

УДК 520.253

**В. Л. Карбовський¹, П. Ф. Лазоренко¹, В. М. Андрук¹,
В. В. Клецонок², М. О. Литвин¹, К. О. Богатирьов¹,
О. В. Денисюк¹**

¹Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
03680 Київ, вул. Академіка Заболотного 27

²Астрономічна обсерваторія Київського національного університету ім. Тараса Шевченка
04053 Київ, вул. Обсерваторна 3

Київський меридіанний аксіальний круг з новою ПЗЗ-камерою

Наведено характеристики нової ПЗЗ-камери, встановленої на Київському меридіанному аксіальному крузі (МАК). ПЗЗ-матриця e2v CCD47-10 камери «Arogee Alta U47» має формат 1024 1024 пкл з розміром пікселя 13 13 мкм. Спостереження проводяться в режимі синхронного накопичення сигналу з ефективним часом експозиції 77 с для екваторіальних зірок. Фотометрична система МАК відповідає стандартній V-смузі Джонсона, гранична зоряна величина $V = 17^m$. За результатами тестових спостережень на МАК у 2009 р. отримано похибки положень та величин V відповідно 0.1 та 0.09^m для зірок каталогу «Tycho-2». Проводяться спостереження зірок в екваторіальній області неба з метою визначення їхніх точних положень, власних рухів та блиску.

КИЕВСКИЙ МЕРИДИАННЫЙ АКСИАЛЬНЫЙ КРУГ С НОВОЙ ПЗЗ-КАМЕРОЙ, Карбовский В. Л., Лазоренко П. Ф., Андрук В. Н., Клецонок В. В., Литвин М. В., Богатирев К. В., Денисюк Е. В. — Приводятся характеристики новой ПЗЗ-камеры, установленной на Киевском меридианном аксиальном круге (МАК). ПЗЗ-матрица e2v CCD47-10 камеры «Arogee Alta U47» имеет формат 1024 1024 пкл с размером пикселя 13 13 мкм. Наблюдения ведутся в режиме синхронного накопления сигнала с эффективным временем экспозиции 77 с для экваториальных звезд. Фотометрическая система МАК отвечает стандартной V-полосе Джонсона, предельная звездная величина $V = 17^m$. По результатам тестовых наблюдений на МАК в 2009 г. получены погрешности положений и величин V соответственно 0.1 и 0.09^m для звезд каталога «Tycho-2». Ведутся наблюдения звезд в эква-

ториальної області неба з целью определения их точных положений, собственных движений и блеска.

THE KYIV MERIDIAN AXIAL CIRCLE WITH A NEW CCD CAMERA, by Karbovsky V. L., Lazorenko P. F., Andruk V. M., Kleshchonok V. V., Lytvyn M. O., Bogatyryov K. O., Denisjuk O. V. — We give characteristics of the new CCD camera «Apogee Alta U47» installed at the Kyiv meridian axial circle (MAC). The camera is based on the 1024 1024 pxl e2v CCD47-10 with a pixel size of 13 13 mkm. Observations are performed in scan-drift mode with an effective exposure time of 77 s for equatorial stars. The MAC photometric system is close to Johnson's V band and the MAC limiting magnitude V is 17. The test observations obtained in 2009 show that the precision of positions and of V magnitudes is about 0.1 and 0.09^m, respectively, for reference stars of the «Tycho 2» catalogue. The telescope is used for observations of equatorial stars to determine their positions, proper motions and magnitudes.

Вступ. У 2009 р. на Київському меридіанному аксіальному крузі (МАК) Головної астрономічної обсерваторії НАН України та Київського національного університету встановлено нову ПЗЗ-камеру «Apogee Alta U47» замість ПЗЗ-камери з матрицею ISD017AP [4], з якою велися спостереження на МАК з 2001 р. У новій камері використовується ПЗЗ-матриця e2v CCD47-10 формату 1024 1024 пкл, з розміром пікселя 13 13 мкм, темновим сигналом 0.66 ел.·пкл⁻¹·с⁻¹ та з шумом зчитування 10 ел. при $T = 20$ С. У ПЗЗ-камері використано 16-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП). У порівнянні з попередньою камерою з 12-розрядним АЦП [4] це дозволяє реєструвати суттєво яскравіші зірки (переважно опорні зірки «Tycho2») без переповнення АЦП за час проходження зображення зірки по всій довжині ПЗЗ-матриці. Таким чином, діапазон зоряних величин в екваторіальній зоні вдалося розширити з 11.5—17^m до 8.5—17^m. Спектральну характеристику чутливості $Q(\lambda)$ ПЗЗ-матриці, надану виробником, приведено на рис. 1 (крива 1). Охолоджувач ПЗЗ-матриці забезпечує різницю температури «матриця — навколишнє середовище» до 55 °С.

