

УДК 523.68

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

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВ-КАМЕР ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТЕОРОВ

У 2011 р. у Науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» було розпочато спостереження метеорів у оптичному діапазоні із застосуванням телевізійних камер. Спостереження провадились із використанням програмного забезпечення, що дозволяє виділяти метеорні явища в автоматичному режимі. Представлено результати аналізу даних перших спостережень.

Повышенный интерес к изучению метеоров в оптическом диапазоне среди любителей и профессионалов, а также развитие технологий регистрации и обработки изображений обусловили появление нового и перспективного направления метеорной астрономии — телевизионные наблюдения. В качестве приемника излучения используется аппаратура на основе телевизионных ПЗС-камер, которая является особенно эффективной для наблюдений метеоров за счет большего временного разрешения по сравнению с другими методами [<http://dmsweb.home.xs4all.nl>]. В настоящее время с использованием этой аппаратуры созданы сети наблюдательных станций: IMO Video Meteor Network (IMO VMN) в рамках Международной метеорной организации (страны Западной Европы), SonotaCo Network (Япония), Polish Fireball Network (PFN, Польша) и др.

ОБЗОР ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ

Оптические системы, используемые для наблюдений метеоров, подразделяются на три типа [14]:

- 1) видеосистемы с широким полем зрения ($>40^\circ$ в диаметре), проникающая способность $5-7^m$, к ним также относятся объективы типа «рыбий глаз» и зеркальные системы для наблюдения всего неба (поле зрения 180°);

- 2) стандартные видеосистемы (поле зрения $10-40^\circ$), проникающая способность $7-9^m$;

- 3) телескопические видеосистемы (поле зрения $< 10^\circ$), проникающая способность лучше чем 9^m . Как правило, используются светосильные и длиннофокусные объективы.

Очень часто в видеосистемах используют электронно-оптические преобразователи (ЭОП), чтобы повысить чувствительность системы [<http://dmsweb.home.xs4all.nl>, http://www.imo.net/wiki/index.php/Video_Meteor_Observation, 11]. Наиболее распространенными ПЗС-камерами, используемыми без ЭОП, являются Mintron 12V6-EX и Watek 902H2 Ultimate, обладающие сравнительно высокой чувствительностью и низкой стоимостью. В табл. 1 приведены характеристики некоторых оптических систем, используемых в настоящее время для видеонаблюдения метеоров [6–10, 11, 12, 15, 16, <http://dmsweb.home.xs4all.nl>, http://www.imo.net/wiki/index.php/Video_Meteor_Observation].

МЕТОДЫ И ПРОГРАММЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МЕТЕОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЗС-КАМЕР

Переход от аналоговых видеозаписей к ПЗС-камерам существенно упростил задачу получения и обработки цифрового файла с изображением метеорного явления. В настоящее время разработаны пакеты программ, позволяющие выделять изображение метеора (как в режиме реального времени, так и оффлайн) и оценивать его астрометрические, кинематические и фотометрические характеристики [13, http://www.imo.net/wiki/index.php/Video_Meteor_Observation]. Наиболее широко используемыми программами являются

© Н. А. КУЛИЧЕНКО, А. В. ШУЛЬГА, Е. С. КОЗЫРЕВ, Е. С. СИБИРЯКОВА, 2012

ся MetRec (разработчик Sirko Molau, Германия), AstroRecord (M. de Lignie, Нидерланды) и UFO Tool Suite (SonotaCo, Япония). При всех различиях между этими программами они используют ряд общих методов цифровой обработки изображений для решения следующих задач:

1) подавление помех (методы пространственного усреднения, вычитание среднего кадра, нормализация);

2) выделение метеорной траектории (группирование и установление порога, пространственная и временная корреляция).

Основные характеристики некоторых программ представлены в табл. 2.

