

УДК 523.44

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ АСТЕРОИДОВ В 2016 Г. И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИХ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ

Щербина М. П., Бусарев В. В., Барабанов С. И.

SPECTROPHOTOMETRIC STUDY OF ASTEROIDS IN 2016 AND INTERPRETATION OF THEIR REFLECTANCE SPECTRA

Scherbina M. P. *, Busarev V. V. *, Barabanov S. I. **

* Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234, Russia

* Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017, Russia
e-mail: morskayaa906@yandex.ru

Abstract. We have carried out observation, calculation and analysis of low-resolution reflectance spectra ($R \approx 100$) in the range of 0.35–0.92 μm of two near-Earth asteroids (93768, 68216), and four main-belt asteroids (2 Pallas, 787 Moskva, 11 Partenope, 245 Tercidina). Observations of the asteroids were performed using 2-m telescope with a CCD-spectrograph of INASAN Terskol Observatory to determine or specify their taxonomic types and estimate heterogeneity in composition at different rotational phases. Qualitative estimates of spectral (taxonomic) types of 787 Moskva and both NEAs are made.

Keywords: asteroids, NEA, reflectance spectra, spectrometry, spectral type of asteroid.

Введение

Изучение метеоритов (напр., [1,2]) показывает, что они сами и их вероятные родительские тела — астероиды — это самые древние и наименее измененные реликты первичного вещества Солнечной системы. Поэтому знание физико-химических особенностей этих тел необходимо для решения космогонических задач. Неправильная форма абсолютного большинства астероидов является признаком их ударного происхождения и эволюции, что, вероятно, привело к перемешиванию их внешних и внутренних слоев. Исходя из этого, можно предполагать, что состав малых астероидов (если их считать фрагментами более крупных тел) является более однородным, а состав их реголитового (верхнего слоя) — более представительным для всего тела [3].

Астероиды, сближающиеся с Землей, являются потенциально опасными объектами, поэтому их изучение необходимо и с точки зрения космической опасности. Кроме того,

близкие к Земле тела рассматриваются 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, как правило, отсутствует газообразная оболочка, создающая случайные и систематические помехи для проходящих сигналов. Важнейшим из дистанционных методов является спектрофотометрия. Она обычно выполняется в видимом и ближнем ИК диапазонах (от 0,38 до 1,1 мкм), хотя с помощью наиболее совершенных наземных телескопов 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 с помощью телескопа со спектрографом спектров отраженного таким телом солнечного излучения, а также ближайших к нему в течение одной наблюдатель-

Щербина Марина Петровна, аспирант кафедры астрофизики и звездной астрономии Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, вед. инженер отдела исследования Луны и планеты Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; e-mail: morskayaa906@yandex.ru.

Бусарев Владимир Васильевич, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник отдела исследования Луны и планет Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; e-mail: busarev@sai.msu.ru.

Барабанов Сергей Иванович, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом Звенигородской обсерватории Института астрономии РАН; e-mail: sbarabanov@inasan.ru

ной ночи одной или нескольких стандартных звезд солнечного типа;

– расчет и анализ спектров отражения исследуемого тела (с использованием звезд — солнечных аналогов);

– и, наконец, химико-минералогическая интерпретация спектра отражения на качественном или количественном уровне на основе информации об образцах-аналогах.

1. Наблюдения и обработка данных

В феврале–сентябре 2016 г. на втором телескопе с призмным ПЗС-спектрометром (WI CCD 1240×1150) Терскольского филиала ИНАСАН в диапазоне 0,35–0,90 мкм с разрешающей силой $R \approx 100$ была выполнена спектрометрия 4 астероидов Главного пояса и 2 астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), которые рассматриваются в данной работе. Их наблюдательные параметры приведены в табл. 1 и в табл. 2. Дополнительные данные были взяты из баз [8–10].

Исходные данные были записаны в формате .fts. Их обработка была проведена с помощью программного пакета DECH (DECH20T и DECH95), разработанного Галазутдиновым Г.А. [7]. В ходе работы также использовалась программа для математической обработки данных Origin 8.1.

