

УДК 523.44

**Б. Е. Жилияев^{1,2}, М. В. Андреев², А. В. Сергеев²,
В. Г. Годунова², Г. З. Бутенко², В. К. Тарадий²**

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
zhilyaev@mao.kiev.ua

²Международный центр астрономических и медико-экологических исследований
Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
v.tarady@gmail.com

Диагностика малых форм на поверхности астероида по данным быстрой спектрофотометрии

Предложенная авторами быстрая спектрофотометрия со спектрографом низкого разрешения и временным разрешением несколько минут позволяет изучать минералогический состав поверхности астероида с помощью техники колориметрии малых форм. В отличие от полной томографии наш метод позволяет обнаруживать только особенности малых размеров по сравнению с размером астероида. В качестве примера астероид 130 Электра показывает наличие на его поверхности приблизительно 16 «пятен» разного минералогического состава в диапазоне от 13 до 30 км. За несколькими исключениями эти особенности демонстрируют спектр поглощения, характерный для оливин-пироксеновых композиций. Цветовые характеристики «пятен» в цветовой системе UVVRI позволяют в принципе определять минералогический состав поверхности малого небесного тела.

ДІАГНОСТИКА МАЛИХ ФОРМ НА ПОВЕРХНІ АСТЕРОЇДА ЗА ДАНИМИ ШВИДКОЇ СПЕКТРОФОТОМЕТРІЇ, Жилияев Б. Ю., Андреев М. В., Сергеев О. В., Годунова В. Г., Бутенко Г. З., Тарадій В. К. — Запропонована авторами швидка спектрофотометрія зі спектрографом з низькою роздільною здатністю і часовою роздільною здатністю кілька хвилин дозволяє вивчати мінералогічний склад поверхні астероїда за допомогою техніки колориметрії малих форм. На відміну від повної томографії наш метод дозволяє виявляти тільки особливості малих розмірів порівняно з розміром астероїда. Як при-

клад астероїд 130 Електра показує наявність на його поверхні приблизно 16 «плям» різного мінералогічного складу в діапазоні від 13 до 30 км. За кількома винятками ці особливості демонструють спектр поглинання, характерний для олівін-піроксенових композицій. Колірні характеристики «плям» у колірній системі UBVRI дозволяють у принципі визначати мінералогічний склад поверхні малого небесного тіла.

DIAGNOSTICS OF SMALL-SIZED FORMS ON THE SURFACE OF AN ASTEROID ACCORDING TO FAST SPECTROPHOTOMETRY, by Zhi-lyayev B. E., Andreev M. V., Sergeev A. V., Godunova V. G., Butenko G. Z., Taradiy V. K. — Fast spectrophotometry with low-resolution imaging spectrograph, proposed by the authors, with a time resolution of a few minutes allows studying the mineralogical composition of the asteroid's surface, using the technique of colorimetry of small-sized forms. Unlike the full tomography our method allows to record only small features on the surface of the asteroid. As an example, the asteroid 130 Elektra shows the presence on its surface approximately 16 «spots» of different mineralogical composition ranging from 13 to 30 km. With a few exceptions, the asteroid presents small-sized absorption features in agreement with the spectra of olivine-pyroxene assemblages. The color characteristics of the «spots» according to the U – B, B – V, V – R, R – I color diagrams allow, in principle, to identify the mineralogical composition of the asteroid's surface material.

Введение. Определение минералогического состава является одной из важнейших задач физики малых небесных тел. Эта задача обычно решается на основе таксономической классификации астероидов Толена [8] или классификации SMASS [1], основанных на многоцветных фотометрических обзорах больших групп астероидов.

Видимый спектр таксономии астероидов SMASS покрывает интервал длин волн от 440 до 920 нм [1]. К сожалению, ограниченный интервал длин волн не всегда достаточен для определения минералогического состава поверхности астероида. Так, некоторые важные полосы поглощения силикатов (оливина, пироксена и их смесей) не попадают под спектральный интервал длин волн как таксономии Толена, так и SMASS. Например, некоторые силикатные минералы оливиновой группы тефроит (Mn_2SiO_4) показывает абсорбцию в УФ-диапазоне вблизи $\lambda = 375$ и 410 нм, монтичеллит ($CaMgSiO_4$) показывает абсорбцию около 950 нм (<http://minerals.gps.caltech.edu/files/visible/olivine/Index.htm>). Магний- и цинксодержащие пироксены проявляют ряд особенностей поглощения на длинах волн $\lambda = 345, 360, 440, 410, \dots, 420$ нм [4].

