на епоху J2000.0; велика піввісь  $r$  еліпса, що відповідає ізофоті  $K = 20^m/\text{сд}^2$ , а також зоряна величина  $K_s$  всередині цього еліпса; безрозмірна «відстань»  $2s = X_{ij}/r_i$  між ізольованою галактикою та її найближчим значимим сусідом; морфологічний тип  $T$  за цифровою шкалою де Вокулора; червоне зміщення  $z$ ; абсолютна зоряна величина  $M_B$  галактики; видима зоряна величина  $V$ ; кількість  $N$  значимих сусідів ізольованої галактики з каталогу 2MIG; відстань  $L$  до галактики, обчислена за світністю (у дужках — відстань  $L'$ , обчислена методами, що не залежать від  $z$ ); велика та мала півосі ( $a$ ,  $b$ ); спектральний тип  $Sp$ ; відношення осей  $b/a$ ; надлишок кольору  $E(B-V)$  у зоряних величинах.

Характеристики деяких об'єктів приведено нижче.

**NGC 6951.** Незважаючи на активність у ядрі, цей об'єкт є звичайною галактикою з баром типу

Sbc. Особливостями цієї галактики можна вважати низький темп зореутворення та наявність вузького, добре визначеного кільця на відстані  $5''$  від центра. Морфологія та властивості внутрішнього регіону можуть бути результатом падіння газу, спричиненого нестабільністю у барі. Знайдено аргументи на користь того, що активність ядер ізольованих галактик спричинена тим самим механізмом, тобто зв'язана з наявністю бару [15]. За даними спостережень маса атомарного газу складає  $M_{\text{H I}} = 7.85 \cdot 10^9 M_{\odot}$  [22], тобто близько 6 % усієї маси галактики. Згідно з оцінкою вмісту молекулярного газу в роботі [12] його маса складає  $M(\text{H}_2) \approx 1.2 \cdot 10^9 M_{\odot}$ . Відношення  $M_{\text{gas}}/L_B = 0.35$  відповідає середньому значенню цього параметра для галактик типу Sbc ( $0.39 \pm 0.03$  [28]).

**NGC 7479** класифікується як спіральна галактика з двома рукавами типу SB(s)c, з сильними признаками асиметрії у всіх компонентах: балджі, диску, барі та спіральних рукавах. Високий темп зореутворення було визначено за даними спостережень в далекому інфрачервоному діапазоні та в лінії  $\text{H}_{\alpha}$  [16]. За спектральними лініями в оптичному діапазоні NGC 7479 класифікується як LINER [11]. В роботі [25] вказано на багато особливостей морфологічної структури NGC 7479. Бар та спіральний рукав у північній частині масивніші, ніж у південній. Рукав у північній

Таблиця 1. Вибірка ізольованих АЯГ

№ 2MIG	Ім'я	$\alpha_{2000}$	$\delta_{2000}$	$r$	$K_s$	$2s$	$T$	$z$	$M_B$	$V$	$N$	$L(L')$ , Мпк	$a$	$b$	$Sp$	$b/a$	$E(B-V)$
9	IC1529	00 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup> 13.22 <sup>s</sup>	-11°30'09.3"	21.9	10.37 <sup>m</sup>	113.2	0	0.023	-21.4 <sup>m</sup>	14.3 <sup>m</sup>	2	89.5	1.7 <sup>m</sup>	1.6 <sup>m</sup>	-	0.94	0.035 <sup>m</sup>
35	IC0009	00 19 44.00	-14 07 18.4	15.3	11.36	87.33	3	0.042	-21.6	15.42	1	173	0.4	0.3	Sy2	0.75	0.031
223	NGC0773	01 58 52.01	-11 30 52.6	31.3	10.03	75.1	1	0.018	-21.2	14		71.9	1.3	0.7	LINER?	0.54	0.029
243	UGC01597	02 06 16.00	-00 17 29.2	20.8	10.66	61.25	0	0.043	-21	15.52		176	1	0.5	Sy1	0.50	0.028
267	UGC01757	02 17 23.07	38 24 49.9	28.6	10.27	74.94	3	0.02	-20.7	13.84		69.8	0.8	0.2	Sy2	0.25	0.057
287	NGC0918	02 25 50.22	18 29 56.1	73.1	9.06	69.58	5	0.005	-16.4	15.01		17.3 (18.4)	3.5	2.0	AGN	0.57	0.344
320	NGC1050	02 42 35.57	34 45 48.4	37	9.81	85.42	1	0.013	-21	13.5		51.1	1.4	1.1	Sy2	0.79	0.062
* 415	ESO116-018	03 24 53.04	-60 44 18.1	21.9	10.49	73.28	0	0.018	-22.5	12.7		76.6	1.4	0.3	Sy2	0.21	0.074
* 417	MCG-02-09-040	03 25 04.94	-12 18 28.5	21.7	10.66	67.49	0	0.015	-19.7	14.15	2	60.2	0.9	0.3	Sy2	0.33	0.089
447	FCCB1658	03 43 26.52	-31 44 38.2	16.6	11.73	69.5	4	0.032	-21.5	14.9		135	0.7	0.4	Sy2	0.57	0.009
479	PGC89963	03 56 00.88	-13 42 32.7	18.7	11.71	62.08	4	0.03	-20.3	16		122			Sy2		0.054
488	UGC02936	04 02 48.25	01 57 56.6	74.7	8.99	89.84	5	0.013	-19.5	15		51.2 (46.8)	2.5	0.7	Sy2	0.28	0.452
500	ESO483-009	04 07 42.51	-22 42 54.9	22.1	10.94	73.02	0	0.032	-21.3	15.1		135	1.5	0.6	LINER?	0.40	0.049
598	ESO551-024	04 39 11.84	-21 20 51.7	21	10.19	68.96	1	0.031	-21.4	15	1	130	1.2	0.4	LINER?	0.33	0.032
705	ESO553-042	05 25 02.38	-20 27 01.5	17.3	11.14	93.47	1	0.045	-22.2	15		190	1.4	0.8	LINER?	0.57	0.058
749	ESO306-025	05 45 51.09	-39 29 39.2	16.4	11.29	61.56	1	0.025	-21	14.9		102	1.0	0.7	Sy2	0.70	0.051
895	PGC86000	06 50 30.94	-19 59 26.7	16.2	11.33	66.35	4	0.026	-19.9	016.2					Sy1.8		
* 1018	ESO208-034	07 43 31.71	-51 40 56.7	31.4	10.31	73.11	2	0.025	-20.5	15.35	1	109	1.0	0.4	Sy2	0.40	0.299
* 1086	IC2227	08 07 07.17	36 14 00.1	17	10.85	61.65	0	0.032	-21.3	14.21	2	139	0.9	0.5	Sy2	0.56	0.052
1126	CGCG179-005	08 25 10.24	37 59 20.2	16.5	11.74	69.58	3	0.021	-17.1	17.41		91.2	0.7	0.2	Sy2	0.29	0.040
1345	NGC3035	09 51 55.02	-06 49 22.5	32	9.97	60.05	3	0.015	-21.3	13.5		65.3	1.6	1.4	Sy1.8	0.88	0.075
1363	NGC3081	09 59 29.53	-22 49 34.3	54.3	9.06	106.1	0	0.007	-18.7	13.55		37.7 (32.5)	2.1	1.6	Sy2	0.76	0.055
1384	ESO499-041	10 05 55.37	-23 03 25.1	17.1	10.54	78.94	0	0.012	-19.8	14.5		57.8	1.0	0.5	Sy1n	0.50	0.058
1442	ESO317-038	10 29 45.61	-38 20 54.7	33	10.33	82.27	1	0.015	-20.3	14.5		67.4	1.3	0.4	AGN	0.31	0.072
* 1454	MCG-02-27-009	10 35 27.35	-14 07 47.6	38.8	10.18	86.78	1	0.015	-20.4	14.33		67.	1.9	0.5	Sy2	0.26	0.069
* 1516	ESO215-014	10 59 19.09	-51 26 32.9	29.3	11.31	66.11	5	0.019	-19.5	15.8		83	1.0	0.7	Sy1	0.70	0.364
* 1522	UGC06087	11 00 32.50	02 06 57.3	26.6	11.45	67.32	3	0.039	-21.6	14.4		173	0.9	0.7	Sy1	0.78	0.043
1550	ESO438-009	11 10 47.97	-28 30 03.9	15.1	10.64	70.77	2	0.024	-21.1	14.17	2	105	1.0	0.7	Sy1	0.70	0.062
* 1571	UGC06398	11 23 11.44	29 35 53.9	30.1	11.19	101.1	6	0.047	-21.3	14.81		206	1.3	0.3	Sy2	0.23	0.016
1573	PGC35009	11 24 02.75	-28 23 15.5	17	11.42	78.23	3	0.014	-21.6	13					Sy2		



