

УДК 523.44

СРАВНЕНИЕ СПЕКТРОВ БАЗАЛЬТОВ СО СПЕКТРАМИ КАМЕННЫХ АСТЕРОИДОВ И МЕТЕОРИТОВ

Муртазов А. К., Ефимов А. В.

COMPARISON OF THE BASALT SPECTRA WITH THE SPECTRA OF STONY ASTEROIDS AND METEORITES

Murtazov A. K., Efimov A. V.

Ryazan State University, Ryazan, 390000, Russia
e-mail: a.murtazov@rsu.edu.ru, a.efimov@rsu.edu.ru

Abstract. The work describes the spectra of some basalt samples and volcanic lava samples obtained during optical experiments in the laboratory.

The task of measuring terrestrial rock reflectance spectra and their comparison with the spectra of meteoroids and asteroids is extremely important. It is related both to the Solar system body origin and evolution problem, and the problem of detecting space bodies dangerous for the Earth. Researchers from many countries have accumulated extensive experimental and observational material as far as the comparison between spectral and photometric peculiarities of basic terrestrial rocks, stony asteroids, and meteorites.

We conducted the measuring of the lava and basalts reflectance spectra, based on the methods previously used for the experiments on physical simulation of photometric and spectral characteristics of satellite and asteroid surfaces.

In the presented research we used a small-size monochromator with a 3–4 nm/mm dispersion concave diffraction grating. As a receiving instrument, we used a photoconductor which is sensitive within the range of 400–900 nm. The measurements were carried out in the system of coordinates connected with the surface under study.

The work presents the results of measuring the spectra reflected by the lava samples collected in the caldera of Teide, Tenerife, and also the spectra of reflection by a number of terrestrial basalt samples.

We also analyzed data of the S-asteroid spectra acquired from observations, as well as the experimental data on stony meteorites. The analysis resulted in marking the areas on the plane “wavelength-albedo” which occupy these surfaces.

The results we obtained are close to the multiple data obtained by different researchers. The simplest comparative analysis of volcanic lava and basalt spectra with the spectra of stony meteorites and asteroids shows, that visibly they are sufficiently similar.

Keywords: basalts, volcanic lava, S-asteroids, stony meteorites, spectra, optical region, comparison.

Введение

Задача измерения спектров отражения земных пород и сравнения их со спектрами метеороидов и астероидов весьма актуальна. Она связана как с проблемой происхождения эволюции тел Солнечной системы, так и с проблемой обнаружения опасных для Земли космических тел.

Эти измерения принято связывать со ставшими классическими работами по исследова-

нию связи эффекта противостояния земных пород различной дисперсности с эффектом противостояния астероидов [1]. В дальнейшем подобные исследования проводили многие ученые, например, Veverka J., Varucci M.A. и др. На основе их исследований была разработана одна из классификаций астероидов по оптическим свойствам [2]. Обширные исследования спектральных характеристик земных минералов были выполнены на обсервато-

Муртазов Андрей Константинович, д-р техн. наук, доцент, директор обсерватории Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина; e-mail: a.murtazov@rsu.edu.ru.

Ефимов Александр Васильевич, инженер обсерватории Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина; e-mail: a.efimov@rsu.edu.ru.

