АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Спектрофотометрические исследования астероидов, сближающихся с Землей, и Главного пояса

М. П. Щербина,[1,a] В. В. Бусарев,[1,2] С. И. Барабанов[2]

[1] *Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ). Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13.*

[2] *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН). Россия, 119017, Москва, ул. Пятницкая, д. 48.*

Поступила в редакцию 26.03.2019, после доработки 09.07.2019, принята к публикации 22.08.2019.

Нами проведены наблюдения, расчет и анализ спектров отражения в диапазоне 0.35–0.95 мкм 4 астероидов, сближающихся с Землей, одного марс-кроссера и 5 астероидов Главного пояса. Наблюдения астероидов до 17 величины были выполнены в 2013–2017 гг. на 2-м телескопе с призменным ПЗС-спектрографом с предельно низким спектральным разрешением (R 100) Терскольской обсерватории ИНАСАН с целью оценки их таксономических типов и состава вещества. Полученные результаты показывают, что несколько изученных сближающихся с Землей астероидов имеют неоднородный состав вещества, судя по вариациям их спектров отражения в пределах соседних таксономических классов. Интересно, что некоторые из этих астероидов являются двойными. Представлена физическая и химико-минералогическая интерпретация спектров отражения.

Ключевые слова: астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ); астероиды Главного пояса; таксономический тип.

УДК: 523.44. PACS: 96.30.Ys, 96.25.Hs, 96.25.-f, 95.75.Fg.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение метеоритов (например, [1, 2]) показывает, что они сами и их наиболее вероятные родительские тела — астероиды — это наиболее древние и наименее измененные реликты первичного вещества Солнечной системы. Поэтому у специалистов сложилось мнение, что знание физико-химических особенностей этих тел необходимо для решения космогонических задач. Стоит заметить, что с самого начала своего существования астероиды часто сталкивались друг с другом, из-за чего происходило перемешивание их внешних и внутренних слоев. Поэтому можно предполагать, что состав малых астероидов (если их считать фрагментами более крупных тел) является достаточно однородным. Это означает, что состав реголитового (верхнего слоя) может быть более представительным для всего тела у малых астероидов по сравнению с крупными [3].

Астероиды, сближающиеся с Землей, являются потенциально опасными объектами, поэтому их изучение необходимо и с точки зрения космической безопасности. Кроме того, близкие к Земле тела могут рассматриваться как возможные источники внеземных природных ресурсов [4, 5].

Безатмосферные тела Солнечной системы представляют собой идеальные объекты для дистанционных оптических измерений, так как вблизи их поверхностей отсутствует газообразная оболочка, создающая случайные и систематические помехи для проходящих сигналов. Важнейшим из дистанционных методов является спектрофотометрия.

Спектрофотометрия безатмосферных небесных тел обычно выполняется в видимом и ближнем ИК-диапазонах (от 0.38 до 1.1 мкм), хотя с помощью специализированных наземных телескопов, позволяющих выполнять наблюдения в более широком ИК-диапазоне, длинноволновую границу удается расширить до 3 мкм. Проведение дистанционной оценки состава вещества твердого небесного тела спектрофотометрическим методом можно разбить на три основных этапа [6]:

- регистрация спектров отраженного таким телом солнечного излучения, а также спектров ближайших к нему одной или нескольких стандартных звезд солнечного типа в течение той же ночи с помощью телескопа со спектрографом;
- расчет и анализ спектров отражения исследуемого тела;
- и, наконец, химико-минералогическая интерпретация спектра отражения на качественном или количественном уровне на основе информации об образцах-аналогах.