1589	ESO571-003	11 28 59.56	-22 28 59.1	25.8	10.75	108.1	0	0.027	-21.5	14.6	3	120	1.1	0.9	AGN	0.82	0.038
* 1607	2MASX	11 36 42.05	-60 03 07.0	22.7	10.87	80.2	1	0.014							Sy2/LINER		
* 1633	UGC06769	11 47 43.69	01 49 34.3	18.1	11.33	109.8	3	0.029	-17.9	17.18		125	1.2	0.6	Sy2	0.50	0.030
* 1646	CGCG243-024	11 53 41.76	46 12 42.6	15.2	11.84	70.66	3	0.024	-19.6	15.45		106	0.6	0.6	SyIn	1.00	0.029
1709	ESO506-004	12 21 49.04	-24 10 05.6	54.4	9.25	99.74	2	0.013	-21.9	12.6	1	60.5 (65.4)	2.1	1.1	LINER?	0.52	0.077
1724	NGC4395	12 25 48.92	33 32 48.2	37.6	11.1	70.01	9	0.001	-18.1	10.27		8.03 (4.1)	13	11	Sy1.8	0.85	0.017
1873	NGC5231	13 35 48.25	02 59 55.6	20.7	10.37	63.11	2	0.022	-18.5	16.17		95.2	1.1	1.0	Sy1	0.91	0.024
1878	PGC170278	13 37 35.04	-21 12 58.6	15.8	11.65	64.58	2	0.052	-22.2	15.26	1	228	0.7	0.4	Sy2	0.57	0.085
1914	MCG-03-35-020	13 53 08.20	-16 57 37.1	31	10.57	86	3	0.021	-20.5	15	1	91.6	1.0	0.2	LINER?	0.20	0.080
1915	NGC5347	13 53 17.85	33 29 26.7	41.3	9.82	60.02	2	0.008	-19.9	12.7		35.1 (36.7)	1.7	1.3	Sy2	0.76	0.021
1950	ESO097-013	14 13 09.90	-65 20 20.4	59.5	5.04	156.2	2	0.001	-16.8	12.1		8.01 (4.205)	6.9	3.0	SyIn,Sy2	0.43	1.455
1981	MCG-02-37-004	14 26 12.28	-11 54 16.3	20.2	11.38	93.23	3	0.041	-22	15	1	180	0.5	0.4	Sy2	0.80	0.085
1989	PGC989455	14 29 33.27	-09 33 40.5	18.9	11.1	63.26	1	0.043	-21.6	15.5		185	0.9	0.5	LINER?	0.56	0.064
1998	NGC5664	14 33 43.60	-14 37 10.9	24.8	10.29	72.57	1	0.015	-20.3	14.52	2	66.4	0.6	0.3	Sy2	0.50	0.079
2018	CGCG248-019	14 43 31.25	49 23 35.3	18.1	11.26	62.29	3	0.03	-20.8	14.61		128	0.7	0.6	Sy1	0.86	0.029
2067	MCG+09-25-022	15 07 45.04	51 27 09.6	21.1	11.26	78.51	3	0.042	-19.2	16.95		197	0.9	0.3	Sy1	0.33	0.024
2139	NGC5968	15 39 57.15	-30 33 10.0	51.4	8.84	144.7	4	0.018	-19.7	14.32		78	2.1	1.9	LINER?	0.90	0.125
2140	ESO583-002	15 40 20.48	-18 26 33.5	22.1	11.04	80.39	4	0.023	-20.2	15.5		101 (88.1)	1.4	1.0	Sy1	0.71	0.117
2183	UGC10120	15 59 09.67	35 01 47.3	22.9	11.18	70.53	3	0.032	-20.7	15.06		133	0.8	0.7	SyIn	0.88	0.025
* 2202	UGC10244	16 09 55.47	43 07 44.3	26.1	10.88	73.7	4	0.033	-20.5	14.92		138 (161.5)	1.1	0.2	Sy3,LINER	0.18	0.015
* 2357	UGC10774	17 14 09.07	58 49 06.7	17.3	11.59	99.3	3	0.03	-16.9	18.34		125	0.9	0.5	Sy,NLAGN	0.56	0.029
2363	NGC6300	17 16 59.47	-62 49 13.9	16.8	7.01	80.05	3	0.003	-17.1	13.08		15.7 (15.06)	4.5	3.0	Sy2	0.67	0.097
2509	PGC206329	18 27 09.10	-35 03 10.5	16	11.75	73	8	0.047	-22.6	R14.1					LINER?		
2570	PGC86291	18 51 59.48	11 52 33.7	44	8.97	111.8	3	0.009	-18.7	15		33.7	2.0	1.6	Sy1	0.80	0.576
2811	NGC6951	20 37 14.07	66 06 20.3	15.6	7.36	84.94	3	0.006	-17.7	14.04		17.4 (22.64)	3.9	3.2	Sy2	0.82	0.366
3051	MCG-0257008	22 29 55.37	-08 16 45.5	25.4	10.86	87.49	4	0.035	-22	14.6		144	0.8	0.8	AGN	1.00	0.059
3107	2MFGC17245	22 55 59.94	-12 22 11.7	20.8	11.25	68.04	3	0.026	-20.5	15.5	1	101			AGN	0.037	
3110	UGC12282	22 58 55.28	40 55 55.9	57.8	9.11	83.23	1	0.017	-20.3	14.7		66.4	1.9	0.5	Sy1.9	0.26	0.142
3118	NGC7479	23 04 56.66	12 19 22.3	87.9	8.36	139.2	4	0.007	-18.2	13.88		27.7 (33.85)	4.1	3.1	Sy1.9	0.76	0.112
* 3128	IC5287	23 09 20.28	00 45 23.0	22.8	11.2	75.36	4	0.032	-18.3	17.08		132	1	0.7	Sy1.2	0.70	0.040
3166	IC1495	23 30 47.73	-13 29 07.6	26.8	10.55	75.71	3	0.021	-22.5	13		84.1	1.3	1.0	Sy2	0.77	0.030
* 3194	NGC7749	23 45 47.55	-29 31 04.1	33.2	10.17	68.73	0	0.035	-22.8	13.82		142	1.6	1.1	LINER?	0.69	0.019

Примітка: Зірочкою позначено об'єкти, що не були виявлені в радіодіапазоні з каталогу Veron+2010

частині розділяється на три менші частини. Вздовж бару розташовані численні регіони зореутворення [1]. Маса галактики NGC 7479 визначена як сума трьох складових:  $M_{tot} = 1.03 \cdot 10^{11} M_{\odot}$ ,  $M_{bulge} = 5.92 \cdot 10^9 M_{\odot}$ ,  $M_{disk} = 8.28 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ ,  $M_{bar} = 1.41 \cdot 10^{10} M_{\odot}$  [25].