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 некотором 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, а также частично — отличия солнечных аналогов от Солнца. Калибровка длин волн спектра была осуществлена по бальмеровской серии спектра α Reg. Кроме того, спектры отражения были нормированы на значение на длине волны 5500 Å. Для устранения шумов дополнительно проводилось сглаживание спектров отражения, которое существенно не влияет на качество достаточно широких полос поглощения, имеющих минералогическое значение.

Далее приводятся усредненные спектры, в случае, если их относительная фаза враще-

ния (ОФВ), рассчитываемая по известному периоду, изменяется на величину примерно не более 0,4. За нуль-пункт принимается середина экспозиции первого спектра. Но при малом количестве данных приводятся только лучшие по отношению сигнал/шум спектры. Таким образом, в табл. 1 указаны либо характеристики для средних величин (в случае усредненных спектров отражения), либо данные, относящиеся к избранным спектрам.

2. Результаты и интерпретация спектров отражения

2.1. 2 Паллада

Астероид 2 Паллада является одним из крупнейших астероидов Главного пояса. Его спектральный тип В характеризует множество малых планетных тел, не подвергавшихся воздействию высокотемпературных процессов (более нескольких сотен градусов) и является подклассом супер-класса С [11].

На рис. 1. представлены спектры отражения Паллады, нормированные на значение на длине волны 5500 Å и произвольно смещенные по вертикальной оси для удобства сравнения. Спектры по форме плоские или имеют небольшой положительный градиент, что, наряду с достаточно низким геометрическим альбедо астероида, соответствует низкотемпературной минералогии [12]. Поскольку спектры отражения Паллады нами получены при очень малых различиях ОФР, нерегулярность спектров на длинах волн более 7000 Å характеризует спектральную неустойчивость атмосферы, связанную с достаточно большими воздушными массами (табл. 1). В то же время форма спектров во всем спектральном диапазоне отражения в основном согласуется с предшествующими результатами [11, 13].

2.2. 787 Москва

Астероид 787 Москва является сравнительно небольшим, 27,9-км, астероидом Главного пояса, с довольно низким альбедо, но, в то же время, с небольшим периодом вращения (табл. 2). На рис. 2 представлены его нормированные спектры отражения, смещенные по вертикальной оси для удобства представления. Как и Паллада, астероид Москва наблюдался в ту же ночь при достаточно больших воздушных массах (табл. 1), поэтому в его спектрах отражения на длинах волн более 7500 Å имеются шумовые нерегулярно-

Таблица 1. Эфемериды и наблюдательные данные

Дата	Время UTC	Прямое восхождение	Склонение	Δ , а.е.	r , а.е.	Фазовый угол	V	Время экспозиции, с	Воздушная масса	ОФВ
2 Паллада (1 ночь, 5 спектров)										
2016 09 19	201400	21 08 52.97	+03 46 51.6	3,325	2,496	11,3	9,46	40	1,739	0
2016 09 19	201700	21 08 52.92	+03 46 50.1	3,325	2,496	11,3	9,46	40	1,757	0.006
2016 09 19	201800	21 08 52.90	+03 46 49.5	3,325	2,496	11,3	9,46	40	1,775	0.008
787 Москва (1 ночь, 4 спектра)										
2016 09 19	211900	22 50 47.53	-01 39 47.0	2,276	1,313	9,2	12,69	1500	1,589	0
2016 09 19	214600	22 50 46.99	-01 40 01.2	2,276	1,313	9,2	12,69	1500	1,703	0.075
2016 09 19	221400	22 50 46.43	-01 40 16.0	2,276	1,313	9,2	12,69	1500	1,871	0,151
11 Партенопа (1 ночь, 5 спектров)										
2016 09 19	232000	00 43 33.76	-02 56 06.4	2,260	1,272	5,9	9,31	45	1,827	0
2016 09 19	232200	00 43 33.69	-02 56 07.0	2,260	1,272	5,9	9,31	45	1,836	0,002
245 Терсидина (1 ночь, 5 спектров)										
2016 09 26	233800	02 07 02.19	+16 08 58.1	2,251	1,332	13,3	11,92	480	1,158	0
2016 09 26	234800	02 07 01.97	+16 08 55.1	2,251	1,332	13,3	11,92	480	1,168	0,014
2016 09 26	002000	02.07 01.27	+16 08 45.6	2,250	1,332	13,3	11,92	500	1,215	0,057
93768 (средние величины; 1 ночь, 3 спектра)										
2016 02 10	211500	13 11 40.10	+49 03 57.5	0,904	1,671	29,3	16,3	1800	1,281	0-0,412
68216 (средние величины; 1 ночь, 3 спектра)										
2016 02 10	233400	16 13 07.54	+71 43 46.1	0,288	1,078	64,1	16,2	1800	1,349	0-0,427