Новый вариант таксономии астероидов Бас-ДеМео [5] охватывает интервал длин волн от 450 до 2450 нм. Новая систематика дает средние значения отражательной способности и стандартные отклонения для 25 классов астероидов. Однако основным недостатком вышеука-

занной системы таксономии являются отсутствие информации на длинах волн короче 450 нм в пределах фотометрической полосы U и низкая точность спектральных данных, которая не позволяют выявлять спектральные особенности малой амплитуды.

Спектрофотометрический подход к определению минералогического состава является более продуктивным. Однако одиночные спектры отражения астероидов дают представление о химико-минералогическом составе астероида в целом, но не решают вопросов распределения минералов по поверхности небесного тела. Томография астероидов является универсальным средством изучения поверхностей на основе инверсии их кривых блеска. Однако она определяет только форму небесного тела.

В настоящей работе предлагается метод изучения минералогического состава поверхности астероида, используя технику колориметрии малых форм. В отличие от полной томографии наш метод позволяет обнаруживать только особенности малых размеров по сравнению с размером астероида. Метод позволяет в цветовой системе $UBVRI$ обнаруживать на поверхности астероида «пятна» различного минералогического состава, оценивать их размеры и количество.

Наблюдения. Малая планета 130 Электра расположена в главном поясе астероидов. Физические параметры астероида в соответствии с базой данных JPL Small-Body Database <http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi#top> следующие: радиус 182.25 ± 11.8 км, период вращения 5.225 ч, абсолютная величина 7.12^m , $U - B = 0.483 \pm 0.031^m$, $B - V = 0.753 \pm 0.023^m$, альbedo 0.076, спектральный тип G в классификации Толена и Ch в классификации SMASSII. По наблюдениям 130 Электра на телескопе Кека с адаптивной оптикой авторы охарактеризовали его как астероид с низким альbedo класса G, подкласса C [6].

Наблюдения проводились в Международном центре астрономических и медико-экологических исследований Национальной академии наук Украины (обсерватория на пике Терскол, Северный Кавказ) в течение трех ночей с 4 по 10 июня 2012 г. Видимая визуальная величина астероида составляла $V = 13.2 \pm 0.1^m$. Мы представляем самый длинный ряд наблюдений, когда было зарегистрировано 224 спектра в течение 5 ч. Спектры получены с телескопом «Цейс-600» со спектрографом изображений низкого разрешения, $R \sim 100$, оснащенный 1024 × 1024 CCD, с размером пикселя 13 мкм [9]. Диспергирующий элемент — прозрачная дифракционная решетка, диапазон длин волн 370...1000 нм, время экспозиции 60 с. Для получения спектра отражения астероида использовалась звезда солнечного типа (GSC 2575 537, $V = 11.56^m$, $B - V = 0.59^m$, Sp G2). Для каждого сета наблюдений получались кадры плоского поля, темнового тока. Редукция данных проводилась с использованием стандартных процедур: удаление фона, коррекция плоского поля, медианная фильтрация, деление спектра астероида на спектр солнечного аналога для получения относительного спектра отражения астероида.

