

УДК 523.53 + 523.68

ГРУППЫ МЕТЕОРИТО-ПРОИЗВОДЯЩИХ МЕТЕОРОИДОВ И МЕТЕОРИТОВ УГЛИСТЫХ ХОНДРИТОВ

Коновалова Н. А., Ибрагимов А. А., Калашникова Т. М.

GROUPS OF METEORITE-PRODUCING METEOROIDS AND CARBONACEOUS CHONDRITE METEORITES

Konovalova N. A., Ibrohimov A. A., Kalashnikova T. M.

Institute of astrophysics of the Academy of sciences of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, 734042,
Republic of Tajikistan
e-mail: nakonovalova@mail.ru

Abstract. The possibility of existence of groups of meteorite-producing meteoroids which include meteorites Maribo, Murchison, Shuttters Mill and Tagish Lake, classified as carbonaceous chondrites was analyzed. The main argument for existence of groups of meteorite-producing bodies is the existence of bolides and meteorites with mutually similar orbits and a time-correlated meteorite falls. The IAU Meteor Database of Photographic orbits and the other published sources have been used to select bright sporadic fireballs with currently similar orbits to meteorites Maribo, Murchison, Shuttters Mill & Tagish Lake. The analysis used the common and widely used orbital similarity functions D_{SH} by Southworth and Hawkins. In result the some meteorite-producing sporadic fireballs as possible members of groups of studied meteorites were found and the possible source regions in Near-Earth space have been considered. Especially the bodies of the small sizes (50 – 100 m) on the Earth-crossing orbits on a time scale of a human civilization represent the natural hazards because of the greatest probability of risk of collision with the Earth. Purposeful monitoring of these bodies in the identified periods of increased fireballs and meteorites activity by means of both of land fireball network and space tools established on orbital satellites is important for the prevention of danger.

Keywords: comet, orbit, meteoroid, meteorite, carbonaceous chondrite, parent body.

Введение

Образование в Солнечной системе метеороидов кометного происхождения согласно классической модели кометного ядра происходит во время активной фазы кометной деятельности вблизи перигелия, когда пары испаряющихся льдов уносят с поверхности кометы твердые частицы и пыль. Другим механизмом образования метеороидов является катастрофическое деление комет на вторичные ядра с выбросом пыли и кометных фрагментов [1]. Также образование метеороидов возможно в результате воздействия импактора на поверхность кометы или астероида, как в случае выброса фрагментов с астероида Веста [2].

В данной работе рассматриваются спорядические метеороидо-производящие болиды

с кометными орбитами (коэффициент Тиссерана $T_j \leq 3,1$), метеориты углистые хондриты, наблюдавшиеся различными инструментальными методами, и их возможные источники в Солнечной системе. О существовании семейств малых тел (комет, астероидов и метеороидо-производящих метеороидов) в околоземном пространстве рассматривалось многими исследователями. Возможная связь между периодической кометой 15P/Finlay, метеоритом Murchison и двумя астероидами: (4015) Wilson-Harrington, который вероятно является бездействующим ядром кометы, и (2061) Anza рассматривалась в работе [3]. В работе [4] помимо перечисленных в [3] объектов в группе идентифицирована связь метеорита Murchison с болидным потоком γ -Sagittarids и астероида-

Коновалова Наталья Андреевна, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан; e-mail: nakonovalova@mail.ru.

Ибрагимов Алишер Абдуллоходжаевич, научный сотрудник Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан; e-mail: a.ibragimov73@mail.ru.

Калашникова Татьяна Михайловна, младший научный сотрудник Института астрофизики Академии наук Республики Таджикистан; e-mail: kruzhevnic_48@mail.ru.

Работа выполнена при поддержке гранта МНТЦ по проекту Т-2113.

ми 1997 YМЗ ($T_j = 2,3$, $Q = 5,4$ а.е.), 2000 PF5 ($T_j = 2,6$, $Q = 5,3$ а.е.) и 2001 PE1 ($T_j = 3,0$, $Q = 4,4$ а.е.). Авторами показано, что в этом большом семействе малых тел существует две ветви: северная (С) и южная (Ю). В работе Терентьевой [5] идентифицирована возможная связь метеорита Tagish Lake с болидным потоком μ -Orionids ($T_j = 4,2$, $Q = 2,8$ а.е.), метеорным потоком 60-Orionids ($T_j = 3,8$, $Q = 3,3$ а.е.) и астероидом 4183 Cupo ($T_j = 3,0$, $Q = 3,2$ а.е.).