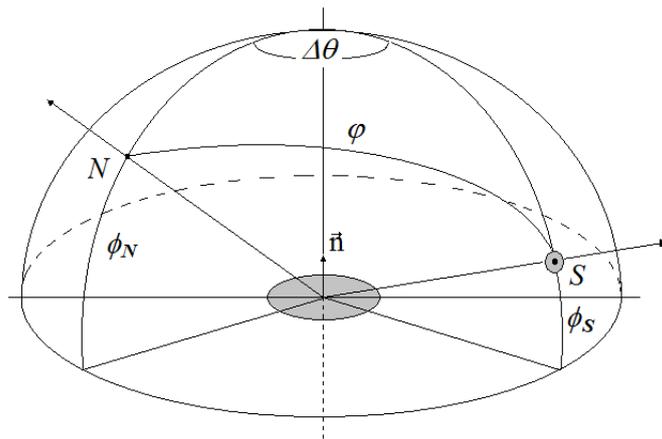


Рис. 1. Система координат, связанная с исследуемой поверхностью

рии Харьковского университета (Belskaya I.N., Lupishko D.F., Shevchenko V.G., Shkuratov Yu.G. и др.). Периодически исследователи разных стран возвращаются к сравнению спектральных и фотометрических особенностей основных земных пород, каменных астероидов и метеоритов в рамках проблемы происхождения тел Солнечной системы [3–5]. В последние годы подробные измерения спектров метеоритов различных типов в широкой спектральной области от УФ до дальней ИК выполнены Ж.М. Триго-Родригез [6]. Большое число работ, в которых подробно рассматриваются спектральные свойства метеоритов всех типов опубликовано группой Cloutis E.A., Gaffey M.J. [7, 8].

Мы провели эксперименты по измерению спектров отражения образцов базальтов и вулканической лавы в видимой области и сравнили их со спектрами астероидов и метеоритов с целью нахождения особенностей, которые могут указывать на общность происхождения тел Солнечной системы.

1. Методика измерений

Измерения спектров отражения образцов лавы и стандартной поверхности проводились по методике, использованной ранее при постановке экспериментов по физическому моделированию фотометрических и спектральных характеристик поверхностей ИСЗ и астероидов [9–11].

В представленных исследованиях использовался малогабаритный монохроматор МУМ с вогнутой дифракционной решеткой с дисперсией 3-4 нм/мм. В качестве приемного устройства использовалось фотоспротивле-

ние с чувствительностью в области 400–900 нм.

Измерения проводились в системе координат, связанной с исследуемой поверхностью (рис. 1). Здесь S и N — источник (имитирующий Солнце) и приемник (наблюдатель) излучения; φ_S и φ_N — широты источника и приемника; $\Delta\theta$ — разность их долгот; \mathbf{n} — нормаль к исследуемой поверхности.

Представленные результаты получены для расположенные осветителя и приемника на меридиане системы, когда $\Delta\theta = 0$, а фазовый угол $\phi = \varphi_S - \varphi_N$.

Все измерения проводились при фазовом угле $\phi = 20^\circ$ для исключения эффекта опозиции, который весьма заметен для такой пористой поверхности, как вулканическая лава.

Стандартная поверхность — BaSO_4 , — имеет геометрическое альbedo, близкое к 1 в видимой области и ортотропный характер рассеяния света. Поэтому спектральные коэффициенты яркости исследуемой поверхности, полученные относительно этого стандарта, можно считать близкими к ее спектральному альbedo.

Из законов отражения света диффузными поверхностями известно, что поток, попадающий в приемник излучения, пропорционален яркости поверхности в наблюдаемой площадке. Для случая, реализованного в наших измерениях в системе координат рис. 1, это выразится как

$$d\Phi(\lambda) = b(\lambda) \sin \phi_N d\omega dS, \quad (1.1)$$

где $b(\lambda)$ и dS — яркость и площадь освещенной площадки, $d\omega$ — телесный угол объектива