**NGC 3081.** Галактика NGC 3081 має класичний ранній спіральний тип та найбільше відрізняється за морфологією серед загальної популяції галактик. Галактика має чотири кільця: ядерне, внутрішнє та два зовнішніх. У кожному кільці відбувається активне зореутворення, у той час як між кільцями зореутворення не спостерігається або воно слабке [4]. Згідно з даними [3] виникнення кілець пов'язано з орбітними резонансами у площині диску галактик з баром, де газ збирається за рахунок гравітаційного кутового моменту бару. В результаті  $n$ -тілого моделювання на основі спостережних даних за допомогою космічного телескопу Габбла в роботі [4] показано, що внутрішнє газове кільце сформовано за рахунок збурень бару, що обертається в області скупчення азимутальних хмар, де кільце перетинає головну вісь бару. Поверхнева густина диску склала  $13 M_{\odot} \text{пк}^{-2}$  на відстані 7 кпк від центра та  $19 M_{\odot} \text{пк}^{-2}$  на відстані 13 кпк від центра [4].

**NGC 4395.** Ядро карликової галактики NGC 4395 має найменшу світність серед усіх відомих об'єктів такого типу, у 100 разів меншу, ніж світність інших галактик Сейферта [21]. Головною особливістю в оптичному та ультрафіолетовому діапазонах є наявність у спектрах широких емісійних ліній. В рентгенівському діапазоні це компактний об'єкт з сильною спектральною змінністю [9, 19, 20], в радіодіапазоні NGC 4395 також є компактным об'єктом з високою температурою [7, 8, 26], хоча формально вважається радіотихим об'єктом [7]. Спектральний енергетичний розподіл від рентгенівського до радіодіапазону такий, як і в усіх галактиках Сейферта 1-го типу [20]. В роботах [21, 27] було визначено масу центральної чорної діри в NGC 4395  $M_{BH} = (3.6 \pm 1.1) \cdot 10^5 M_{\odot}$ . Це проміжний діапазон мас між надмасивними чорними дірами в АЯГ та масивними залишками наднових, що були знайдені у подвійних системах [20]. Маса центральної чорної діри галактики NGC 4395 наймен-

ша серед обчислених на даний момент для АЯГ; темп акреції на ядро цієї галактики дуже низький [21].

**NGC 6300.** Спектр ядра галактики NGC 6300 в жорсткому рентгенівському діапазоні описується степеневим законом та свідчить про поглинання у комптонівському тонкому диску, яке характерне для галактик Сейферта 2-го типу. В роботі [2] знайдено швидку змінність з характерним часовим масштабом близько 1000 с в діапазоні 2 кеВ. На основі дослідження змінності випромінювання в рентгенівському діапазоні NGC 6300 зроблено висновок, що маса центральної чорної діри та властивості акреції типові для галактик Сейферта 1-го типу. Тобто, ядро галактики NGC 6300 «затемнене» речовиною. Цей результат підтверджує уніфіковану схему, розроблену на основі спостережень. Маса центральної чорної діри  $M_{BH} \approx 2.8 \cdot 10^5 M_{\odot}$ , болометрична світність  $L = 3.3 \cdot 10^{36} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}$  [2].

### ПОРІВНЯННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІЗОЛЬОВАНИХ АЯГ ТА ІЗОЛЬОВАНИХ ГАЛАКТИК З КАТАЛОГУ 2MIG

Із усіх галактик нашої вибірки 16 не ототожнено як радіоджерела, а 46 ототожнено як радіоджерела (26 та 74 % від загальної кількості ізольованих АЯГ). У каталозі Veron+2010 30698 галактик не ототожнено як радіоджерела та 6026 ототожнено як радіоджерела (84 та 16 %); серед галактик у діапазоні червоних зміщень  $z < 0.2$  — відповідно 75 та 25 %. Більша доля галактик, які було ототожнено з радіоджерелами для вибірки ізольованих АЯГ, ніж для каталогу Veron+2010, може пояснюватись тим, що об'єкти каталогу Veron+2010 з  $z > 0.2$  не були дослідженими в радіодіапазоні.

На рис. 2 подано розподіл ізольованих АЯГ за спектральними типами. Відповідно до класифікації, введеної Уїдменом та Хачікяном у 1970-х рр., у спектрах галактик Сейферта 1-го типу є вузькі та широкі лінії, а у спектрах галактик Сейферта 2-го типу — лише вузькі. До того як було відкрито проміжні типи галактик Сейферта, ця класифікація пояснювалась за допомогою уніфікованої схеми, згідно з якою спектральний тип галактики Сейферта залежить від кута, під яким

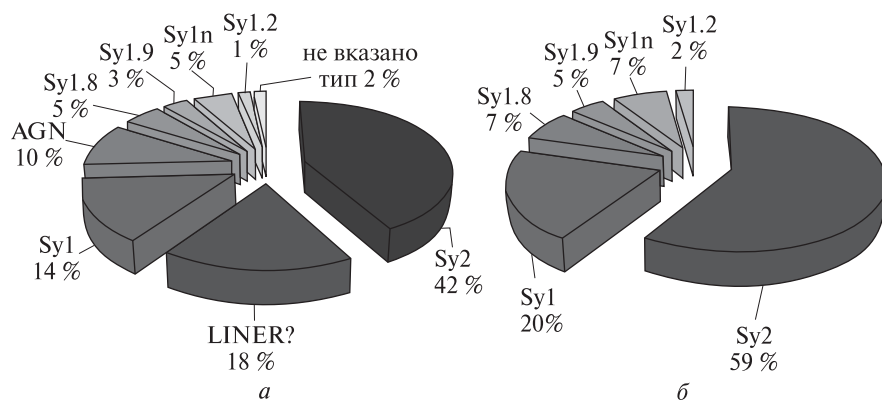


Рис. 2. Розподіл за спектральними типами: *a* — вибірки 62 ізольованих АЯГ, *б* — 44 галактик Сейферта з вибірки ізольованих АЯГ

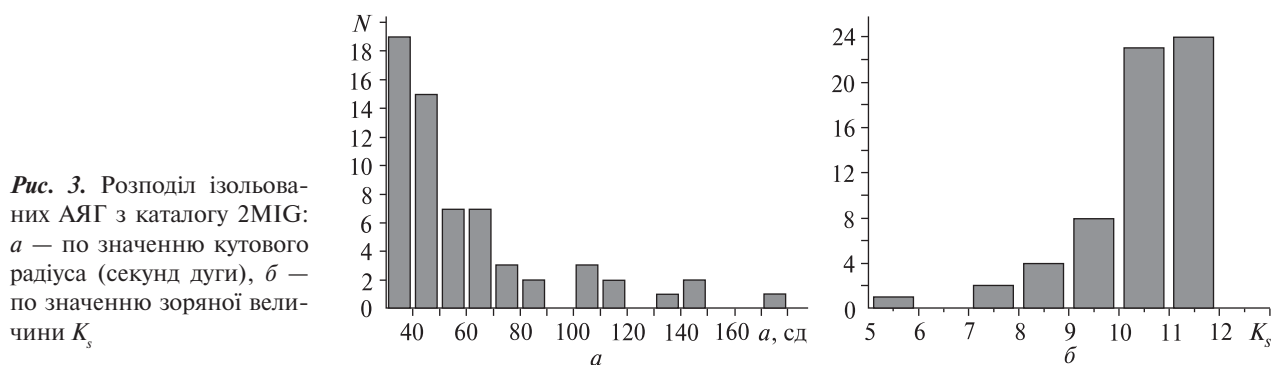


Рис. 3. Розподіл ізольованих АЯГ з каталогу 2MIG: *a* — по значенню кутового радіуса (секунд дуги), *б* — по значенню зоряної величини  $K_s$

площина галактики повернута до спостерігача. Пізніше було знайдено, що у спектрах деяких галактик Сейферта 2-го типу в поляризованому світлі спостерігається широка складова. Відповідно до уніфікованої схеми, в залежності від кута, під яким спостерігається площа галактики Сейферта, їх розділяють на галактики 1-го та 2-го типів. Серед вибірки з 62 ізольованих АЯГ 42 % складають галактики Сейферта 2-го типу (рис. 2, *a*). Доля галактик Сейферта 1-го типу виявилась утричі меншою (14 %). Через те що для частини об'єктів з вибірки ізольованих галактик не було даних щодо спектральної класифікації (2 %), то для порівняння також було знайдено розподіл серед галактик Сейферта за типами. Галактики 2-го типу склали 59 %, 1-го — 20 %, решта — проміжні типи. Якщо спектральний тип залежить лише від кута, під яким спостерігається площа галактики (уніфікована схема), то розподіл мав би бути однорідним. Тобто, уніфікована схема не повністю описує спостережуваний розподіл галактик Сейферта за спектральними типами.