ТЕХНОЛОГИЯ НАБЛЮДЕНИЯ МЕТЕОРОВ В НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ИНСТИТУТЕ «НИКОЛАЕВСКАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ» (НИИ НАО)

В 2011 г. в НИИ НАО введен в эксплуатацию опытный вариант метеорного телескопа (рис. 1, а), который включает два оптических телескопа ($D = 47$ мм, $F = 85$ мм), оснащенных ТВ-ПЗС-камерами Watec (768×576 пкл, 8.3 мкм). Поле зрения каждого телескопа составляет $4.2 \times 3.2^\circ$. Наблюдения проводятся комбинированным методом [4]. Для наблюдений используется программное обеспечение автоматической регистрации метеорных явлений с использованием

Таблица 1. Характеристики некоторых систем видеонаблюдения метеоров

Организация	F , мм	D , мм	Поле зрения	Звездная величина m	Наличие ЭОП
ИМО VMN (Центральная Европа)	3.8–12	$f/0.8$ – $f/1.8$	$67 \times 89^\circ$ $43 \times 57^\circ$	3–4 ^m	+/-
ИА АНРТ (Таджикистан)	50 30	$f/1.5$ – $f/3.5$	$20 \times 30^\circ$ 180°		+ –
АО ОНУ (Украина)	540 85 8	$f/2.25$ $f/1.8$ $f/1.2$	$36 \times 48'$ $4 \times 4.5^\circ$ $36 \times 49^\circ$	13.5 ^m 11.5 ^m 7 ^m	–
Ondrejov Observatory (Чехия)	50 12	$f/1.4$ $f/1.4$	45° 52°	6.5 ^m 8.0 ^m	+
DMS (Нидерланды)	55 8	$f/1.2$ $f/2.8$	25° 180°	7 ^m 2 ^m	+
SPMN (Испания)		$f/0.8$ – $f/1.0$	180°	3–4 ^m	–
RASC (Канада)		$f/0.95$	180°		–
SonotaCo (Япония)	3.8–12	$f/0.8$	30 – 90°	3–4 ^m	–
CMN(Хорватия)	4	$f/1.2$	$64 \times 48^\circ$	3.5–4 ^m	–
PFN (Польша)	4	$f/1.2$	$66 \times 49^\circ$		–
SABERNET (Франция)	50	$f/1.2$	$40 \times 30^\circ$	8.5 ^m	–

Таблица 2. Сравнение некоторых программ детектирования метеоров

Название ПО	Режим работы	Системные требования (рекомендуемые)	Формат данных на входе	Формат данных на выходе
AstroRecord	оффлайн	Pentium PC, 600 МГц, 32 MB RAM	BMP, PCD, AVI	BMP, PCD, AVI
MetRec	онлайн	Pentium PC, 600 МГц, 32 MB RAM	Видеокамера PAL & NTSC или кассета	BMP
UFO Capture	онлайн/ оффлайн	Pentium PC, > 2.4 ГГц, > 512 MB RAM	Онлайн: PAL & NTSC с PCI-платой видеозахвата, нестандартный сигнал; Оффлайн: AVI, WMV	BMP, AVI