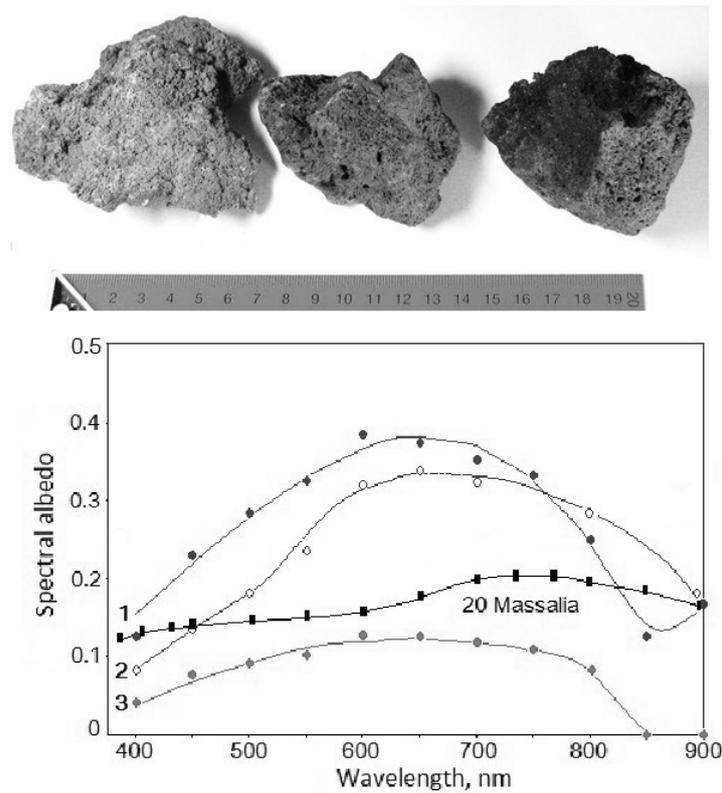


Рис. 2. Спектры отражения излучения образцов лавы (1–3) в сравнении со спектром S-астероида 20 Massalia

приемного устройства, под которым он виден с образца поверхности.

Если теперь регистрируется поток $d\Phi_0$ от какого-либо ортотропного (рассеивающего по закону Ламберта) стандартного образца плоской поверхности, поставленной в такие же условия видимости, то

$$d\Phi_0 = b_0(\lambda) \sin \phi_N d\omega dS, \quad (1.2)$$

откуда

$$b(\lambda) = b_0(\lambda) \frac{d\Phi(\lambda)}{d\Phi_0(\lambda)}. \quad (1.3)$$

Следует отметить, что полученные в (1.3) значения $b(\lambda)$ характеризуют спектральную яркость образца в направлении, в котором производятся измерения (характеризуемом углами $\varphi_S, \varphi_N, \Delta\theta$), то есть фактически индикатрису рассеяния $b_\lambda(\phi)$.

Поскольку измерения проводились относительно баритового экрана с почти ортотропной поверхностью (тщательно определенной индикатрисой рассеяния) и геометрическим альбедо $a_0(\lambda)$, близким к 1 в области 400–800 нм, яркость $b(\lambda)$, приведенная к нормаль-

ным углам падения и рассеяния, будет характеризовать спектральное альбедо $a(\lambda)$ исследуемой поверхности. Альбедо поверхности в области длин волн (λ_1, λ_2) найдется как

$$a = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} a(\lambda) d\lambda. \quad (1.4)$$

Описанная методика применялась для получения индикатрис рассеяния и определения спектрального альбедо диффузных поверхностей.

Ошибки единичных измерений изменялись в пределах от 5% в середине спектрального интервала до 20% по его краям.

Результаты измерений сглаживались полиномами различных степеней с погрешностью не хуже 10% их максимальных значений.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты измерений спектров отражения излучения образ-

