

УДК 523.4-355, 523.44

СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ В ОБСЕРВАТОРИИ НА ПИКЕ ТЕРСКОЛ¹

*Тарадий В. К.², Сергеев А. В.³, Решетник В. Н.⁴, Годунова В. Г.⁵,
Андреев М. В.⁶, Бутенко Г. З.⁷, Величко С. Ф.⁸, Борачок Н. И.⁹,
Парахин Н. А.¹⁰, Козлов В. А.¹¹, Бронич Ю. В.¹²*

SPECTRAL OBSERVATIONS OF SOLAR SYSTEM SMALL BODIES AT THE TERSKOL OBSERVATORY

Taradii V. K., Sergeev A. V., Reshetnik V. N., Godunova V. G., Andreev M. V., Butenko G. Z., Velichko S. F.,
Borachok N. I., Parakhin N. A., Kozlov V. A., Bronich Y. V.

Advances in studies of Solar System small bodies achieved in the last years at the Terskol Observatory are presented. Spectral observations have been carried out on the astronomical facilities, which include the 60-cm telescope (with a low-resolution spectrophotometer) and the 2-m telescope (with the spectrometers MAESTRO and MMCS). Observational techniques as well as data-processing software, which have been used to obtain and analyze spectrophotometric observations, are described. In this paper, the different aspects of monitoring of Solar System small bodies will be discussed.

Keywords: spectral observations, Solar System small bodies, asteroids, spectral types.

Исследования физических и кинематических характеристик малых тел Солнечной системы является актуальной задачей, особенно в связи с проблемой астероидно-кометной безопасности. Кроме того, актуальность исследований обусловлена еще и тем, что физические характеристики (размеры, параметры собственного вращения, фотомет-

рические характеристики, состав и свойства вещества, и др.), необходимые для изучения происхождения и эволюции этих объектов, для прогнозирования заселенности и траекторий движения как в Солнечной системе, так и в околоземном пространстве, определены только для незначительного числа малых тел, представленных в каталогах.

¹Работа выполнена при поддержке НАН Украины и РФФИ (№63-02-12/12-02-90444).

²Тарадий Владимир Кириллович, д-р физ.-мат. наук, директор Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: tarady@mao.kiev.ua.

³Сергеев Александр Васильевич, канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: sergeev@mao.kiev.ua.

⁴Решетник Владимир Николаевич, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: reshetnykv@gmail.com.

⁵Годунова Вера Георгиевна, старший научный сотрудник Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: godunova@mao.kiev.ua.

⁶Андреев Максим Владимирович, научный сотрудник Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: starmax78@inbox.ru.

⁷Бутенко Галина Зиновьевна, канд. физ.-мат. наук, ученый секретарь Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: butenko@mao.kiev.ua.

⁸Величко Сергей Федорович, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: honorus@mail.ru.

⁹Борачок Назарий Иванович, ведущий инженер Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: borachoknazar@gmail.com.

¹⁰Парахин Николай Александрович, ведущий инженер Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: astrobmх@mail.ru.

¹¹Козлов Владимир Анатольевич, младший научный сотрудник Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: kozlov61@mail.ru.

¹²Бронич Юрий Викторович, ведущий инженер Международного центра астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины; e-mail: bronich@gmail.com.

Благодаря высокогорному расположению и наличию уникальных астрономических комплексов и приборов (телескоп Цейсс-2000 и несколько малых роботизированных телескопов) Терскольская обсерватория имеет значительный потенциал для исследования малых тел, включая астероиды, опасно сближающиеся с планетой Земля [1].

1. Наблюдательные комплексы и приборы

Для наблюдений в обсерватории на пике Терскол (код В18) использовались следующие телескопы и приборы: астрономический комплекс для быстрой спектроскопии (телескоп Цейсс-600 и бесщелевой спектрометр низкого разрешения) [2, 3]; спектрометр фокуса Кассегрена (MMCS) и куде-эшелле спектрометр MAESTRO 2-метрового телескопа [4, 5].

Система управления 2-метрового телескопа, камера для позиционных измерений и высокоточная служба времени способны отслеживать объекты практически на любых траекториях движения и фиксировать их координаты одновременно с проведением многоцветной фотометрии.

Основные характеристики спектральной аппаратуры :

1) спектрометр фокуса Кассегрена (MMCS):

- спектральное разрешение, R_z 3000, ..., 15000;
- спектральный диапазон 300, ..., 1200 нм;
- проникающая сила (режим решетки) до $16,5^m$;
- фотоприемное устройство спектрометра Write Instruments.