Зв'язок між ПЗЗ-камерою та персональним комп'ютером здійснюється по USB-порту, який забезпечує управління камерою під час спостережень та обмін цифровими даними між ними.

ПЗЗ-камера дозволяє проводити спостереження небесних об'єктів у двох режимах роботи. У першому, кадровому, режимі впродовж програмно встановленого часового інтервалу здійснюється накопичення сигналу одночасно у всіх елементах ПЗЗ-матриці з подальшим швидким зчитуванням інформації після закінчення експозиції. Діапазон можливих експозицій лежить у межах 20 мс — 183 хв. Кутовий розмір знімка — 19.3 19.3 . У зв'язку

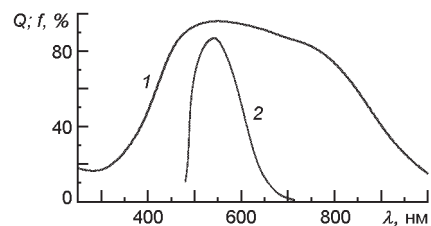


Рис. 1. Спектральна характеристика абсолютної квантової ефективності ПЗЗ-матриці e2v CCD47-10 (крива 1) і коефіцієнт пропускання V-фільтра для МАК (крива 2)

з відсутністю на МАК механізму відслідковування добового руху зображень зір цей режим може застосовуватися лише для спостереження малорухомих об'єктів (геостаціонарних супутників, об'єктів навколо полярної області та ін.) та для дослідження ПЗЗ-камери.

Для спостережень на телескопі МАК, як і на інших меридіанних кругах (САМС, Bordough, FASTT [8, 9, 12—15]), використовується другий режим роботи ПЗЗ-камери — режим синхронного накопичення (scan-drift mode) [11]. В цьому режимі накопичення електричного сигналу від об'єкта відбувається одночасно з переносом зарядових пакетів синхронно добовому рухові зображень зірок. Швидкість переносу зарядових пакетів вибирається рівною швидкості руху оптичного зображення об'єкта по поверхні ПЗЗ-матриці. Кутовий розмір відсканованої області неба по схиленню визначається кутовим розміром проекції матриці у даному напрямі і становить 19.3° , а по прямому сходженню розмір скана обмежений лише тривалістю спостереження, і може досягати кількох десятків градусів. Для цього режиму спостережень властиве додаткове розмиття зображень зірок [7], що становить близько 4 tg по прямому сходженню та 1 tg по схиленню.

На МАК реалізовано лише односмугову фотометричну V -систему [4]. Фільтр V складається із скла ЖС-17 та СЗС-21 товщиною 2.5 і 2.3 мм відповідно. Спектральна характеристика фільтра (виміряна на спектрофотометрі) з врахуванням чутливості матриці близька до характеристики смуги V системи Джонсона (рис. 1, крива 2). Зображення зірок у смугі V мають симетричну форму і апроксимуються гауссовим еліптичним розподілом з параметром $\sigma = 1.3 \text{ пкл}$, що відповідає $f_{1/2} = 4.7 \text{ пкл}$, або 5.3° . Нижче приведено основні характеристики київського меридіанного аксіального круга з новою камерою:

Вхідний отвір	18 см
Фокусна відстань	2.368 м
Фотометрична смуга	V
Масштаб	1.132 /пкл
Діапазон зоряних величин	8.5—17 ^m

Кадровий режим роботи ПЗЗ-камери

Розмір кадра	19.3 19.3
Експозиція	20 мс — 183 хв

Режим синхронного накопичення

Розмір скана по схиленню	19.3
Тривалість експозиції зірок	(77 с)·sec

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЗЗ-КАМЕРИ «Apogee Alta U47»

В режимі синхронного накопичення сигналу проведено дослідження шумів ПЗЗ-камери та їхнього розподілу по полю матриці. Для цього отримувались серії сканів при закритому вхідному вікні ПЗЗ-камери з експозиціями 20 мс і 77 с. При експозиції 20 мс основною шумовою складовою є шум зчитування з деяким додатковим постійним зміщенням. Вклад інших шумів незначний. Ця шумова складова сигналу виключалась із сканів, отриманих при экс-