Примечание. Астероиды перечислены в порядке их наблюдений за исключением АСЗ, данные о которых приведены в конце таблицы. Количество ночей и спектров указано рядом с названием астероида. За нулевую относительную фазу вращения (ОФВ) каждого астероида условно принята ОФВ, соответствующая его первому спектру.

Таблица 2. Известные данные о рассматриваемых астероидах

Астероид	2 Паллада	787 Москва	11 Партенопа	245 Терсидина	93768	68216
Группа	Гл	Гл	Гл	Гл	МК	Ап
Период вращения, ч	7.81	6.06	13.72	12.37	2.68	2.43
Диаметр, км	545	27.9	153.3	94.12	–	–
Геометрич. альbedo	0.16	0.19	0.18	0.07	–	–
Спектральный тип по Толену [11]	V	–	S	C	–	–

Обозначения: Гл — Главный пояс, Ап — Аполлон, МК — Марс-кроссер.

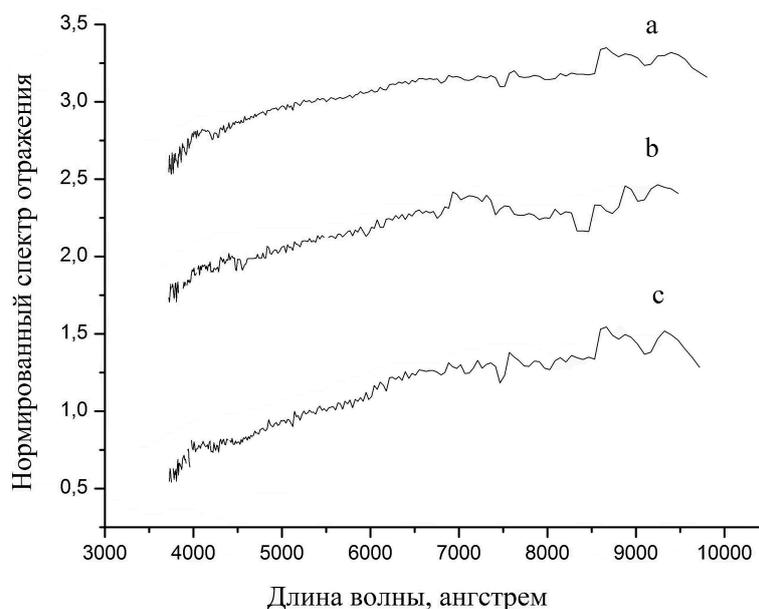


Рис. 1. Нормированные спектры отражения 2 Паллады. Спектр «а» соответствует наблюдению 19.09.2016 20:14 (UTC), спектр «b» соответствует 19.09.2016 20:17 (UTC), спектр «с» соответствует 19.09.2016 20:18 (UTC)

сти, связанные со спектральной неустойчивостью земной атмосферы. Спектральными особенностями, свойственными самому астероиду, являются некоторые вариации формы коротковолнового континуума, зарегистрированные при небольших различиях ОФР (0, 0,075 и 0,151, соответственно), что можно связать с неоднородностями степени окисления его поверхностного вещества [14]. Поскольку таксономический тип астероида Москва неизвестен, по достаточно плоской форме его спектра отражения с небольшим положительным градиентом и сравнительно низким (но все же недостаточно низким для С-типа) геометрическим альbedo можно предполагать, что он относится к промежуточному спектральному типу X. На монолитность тела астероида может указывать небольшой период его вращения (табл. 2). Минералогия его

вещества может быть переменной, включая низкотемпературную.