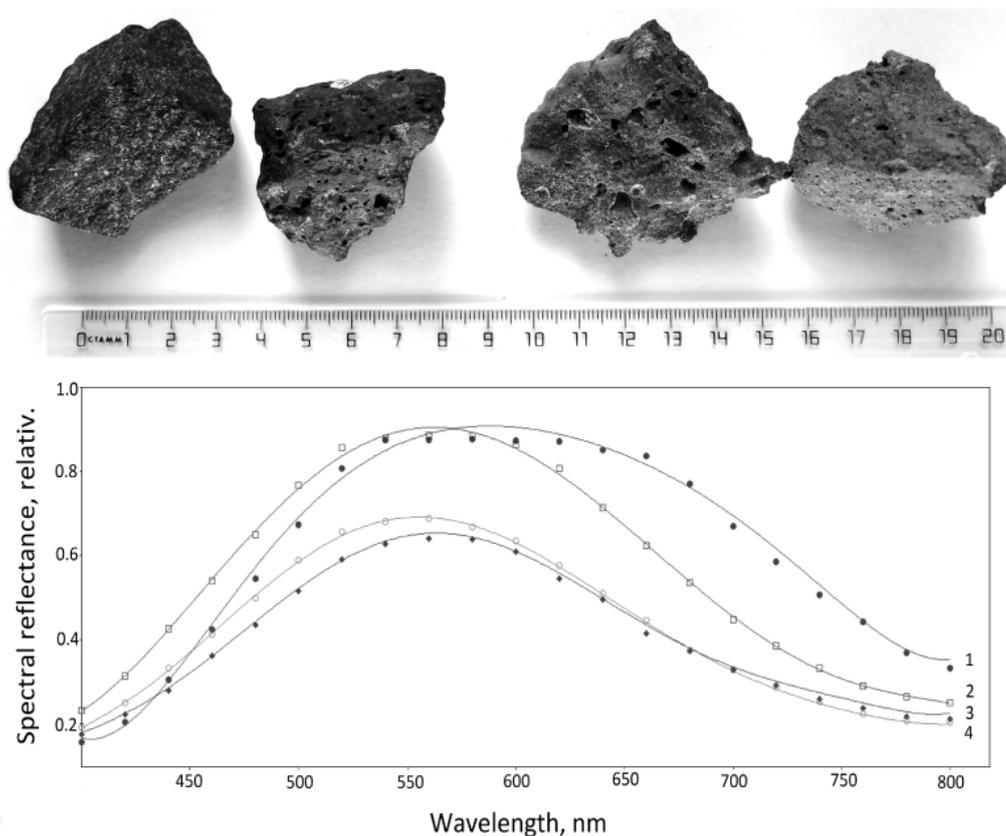


Рис. 3. Спектры отражения излучения различных базальтов

цами лавы, собранными в кальдере вулкана Тейде, о. Тенерифе [12].

Эта лава относится к кислым базальтовым лавам и имеет цвет от почти черного (образец 3) до светло серого (образцы 1, 2). Она типична для подобных вулканов и содержит ряд химических элементов, например, серу (сера в наибольшем количестве присутствует в образце 1). Поверхность покрыта вмятинами от пузырьков воздуха средними размерами 0,5–1,0 мм, что вполне имитирует покрытую кратерами поверхность безатмосферных тел Солнечной системы.

Спектральные кривые образцов лавы имеют избыток излучения в области 600–750 нм и полосу поглощения в области $\lambda > 800$ нм.

Внешний вид спектров лавы весьма похож на спектры различных фракций Челябинского болида. Как подчеркивают авторы [13], главной особенностью всех этих спектров является сходство их общей формы с формой спектра оливина.

Спектр S-астероида 20 Massalia, приведенный здесь же для сравнения, имеет полосу поглощения в области $\lambda > 900$ нм [4].

На рис. 3 приведены спектры отражения излучения некоторыми образцами земных базальтов: 1) базальт, Азатап, Армения; 2) долерит, Ереван, Армения; 3) габбро оливинное, Рудня Шляховая, Украина; 4) базальт нефелиновый, Приморье, РФ. Здесь избытки излучения приходятся на длины волн 550–650 нм.

Более выраженные подобные особенности найдены у спектров выбросов из кратеров на Весте. Они имеют сходство с ахондритными метеоритами, которые, вероятно, были выбиты из внешних слоёв поверхности Весты [14, 15].

На рис. 4 показаны результаты измерения спектра зеркального отражения шлифа железного метеорита (94 % Fe, 6 % Ni), найденного вблизи п. Сеймчан (Кольский п-в, РФ) в 2015 г. Этот спектр не имеет особенностей, характерных для базальтовых пород.