2) астрономический комплекс для быстрой спектроскопии:

- спектральное разрешение, $R_z \sim 100$;
- спектральный диапазон 350, ..., 900 нм;
- проникающая сила (экспозиция до 30–60 с) 13^m – 14^m ;
- проникающая сила (экспозиция ~ 1000 с) 16^m – 17^m ;
- фотоприемное устройство спектрометра SpectraVideoTM Camera.

3) куде-эшелле спектрометр MAESTRO:

- спектральное разрешение, R_z 45000–190000;
- спектральный диапазон 350–1000 нм;
- фотоприемное устройство спектрометра Write Instruments.

Спектрограф низкого разрешения, используемый на телескопе Цейсс-600, относительно прост в изготовлении и состоит из двух основных компонентов: дифракционной решетки, оптимизированной на наибольшее пропускание света в спектре первого порядка, и ПЗС-камеры [2, 3]. В данном приборе функцию входной щели выполняет изображение звезды, а решетка используется в качестве диспергирующего элемента. Оптимизация решетки обеспечивает направление до 67% падающего света в спектр в диапазоне длин волн 3500–9000 Å.

Дополняют комплексы два малых автоматических телескопа: Celestron 11" и Meade 14", оснащенные современными автоматическими UBVRi фотометрами для высокоточных фотометрических и позиционных измерений.

2. Методы наблюдений и обработки

Спектральные наблюдения на 2-м телескопе проводились по классической схеме: были получены кадры объекта, плоского поля, темновых токов, калибровочных ламп и звезды сравнения солнечного типа. Обработка данных наблюдений проводилась в программном пакете DECH 20T.

Наблюдения спектров малых тел Солнечной системы на комплексе быстрой спектроскопии телескопа Цейсс-600, кроме классической схемы включали, и получения кадров пар звезд (вечерних и утренних) для вычисления коэффициентов экстинкции. Предварительная обработка кадров выполнялась с помощью программы MAXIM DL. Окончательная обработка спектральных данных проводилась с помощью оригинального программного пакета, в котором были реализованы следующие этапы:

- выбор и загрузка снимков, распознавание объектов на изображениях;
- учет калибровочных снимков и неравномерности фона неба по полю кадра;
- получение спектра объекта (астероида) и звезд-стандартов;
- подсчет коэффициента экстинкции на разных длинах волн (от 350 до 900 нм);
- переход от инструментальных спектральных единиц к энергетическим, вынесенным за атмосферу (учитываются полученные спектры звезд-стандартов и коэффициенты экстинкции);
- определение из спектра звездных величин астероида в фильтрах системы Eight

Color Asteroid Survey-ECAS («синтетические» звездные величины, вычисляются математически);

- определение спектрального класса наблюдаемого астероида с помощью кластерного анализа;

- определение величин относительного альбеда астероида в зависимости от длины волны на основе известного спектра Солнца и внеатмосферного спектра астероида;

- определение относительного размера характерных неоднородностей поверхности астероида на основе кривых блеска (вариаций яркости в определенных спектральных диапазонах).

3. Спектрометрические исследования астероидов Астероид 130 Elektra

Для апробации методики использования быстрой спектроскопии низкого разрешения были проведены исследования астероида 130 Elektra, который находится в главном поясе астероидов. Его физические параметры: радиус 91,1 км, период обращения 5,225 ч., абсолютная звездная величина $7,12^m$, $U - B = 0,483 \pm 0,031$, $B - V = 0,753 \pm 0,023$, альбеда 0,076, видимая визуальная звездная величина на период наблюдений составляла $13,2 \pm 0,1^m$.

Наблюдения астероида проводились в обсерватории Терскол на телескопе Цейсс-600 со спектрографом низкого разрешения при экспозиции 60 с. Были получены спектры астероида в диапазоне 3400–9000 Å в течение трех ночей с 4 по 10 июня 2012 г.

Из полученных массивов спектров астероида и звезды сравнения по вышеописанной методике были вычислены усредненные спектры. Наблюдательный материал интерпретировался как спектрофотометрические наблюдения объектов в полусотне узких полос с шириной около 10 нм. Разработанное программное обеспечение позволило получить из записей спектров синтетические звездные величины астероида и генерировать кривые блеска в UBVR фильтрах. Целью данных исследований было определение спектрального класса астероида, а также изучение вариаций показателей цвета при вращении астероида.

Синтетические звездные величины астероида были получены путем свертки спектра

с кривой пропускания фильтра:

$$m = -2,5 \lg \frac{\int I(\lambda)F(\lambda)d\lambda}{\int I_{st}(\lambda)F(\lambda)d\lambda} + m_{st},$$

где $I(\lambda)$ — спектральный поток излучения астероида, $F(\lambda)$ — кривая пропускания фильтра, m_{st} — звездная величина звезды сравнения в том же фильтре, с учетом того же значения коэффициента экстинкции, что и для астероида.