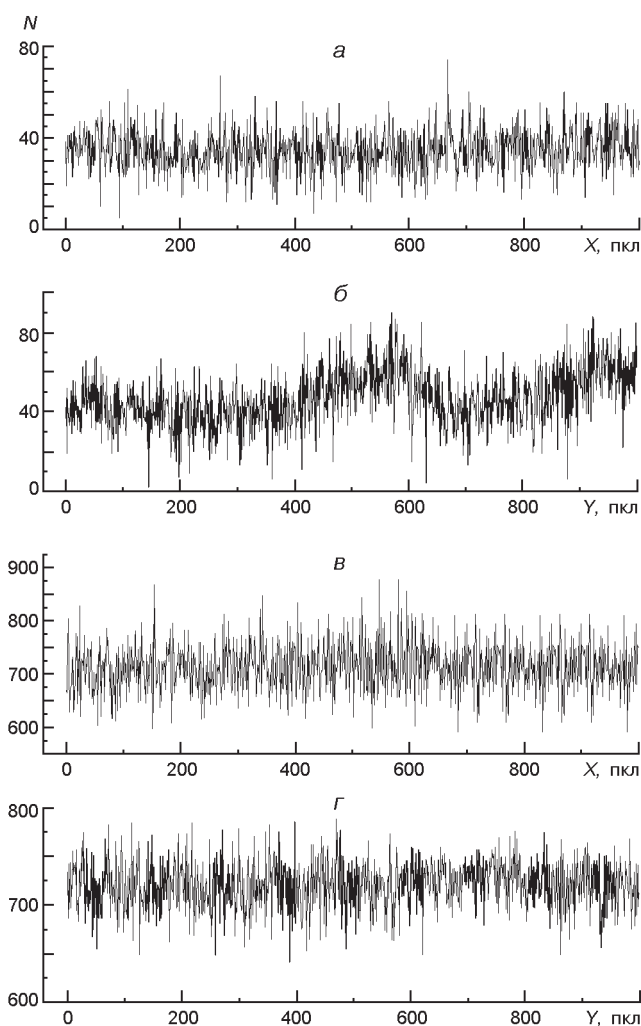


Рис. 2. Розподіл шумової складової (а, б) та неоднорідності чутливості (в, г) по полю ПЗЗ-матриці

позиції 77 с. Таким чином було отримано шумову складову поля ПЗЗ-матриці без шуму зчитування. Усереднений розподіл шумової складової по координатах X , Y показано на рис. 2, а, б (N — значення вихідного сигналу в одиницях 16-розрядного АЦП ПЗЗ-камери).

Також досліджено розподіл неоднорідності чутливості по полю ПЗЗ-матриці. Для цього отримувались серії сканів нічного неба при фазі Місяця 1/5. Із отриманих сканів виключалась складова темного шуму та шум зчитування з додатковим постійним зміщенням. Отримана таким чином неоднорідність чутливості по полю ПЗЗ-матриці має двовимірну структуру. Її розподіл по координатах X , Y (та на небі відповідно) показано на рис. 2, в, г.

Характерні профілі зображень зірок, їхні розміри і форма приведено на рис. 3.

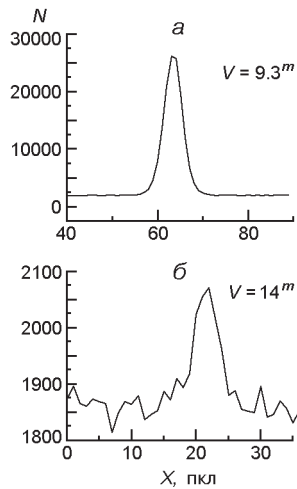


Рис. 3. Профілі зображень яскравої ($V = 9.3^m$) та слабкої ($V = 14^m$) зірок

ТЕСТОВІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ЇХНЯ ОБРОБКА

Тестові спостереження з новою ПЗЗ-камерою були проведені у квітні 2009 р. в екваторіальній зоні ($\alpha = 13^h$, $\delta = 10^\circ$). Обробку ПЗЗ-сканів розміром 1024×10000 пкл для визначення екваторіальних координат α , δ і коефіцієнтів редуції інструментальної системи у систему V «Тучо-2» виконано у програмному середовищі MIDAS/ROMAFOT, яке дозволяє отримувати прямокутні координати X і Y у системі координат матриці та фотометричні величини в інструментальній системі [10]. В даній роботі для фотометричної процедури корекції за плоске поле ми скористались способом знаходження індивідуального плоского поля для кожного скану без використання калібровочних знімків з темновим сигналом та плоским полем.