2.3. 11 Партенопа

Астероид 11 Партенопа движется в Главном поясе, имеет достаточно большой диаметр, и установленный спектральный класс S (табл. 2), для которого свойственна преимущественно высокотемпературная минералогия [12]. На рис. 3 показаны два его спектра отражения, соответствующие очень близким ОФР (табл. 1). Как и два предыдущих астероида, Партенопа наблюдалась при достаточно больших воздушных массах, что вызвало шумовые нерегулярности в диапазоне 7000–9500 Å (рис. 3). Спектры имеют максимум у 7000 Å, и признаки наличия достаточно интенсивной оливин-пироксеновой полосы по-

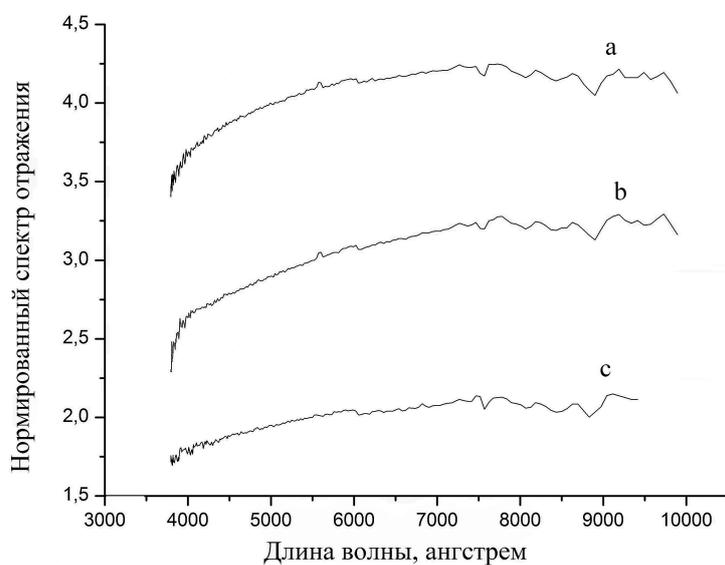


Рис. 2. Нормированные и смещенные по вертикальной оси для удобства сравнения спектры отражения 787 Москвы. Спектр «а» соответствует 19.09.2016 21:19 (UTC), спектр «b» соответствует 19.09.2016 21:46 (UTC), спектр «с» соответствует 19.09.2016 22:14 (UTC)