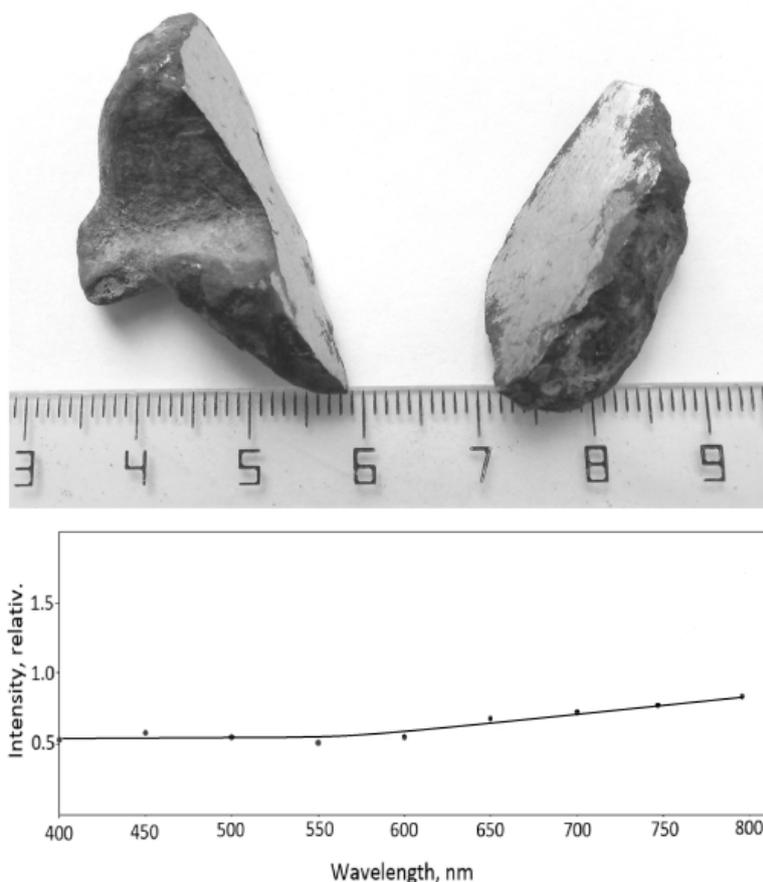


Рис. 4. Спектр железного метеорита Сеймчан

Краткие выводы

Полученные результаты близки к многочисленным данным, полученным разными исследователями.

Нами были проанализированы данные по спектрам S-астероидов, полученные из наблюдений, и экспериментальные данные по спектрам каменных метеоритов. В результате анализа выделены области на плоскости «длина волны–альbedo», которые занимают их поверхности.

На рис. 5 представлены в относительных величинах области S-астероидов [13, 16] а также близких к нормальным хондритам CO и черных CV хондритов [5, 6].

Как уже было показано ранее [17] спектры S-астероидов и каменных метеоритов имеют одинаковые особенности.

Для сравнения здесь приведены [4] спектр железного метеорита Mundrabilla (падение в западной Австралии, 1911 г.), совершенно не совпадающий со спектрами S-астероидов и каменных метеоритов, и спектр типичного

каменного метеорита Yamato 82111 (Антарктида, 1982), весьма близкий к ним.

Простейший сравнительный анализ расположения спектров вулканической лавы относительно представленных на рис. 5 зон показывает, что они достаточно близки, то есть еще раз подтверждает полученные в мире результаты.

Литература

1. *Oetking P.* Photometric studies of diffuse reflecting surfaces with applications to the brightness of the moon // *J. of Geophys. Research.* 1966. Vol. 71. P. 2505–2513.
2. *Chapman D., Morrison B., Zellner B.* Surface properties of asteroids: A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry // *Icarus.* 1975. Vol. 25. P. 104–130.
3. *Busarev V.V.* New reflectance spectra of 40 asteroids: A comparison with the previous results and an interpretation // *Solar system research.* 2016. Vol. 50. P. 13–23.
4. *Hiroi T., et al.* Modeling of S-type asteroid spectra using primitive achondrites and iron