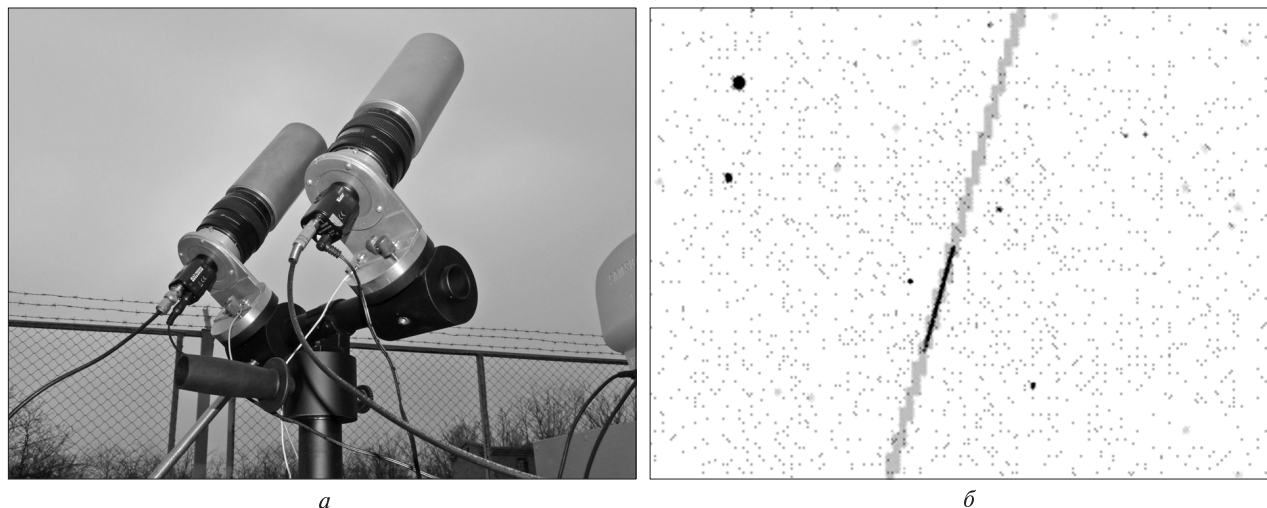


Рис. 1. Опытный экземпляр метеорного телескопа Научно-исследовательского института «Николаевская астрономическая обсерватория» (а) и пример автоматического выделения изображения метеора (б)

ТВ-камер «Meteor detect», разработанное в НИИ НАО [3]. Метод автоматического детектирования метеорных явлений заключается в выделении ячеек изображения, отношение сигнал/шум которых превышает пороговое значение по сравнению с отношением сигнал/шум этих же ячеек на предыдущих кадрах. Помимо отношения сигнал/шум анализируется также скорость объектов. Алгоритм состоит из следующих основных этапов: 1) разбиение изображения на ячейки 8×8 пкл; 2) вычисление отношения сигнал/шум для ячеек по последовательности кадров; 3) поиск линий движения объекта среди ячеек, которые превышают пороговое значение отношения сигнал/шум; 4) поиск объектов, равномерно перемещающихся вдоль линий; 5) исключение объектов, скорость которых меньше 2 град/с, для отсеивания ИСЗ; 6) сохранение изображения. Параллельно с записью изображения метеора проводится накопление и сохранение кадров с опорными звездами. Пример автоматического выделения изображения метеора показан на рис. 1, б.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ. ПОЛУЧЕНИЕ ЭКВАТОРИАЛЬНЫХ КООРДИНАТ МЕТЕОРА

Процесс наблюдений метеоров и их обработка включают методические решения, разработанные в НИИ НАО для наблюдений космических

объектов на околоземных орбитах с применением ТВ-камер [5].

Обработка данных наблюдений включает в себя учет неоднородности чувствительности ПЗС-матрицы, отождествление опорных звезд с каталогом USNO-B1.0 и расчет экваториальных координат изображений метеоров.

Учет неоднородности чувствительности ПЗС-матрицы проводился путем постолбцового и построчного выравнивания фона изображения. Отождествление звезд с каталогом и расчет постоянных формулы приведения проводилось с использованием кубической модели редукции. Определение экваториальных координат изображения метеоров проводилось с использованием редукционных постоянных кадров и экваториальных координат центра изображения на момент регистрации метеорного явления [4].

АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В 2011 г. на протяжении 21 ночи наблюдений метеоров было получено 105 регистраций метеорных явлений. Все данные обработаны, получены экваториальные координаты.

Для оценки методических решений, качества метеорного телескопа, а также программного обеспечения был проведен статистический и астрометрический анализ наблюдений метеоров и опорных звезд.

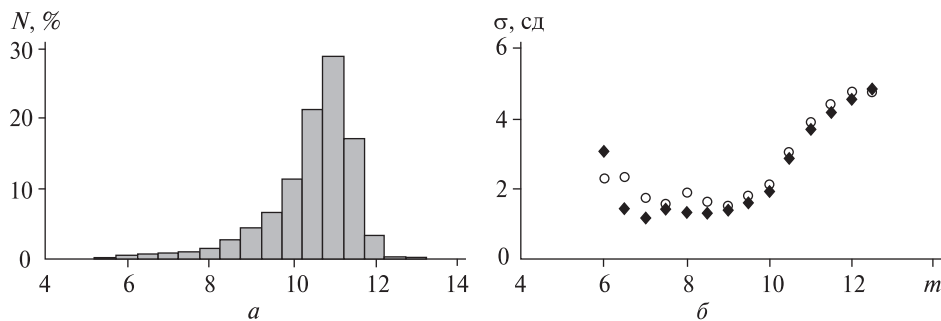


Рис. 2. Распределение количества N опорных звезд по звездной величине m (а) и зависимость погрешности σ по прямому восхождению (ромбики) и склонению (кружки) от звездной величины m (б)