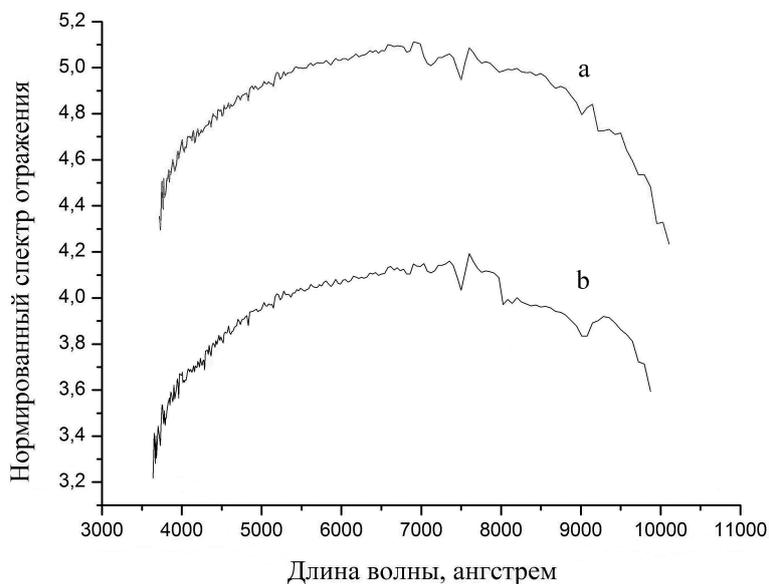


Рис. 3. Нормированные спектры отражения 11 Партенопы. Спектры произвольно смещены по вертикальной оси для удобства сравнения. Спектр «а» соответствует наблюдению 19.09.2016 23:20 (UTC), спектр «b» соответствует 19.09.2016 23:22 (UTC)

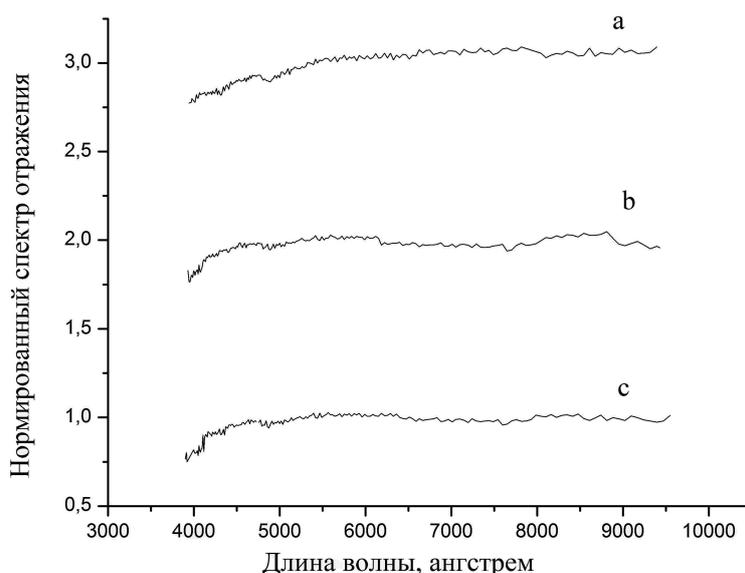


Рис. 4. Нормированные спектры отражения 245 Терсидина. Спектр «а» соответствует 26.09.2016 23:38 (UTC), спектр «b» соответствует 26.09.2016 23:48 (UTC), спектр «с» соответствует 26.09.2016 00:20 (UTC)

глощения с центром у $10\,000\text{ \AA}$, что согласуется с общей высокотемпературной минералогий астероида.

Ранее было показано, что Партенопа обладает неоднородностью вещества и на ее поверхности могут быть низкотемпературные образования, связанные с падениями тел примитивного (углисто-хондритового или ледяного) состава, в качестве индикатора которых рассматривалась слабая полоса поглощения Fe^{3+} у 4300 \AA [15]. На представленных спектрах отражения признаки такой полосы поглощения имеются (рис. 3).

2.4. 245 Терсидина

245 Терсидина также является астероидом Главного пояса, имеющим крайне низкое геометрическое альbedo и большой период вращения (табл. 2). Полученные спектры отражения астероида соответствуют очень близким ОФР и характеризуют, как и в предыдущих случаях, шумовые нерегулярности спектральной прозрачности земной атмосферы в диапазоне $7000\text{--}9500\text{ \AA}$. В основном плоские в более коротковолновой области спектры отражения с небольшим положительным градиентом (рис. 4), соответствуют низкотемпературной минералогии астероида и являются признаками его принадлежности к уже установленному классу С, что согласуется с результатами других авторов [11]. Еще од-

ним признаком, подтверждающим указанную минералогическую интерпретацию, является слабая полоса поглощения в диапазоне $4300\text{--}4500\text{ \AA}$, характерная для Fe^{3+} в гидратированных силикатах [16].