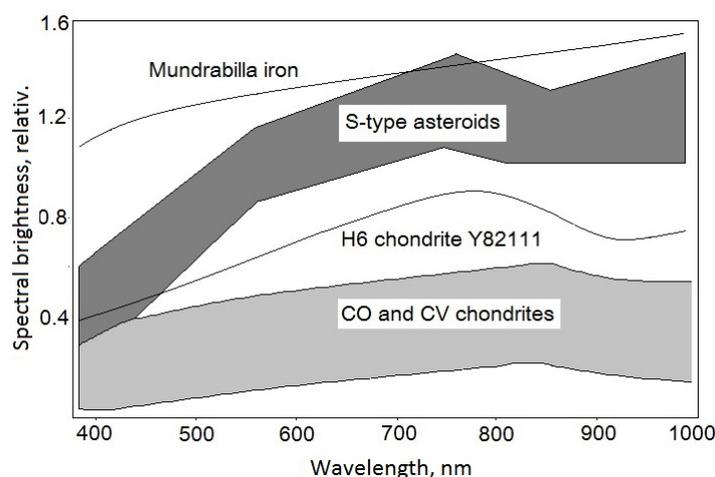


Рис. 5. Зоны спектральных яркостей каменных астероидов и метеоритов

- meteorites // *Icarus*. 1993. Vol. 102. Iss. 1. P. 107–116.
5. Vernazza P., et al. Compositional differences between meteorites and near-Earth asteroids // *Nature*. 2008. Vol. 454. P. 858–860.
 6. Trigo-Rodriguez J.M., et al. UV to far-IR reflectance spectra of carbonaceous chondrites. I. Implications for remote characterization of dark primitive asteroids targeted by sample-return missions // *MNRAS*. 2013. Vol. 437. Iss. 1. P. 227–240.
 7. Cloutis E.A., Gaffey M.J., Moslow T.F. Spectral reflectance properties of Carbon-Bearing materials // *Icarus*. 1994. Vol. 107. P. 276–287.
 8. Cloutis E.A., Hiroi T., Gaffey M.J., Alexander C.M.O'D., Mann P. Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 1. CI chondrites // *Icarus*. 2011. Vol. 212. P. 180–209.
 9. Курьшев В.И., Муртазов А.К., Верещагин С.И. Моделирование фотометрических характеристик астрономических объектов // *Известия вузов СССР. Приборостроение*. 1985. Т. XXVIII. С. 81–85.
 10. Murtazov A. K. Physical simulation of space objects' spectral characteristics for solving the reverse problem of their photometry // *American Journal of Modern Physics*. 2013. Vol. 2. Iss. 6. P. 282–286.
 11. Murtazov A.K. Physical simulation of asteroid and artificial Earth satellite surface optical properties. *Astronomical and Astrophysical Transactions (AApTr)*. 2016. Vol. 29. Iss. 4. P. 519–528.
 12. Murtazov A.K., Efimov A.V. Laboratory measurements of volcanic lava spectra in comparison with spectra of meteoroids. *Meteoroids-2016. International Conference. Noordwijk, the Netherlands, 6–10 June, 2016*.
 13. Бусарев В.В., Таран М.Н. О возможном происхождении Fe³⁺ в метеорите Челябинск: материалы Всероссийской научной конференции «Метеорит Челябинск — год на Земле». Челябинск, 2014. С. 402–412.
 14. McFadden L.A. et al. Vesta's Pinaria region: Original basaltic achondrite material derived from mixing upper and lower crust // *Icarus*. 2015. Vol. 259. P. 150–161.
 15. Pieters C.M., Ammannito E., et al. Distinctive space weathering on Vesta from regolith mixing processes // *Nature*. 2012. Vol. 491. P. 79–82.
 16. Moroz L.V., et al. Optical effects of regolith processes on s-asteroids as simulated by laser shots on ordinary chondrite and other mafic materials // *Icarus*. 1996. Vol. 122. P. 366–382.
 17. Johnson T.V., Fanale F.P. Optical properties of carbonaceous chondrites and their relationship to asteroids // *J. of geophysical research*. 1973. Vol. 78. Iss. 2. P. 8507–8518.