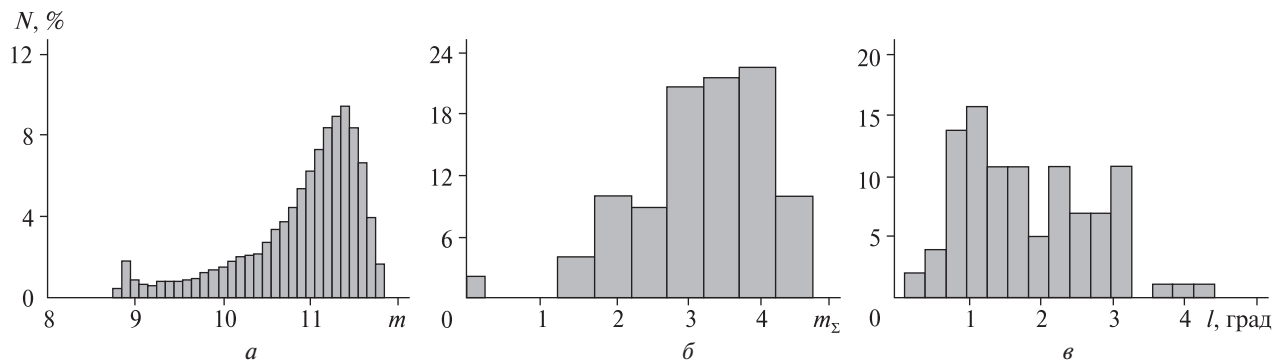


Рис. 3. Распределения количества N метеоров: а — по звездной величине m пиксела, б — по интегральной звездной величине m_{Σ} , в — по длине l наблюдаемых дуг

Произведена оценка погрешностей измерений координат опорных звезд [4]. Распределение количества N опорных звезд по звездным величинам m и стандартные отклонения σ оценок координат показаны на рис. 2. Видно, что для определения постоянных редукиции используются звезды $6-12^m$, погрешность координат составила $1-6''$.

Для оценки блеска метеора были вычислены звездные величины пикселей, составляющих метеорную траекторию. Получено распределение звездных величин для каждого пиксела, составляющего изображение метеора (рис. 3, а).

С учетом попиксельной звездной величины метеорной траектории для каждого метеора была вычислена интегральная звездная величина m_{Σ} по формуле

$$m_{\Sigma} = m_1 - 2.5 \cdot \lg(I_{\Sigma} / I_1),$$

где m_1, I_1 — звездная величина и интенсивность первого пиксела наблюдаемой дуги метеора, I_{Σ} — сумма интенсивностей пикселей наблюдаемой дуги метеора.

Распределения метеоров по значениям суммарных звездных величин и угловой длине изображений показаны на рис. 3, б и в соответственно. Из анализа распределения метеоров по углу наклона наблюдаемой дуги метеора к небесному экватору следует, что более половины метеоров имеют наклон менее 45° . Ориентация телескопа составляет 243.75° по азимуту и 57.6° по высоте и была определена с целью проведения базисных наблюдений совместно с Одесской астрономической обсерваторией. При фиксированном наведении телескопа более 90 % метеорных траекторий имеют наклон к горизонту от 30 до 60° .

Для оценки внутренней погрешности каждое изображение метеора аппроксимировалось линейной функцией по методу наименьших квадратов. При этом вычислялись невязки по прямому восхождению и склонению. Зависимости невязок аппроксимации от звездной величины пиксела показаны на рис. 4. Большие значения невязок по прямому восхождению характерны для метеоров с малым углом наклона метеорной траектории к небесному экватору, по склонению —