Крім того, попередні дослідження показали, що шуми від фону неба для Києва в декілька разів перевищують шумову складову ПЗЗ-камери. При виконанні обробки тестових спостережень шумова складова як адитивна добавка не враховувалася.

Програмно реалізовано ітераційний метод видалення об'єктів (зірок, слідів гарячих пікселів і космічних частинок, галактик тощо) та побудова і виділення просторової обвідної власного плоского поля із необробленого скану. Обґрунтованість такого підходу до обробки зображень, порівняння з традиційним способом обробки а також отримані результати викладено в роботах [1—3, 5, 6].

ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ

Метою тестових спостережень є визначення точності вимірювання екваторіальних координат і зоряних величин зареєстрованих об'єктів. Для визначення тангенціальних координат опорних зірок за опорний каталог використано каталог «Тучо-2». Сталі редуції вимірюваних координат до тангенціальних координат визначалися з розв'язку методом найменших квадратів систем рівнянь

$$\begin{aligned}
 & a_1 X_i \quad b_1 Y_i \quad c_1 \quad d_1 X_i^2 \quad e_1 X_i Y_i \quad f_1 Y_i^2 \\
 & g_1 X^3 \quad g_2 X^4 \quad g_3 X^5 \quad g_4 X^6, \\
 & a_2 X_i \quad b_2 Y_i \quad c_2 \quad d_2 X_i^2 \quad e_2 X_i Y_i \quad f_2 Y_i^2 \\
 & h_1 X^3 \quad h_2 X^4 \quad h_3 X^5 \quad h_4 X^6,
 \end{aligned} \tag{1}$$

де i — номери опорних зірок ($i = 1, 2, \dots, n$).

Формули редукції виду (1) були підібрані емпірично для найкращого узгодження обчислених екваторіальних координат з їхніми каталожними значеннями. Якщо обмежитись сталими редукції у вигляді повних поліномів другого чи третього степенів, то значення середніх квадратичних похибок одного вимірювання для залишкових різниць ($O - C$) складають: $\sigma = 0.25$, 0.14 для прямих сходжень та $\sigma = 0.29$, 0.16 для схилень. Результати покращуються, якщо редукцію здійснювати з використанням повних поліномів другого степеня з додаванням коефіцієнтів 4-го, 5-го і 6-го порядку по X (7-й порядок дає погіршення): $\sigma = 0.16$, 0.14 , 0.10 для прямих сходжень та $\sigma = 0.13$, 0.13 , 0.12 для схилень відповідно.

На рис. 4 приведено результати обробки типового скану ($N = 21$), с. к. п. для залишкових різниць $O - C$ близькі до 0.1 . Показано хід різниць $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$, між виміряними та каталожними координатами для прямих сходжень і схилень зірок каталогу «Tucho-2». Вказані різниці подано (зверху вниз)