Рис. 1. Кривые B - и V -блеска астероида Электра по данным спектрофотометрии

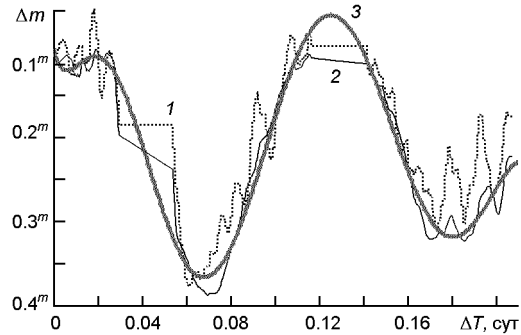
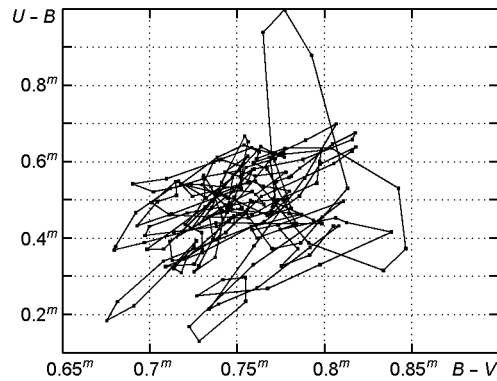


Рис. 2. Диаграмма $(U - B) - (B - V)$ блеска астероида Электра по отношению к звезде аналога Солнца



Результаты. На рис. 1 приведены кривые блеска астероида в BV -полосах и аппроксимация кривой V -блеска полиномом восьмой степени. Кривые $UBVRI$ -блеска по наблюдениям с бесщелевым спектрографом получаются путем свертки спектров с кривыми пропускания фильтров. Кривая блеска в синих лучах B на рис. 1 демонстрирует резкие выбросы в отличие от кривой в полосе V , что говорит о вариациях показателя цвета $B - V$ на поверхности астероида. Это открывает перспективу изучения минералогического состава поверхности методами колориметрии.

На рис. 2 приведен трек астероида на цветовой диаграмме $(U - B) - (B - V)$. Диаграмма демонстрирует существенные вариации цвета поверхности астероида при его вращении. Выбросы на цветовой диаграмме свидетельствуют о наличии локальных пятен, цвет которых отличается от цвета фона. Вариации цвета существенны и в несколько раз превосходят ошибки наблюдений. Вариации появляются при прохождении пятна через терминатор при вращении астероида. Диаграмма позволяет сделать следующие выводы. Визуальная инспекция рис. 2 показывает наличие нескольких отчетливо видимых пятен с разными показателями цвета. Это говорит о разном минералогическом составе пятен. Размер пятна легко определить по длительности выброса, зная размер и период вращения астероида.

Спектр отражения астероида получается путем деления спектра астероида на спектр звезды аналога Солнца. На рис. 3 приведен усред-

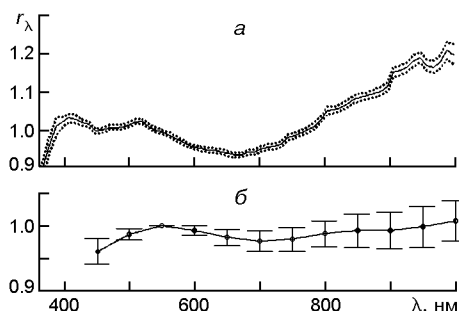


Рис. 3. Усредненный спектр отражения Электры и спектр объекта Ch-класса таксономии Бас-ДеМео [5], нормализованные на 550 нм. Показаны коридоры ошибок шириной \pm

ненный спектр отражения Электры и спектр объекта Ch-класса таксономии Бас-ДеМео [5], нормализованные на 550 нм. На рисунках приведены коридоры ошибок шириной \pm .

Рис. 3 демонстрирует полосы поглощения глубиной до 5...10 % относительно континуума астероида Электра. Вариация в спектре отражения в диапазоне 370...1000 нм достигает 25 %. Точность усредненного спектра отражения около 1 %. Эта величина вычисляется по массиву данных, содержащих 224 спектра астероида.

Как отмечено в работе [3], спектры отражения разных по составу пироксенов демонстрируют разнообразие спектральных свойств в зависимости от содержания различных катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Na^+ и Li^+) и примесей. Те, что связаны с элементами переходного ряда, таких как Cr, Ti, V, Mn, порождают ряд незначительных полос поглощения в видимой области спектра.