2.5. 93768

Астероид 93768 принадлежит к семейству так называемых марс-кроссеров (пересекающих орбиту Марса) и обладает довольно коротким периодом вращения (табл. 2). Все спектры отражения астероида были усреднены для улучшения качества и уменьшения погрешностей на интервале ОФР от 0 до 0,4 (рис. 5). Спектр имеет подъем, свойственный для астероидов класса S, характеризующий его в основном высокотемпературную минералогию. В то же время имеются признаки достаточно широкой полосы поглощения с центром у 6500 \AA , вызываемой переносом заряда $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ в гидратированных силикатах, которые могут присутствовать в поверхностном веществе астероида в виде примеси или как отдельные образования [16].

Качественная оценка спектрального (таксономического) типа данного астероида сделана впервые.

2.6. 68216

Астероид 68216 принадлежит к классу аполлонцев. На рис. 6 представлен усред-

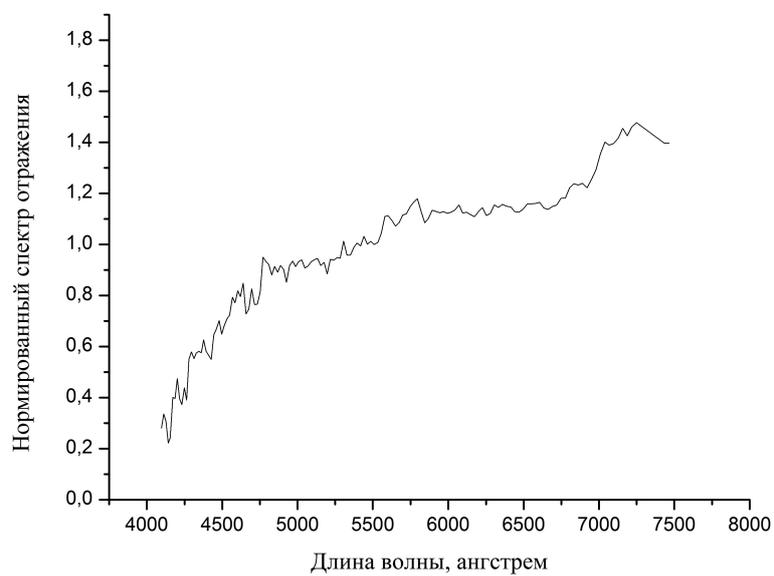


Рис. 5. Усредненный нормированный спектр отражения астероида 93768

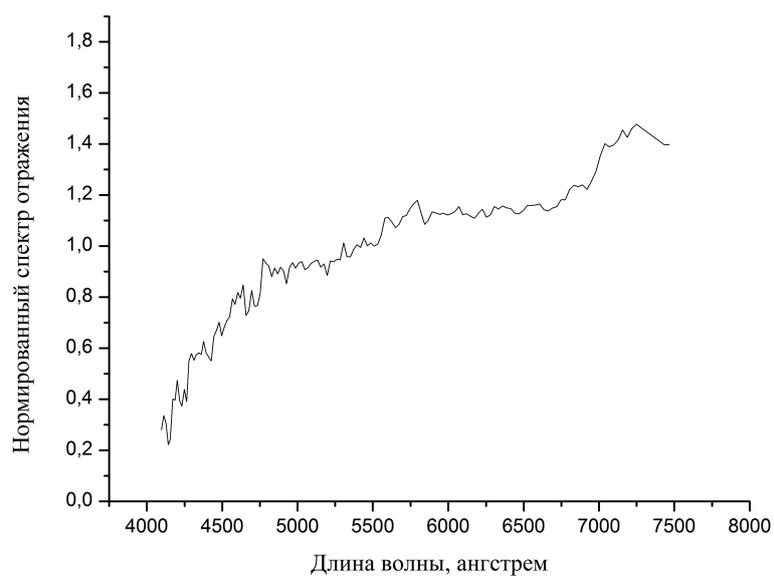


Рис. 6. Усредненный нормированный спектр отражения астероида 68216

ненный нормированный спектр отражения в диапазоне ОФР от 0 до 0,4. Как и в предыдущем случае, спектр отражения обладает подъемом, характерным для астероидов высокотемпературных минералогических типов суперкласса S [11]. Довольно короткий период вращения 68216 также косвенно указывает на это. Однако зашумленность спектра отражения не позволяет дать его более точную интерпретацию.