References

1. Oetking P. Photometric studies of diffuse reflecting surfaces with applications to the brightness of the moon. *J. of Geophys. Research*, 1966, vol. 71, pp. 2505–2513.
2. Chapman D., Morrison B., Zellner B. Surface properties of asteroids: A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry. *Icarus*, 1975, vol. 25, pp. 104–130.
3. Busarev V.V. New reflectance spectra of 40 asteroids: A comparison with the previous results and an interpretation. *Solar system research*, 2016, vol. 50, pp. 13–23. doi: 10.1134/S0038094616010019
4. Hiroi T., et al. Modeling of S-type asteroid spectra using primitive achondrites and iron meteorites. *Icarus*, 1993, vol. 102, iss. 1, pp. 107–116. doi: 10.1006/icar.1993.1036

5. Vernazza P., et al. Compositional differences between meteorites and near-Earth asteroids. *Nature*, 2008, vol. 454, pp. 858–860. doi: 10.1038/nature07154
6. Trigo-Rodriguez J.M., et al. UV to far-IR reflectance spectra of carbonaceous chondrites. I. Implications for remote characterization of dark primitive asteroids targeted by sample-return missions. *MNRAS*, 2013, vol. 437, iss. 1, pp. 227–240. doi: 10.1093/mnras/stt1873
7. Cloutis E.A., Gaffey M.J., Moslow T.F. Spectral reflectance properties of Carbon-Bearing materials. *Icarus*, 1994, vol. 107, pp. 276–287. doi: 10.1006/icar.1994.1023
8. Cloutis E.A., Hiroi T., Gaffey M.J., Alexander C.M.O'D., Mann P. Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 1. CI chondrites. *Icarus*, 2011, vol. 212, pp. 180–209. doi: 10.1016/j.icarus.2010.12.009
9. Kuryshv V.I., Murtazov A.K., Vereshchagin S.I. Modelirovanie fotometricheskikh kharakteristik astronomicheskikh ob"ektov [Modeling of photometric characteristics of astronomical objects]. *Izvestiya vuzov SSSR. Priborostroenie* [Izvestiya Vuzov USSR. Instrument making], 1985, vol. 28, pp. 81–85. (In Russian)
10. Murtazov A.K. Physical simulation of space objects' spectral characteristics for solving the reverse problem of their photometry. *American J. of Modern Physics*, 2013, vol. 2, iss. 6, pp. 282–286. doi: 10.11648/j.ajmp.20130206.12
11. Murtazov A.K. Physical simulation of asteroid and artificial Earth satellite surface optical properties. *Astronomical and Astrophysical Transactions (AApTr)*, 2016, vol. 29, iss. 4, pp. 519–528.
12. Murtazov A.K., Efimov A.V. Laboratory measurements of volcanic lava spectra in comparison with spectra of meteoroids. In: *Proc. of Int. Conf. "Meteoroids-2016"*. Noordwijk, Netherlands, 6–10 June, 2016.
13. Busarev V.V., Taran M.N. O vozmozhnom proiskhozhdenii Fe³⁺ v meteorite Chelyabinsk [On the possible origin of Fe³⁺ in the Chelyabinsk meteorite]. In: *Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii "Meteorit Chelyabinsk — god na Zemle"* [Proc. of the All-Russian Scientific Conf. "Meteorite Chelyabinsk — year on Earth"]. Chelyabinsk, 2014, pp. 402–412. (In Russian)
14. McFadden L.A. et al. Vesta's Pinaria region: Original basaltic achondrite material derived from mixing upper and lower crust. *Icarus*, 2015, vol. 259, pp. 150–161. doi: 10.1016/j.icarus.2015.07.003
15. Pieters C.M., Ammannito E., et al. Distinctive space weathering on Vesta from regolith mixing processes. *Nature*, 2012, vol. 491, pp. 79–82. doi: 10.1038/nature11534
16. Moroz L.V., et al. Optical effects of regolith processes on s-asteroids as simulated by laser shots on ordinary chondrite and other mafic materials. *Icarus*, 1996, vol. 122, pp. 366–382. doi: 10.1006/icar.1996.0130
17. Johnson T.V., Fanale F.P. Optical properties of carbonaceous chondrites and their relationship to asteroids. *J. of geophys. research*, 1973, vol. 78, iss. 2, pp. 8507–8518.