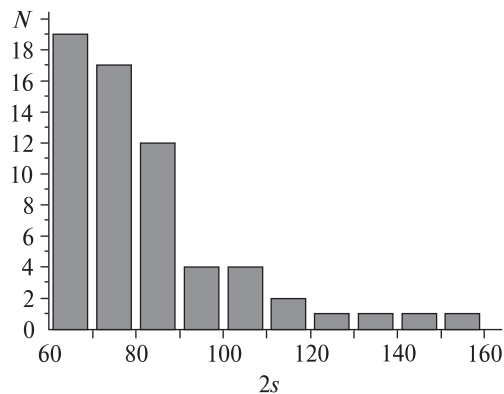


Рис. 4. Розподіл вибірки ізольованих АЯГ каталогу 2MIG по значенням безрозмірного параметра  $2s$

На рис. 3 зображено розподіл ізольованих АЯГ з каталогу 2MIG: *a* — по величині кутового радіуса, *б* — по зоряній величині  $K_s$ , що відповідає ізофоті  $K_{20\%}$ . Кутові діаметри ізольованих АЯГ менші, ніж у галактик каталогу 2MIG (62 % 2MIG галактик мають діаметри 40—50"; 71 % АЯГ мають діаметри 30—50"). Ця відмінність потребує статистичної перевірки на значимість.

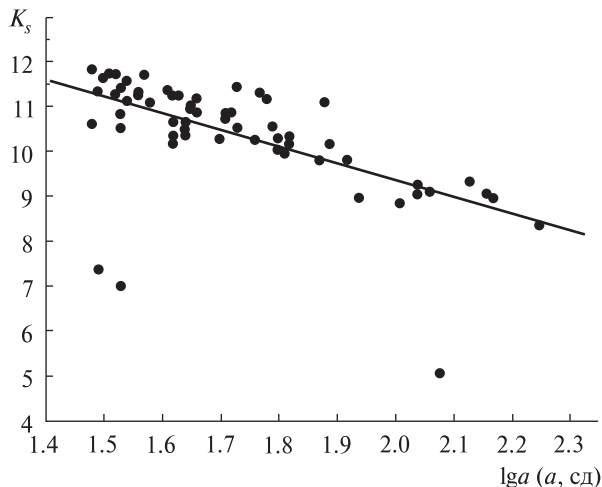


Рис. 5. Залежність видимої величини  $K_s$  від  $\lg a$  для ізольованих АЯГ з каталогу 2MIG

На рис. 4 представлено розподіл ізольованих АЯГ з нашої вибірки по значеннях безрозмірного параметра ізольованості  $2s$ . Середнє значення для 62 об'єктів складає  $2s = 82.4$ , що збігається зі значеннями для каталогу 2MIG ( $2s = 81.1$ ) та для галактик 2MVIG ( $2s = 81.9$ ).

На рис. 5 представлено залежність видимої величини  $K_s$  від логарифма кутового радіуса  $a_K$  для вибірки 62 ізольованих галактик каталогу 2MIG. Цю залежність можна описати виразом  $K_s = -3.73 \lg a + 16.8$ , близьким до виразу, отриманого для каталогу 2MIG ( $K_s = -3.77 \lg a + 17.29$ ).

На рис. 6 представлено розподіл по небу 62 ізольованих АЯГ з каталогу Veron+2010 в галак-

тичних координатах. Була обчислена відстань між усіма ізольованими АЯГ, мінімальна відстань становить  $1.5^\circ$  між NGC 3081 та ESO 499-041. Об'єкти ESO 438-009 та PGC 35009 перебувають на кутовій відстані  $2.87^\circ$ , MCG-02-37-004 та PGC 989455 — на відстані  $2.3^\circ$ . Максимальна кутова відстань між ізольованими АЯГ вибірки становить  $269.4^\circ$  між PGC89963 та 2MASX 11364205-6003070; середня кутова відстань становить  $141.6^\circ$ .

Для визначення просторової відстані між ізольованими АЯГ вибірки було використано відстань за світністю, приведену в базі даних NED. Мінімальна відстань становить  $7.67$  Мпк для NGC 0625 та ESO 097-013. Аналогічно було знайдено 16 пар ізольованих АЯГ, для яких просторова відстань менша за  $3^\circ$ . Максимальне значення відстані  $396.27$  Мпк для UGC 01597 та PGC 170278, середня відстань становить  $135.78$  Мпк.

Розподіл вибірки ізольованих АЯГ по променевих швидкостях виявився близьким до рівномірного (рис. 7) без видимого піку (середнє значення  $\langle V_{LG} \rangle = 7096$  км/с), тоді як каталог 2MIG характеризується піком поблизу  $5000$  км/с при середньому значенні  $\langle V_{LG} \rangle = 6570$  км/с.

На рис. 8 та у табл. 2 представлено долю ізольованих АЯГ різних морфологічних типів у вибірці. Галактики типу Sb складають близько  $31\%$ , Sa, Sbc, S0 — близько  $15\%$ . Еліптичних, іррегулярних галактик немає взагалі, тоді як у каталозі 2MIG їх загалом близько  $10\%$ . У каталозі 2MIG

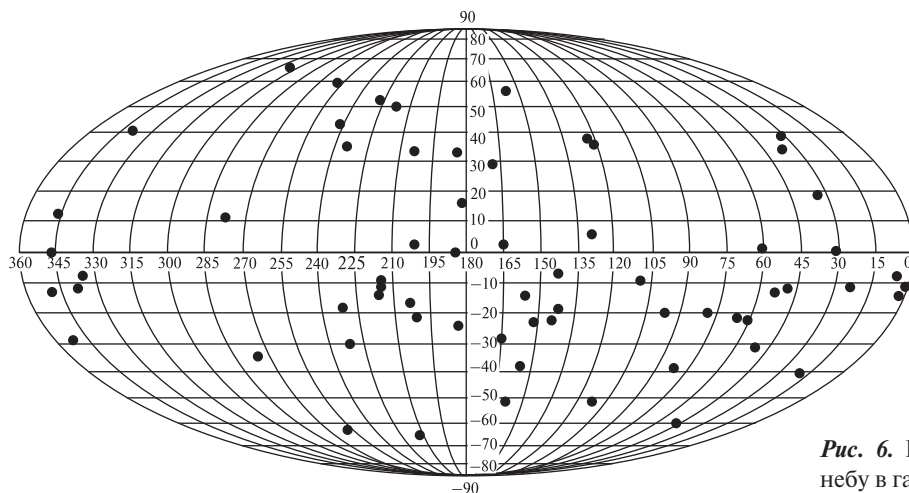


Рис. 6. Розподіл 62 ізольованих АЯГ по небу в галактичних координатах

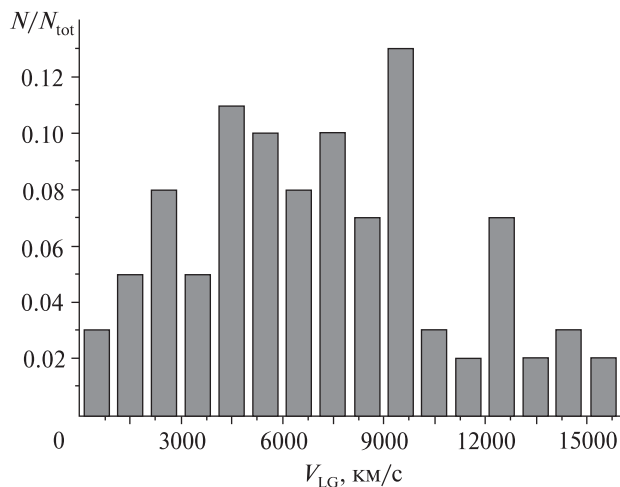


Рис. 7. Розподіл 62 ізольованих АЯГ по значеннях променевих швидкостей  $V_{LG}$

більшість складають галактики типів Sc, Sbc та Sb (25, 20 та 16 %).