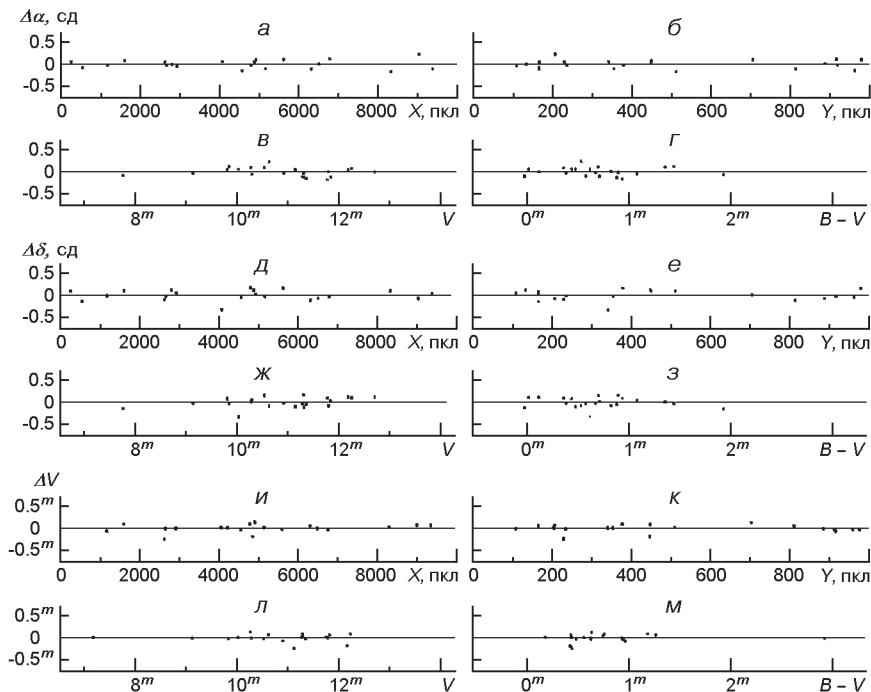


Рис. 4. Різниці $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$, V між виміряними та каталожними значеннями для прямих сходжень і схилень зірок каталогу «Tucho-2». Різниці подано відносно прямокутних координат $X(a, d, u)$, $Y(b, e, k)$, зоряних величин V (g, j, l) і кольорів зірок $B - V$ (z, z, m) каталогу «Tucho-2»

відносно прямокутних координат $X(a, d)$ та $Y(b, e)$, зоряних величин $V(v, ж)$ і показників кольору $B - V(z, з)$ каталогу «Tucho-2». Видно, що залишкові різниці, відносно прямокутних координат X та Y , величин V зір та їхніх кольорів $B - V$ мають випадковий характер. За результатами обробки трьох сканів визначено масштаб, який для координати Y складає 1.132 /пкл.

ФОТОМЕТРИЯ

Для фотометричної обробки за опорний каталог було використано каталог «Tucho-2». Після корекції за екстинкцію зв'язок фотометричної системи реєструвальної апаратури МАК з V -системою каталогу «Tucho-2» визначався із рішення методом найменших квадратів систем рівнянь

$$V_i = A(B - V)_i + D + C v_i, \quad (2)$$

де $i = 1, 2, \dots, 19$ (кількість визначень стандартів). Похибки розв'язків систем рівнянь виду (2) склали $\sigma_v = 0.089^m$. Знайдено значення коефіцієнтів переходу від інструментальних фотометричних величин до величин в системі каталогу «Tucho-2»: $A = -0.097$, $D = 23.420$, $C = 0.952$. Зв'язок фотометричних систем, отриманий із рівнянь (2), показано на рис. 5, а.

На практиці звичайно використовуються рівняння без врахування кольорів зірок для визначення нуль-пунктів інструментальної системи:

$$V_i = c v_i + d, \quad (3)$$

За нашими дослідженнями $c = 0.966$, $d = 23.168$, $\sigma_v = \pm 0.093^m$. Результати, представлені на рис. 4, $u-m$, отримано на основі рівнянь (3). Видно відсутність залежності фотометричних різниць V між визначеними (без корекції за колір зірок) та каталожними зоряними величинами від прямокутних координат $X, Y(u, \kappa)$, зоряної величини V та показника кольору $B - V(l, m)$. На рис. 5, б подано гістограму розподілу кількості об'єктів (зірок) за значеннями зоряних величин V (неперервна лінія) зірок каталогу «Tucho-2» (точки). На рис. 5, в показано зв'язок зоряних величин V з шириною зображень зареєстрованих об'єктів на половині максимальної інтенсивності $f_{1/2}$.

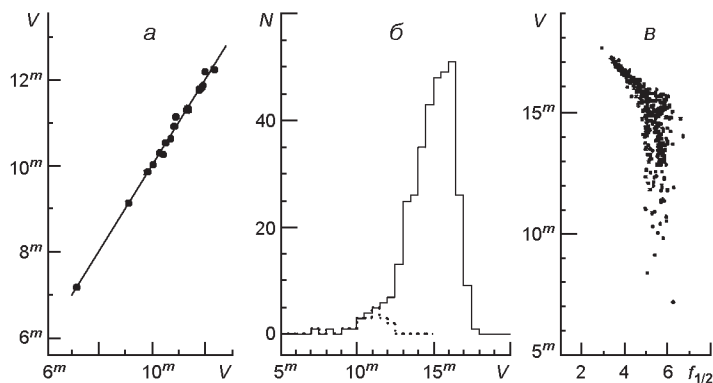


Рис. 5: а — зв'язок фотометричних систем ($V = 0.95v - 0.1(B - V) + 23.4$, $\sigma_v = 0.089^m$); б — розподіл кількості N зірок по значеннях зоряних величин V (неперервна лінія) і зірок каталогу «Tucho-2» (точки); в — залежність зоряних величин V від півширини $f_{1/2}$ профілів зображень

Як висновок відзначимо відсутність фотометричної похибки поля. Це, ймовірно, зумовлено використанням в даній роботі процедури корекції за індивідуальне плоске поле для окремо взятого скану.