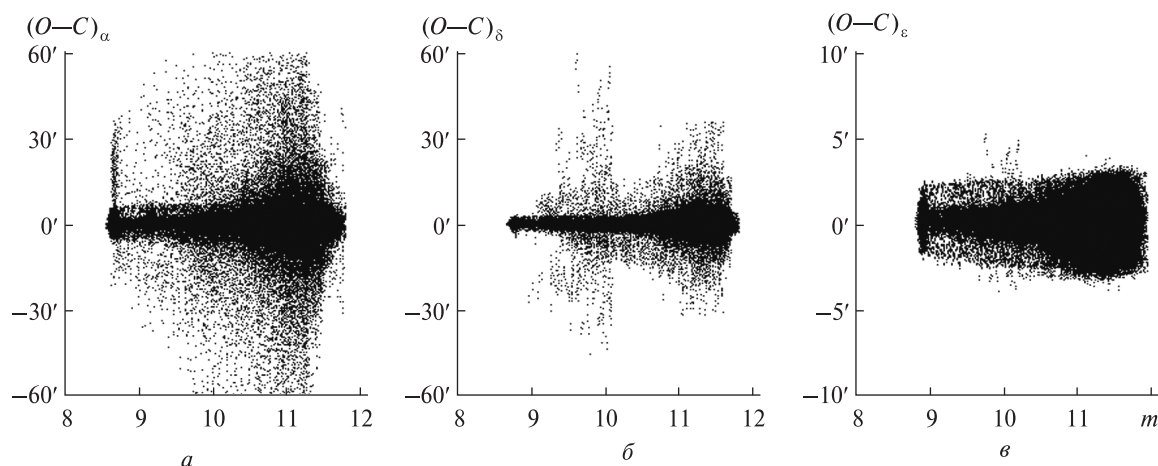


Рис. 4. Зависимость $O-C$ от звездной величины m пиксела изображения метеора: a — по прямому восхождению, b — склонению, c — расстоянию ϵ до линейного тренда

для метеоров с углом наклона метеорной траектории к небесному экватору, близким к 90° .

Стандартное отклонение линейного сглаживания по прямому восхождению и склонению равно соответственно $5'$ и $2.5'$, что характеризует внутреннюю точность измерений в случайном отношении. Среднее значение невязок составляет $10-12''$. Превышение погрешности по прямому восхождению объясняется тем, что большая часть метеоров имеет малый наклон к небесному экватору. Также вычислялись величина расстояния ϵ до линейного тренда и соответствующее стандартное отклонение, которое является средней шириной метеорной траектории и составляет около $1'$.

Для оценки точности определения радиантов метеорных потоков по данным наблюдений рассчитаны большие круги метеорных траекторий. Основным параметром большого круга являются координаты его полюса, которые рассчитывались по методу наименьших квадратов [1]. Уравнения, составляющие систему, имеют вид:

$$\chi \cos \alpha_i \cos \delta_i + \eta \sin \alpha_i \cos \delta_i = -\sin \delta_i,$$

где α_i , δ_i — прямое восхождение и склонение точки.

Прямое восхождение A и склонение D полюса находятся из выражений

$$A = \arctg(\eta/\chi), \quad D = \text{arccctg} \sqrt{\chi^2 + \eta^2}.$$

Погрешность определения полюса большого круга метеорной траектории не хуже $10-13'$.

Проанализированы зависимости погрешностей определения полюса от интегральной звездной величины метеора и от угловой длины наблюдаемой дуги метеора. Получены следующие аппроксимации для вычисленных значений погрешностей:

$$\delta A = 1.32' \cdot \exp(0.48m_\Sigma),$$

$$\delta D = 0.38' \cdot \exp(0.58m_\Sigma),$$

$$\delta A = 19.32' \cdot \exp[0.12(l - 0.25^\circ)^2 - 0.74(l - 0.25^\circ)],$$

$$\delta D = 8.38' \cdot \exp[0.10(l - 0.25^\circ)^2 - 0.65(l - 0.25^\circ)],$$

где δA , δD — погрешности определения полюса большого круга метеорной траектории по прямому восхождению и склонению соответственно, в минутах дуги, l — длина наблюдаемой дуги метеора в градусах. По причине малого наклона траектории движения к экватору погрешность по прямому восхождению превышает погрешность по склонению.

ВЫВОДЫ

С использованием разработанных в НИИ НАО методик и аппаратуры в Николаеве начаты наблюдения метеоров для задач метеорной опасности. Получены следующие результаты.

- По наблюдениям метеоров с мая по декабрь 2011 г. проведены тестовые испытания телевизи-

онного метеорного патруля, в результате которых получено 105 регистраций метеоров с длиной наблюдаемой дуги в диапазоне от 0.25—4.5° и суммарной звездной величиной 0—5^m.

• Погрешность опорной системы звезд составила 1—6".

• Среднее значение невязок по прямому восхождению и склонению не хуже 10—12", а случайная погрешность координатных измерений — около 2.5—5', что для объектива и телевизионной камеры с данными характеристиками является показателем высокого качества наблюдений [2].