Некоторые сближающиеся с Землей объекты на кометных орбитах по наблюдаемым характеристикам похожи на астероиды. В действительности они являются бездействующими (dormant) кометами, которые уже не проявляют признаков кометной активности. С этой позиции в [6] рассматривалось, что примитивные тела с элементарным составом и структурной прочностью типа углистых хондритов CI, CM, которые представляют первичный материал, из которого сформировалась Солнечная система, могут быть среди астероидов С-типа или в некоторых кометах.

1. Группы малых тел с кометными орбитами

Из 24-х известных по различным инструментальным наблюдениям и опубликованных в научных журналах орбит метеоритов 9 орбит являются кометными. В данной работе рассматривается возможная связь в 4-х группах метеоритов Murchison [3], Tagish Lake [7], Maribo [8] и Shutters Mill [9] с метеорито-производящими спорадическими болидами, наблюдавшимися в периоды повышения болидной активности. На базе опубликованной информации о датах наблюдения спорадических метеорито-производящих болидов и метеоритов создана гистограмма распределения числа болидов N астероидного и кометного происхождения и метеоритов по долготе Солнца с шагом 2° (рис. 1). На гистограмме отмечены 6 больших (Maj) и 2 меньших (Min) периодов повышения активности метеоритов и спорадических болидов в течение года. Даты инструментально наблюдавшихся 4-х метеоритов углистых хондритов указаны на диаграмме стрелками, и они попадают в 1 Maj, 3 Maj, и 5 Maj периоды повышения болидной активности.

Чтобы выявить группы малых тел с близкими орбитами спорадических метеорито-производящих болидов, метеоритов и их ис-

точников в околоземном пространстве, использовались наблюдательные данные об этих объектах, доступные в научных публикациях и каталогах [10–12]. Динамическая связь объектов в группах устанавливалась на основе анализа их орбит с использованием критерия близости D_{SH} как средства оценки степени подобия между орбитами исследуемых объектов. На рис. 2а–2г показаны орбиты выявленных 4-х групп метеоритов Murchison, Tagish Lake, Maribo и Shutters Mill и метеорито-производящих спорадических болидов. Принадлежность анализируемых болидов к астероидному или кометному типу определялась на основе параметра Тиссерана T_j [13]

$$T_j = \frac{a_j}{a} + 2 \cos i \left[\left(\frac{a_j}{a} \right) (1 - e^2) \right]^{0,5}, \quad (1.1)$$

где a , a_j — большая полуось орбиты объекта и Юпитера, соответственно, i и e — наклонение и эксцентриситет орбиты объекта. Согласно параметру Тиссерана, при $T_j \leq 3,1$ — орбита кометного типа, при $T_j > 3,1$ — орбита астероидного типа.

В табл. 1–4 представлены данные о средних (Mean) орбитах четырех групп метеорито-производящих спорадических болидов, где в круглых скобках указано число членов группы, орбитах метеоритов углистых хондритов и их вероятных источников. Объекты с близкими орбитами отбирались согласно D_{SH} -критерия ($D_{SH} \leq 0,2$). В табл. 1 включены также данные из работ [3, 4] об ассоциации между метеоритом Murchison, кометой 15P/Finlay, болидным потоком γ -Sagittarids и несколькими астероидами. В табл. 2 включены данные из работы [5] об ассоциации между метеоритом Tagish Lake, болидными потоками μ -Orionids, 60-Orionids и астероидом 4183 Cupo. В табл. 3 включены данные из работы [13] об ассоциации между метеоритом Maribo, кометой Энке и Тауридным комплексом околоземных объектов.