В последние два десятилетия выполнялись и продолжают выполняться прямые исследования наиболее интересных астероидов прямыми космическими методами (25143 Итокава, S-тип; 4 Веста, V-тип; 1 Церера, C-тип; 162173 Рюгу, C-тип; 101955 Бенну, B-тип), включая доставку вещества с некоторых из них на Землю [7–11]. Но необходимо отметить, что выбор этих астероидов в качестве объектов космических миссий был осуществлен с помощью наземных дистанционных методов, которые, несомненно, являются важной составляющей частью подобных космических проектов. С другой стороны, с учетом огромного числа уже известных малых планет в Солнечной системе, приближающегося к миллиону, только дистанционные методы позволят осуществить оценку основных параметров этих тел за сравнительно короткое время и с минимальными затратами.

[a] E-mail: morskayaa906@yandex.ru

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

В течение 2013–2017 гг. на 2-м телескопе с призменным ПЗС-спектрометром предельно низкого разрешения R ≈ 100 (WI CCD 1240 × 1150) [12] Терскольского филиала ИНАСАН в диапазоне 0.35–0.90 мкм была выполнена спектрометрия астероидов до 17 звездной величины, которые рассматриваются в данной работе. Выходные данные были предоставлены в формате .fts, обработанные затем программным пакетом DECH (DECH20T и DECH95), разработанным Г. А. Галазутдиновым [13]. Также в ходе работы использовался пакет программ для математической обработки данных Origin 2015.

Измерение спектра любого излучающего небесного объекта осуществляется принятым в астрофизике дифференциальным методом, т. е. путем сравнения световых потоков от этого объекта и стандартной звезды на каждой длине волны или в узком интервале длин волн. Использование солнечных аналогов в качестве стандартных звезд значительно упрощает получение спектров отражения астероидов.

При обработке наблюдательных данных были исключены высокочастотные шумы, связанные с земной атмосферой, аппаратурой и частично — отличия солнечных аналогов от Солнца. Калибровка длин волн спектра была осуществлена на основе бальмеровской серии спектра α Peg. Кроме того, спектры отражения были нормированы на значение на длине волны 5500 Å. Для устранения шумов дополнительно проводилось сглаживание спектров, которое существенно не влияет на качество особенностей спектров отражения.

При возможности проводилось усреднение спектров, а также последующая полиномиальная аппроксимация. В случае с небольшим количеством данных в качестве результирующего брался спектр с наилучшим отношением сигнал/шум. Координаты и прочие данные относительно наблюдений даны в электронном приложении, доступном по ссылке.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ

2.1. Астероиды, сближающиеся с Землей, и марс-кроссер

2.1.1. 4450 Пан (1987 SY)

Астероид Пан относится к группе аполлонов, а также является потенциально опасным астероидом. Период обращения 4450 составляет 632.64 сут, а период вращения астероида — 56.48 ч. Диаметр ≈ 1 км [14, 15]. Также стоит отметить, что астероид Пан может быть контактным двойным астероидом [16]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 1, *а*.

Общая форма спектра отражения астероида Пан, вероятно, соответствуют высокотемпературному классу S. Вероятно, коротковолновое крыло полосы поглощения у 10000 Å возникает при электронных переходах в кристаллическом поле у Fe^{2+} в пироксене (и/или оливине). К настоящему времени другими исследователями не была проведена оценка принадлежности к тому или иному таксономическому типу.

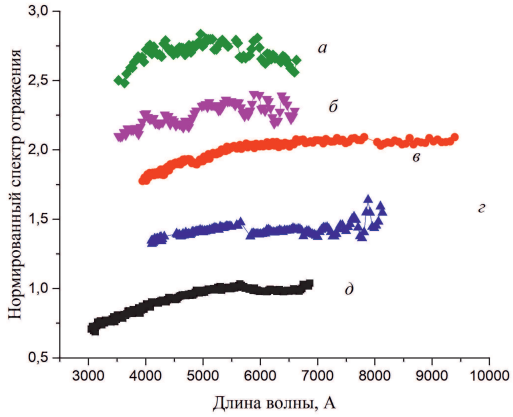

Рис. 1. Нормированные спектры отражения астероидов 4450 Пан (*а*), 2010 TN54 (*б*), 345 Терцидина (*в*), 381 Мирра (*г*), 712 Боливиана (*д*)

2.1.2. 2010 TN54

Данный астероид относится к группе амуров, а также является потенциально опасным астероидом. Период обращения 2010 TN54 составляет 1119.45 сут, а период вращения астероида — 12.12 ч. Диаметр ≈ 0.5 км. [14, 15]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 1, *б*.