Качественная оценка спектрального типа данного астероида была сделана впервые.

Заключение

В течение 2016 г. во время двух наблюдательных сессий в феврале и сентябре на обсерватории «Пик Терскол» удалось получить спектральные данные для четырех астероидов Главного пояса и двух АСЗ. Впервые сделаны оценки спектральных (таксономических) типов астероидов 787 Москва (X), марс-кроссера 93768 (S) и аполлонца 68216 (S). Кроме того, получены подтверждения неоднородности вещества астероида S-типа 11 Партенопа, связанные, вероятно, с падениями на него небольших тел примитивного (углисто-хондритового или ледяного) состава.

Литература

1. *Patterson C.* Age of meteorites and the earth // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1956. Vol. 10, P. 230–237.
2. *Dodd R.T.* Meteorites – A Petrologic-chemical Synthesis. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1981. 368 p.
3. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 241 с.
4. *National Research Council.* Defending planet Earth: near-earth object surveys and hazard mitigation strategies. Washington, DC: The National Academies Press, 2010. 152 p. DOI: 10.17226/12842
5. *Lewis J.S.* Mining the sky: untold riches from the asteroids, comets, and planets. Basic Books, 1998. 274 p.
6. *Бусарев В.В.* Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. № 2. С. 140–150.
7. *Галазутдинов Г.А.* Обработка астрономических спектров в ОС Windows с помощью программ DECH. Ч. 2. «Обработка спектров (описание программы Dech20T и руководство пользователя)», 1991.
8. The International Astronomical Union Minor Planet Center. Режим доступа: [http://](http://www.minorplanetcenter.net)

- www.minorplanetcenter.net (дата обращения: 21.12.2016 г.).
9. SIMBAD Astronomical Database. Режим доступа: <http://simbad.cfa.harvard.edu/simbad> (дата обращения: 21.12.2016 г.).
 10. Каталог АСЗ Физические характеристики. Режим доступа: <http://quasar.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LSBSS/hazard/index.php?lang=ru&table=3> (дата обращения: 21.12.2016 г.).
 11. *Bus S.J., Binzel R.P.* Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey: The observations // *Icarus*. 2002. Vol. 158. No. 1. С. 106–145.
 12. *Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P.* Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy / Asteroids II (Eds Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M. S.), Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 98–127.
 13. *Бусарев В.В.* Новые спектры отражения 40 астероидов: сравнение с предшествующими результатами и интерпретация // *Астрон. вестн.* 2016. Т. 50. №1. С. 15–26.
 14. *Loeffler B.M., Burns R.G., Tossel J.A., Vaughan D.J., Johnson K.H.* Charge transfer in lunar materials: Interpretation of ultraviolet-visible spectral properties of the moon // *Proc. of the Fifth Lunar Conf. (Supplement 5. Geochimica et Cosmochimica Acta)*. 1974. Vol. 3. P. 3007–3016.
 15. *Бусарев В.В.* Астероиды неоднозначных спектральных типов: 11 Партенопа, 198 Амелла, 201 Пенелопа и 21 Лютеция // Труды конференции «Околоземная астрономия 2007» (под ред. Л.В. Рыхловой, В.К. Тарадия), ИНАСАН (Россия) и МЦАМЭИ (Украина), Нальчик: Изд. М. и В. Котляровы, 2008, С. 79–84.
 16. *Busarev V.V., Barabanov S.I., Rusakov V.S., Puzin V.B., Kravtsov V.V.* Spectrophotometry of (32) Pomona, (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (330825) 2008 XE3, and 2012 QG42 and laboratory study of possible analog samples // *Icarus*, v. 262, p. 44–57.