• Средняя ширина наблюдаемой дуги метеорной траектории составляет 1'.

• По данным наблюдений рассчитаны большие круги метеорных траекторий. Погрешность определения полюса большого круга метеорной траектории составила 10—13', что при сравнении с работой [2] и с поправкой на меньшее фокусное расстояние используемого объектива характеризует достаточно высокую точность.

Таким образом, была подготовлена основа для создания каталога радиантов метеорных потоков.

1. Астапович И. С. Метеорные явления в атмосфере Земли. — М.: Физматгиз, 1958. — 640 с.
2. Горбанев Ю. М., Голубаев А. В., Жуков В. В. и др. Методика позиционных измерений телевизионных изображений телескопических метеоров // Астрон. вестник. — 2008. — 42, № 1. — С. 37—53.
3. Козырев Е. С. Программный продукт «Регистрация метеорных явищ з використанням телевізійних камер» («Meteor detect») // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 37593, видане 25.03.2011.
4. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Исследование точности астрометрической редукции при использовании комбинированного метода наблюдений небесных объектов // Космічна наука і технологія. — 2010. — 16, № 5. — С. 71—76.
5. Козырев Е. С., Сибирякова Е. С., Шульга А. В. Координатные наблюдения низкоорбитальных объектов околоземного космического пространства с использованием режима синхронного накопления телевизионных кадров // Космічна наука і технологія. — 2011. — 17, № 3. — С. 83—87.
6. Babadzhanov P. B., Kokhirova G. I., Borovička J., et al. Photographic observations of fireballs in Tajikistan // Solar System Res. — 2009. — 43, N 4. — P. 353—363.

7. Colas F., Vaubaillon J., Bouley S., et al. CABERNET network cameras for high accuracy meteor orbits determination. // EPSC-DPS Joint Meeting 2011, held 2-7 October 2011 in Nantes, France., P. 1323.
8. Connors M., Syrjasuo M., Brown P., et al. Meteor and aurora detection using modern video technologies // J. Royal Astron. Soc. Canada. — 2005. — 99, N 1. — P. 14.
9. Gorbanev Yu. M. Odessa television meteor patrol // Odessa Astron. Publs. — 2010. — 22. — P. 60—67.
10. Gural P., Šegon D. A new meteor detection processing approach for observations collected by the Croatian Meteor Network (CMN) // WGN, Journal of the International Meteor Organization. — 2009. — 37, N 1. — P. 28—32.
11. Koten P., Fliegel K., Vitek S., et al. Automatic video system for continues monitoring of the meteor activity // Earth, Moon, and Planets. — 2011. — 108, N 1. — P. 69—76.
12. Madiedo J. M., Ortiz J. L., Castro-Tirado A., et al. On the development of robotic CCD video meteor observing stations in Spain // 41st Lunar and Planetary Science Conference, held March 1—5, 2010 in The Woodlands, Texas. LPI Contribution N 1533. — P. 1504.
13. Molau S., Gural P. S. A review of video meteor detection and analysis software // WGN, Journal of the International Meteor Organization. — 2005. — 33, N 1. — P. 15—20.
14. Molau S., Nitschke M., de Lignie M., et al. Video observations of meteors: History, current status and future prospects // WGN, Journal of the International Meteor Organization. — 1997. — 25, N 1. — P. 15.
15. Olech A., Zoladek P., Wisniewski M., et al. Polish fireball network // Proceedings of the International Meteor Conference, Oostmalle, Belgium, 15—18 September, 2005. — P. 53—62.
16. Wisniewski M., Olech A., Krasnowski M., et al. CCTV lenses for video meteor astronomy // WGN, Journal of the International Meteor Organization. — 2005. — 33, N 1. — P. 23—29.

Надійшла до редакції 02.07.12

N. A. Kulichenko, A. V. Shulga,
E. S. Kozyrev, E. S. Sibiriakova

THE USE OF TV CAMERAS FOR METEOR OBSERVATIONS

Observations of optical meteors with the use of TV cameras have begun at the Nikolaev Astronomical Observatory (RI NAO) in 2011. Observations were performed using the software for extracting meteor phenomena in program mode. Some results of our analysis of first observational data are given.