Общий слабый положительный градиент спектра и полоса поглощения у 4500 Å (Fe^{3+}), что свидетельствует о гидросиликатах [17], дают возможность предполагать о принадлежности TN54 к низкотемпературным классам, вероятно к C. К настоящему времени другими исследователями не была проведена оценка принадлежности к тому или иному таксономическому типу.

2.1.3. 20826 (2000 UV13)

Данный астероид относится к группе аполлонов. Период обращения 20826 составляет 1378.08 сут, а период вращения астероида — 12 ч [14, 15]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 2, *а*. Общий градиент спектра отражения 20826

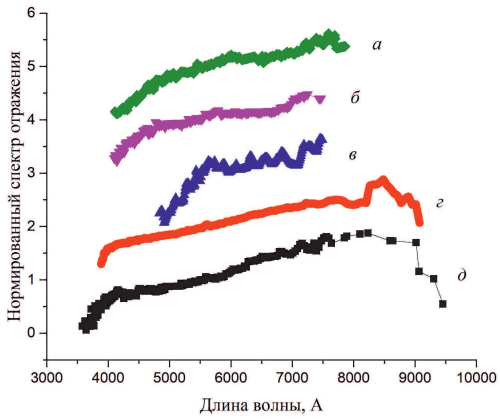

Рис. 2. Нормированные спектры отражения астероидов 20826 (*а*), 93768 (*б*), 162385 (*в*), 482 Петрина (*г*), 863 Бенкоэла (*д*)

указывает на высокотемпературную минералогию, предположительно S-класса. Это же подтверждает опубликованная оценка [18].

2.1.4. 93768 (2000 WN22)

Данный астероид относится к группе марс-кроссеров, астероидов, пересекающих орбиту Марса. Период обращения 93768 составляет 1297.73 сут, а период вращения астероида — 2.68 ч [14, 15]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 2, *б*. Кроме общего градиента спектра отражения, преимущественно высокотемпературный состав астероида и принадлежность к S-типу подтверждается достаточно коротким периодом вращения как тела с более высокой плотностью. К настоящему времени другими исследователями не была проведена оценка принадлежности к тому или иному таксономическому типу.

2.1.5. 162385 (2000 BM19)

Данный астероид относится к группе атонов. Период обращения 162385 составляет 232.75 сут, а период вращения астероида — 9.47 ч [14, 15, 19]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 2, *в*. Общая форма спектра отражения астероида говорит о высокотемпературной минералогии Q—S-классов. Это же подтверждают другие авторы [20].

2.2. Астероиды Главного пояса

2.2.1. 345 Tercidina (1892 O)

Данный астероид является астероидом Главного пояса. Период обращения составляет 1294.95 сут, а период вращения астероида — 12.37 ч. Геометрическое альбедо составляет 0.065, диаметр — 94.12 км [14, 15]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 1, *в*. В основном плоский спектр отражения в более коротковолновой области с небольшим положительным градиентом соответствует низкотемпературной минералогии астероида и является признаком его принадлежности к уже установленному классу C, что согласуется с результатами других авторов [21]. Еще один признак, подтверждающий указанную минералогическую интерпретацию, — слабая полоса поглощения в диапазоне 4500–4700 Å, вероятно, характерная для Fe^{3+} в гидратированных силикатах [17].