ВИСНОВКИ

Результати обробки тестових спостережень показують, що спостереження з новою ПЗЗ-камерою щонайменше не поступаються досягнутому з попередньою камерою [4] рівня точності [9]. У той же час камера «Aprogee Alta U47» має вищу якість, менший рівень шумів та дозволяє спостерігати приблизно вдвічі більшу кількість яскравих опорних зірок каталогу «Tycho-2». З новою камерою продовжаться спостереження по довготерміновій програмі [4], яка має на меті створення астрометричного огляду неба в екваторіальній зоні при чотирикратному перекритті сканів для поширення опорної системи HIPPARCOS — «Tycho» на слабкі зорі та для отримання їхніх фотометричних характеристик.

Автори вдячні Л. К. Пакуляк за змістовні поради під час підготовки програм керування ПЗЗ-камерою.

1. Андрук В., Барташюте С., Бутенко Г. та ін. ПЗЗ-фотометрія у Вільнюській системі в області скупчення IC4665 в Андрушівській АО // Изучение объектов околоземного пространства и малых тел Солнечной системы: Междунар. науч. конф. — Николаев: Атолл, 2007.—С. 252—264.
2. Андрук В. Н., Бутенко Г. З. Исследование фотометрической системы 2-м телескопа на пике Терскол // Кинематика и физика небес. тел.—2006.—**22**, № 3.—С. 231—240.
3. Андрук В., Бутенко Г., Свачій Л. ПЗЗ-фотометрія в UBVR-системі в ділянці скупчення NGC 6913 // Журн. фіз. досліджень.—2008.—**12**. № 1.—С. 1903-1—1903-4.
4. Лазоренко П., Карбовський В., Денисюк О. та ін. Київський меридіанний аксіальний круг з ПЗЗ-камерою // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—**23**, № 5.—С. 304—311.
5. Харин А. С., Андрук В. Н., Барташюте С. и др. UVR ПЗС-фотометрия звезд для пяти областей неба с инфракрасными двойниками радиоисточников // Кинематика и физика небес. тел.—2007.—**23**, № 4.—С. 207—221.
6. Andruk V. M., Vid'machenko A. P., Ivashchenko Yu. M. Processing of CCD frames of images of star fields without the frame of a flat field using new software in program shell of MIDAS/ROMAFOT // Kinematics and physics of celestial bodies. Suppl.—2005.—N 5.—P. 544—550.
7. Gibson B. K., Hickson P. Time-delay integration CCD read-out technique: image deformation // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1992.—**258**.—P. 543—551.
8. Carlsberg Meridian Catalogue N 9. Observation of position of stars and planets: May 1984 to March 1995. — La Palma, 1997.—CD-ROM version.
9. Lazorenko P., Babenko Yu., Karbovsky V., et al. The Kyiv meridian axial circle catalogue of stars in fields with extragalactic radio sources // Astron. and Astrophys.—2005. — **438**.—P. 377—389.
10. MIDAS users guide. — Garching: European Southern Observatory, 1994.—Vol. A, B and C.
11. Stone R., Monet D., Monet A., et al. The Flagstaff astrometric scanning transit telescope (FASTT) and star positions determined in the extragalactic reference frame // Astron. J.—1996.—**111**, N 4.—P. 1721—1741.

12. *Stone R., Monet D., Monet A., et al.* Upgrades to the Flagstaff astrometric scanning transit telescope: a fully automated telescope for astrometry // *Astron. J.*—2003.—**126**.—P. 2060—2080.
13. *Telnyuk-Adamchuk V., Babenko Yu., Lazorenko P., et al.* Observing Programs of the Kyiv meridian axial circle equipped with a CCD micrometer // *Astron. and Astrophys.* —2002.—**386**.—P.1153—1156.
14. *Viateau B., Requieme Y., Le Campion J., et al.* The Bordeaux and Valinhos CCD meridian circles // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1999.—**134**.—P. 173—186.
15. *Yoshizawa W., Suzuki S., Kuwabara T., Ishizaki H.* Observation of faint stars deep to 16th magnitude with CCD meridian circle // *IAU Symp. N 156: Developments in Astrometry and Their Impact on Astrophysics and Geodynamics.* — Shanghai (China), 1993.— P. 71—74.

Надійшла до редакції 15.03.10