Спектры отражения пироксенов с низким содержанием кальция в области 300...2600 нм характеризуются двумя основными полосами поглощения, расположенными вблизи 900 нм (полоса I) и 1900 нм (полоса II). Фактическое положение центра полосы поглощения I варьирует от 900 до 1060 нм в обогащенных хромом и титаном пироксенах в соответствии с концентрацией указанных элементов [3].

Титаносодержащие пироксены демонстрируют поглощение в спектре вблизи 770 нм. Магний- и цинксодержащие пироксены проявляют ряд особенностей поглощения на длинах волн меньше 600 нм. Наблюдаются группы полос поглощения в районах 345, 360, 410...420, 440, 505, 540 нм. Полосы 360, 410, 440, 505 нм связаны со спин-запрещенными зонами в Mn^{2+} и Fe^{3+} согласно работе [4].

Катион V^{3+} приводит к полосе поглощения в районе 445 и 680 нм, связанной с внутрикристаллическими переходами [3].

По нашим измерениям 130 Электра демонстрирует основные признаки астероидов G типа подкласса C. В частности, Электра показывает наличие поглощения в области 700 нм глубиной до 10 % ниже континуума (рис. 3). Это основной признак наличия филлосиликатов на поверхности астероида [1]. В то же время Электра наглядно демонстрирует полосу поглощения около 950 нм (рис. 3). А это характерная особенность спектров поглощения астероидов класса S, связанных с оливином и пироксеном [2, 7].

Рис. 4. Кривые спектрального альбеда Электры на плоской, восходящей и нисходящей частях кривой блеска

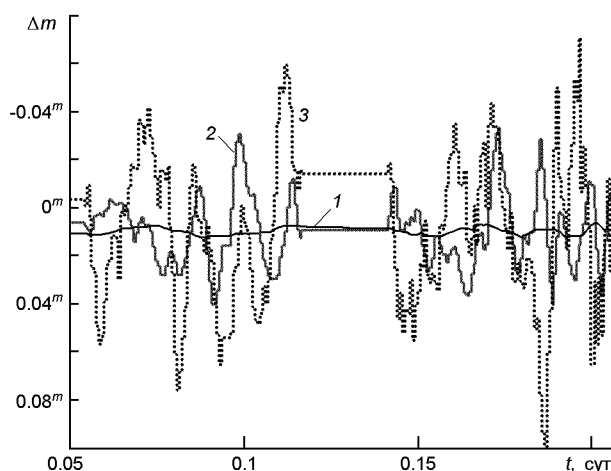
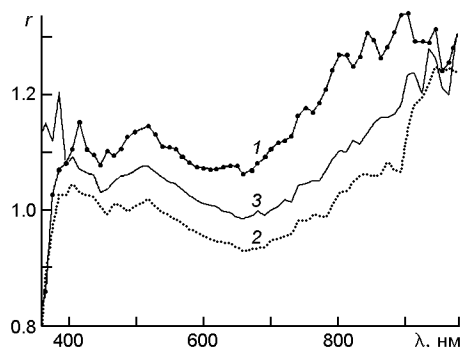


Рис. 5. Кривые UVI-блеска Электры относительно звезды-аналога Солнца

Однако *UBV*-наблюдения показывают, что Электра занимает промежуточное положение между астероидами типа G и S на цветовой диаграмме $(U - B) - (B - V)$ ([7], <http://www.observeasteroids.org/asteroid-colors.php>). Наши измерения показывают абсорбцию в окрестности $\lambda = 950$ нм, характерную для спектров отражения астероидов класса S, связанную с минералами оливин-пироксеновых композиций [2, 7]. Отметим, что в спектрах астероидов класса Ch полоса поглощения в окрестности 950 нм не наблюдается.

Записи спектров отражения Электры на рис. 4 демонстрируют полосы поглощения в регионах 450, 680, 770, 950 нм. Это дает основания предполагать наличие пироксенов на поверхности астероида Электра. Можно видеть, что некоторые полосы поглощения (680, 950 нм) по-разному ведут себя на плоской, восходящей и нисходящей частях кривой блеска (рис. 4). Это свидетельствует о неравномерном распределении соответствующего агента по поверхности астероида.