2.2.2. 381 Myrrha (1894 AS)

Данный астероид является астероидом внешней части Главного пояса. Период обращения 381 Myrrha составляет 2114.6 сут, а период вращения астероида — 6.57 ч. Геометрическое альбедо составляет 0.06, диаметр — 120.58 км [14, 15]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 1, *г*.

Спектр отражения астероида соответствует низкотемпературному классу C, что подтверждает работа [22].

2.2.3. 712 Boliviana (1911 LO)

Данный астероид является астероидом Главного пояса. Период обращения составляет 1509.48 сут, а период вращения астероида — 11.732 ч. Геометрическое альбедо составляет 0.051, диаметр — 127.57 км [14, 15]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 1, *д*. Период вращения — как у тела с пониженной плотностью, низкое геометрическое альбедо, ровный слабый положительный градиент спектра отражения указывают на низкотемпературную минералогию. Форма в диапазоне 5500–6700 Å меняется от выпуклой до вогнутой. Появление на указанных длинах волн значительной полосы поглощения (по-видимому, вследствие переноса заряда $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$), может быть вызвано наличием гидросиликатов. Согласно [14] астероид принадлежит к классу C (по классификации Толена), по работе [22] — к классу X (согласно классификации SMASS II).

2.2.4. 482 Petrina (1902 HT)

Данный астероид является астероидом Главного пояса. Период обращения составляет 1895.25 сут, а период вращения астероида — 11.79 ч. Геометрическое альбедо составляет 0.24, диаметр — 46.57 км [14, 15]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 2, *г*. Спектр отражения 482 Petrina имеет ярко выраженный рост в длинноволновой области, что говорит о высокотемпературной минералогии. Согласно [14] на основании двух цветовых индексов астероид относится к классу S по Толену. Об этом косвенно может подтверждать высокое альбедо.

2.2.5. 863 Benkoela (1917 BH)

Данный астероид является астероидом внешней части Главного пояса. Период обращения 863 Benkoela составляет 2093.44 4 сут, а период вращения астероида — 7.03 ч. Геометрическое альбедо составляет 0.595, диаметр — 27.06 км [14, 15]. Нормированный спектр отражения изображен на рис. 2, *д*.

Спектр отражения астероида имеет форму, характерную для высокотемпературного класса A, что определяется значительным ростом к длинным волнам отражательной способности астероидов этого класса, и признаки сильной полосы поглощения Fe^{2+} у 10000 Å в высокотемпературных минералах (пироксен, оливин и др.), а также высоким альбедо. Данную оценку подтверждают такие публикации, как [21–23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами определен спектральный тип для 5 астероидов, сближающихся с Землей, и марс-кроссеров, а также для 5 астероидов Главного пояса. Были проведены обработка, расчет спектров отражения

Таблица. Результаты определения таксономических классов астероидов. Звездочкой отмечены те объекты, для которых таксономический класс не был определен другими авторами к настоящему моменту

Объект	Класс по Толену	Объект	Класс по Толену
4450 Пан*	S	345 Терцидина	C
2010 TN54*	C	381 Мирра	C
20826	S	482 Петрина	S
93768*	S	712 Боливиана	C
162385	Q—S	863 Бенкоэла	A