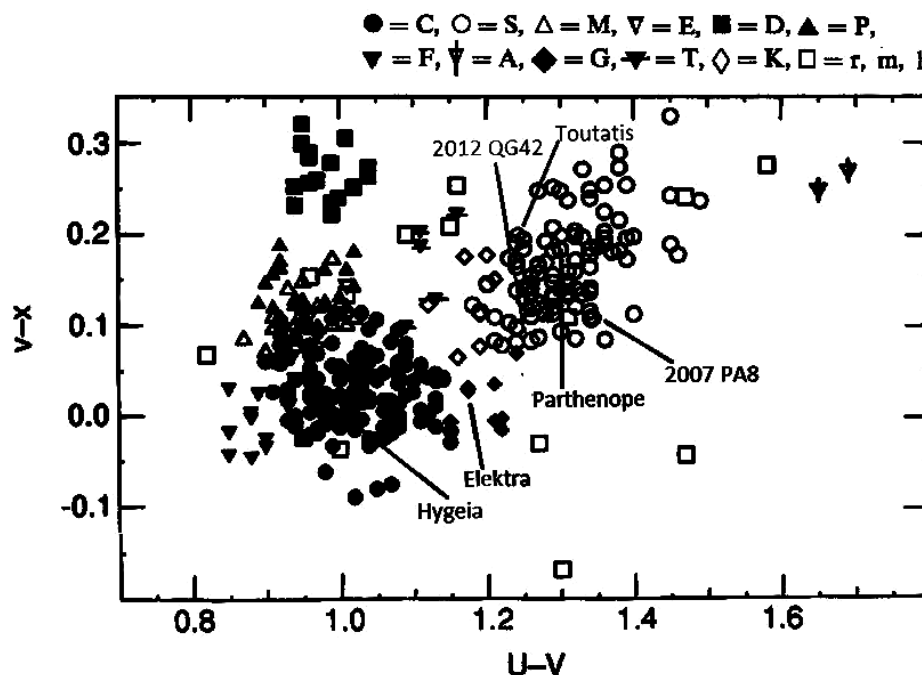
Если не использовать наблюдения звезды сравнения, то можно получить оценки вариаций синтетической звездной величины со временем, обусловленные как изменениями интенсивности блеска самого астероида, так и вариациями атмосферной экстинкции.

Поскольку из спектров вычисляются синтетические звездные величины в любом фильтре, то можно анализировать изменения показателя цвета со временем. Применение бесщелевого спектрографа в этом случае более оптимально, чем классического одноканального фотометра, поскольку звездные величины определяются одновременно, а не поочередно, что улучшает временное разделение кривых блеска и позволяет изучать поведение цветовых особенностей отраженного от поверхности астероида света.

Используя возможность определения синтетических звездных величин астероида из его спектра, были вычислены звездные величины 130 Elektra в фильтрах фотометрической системы Джонсона и системы ECAS. Затем с помощью алгоритма кластерного анализа Тедеско и др. [6] по нашим наблюдениям были рассчитаны показатели цвета для 130 Elektra: $U - V = 1,16$ и $v - x = 0,04$. Вычисленные значения параметров характерны для астероидов класса G (рисунок). Полученные на основе наблюдений с бесщелевым спектрографом результаты хорошо совпадают с данными других авторов, что подтверждает эффективность разработанной методики.

4. Астероиды 11 Parthenope и 10 Hygeia

При обработке наблюдений двух астероидов главного пояса, 11 Parthenope и 10 Hygeia, выполненных в сентябре 2012 г., были найдены зависимости коэффициента экстинкции от длины волны для соответствующих ночей наблюдений и учтено влияние экстинкции на спектрофотометрические



Полученные из наблюдений положения астероидов на двухцветной диаграмме (спектральные классы) (диаграмма из [6])

данные. Использование метода синтетической фотометрии позволило после учета экстинкции получить внеатмосферные звездные величины астероидов в фильтрах системы ECAS и системы Джонсона, а затем определить спектральные типы указанных астероидов.

По методу кластерного анализа Тедеско [6] были вычислены параметры, необходимые для спектральной классификации наблюдаемых астероидов, и определены их спектральные классы. Для астероида 11 Parthenope показатели $U - V = 1,3$, $v - x = 0,2$ и, соответственно, этот астероид относится к типу S (значение по ECAS каталогу: $U - V = 1,26800$; $v - x = 0,126$).