References

1. *Patterson C.* Age of meteorites and the earth. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1956, vol. 10, pp. 230–237.
2. *Dodd R.T.* *Meteorites – A Petrologic-chemical Synthesis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1981, 368 p.
3. *Safronov V.S.* *Evolyutsiya doplanetnogo oblaka i obrazovanie Zemli i planet* [The evolution of protoplanetary disk and formation of Earth and planet]. Moscow, Nauka Pub., 1969, 241 p. (In Russian)
4. *National Research Council.* *Defending planet Earth: near-earth object surveys and hazard mitigation strategies*. Washington, DC: The

- National Academies Press, 2010, 152 p. DOI: 10.17226/12842
5. Lewis J.S. *Mining the sky: untold riches from the asteroids, comets, and planets*. Basic Books, 1998. 274 p.
 6. Busarev V.V. Spektrofotometriya bezatmosfernykh tel Solnechnoy sistemy [Spectroscopy of small bodies of Solar System without atmosphere]. *Astronomicheskii vestnik* [Solar System Research], 1999, vol. 33, no. 2, pp. 140–150. (In Russian)
 7. Galazutdinov G.A. *Obrabotka astronomicheskikh spektrov v OS Windows s pomoshch'yu programm DECH. ch. 2 - Obrabotka spektrov (opisanie programmy Desh20T i rukovodstvo pol'zovatelya)* [Astronomical data processing using DECH program, part 2 - Spectra processing (The specification of Dech20T program and the reference guide)], 1991. (In Russian)
 8. *The International Astronomical Union Minor Planet Center*. Available at: <http://www.minorplanetcenter.net/> (access date: 21.12.2016).
 9. *SIMBAD Astronomical Database*. Available at: <http://simbad.cfa.harvard.edu/simbad> (accessed: 21.12.2016).
 10. *Katalog ASZ Fizicheskie kharakteristiki* [The catalogue of NEA Physical characteristics]. Available at: <http://quasar.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/LSBSS/hazard/index.php?lang=ru&table=3> (accessed: 21.12.2016). (In Russian)
 11. Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey: The observations. *Icarus*, 2002, vol. 158, no. 1, pp. 106–145.
 12. Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P. Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy. In: Binzel R.P., Gehrels T., Matthews M.S. (eds.) *Asteroids II*. Tucson, Univ. of Arizona Press, 1989, pp. 98–127.
 13. Busarev V.V. Novye spektry otrazheniya 40 asteroidov: sravnenie s predshestvuyushchimi rezul'tatami i interpretatsiya [New reflection spectra of 40 asteroids: comparison with previous results and interpretation]. *Astronomicheskii vestnik* [Solar System Research], 2016, vol. 50, no. 1, pp. 15–26. (In Russian)
 14. Loeffler B.M., Burns R.G., Tossel J.A., Vaughan D.J., Johnson K.H. Charge transfer in lunar materials: Interpretation of ultraviolet-visible spectral properties of the moon. *Proc. of the Fifth Lunar Conf. (Supplement 5. Geochimica et Cosmochimica Acta)*, 1974, vol. 3, pp. 3007–3016.
 15. Busarev V.V. Asteroidy neodnoznachnykh spektral'nykh tipov: 11 Partenopa, 198 Ampella, 201 Penelopa i 21 Lyutetsiya. [Asteroids of controversial types: 11 Parthenope, 198 Ampella, 201 Penelope and 21 Lutetia]. In: Rykhlovoy L.V., Taradiya V.K. *Trudy konferentsii "Okolozemnaya astronomiya 2007"* [Proc. of the "Near-Earth astronomy 2007" conf.]. INASAN (Rossiya) i MTsAMEI (Ukraina), Nal'chik, Izd. M. i V. Kotlyarovy Pub., 2008, pp. 79–84. (In Russian)
 16. Busarev V.V., Barabanov S. I., Rusakov V.S., Puzin V.B., Kravtsov V.V. Spectrophotometry of (32) Pomona, (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (330825) 2008 XE3, and 2012 QG42 and laboratory study of possible analog samples. *Icarus*, 2015, vol. 262, pp. 44–57.