На рис. 9 показано залежність променевих швидкостей ізольованих АЯГ від їхнього морфологічного типу. Зміна медіанної променевої швидкості відбувається так само, як і для галактик каталогу 2MIG.

### ТИПОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ ДЛЯ АЯГ

Побудовано залежності показників кольору  $B - V$  та  $U - B$  від  $z$  для АЯГ, що містяться в каталозі Veron+2010 для  $z < 0.06$ , та ізольованих галактик з активними ядрами. Значення показників кольору  $B - V$  та  $U - B$  взято з каталогу Veron+2010. З рис. 10 видно, що даний розподіл має рівномірний характер у межах  $z < 0.06$  як для АЯГ, так і для ізольованих АЯГ. За даними роботи [23] різке збільшення показників кольору  $B - V$  та  $U - B$  відбувається при  $3 < z < 4$ .

На рис. 11 показано розподіл ізольованих АЯГ по значеннях відношення осей  $b/a$ . Рис. 12 показує, що немає явної залежності абсолютної зоряної величини від параметра  $b/a$ .

На рис. 13 зображено залежність відстані до ізольованих АЯГ, визначеної за світністю, від відстані до об'єкта, визначеної методами, що не залежать від червоного зміщення. Видно, що обидві оцінки добре узгоджуються. Іншими словами, для визначення просторової відстані між

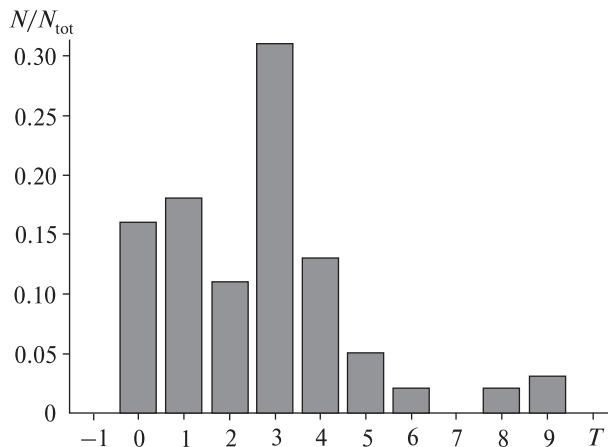


Рис. 8. Розподіл ізольованих АЯГ по морфологічних типах

Таблиця 2. Доля об'єктів різних морфологічних типів у вибірці ізольованих галактик з активними ядрами та для галактик каталогу 2MIG

Морфологічний тип	Вибірка ізольованих АЯГ	Каталог 2MIG
E	—	7 %
S0	16 %	10 %
Sa	18 %	1 %
Sb	31 %	15 %
Sbc	13 %	18 %
Sc	5 %	27 %
Irr	—	2 %

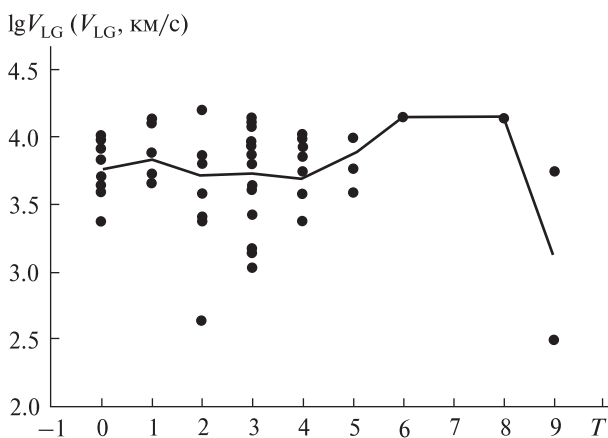


Рис. 9. Залежність променевої швидкості АЯГ від морфологічного типу

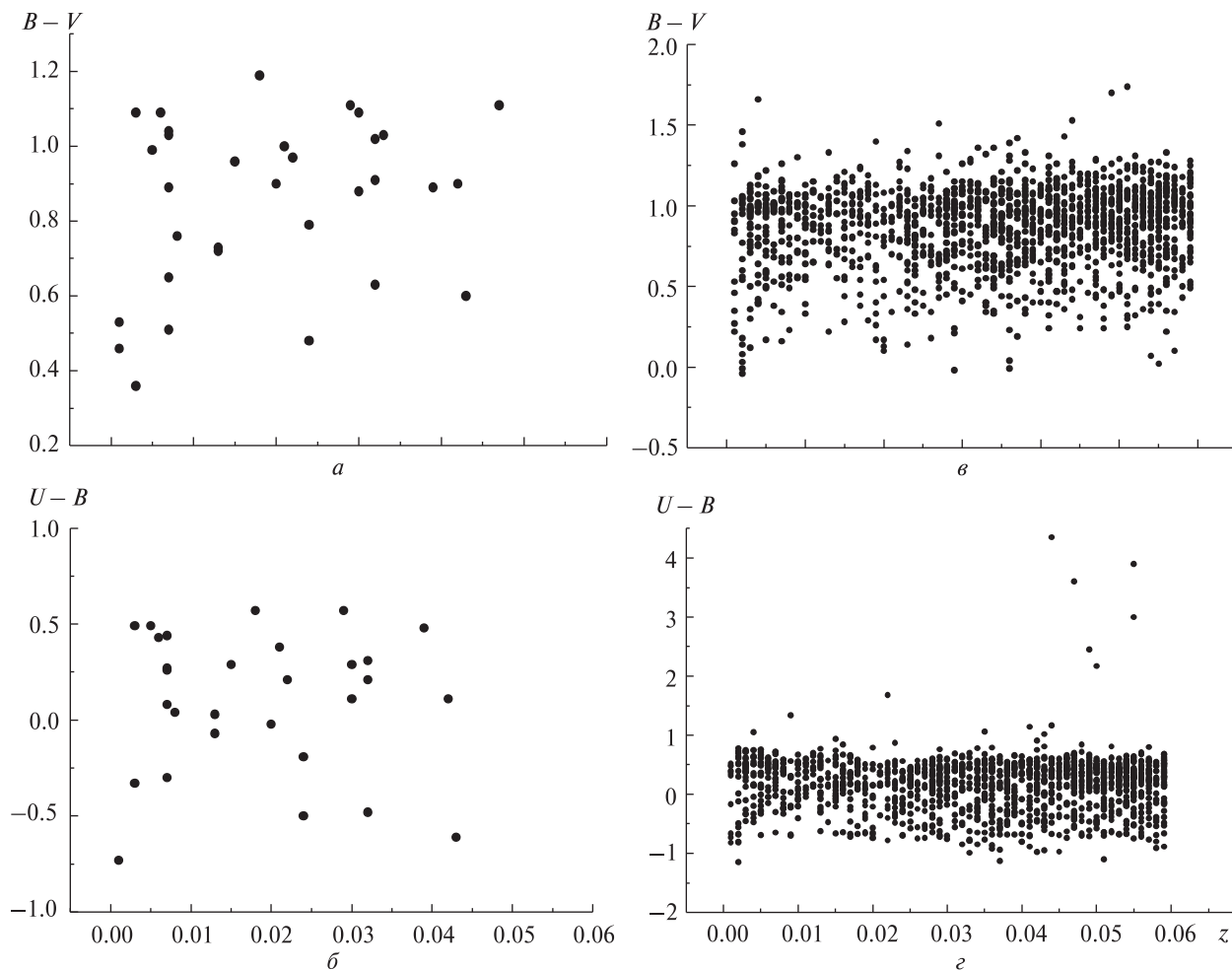


Рис. 10. Залежність показника кольору  $B - V$  ( $a$ ) та  $U - B$  ( $b$ ) від червоного зміщення  $z$  для вибірки ізольованих АЯГ та для вибірки АЯГ з каталогу Veron+2010 з  $z < 0.06$  ( $\epsilon, z$ )