На рис. 5 показаны кривые UVI-блеска Электры относительно звезды-аналога Солнца. В полосах *U, I* отчетливо наблюдаются вариации яркости, связанные с пятнами разного минералогического состава.

Можно показать, что пятно при прохождении через терминатор порождает всплеск интенсивности положительной или отрицательной полярности. Амплитуды всплесков зависят от цвета пятен. Соотношения амплитуд определяют количественную меру цвета пятна, а следовательно, его минералогический состав.

Можно видеть, что вариации цвета различны в разных пятнах. Это свидетельствует о разном минералогическом составе пятен. Длительность эпизодов пятен в среднем 0.005 сут. Зная радиус и период вращения астероида, легко вычислить размер пятен. Можно насчитать примерно 16 пятен на поверхности Электры разного минералогического состава размером от 13 до 30 км.

Наблюдается существенная корреляция в полосах U и I . Выше отмечалось, что в полосы U (365 ± 34 нм), I (900 ± 120 нм) попадают полосы поглощения некоторых силикатных минералов оливиновой группы, тефроита, монтчеллита, а также магний- и цинксодержащих пироксенов [4]. В полосу I также попадают абсорбции обогащенных хромом и титаном пироксенов [3]. Таким образом, можно сделать вывод, что высокая корреляция отдельных участков U и I кривых блеска Электры свидетельствует о наличии на ее поверхности пятен силикатов, содержащих оливины, пироксены или оливин-пироксеновые композиции.

Заключение. Быстрая спектрофотометрия с временным разрешением несколько минут позволяет изучать минералогический состав поверхностей астероидов, используя технику колориметрии малых форм.

Цветовые характеристики «пятен» по данным цветовых диаграмм $UBVRI$ цветовой системы позволяют идентифицировать минералогический состав вещества поверхности астероида, определять размеры и количество малых форм на поверхности астероида.

На примере астероида 130 Электра показано наличие на его поверхности примерно 16 «пятен» разного минералогического состава размером от 13 до 30 км.

Колориметрический анализ кривых блеска Электры свидетельствует о наличии на ее поверхности пятен силикатов, содержащих оливины, пироксены или оливин-пироксеновые композиции.

Техника колориметрии малых форм на основе быстрой спектрофотометрии представляет собой новое направление в изучении малых тел Солнечной системы.

1. Bus S. J., Binzel R. P. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopy survey: A feature-based taxonomy // *Icarus*.—2002.—**158**, N 1.—P. 146—177.
2. Clark R. N. Chapter 1: Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy // *Manual of remote sensing* / Ed. by A. N. Rencz. New York: John Wiley and Sons, 1999. Vol. 3. P. 3—58.
3. Cloutis E. A. Pyroxene reflectance spectra: Minor absorption bands and effects of elemental substitutions // *J. Geophys. Res.*—2002.—**107E**, N 6.—P. 5039.

4. Ghose S., Kersten M., Langer K., et al. Crystal field spectra and Jahn Teller effect of Mn³⁺ in clinopyroxene and clinoamphiboles from India // Phys. Chem. Miner.—1986.—**13**.—P. 291—305.
5. DeMeo F. E., Binzel R. P., Slivan S. M., Bus S. J. Bus-DeMeo Asteroid Taxonomy V1.0. EAR-A-VARGBDET-5-BUSDEMEOTAX-V1.0. NASA Planetary Data System, 2009.
6. Marchis F., Kaasalainen M., Hom E. F. Y., et al. Shape, size and multiplicity of main-belt asteroids. I. Keck Adaptive Optics survey // Icarus.—2006.—**185**, N 1.—P. 39—63.
7. Tholen D. J. Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry: PhD. The University of Arizona, 1984.
8. Tholen D. J., Barucci M. A. Asteroid taxonomy // Asteroids II / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. S. Matthews.—Tucson: Univ. Arizona Press. —P. 298—315.
9. Zhilyaev B. E., Sergeev O. V., Andreev M. V., et al. A slitless spectrograph for observing transient events with small telescopes // Proc. SPIE.—2012.—**8446**.—P. 844681-1-10.

Статья поступила в редакцию 01.12.15