Для астероида 10 Hygeia показатели $U - V = 1,04$, $v - x = -0,005$ и, соответственно, этот астероид относится к типу C (значение по ECAS каталогу: $U - V = 1,04600$ или $1,03900$; $v - x = -0,021$ или $-0,032$).

Результаты расчетов спектральных типов астероидов нанесены на диаграмму (рисунк).

Как следует из приведенных значений, в целом полученные результаты находятся в пределах погрешностей предварительных оценок авторов каталога ECAS, что указывает на перспективность применения бесце-

левого спектрографа на основе решетки для спектральных исследований астероидов.

5. Потенциально опасные астероиды

Возможность использования коротких (до 10 с) экспозиций дает значительные преимущества быстрой спектроскопии при наблюдениях потенциально опасных астероидов, которые являются слабыми объектами и движутся в поле зрения телескопа с достаточно большими угловыми скоростями.

В сентябре-декабре 2012 г. одновременно с помощью различных методов на обсерватории Терскол были выполнены наблюдения потенциально опасных астероидов группы Аполлона 2012QG42, 2007PA8 и 4179 Toutatis [7], а также проведено исследование характеристик этих объектов и определены их спектральные классы с применением разработанных алгоритмов и программ анализа спектрофотометрических наблюдений астероидов. Результаты исследований спектральных классов астероидов нанесены на двухцветную диаграмму (рисунок). Из данных наблюдений астероида 2007PA8 определены значения показателей $U - V = 1,34$, $v - x = 0,10$; спектральный класс — тип S. Для астероида 2012QG42: вычислены значения показателей $U - V \approx 1,3 \pm 0,3$,

$v - x \approx 0,1 \pm 0,2$. Вероятно, спектральный класс этого астероида близок к типу S или G. Отсутствие наблюдений спектрофотометрических и экстинкционных стандартов не позволило провести однозначное определение спектрального класса астероида.

Заключение

В обсерватории на пике Терскол созданы астрономические комплексы для наблюдений и обработки данных позиционных, фотометрических и спектральных наблюдений астероидов, включая АСЗ, с целью исследования физических характеристик и эволюции малых тел Солнечной системы.

Литература

1. Tarady V., Sergeev O., Karpov N., Zhilyaev B., Godunova V. Observations with Small and Medium-Sized Telescopes at the Terskol Observatory, 25 March 2010. [URL] <http://arxiv.org/pdf/1003.4875>
2. Zhilyaev B. E., Stetsenko K. O., Sergeev A. V., Andreev M. V., Ivanov Yu. S., Svyatogorov O. A. Low resolution spectrophotometer for fast spectrometry and photometry of stars // *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel.* 2010. Suppl. 6. P. 422–425.
3. Zhilyaev B. E., Sergeev O. V., Andreev M. V., Godunova V. G., Reshetnyk V. M., Tarady V. K. A slitless spectrograph for observing transient events with small telescopes / *Ground-based & Airborne Instrumentation for Astronomy IV*. I.S. McLean, S.R. Ramsay, H. Takami (eds.). Proc. of SPIE. Vol. 8446. 84468I doi: 10.1117/12.925730.
4. MMCS — Multi Mode Cassegrain Spectrometer. [URL] <http://www.terskol.com/telescopes/cmms.htm>.
5. Musaev F. A., Galazutdinov G. A., Sergeev A. V., Karpov N. V., Pod'yachev Yu. V. Coudé echelle spectrometer for the Terskol 2-meter telescope // *Kinematics Phys. Celest. Bodies*. 1999. Vol. 15. No. 3. P. 216–219.
6. Tedesco E. F., Williams J. G., Matson D. L., Veeder G. J. A three-parameter asteroid taxonomy // *AJ*. 1989. Vol. 97. No. 2. P. 580–590.
7. Величко С. Ф., Видьмаченко А. П., Величко Ф. П. Поляриметрия и спектрометрия астероида-Аполлона 4179 Toutatis // *Материалы Межд. конференции «Околоземная астрономия-2013»* (Краснодар, 7–11 октября 2013). Сб. тезисов. С. 23–24.

Ключевые слова: спектральные наблюдения, малые тела Солнечной системы, астероиды, спектральные классы.

Статья поступила 11 ноября 2013 г.

Международный центр астрономических и медико-экологических исследований НАН Украины, г. Киев

© Тарадий В. К., Сергеев А. В., Решетник В. Н., Годунова В. Г., Андреев М. В., Бутенко Г. З., Величко С. Ф., Борачок Н. И., Парахин Н. А., Козлов В. А., Бронич Ю. В., 2013