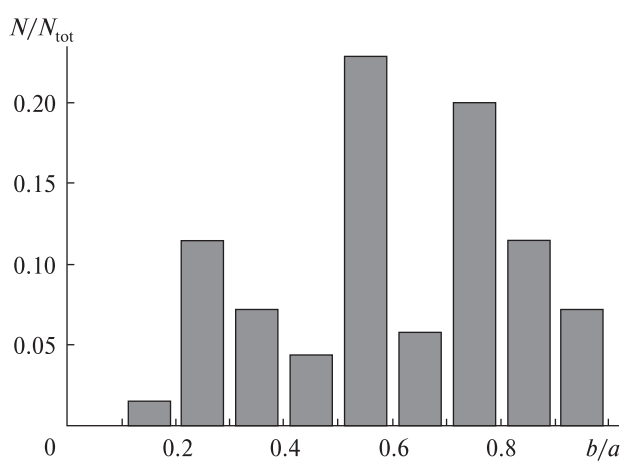


Рис. 11. Розподіл ізольованих АЯГ по значеннях  $b/a$

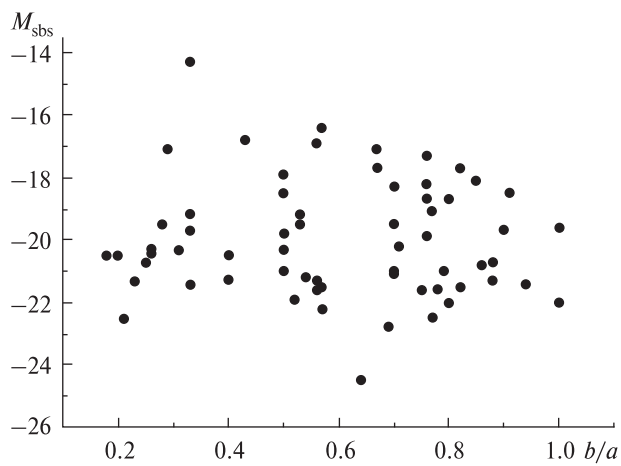


Рис. 12. Корелятивна залежність абсолютної зоряної величини ізольованих АЯГ від параметра  $b/a$

ізольованими галактиками з активними ядрами можна використовувати значення відстані до об'єкта за його світністью.

## ВИСНОВКИ

Вибірка ізольованих галактик з активними ядрами необхідна для перевірки моделей формування та еволюції галактик, а також як опорна вибірка при вивченні властивостей галактик у парах, групах, скупченнях — для розуміння впливу оточення на такі фундаментальні властивості галактик, як їхня морфологія, вміст газу та пилу, хімічний склад, темпи зореутворення тощо.

Для створення вибірки та дослідження властивостей ізольованих АЯГ нами було використано каталог ізольованих галактик 2MIG та каталог АЯГ Veron+2010, а також бази даних NED та HYPERLEDA.

У розподілі вибірки ізольованих АЯГ по променевих швидкостях не виявлено піку, а розподіл має рівномірний характер із середнім значенням  $\langle V_{LG} \rangle = 7096$  км/с, тоді як для каталогу 2MIG пік розподілу за променевими швидкостями приходить на 5000 км/с (середнє значення  $\langle V_{LG} \rangle = 6570$  км/с).

Кутові діаметри ізольованих АЯГ менші, ніж у галактик каталогу 2MIG (більшість 2MIG-галактик, а саме близько 2000 об'єктів, мають діаметри 40–50", більшість ізольованих АЯГ ( $\approx 50$ ) мають діаметри 30–50"). Ця відмінність потребує статистичної перевірки на значимість.

Серед вибірки з 62 ізольованих АЯГ 42 % складають галактики Сейферта 2-го типу (рис. 2, а). Доля галактик Сейферта 1-го типу виявилась утричі меншою (14 %). Через те що для 2 % об'єктів з вибірки ізольованих галактик не було даних щодо спектральної класифікації, то для порівняння також було знайдено розподіл серед галактик Сейферта за типами. Приблизно 59 % склали галактики другого типу, 20 % — першого, решта — проміжні типи. Якщо спектральний тип залежить лише від кута, під яким спостерігається площа галактики (уніфікована схема), то розподіл, згідно з теорією ймовірності, мав би бути однорідним. Тобто, признаки галактик Сейферта можна пояснити не лише в рамках уніфікованої схеми.

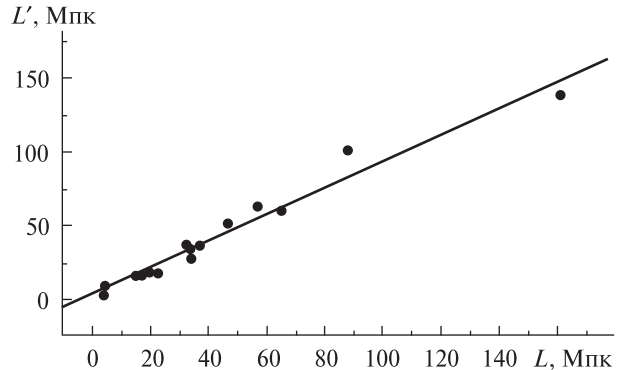


Рис. 13. Корелятивна залежність відстані  $L$  до ізольованих АЯГ, визначеної за світністю, від відстані  $L'$  до об'єкта, визначеної методами, що не залежать від червоного зміщення

Іншою відмінністю між вибіркою ізольованих АЯГ та ізольованих галактик каталогу 2MIG є розподіл за їхніми морфологічними типами. У складі вибірки ізольованих АЯГ галактики типу Sb складають близько 31 %, Sa, Sbc, S0 — близько 15 %. Еліптичні, іррегулярні галактики відсутні взагалі, тоді як у каталозі 2MIG їх загалом близько 10 %. Серед галактик Каталогу 2MIG більшість Sc, Sbc та Sb близько 25, 20 та 16 % відповідно.

*Автор вдячна І. Б. Вавиловій за постановку задачі і науковій дискусії; а також В. Ю. Караченцевій за надання каталогу 2MIG до його публікації та цінні зауваження до рукопису. Робота виконувалася за часткової підтримки російсько-українського проекту ДФФД «Створення нових каталогів ізольованих галактик» № Ф28.2/265 (2009–2010 р).*

1. *Agueri J. A. L., Muñoz-Tuñon C., Varela A. M., et al. Characterizing bar structures: application to NGC 1300, NGC 7479 and NGC 7723 // Astron. and Astrophys. — 2000. — 361. — P. 841–849.*
2. *Awaki H., Murakami H., Leighly K. M., et al. A variability study of the Seyfert 2 galaxy NGC 6300 with XMM-Newton // Astrophys. J. — 2005. — 632. — P. 793–798.*
3. *Buta R., Combes F. Galactic Rings // Fundam. Cosm. Phys. — 1996. — 17. — P. 95–281.*
4. *Byrd G. G., Freeman T., Buta R. G. The inner resonance of NGC 3081. II. Star formation, bar strength, disk surface mass density, and mass-to-light ratio // Astron. J. — 2006. — 131. — P. 1377–1393.*