и определение таксономического класса согласно Толену (т. к. используемый нами спектральный диапазон соответсвует именно этой классификации) по общему виду спектров, а также некоторым особенностям. Кратко результаты представлены в таблице. Для астероидов 93768, 4450 Пан и 2010 TN54 оценка таксономического класса была дана впервые, результаты для остальных рассмотренных объектов согласуются с другими авторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Patterson C.* // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1956. **10**, № 4. P. 230.
2. *Dodd R. T.* // Cambridge Univ. Press, 1981. P. 368
3. *Сафронов В. С.* // Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. Наука, 1969.
4. *Board S. S.* et al. // Defending Planet Earth: Near-Earth Object Surveys and Hazard Mitigation Strategies. National Academies Press, 2010.
5. *Lewis J. S.* // Mining the Sky: Untold Riches from the Asteroids, Comets, and Planets. Helix Book, 1996.
6. *Бусарев В. В.* // Астрон. вестн. 1999. **33**, № 2. С. 140.
7. *Fujiwara A.* et al. // Science. 2006. **312**, № 5778. P. 1330.
8. *Russell C. T.* et al. // Earth, Moon, and Planets. 2007. **101**, № 1–2. P. 65.
9. *Russell C. T.* et al. // Science. 2012. **336**, № 6082. P. 684.
10. *Tachibana S.* et al. // Geochem. J. 2014. **48**. P. 571.
11. *Lauretta D. S.* et al. // Meteorit. & Planet. Sci. 2015. **50**, № 4. P. 834.
12. MMCS — Multi Mode Cassegrain Spectrometer // Режим доступа: http://terskol.com/telescopes/cmms.htm (Дата обращения: 01.03.2019.)
13. *Галазутдинов Г. А.* // Обработка астрономических спектров в ОС Windows с помощью программ DECH. 2002.
14. JPL Small-Body Database // Режим доступа: http://ssd.jpl.nasa.gov/ssdb.cgi (Дата обращения: 01.03.2019.)
15. The International Astronomical Union Minor Planet Center // Режим доступа: http://www.minorplanetcenter.net/ (Дата обращения: 01.03.2019.)
16. Contact Binary Asteroids and Comets // Режим доступа: http://www.johnstonsarchive.net/astro/contactbinast.html (Дата обращения: 01.03.2019.)
17. *Busarev V. V.* et al. // Icarus. 2015. **262**. P. 44.
18. *Ieva S.* et al. // Astronomy & Astrophysics. 2014. **569**. P. A59.
19. *Koehn B. W.* et al. // Minor Planet Bulletin. 2014. **41**. P. 286.
20. *Binzel R. P.* et al. // Meteoritics & Planetary Science. 2004. **39**,№ 3. P. 351.
21. *Xu S.* et al. // Progr. Part. Nucl. Phys. 1995. **115**, № 1. P. 1.
22. *Bus S. J., Binzel R. P.* // Icarus. 2002. **158**, № 1. P. 146.
23. *Tholen D. J.* // Asteroids II. 1989. P. 1139.

Spectrophotometric Studies of Near-Earth and Main-Belt Asteroids

M. P. Shcherbina[1,a], V. V. Busarev[1,2], S. I. Barabanov[2]

[1]*Sternberg State Institute of Astronomy, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119191, Russia.*
[2]*Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. Moscow 119017, Russia.*
E-mail: [a]morskayaa906@yandex.ru.

The reflectance spectra of five near-Earth asteroids, one Mars crosser, and four classical asteroids of the main belt in the range 0.35–0.95 μm have been observed, calculated, and analyzed. Asteroids with a magnitude up to 17 were observed in 2013–2017 with a 2-m telescope with a CCD spectrograph with extremely low spectral resolution ($R \sim 100$) of the Terskol Observatory of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences in order to determine their taxonomic types and composition. These results show that the composition of some of the studied near-Earth asteroids is heterogeneous judging by the variations in their reflectance spectra within adjacent taxonomic classes. It is notable that some of these asteroids are binary. The physical and chemical-mineralogical interpretation of reflectance spectra is presented.

Keywords: near-Earth asteroids (NEAs), Main Belt asteroids,taxonomic types.
PACS: 96.30.Ys, 96.25.Hs, 96.25.-f, 95.75.Fg.
Received 26 March 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2019. **74**, No. 6. Pp. 675–678.

Сведения об авторах

1. Щербина Марина Петровна — аспирант; e-mail: morskayaa906@yandex.ru.
2. Бусарев Владимир Васильевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: busarev@sai.msu.ru.
3. Барабанов Сергей Иванович — канд. физ.-мат. наук, зав. отделом; e-mail: sbarabanov@inasan.ru.