5. Chesnok N. G., Sergeev S. G., Vavilova I. B. Photometric and kinematic properties of non-isolated and isolated AGNs // AIP Conf. Proc. — 2010. — **1206**. — P. 328—334.
6. Dahari O. The nuclear activity of interacting galaxies // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 1985. — **57**. — P. 643—664.
7. Ho L. C., Peng C. Y. Nuclear luminosities and radio loudness of Seyfert nuclei // Astrophys. J. — 2001. — **555**. — P. 650—662.
8. Ho L. C., Ulvestad J. S. Radio continuum survey of an optically selected sample of nearby Seyfert galaxies // Astrophys. J. Suppl. Ser. — 2001. — **133**. — P. 77—118.
9. Iwasawa K., Fabian A. C., Almaini O., et al. X-ray absorption and rapid variability of the dwarf Seyfert nucleus of NGC 4395 // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 2000. — **318**. — P. 879—888.
10. Karachentseva V. E., Mitronova S. N., Melnyk O. V., et al. The catalog of isolated galaxies selected from 2MASS // Astrophys. Bull. — 2010. — **65**. — P. 1—25.
11. Keel W.C. Spectroscopic evidence for activity in the nuclei of normal spiral galaxies // Astrophys. J. — 1983. — **269**. — P. 466—486.
12. Kenney J. D. P., Wilson C. D., Scoville N. Z., et al. Twin peaks of CO emission in the central regions of barred galaxies // Astrophys. J. — 1992. — **395**. — P. L79—L82.
13. Laurikainen E., Moles M. Two interacting Seyfert 2 galaxies – VV 343 and III ZW 55 // Astron. J. — 1988. — **96**. — P. 470—480.
14. Laurikainen E., Moles M. Star formation in a sample of interacting galaxies // Astrophys. J. — 1989. — **345**. — P. 176—185.
15. Marquez I., Moles M. The stellar content, star formation, and mass of the active galaxy NGC 6951 // Astron. J. — 1993. — **105**, N 6. — P. 2090—2097.
16. Martinet F., Friedli D. Bar strength and star formation activity in late-type barred galaxies // Astron. and Astrophys. — 1997. — **323**. — P. 363—373.
17. Melnick J., Terlevich R., Moles M. Warmers – massive stars in the nuclei of galaxies // Luminous Stars and Associations in Galaxies / Eds C. W. H. De Loore, A. Wikis, P. Laskarides. — Dordrecht: Reidel, 1986. — P. 505.
18. Moles M., Del Olmo A., Perea J., et al. Star formation and merging in compact groups of galaxies // Astrophys. J. — 1994. — **285**. — P. 404—414.
19. Moran E. C., Eracleous M., Leighly K. M., et al. Extreme X-ray behavior of the low-luminosity active nucleus in NGC 4395 // Astron. J. — 2005. — **129**. — P. 2108—2118.
20. Moran E. C., Filippenko A.V., Ho L. C., et al. The nuclear spectral energy distribution of NGC 4395, the least luminous type 1 Seyfert galaxy // Publ. Astron. Soc. Pacif. — 1999. — **111**. — P. 801—808.
21. Peterson B. M., Bentz M. C., Desroches L.-B., et al. Multiwavelength monitoring of the dwarf Seyfert 1 galaxy NGC 4395. I. A Reverberation-based measurement of the black hole mass // Astrophys. J. — 2005. — **632**. — P. 799—808.
22. Tifft W. G., Cocke W. J. Uncertainties in 21 centimeter redshifts. I. Data // Astrophys. J. Suppl. Ser.— 1988. — **67**. — P. 1—75.
23. Veron-Cetty M. P. A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition // Astron. and Astrophys. — 2010. — **510**. — P. V10—V18.
24. Vinkler H. Variability studies of Seyfert galaxies. II – Spectroscopy // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 1992. — **257**. — P. 677—688.
25. Wilke K., Mollenhoff C. M., Matthias M. Mass distribution and kinematics of the barred galaxies NGC3992 and NGC7479 // Astron. and Astrophys. — 2000. — **361**. — P. 507—528.
26. Wrobel J. M., Fassnacht C. D., Ho L. C. The inner light-year of the nearest Seyfert 1 nucleus in NGC 4395 // Astrophys. J. — 2001. — **553**. — P. L23—L26.
27. Wrobel J. M., Ho L. C. Radio emission on subparsec scales from the intermediate-mass black hole in NGC 4395 // Astrophys. J. — 2006. — **646**. — P. L95—L98.
28. Young J. S., Knezek M. The ratio of molecular to atomic gas in spiral galaxies as a function of morphological type // Astrophys. J. — 1989. — **347**. — P. L55—L58.

Надійшла до редакції 19.07.10

N. G. Chesnok

GENERAL PROPERTIES OF A SAMPLE OF ISOLATED GALAXIES CONTAINING ACTIVE NUCLEUS

We investigated the general properties of 62 isolated galaxies with active nuclei (AGN) selected from the Catalogue 2MIG and Catalogue Veron+2010. The main characteristics of the distribution of these objects are given. The sample under investigation can be included to the scientific research program for «Radioastron».



### До 70-річчя від дня народження академіка НАН України Я. С. ЯЦКІВА



25 жовтня виповнилось сімдесят років видатному вченому в галузі астрономії, космічної геодинаміки та космічних досліджень, лауреату Державних премій України і Державної премії СРСР, заслуженому діячеві науки України академікові НАН України Ярославу Степановичу Яцківу.

Свій науковий шлях Я. С. Яцків, закінчивши у 1960 р. Львівський політехнічний інститут, розпочав як астроном-спостерігач у Полтавській гравіметричній обсерваторії АН УРСР. У 1965 р. він закінчив аспірантуру Головної астрономічної обсерваторії (ГАО) АН України і відтоді працює в цій установі. З 1975 р. Я. С. Яцків очолює ГАО.

Тематика наукових досліджень Я. С. Яцківа різноманітна. Основні наукові праці присвя-

чені вивченню особливостей обертання Землі, фундаментальній астрометрії та космічній геодинаміці.

Я. С. Яцків — яскравий представник широко званої у світі наукової школи О. Я. Орлова — Є. П. Федорова. Він продовжив розвиток ідей Є. П. Федорова стосовно теорії нутації Землі, яка має велике значення для вивчення орієнтації осі обертання Землі в просторі. На ниві цих досліджень Ярослав Степанович досягнув великих успіхів, об'єктивним свідченням чого є присудження йому 2003 р. у складі когорти європейських учених премії ім. Рене Декарта Європейського Союзу.

Активна участь Я. С. Яцківа у виконанні багатьох великих науково-технічних і науково-організаційних програм (наприклад, міжнародний проект наземних і космічних досліджень комети Галлея (ВЕГА), створення в Україні перманентної мережі станцій ГНСС; сприяння організації Національного космічного агентства України (НКАУ) і Державної служби єдиного часу та еталонних частот).

Визнанням високого авторитету Я. С. Яцківа у світі є: обрання його віце-президентом Міжнародного астрономічного союзу, скорочено МАС (1982—1986), президентом Комісії МАС «Обертання Землі» (1982—1986), співголовою секції Міжнародної геодезичної асоціації, головою дирекції Міжнародної служби обертання Землі (1992—1993), віце-президентом Європейського астрономічного союзу (2004—2009), до створен-

ня якого він був причетним, та інших наукових організацій.

Багато сил і енергії Ярослав Степанович віддає науково-організаційній роботі. Уже 35 років він керує Головною астрономічною обсерваторією НАН України. За цей час обсерваторія здобула широке міжнародне визнання, стала однією з найбільших у Європі. Завдяки його намаганням створена найвища у Європі Високогірна спостережна база в Приельбруссі, яка нині входить до складу Міжнародного центру астрономічних та медико-біологічних досліджень.

З 1998 р. Я. С. Яцків плідно працює як член Президії НАН України. Його обов'язки охоплюють багато питань, пов'язаних з координацією діяльності наукових установ НАН України в галузі космічних досліджень, розвиток зв'язків із закордонними космічними центрами й організаціями. Він є членом Ради з питань науки та науково-технічної політики при Президентові України, членом Національної комісії України у справах ЮНЕСКО, головою Українського міжнародного комітету з питань науки і культури при НАН України тощо. З 2002 р. Я. С. Яцків є головою Науково-видавничої ради НАН України.

Виконуючи в 2000—2001 рр. обов'язки першого заступника міністра освіти і науки України, Я. С. Яцків спрямовував свої зусилля на формування в нашій державі системи, здатної забезпечити якнайповніший розвиток наукового і технічного потенціалу України.

З 1991 р. Ярослав Степанович очолює створену з його ініціативи Українську астрономічну асоціацію (УАА), діяльність якої спрямована на координацію астрономічних досліджень в Україні.

Я. С. Яцків засновник і головний редактор журналу «Кинематика и физика небесных тел» (з 1984 р.), науково-популярного журналу «Світогляд» (з 2005 р.), заступник головного редактора журналу «Космічна наука і технологія» (з 1995 р.), «Наука та інновації» (з 2005 р.), член ред-

колегій журналів «Astrophysics and Space Science» (1994—2000), «Радиоастрономия і радіофізика» (з 1996 р.), «Наука і наукознавство» (з 1997 р.), «Світ фізики» (з 2000 р.), «Artificial satellites» (з 2000 р.) та ін.

Громадянська активність Ярослава Степановича — одна з невід'ємних рис його характеру, яка проявляється в багатьох сферах суспільного життя. Значні зусилля Я. С. Яцків спрямовує на запровадження демократичних принципів в управлінні наукою. Популярними серед громадськості стали засідання дискусійного клубу «Елітарна світлиця», які щомісячно проходять у Будинку вчителя під головуванням Я. С. Яцківа, а також його яскраві виступи в засобах масової інформації з різноманітних проблем науки й суспільного життя.

Ярослав Степанович — лауреат багатьох наукових премій, серед яких «Фундація доктора Дем'янів. За мир і свободу України», премія ім. Є. П. Федорова НАН України, премія ім. Рене Декарта Євросоюзу; вітчизняні та іноземні нагороди, серед яких ордени України «За заслуги» (II і III ступенів), золотий Знак пошани НДР, орден «Дружба» Російської федерації за сприяння створенню РНДБ-комплексу КВАЗАР, уже відзначені вище Державні премії України (1983, 2003 рр.) та СРСР (1986 р.).

Ярослав Степанович Яцків є членом Польської академії наук, Міжнародної академії астронавтики, Ради Українсько-Польського Форуму, входить до складу багатьох міжнародних наукових організацій. Він почесний професор Прикарпатського національного університету та національного університету «Львівська політехніка».

Астероїд Сонячної системи № 2728 дістав назву «Яцків».

Свій ювілей Ярослав Степанович зустрічає у розквіті творчих сил, сповнений нових планів і задумів.

**АГАПТОВ Олексій Володимирович** — доцент кафедри астрономії та фізики космосу фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика навколосезного космічного простору.

**ВАВІЛОВА Ірина Борисівна** — завідувачка лабораторії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

Напрямок науки — позагалактична астрономія, математичні методи розпізнавання та обробки даних, каталоги і бази даних небесних об'єктів, історія астрономії.

**ВОЙЦЕХОВСЬКА Анна Дмитрівна** — науковий співробітник відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — теоретичні дослідження плазмових явищ в іоносфері та магнітосфері Землі, в сонячному вітрі та атмосфері Сонця.

**ГЕРАСИМЕНКО Світлана Володимирівна** — науковий співробітник відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — теоретичні дослідження плазмових явищ в іоносфері та магнітосфері Землі, в сонячному вітрі та атмосфері Сонця.

**ГРИЦАЙ Асен Васильович** — молодший науковий співробітник кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика середньої та верхньої атмосфери.

**ГРИНЧЕНКО Сергій Володимирович** — науковий співробітник Інституту іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти та науки України.

Напрямок науки — моделювання іоносферних процесів, фізика плазми, теорія та практика некогерентного розсіяння.

**ДРОНЬ Микола Михайлович** — проректор з наукової роботи Дніпропетровського національного університету ім. Олесь Гончара, доктор технічних наук, професор.

Напрямок науки — балістика літальних апаратів, стійкість їх руху, проектування та конструювання ракетно-космічної техніки.

**ДУБОВИК Людмила Григорівна** — старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту енергетики Дніпропетровського національного університету ім. Олесь Гончара.

Напрямок науки — робочі процеси в електроракетних двигунах малої потужності.

**ДУДНИК Олексій Володимирович** — завідувач відділу космічних досліджень Харківського національного університету ім. В. М. Каразіна, старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — фізика космічних променів, сонячно-земні зв'язки, космічне приладобудування.

**ІГНАТОВИЧ Сергій Ромуальдович** — декан факультету літальних апаратів Національного авіаційного університету — Аерокосмічного інституту, доктор технічних наук, професор.

Напрямок науки — дослідження міцності та ресурсу авіаційних і космічних конструкцій.

**КОЗИРЄВ Євген Сергійович** — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрямок науки — навколосезна астрономія.

**КОНДРАТЬЄВ Олександр Іванович** — старший науковий співробітник Науково-дослідного інституту енергетики Дніпропетровського національного університету ім. Олесь Гончара, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — процеси в електроракетних русійних установках, використання електроракетних русійних установок у космічних апаратах.

**КРИШТАЛЬ Олександр Нектарійович** — завідувач відділу фізики космічної плазми Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрофізика, фізика Сонця, фізика плазми.

**МАКАРОВ Олександр Леонідович** — головний конструктор і начальник конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприєм-

ства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», кандидат технічних наук, лауреат Державної премії України.

Напрямок науки — ракетно-космічна техніка.

**ПАКУЛЯК Людмила Казимирівна** — старший науковий співробітник відділу астрометрії Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України, кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — астрометрія, математичні методи розпізнавання та обробки даних, астроінформатика, каталоги і астрономічні бази даних.

**ПОПЕЛЬ Валерій Михайлович** — заступник начальника відділу антено-фідерних та НВЧ-пристроїв конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Напрямок науки — антенно-фідерні пристрої та засоби мікрохвильової техніки.

**ПРОЦЮК Юрій Іванович** — завідувач лабораторією інформаційних технологій Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — зоряна астрономія, астрометрія, астрономічні бази даних.

**САЛЮК Дмитро Анатолійович** — аспірант кафедри астрономії та фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Напрямок науки — фізика середньої та верхньої атмосфери.

**СЕМЕНОВ Лев Петрович** — заступник директора департаменту — начальник відділу Національного космічного агентства України, кандидат технічних наук.

Напрямок науки — космічні технології, космічне матеріалознавство.

**СИБІРЯКОВА Євгенія Сергіївна** — молодший науковий співробітник Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія».

Напрямок науки — навколосемна астрономія.

**СТОДІЛКА Мирослав Іванович** — провідний науковий співробітник Астрономічної обсерваторії Львівського

національного університету імені Івана Франка, доктор фізико-математичних наук.

Напрямок науки — нерівноважне перенесення випромінювання, діагностика атмосфери Сонця інверсними методами, геофізичні прояви активних процесів на Сонці.

**ХИТЬКО Андрій Володимирович** — директор Науково-дослідного інституту енергетики Дніпропетровського національного університету ім. Олеся Гончара, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — процеси компенсації іонного струму в електроракетних рушійних установках.

**ХОРОЛЬСЬКИЙ Петро Георгійович** — провідний науковий співробітник Науково-дослідного інституту енергетики Дніпропетровського національного університету ім. Олеся Гончара, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник.

Напрямок науки — балістика літальних апаратів, механіка космічного польоту, проектування та конструювання ракетно-космічної техніки.

**ХОРОШИЛОВ Віктор Сергійович** — начальник сектору конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», доктор технічних наук, професор.

Напрямок науки — динаміка, балістика та керування рухом літальних апаратів.

**ЧЕСНОК Надія Григорівна** — молодший науковий співробітник Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України.

Напрямок науки — позагалактична астрономія, математичні методи розпізнавання та обробки даних, каталоги і бази даних небесних об'єктів, історія астрономії.

**ШАТІХІН Валерій Євгенович** — Національне космічне агентство України.

Напрямок науки — дослідження динамічних характеристик та надійності механізмів космічних апаратів.

**ШУЛЬГА Олександр Васильович** — заступник директора з наукових питань Науково-дослідного інституту «Миколаївська астрономічна обсерваторія», кандидат фізико-математичних наук.

Напрямок науки — навколосемна астрономія.