В табл. 1–4 содержатся следующие сведения: номер (имя) объекта; дата наблюдения (год, месяц, день); прямое восхождение α_R ($^\circ$) и склонение δ_R ($^\circ$) радианта; внеатмосферная скорость v_∞ (км/сек) (в табл. 1 геоцентрическая скорость v_g); перигелийное расстояние q (а.е.); большая полуось a (а.е.); эксцентриситет e ; наклонение орбиты i ($^\circ$); аргумент перигелия ω ($^\circ$); долгота восходящего узла

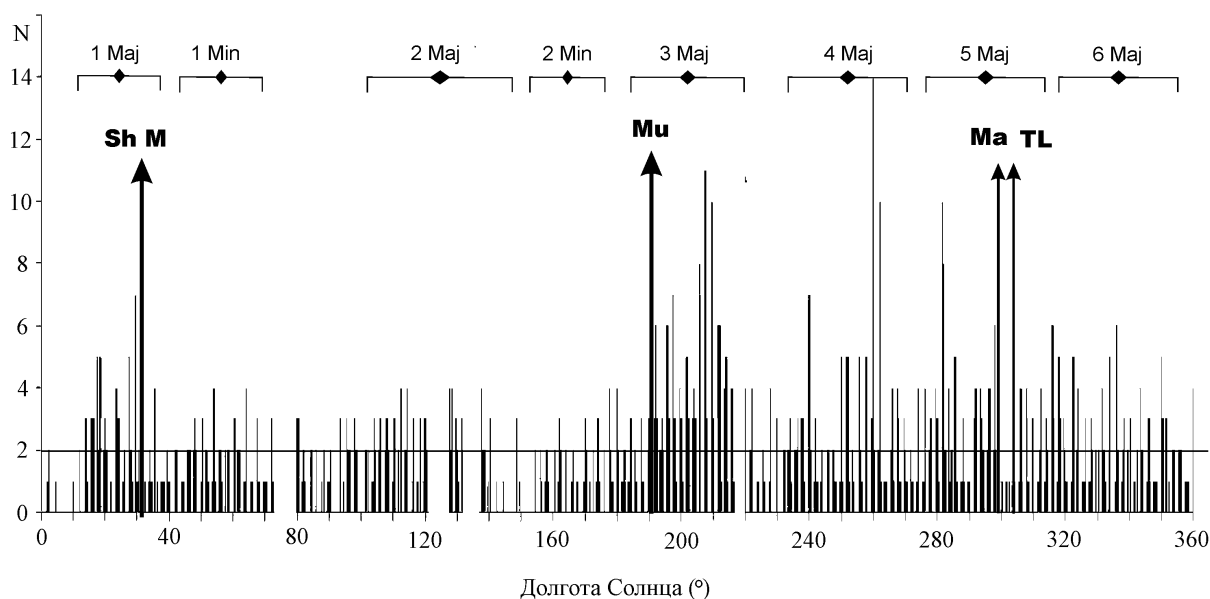


Рис. 1. Гистограмма годовой активности метеоритов и метеорито-производящих спорадических болидов с астероидными (толстая линия) и кометными (тонкая линия) орбитами

Таблица 1. Группа метеорита Murchison и малых тел с близкими орбитами (J2000.0)

Номер	ггммдд	α_R (°)	δ_R (°)	v_g км/с	q а.е.	a а.е.	e	i (°)	ω (°)	Ω (°)	D_{SH}
Mean (7)	-1004	269,7	-21,5	8,5	0,992	2,564	0,607	1,8	353,4	16,7	0,00
Murchison	690928	268,4	-37,0	8,4	1,001	2,630	0,620	3,0	358,7	4,5	0,08
Южная (Ю) ветвь											
15P/Finlay	-1003	269,7	-37,8	10,2	1,034	3,573	0,711	3,7	323,6	42,0	0,11
γ -Sagittari	-0913	270,0	-31,0	12,8	1,003	2,008	0,452	1,0	8,0	350,1	0,27
107P/WH	-0906	276,1	-25,0	9,1	1,001	2,643	0,620	0,4	8,9	353,0	0,15
2000 PF5	-0904	259,4	-45,2	11,3	1,113	3,199	0,652	6,1	52,2	298,9	0,24
1997 YM3	-1006	290,4	-37,1	10,6	1,084	3,263	0,668	3,9	75,5	302,0	0,18
Северная (С) ветвь											
D/1978 1	-0926	282,5	-1,1	11,3	1,101	3,290	0,665	5,9	240,5	132,3	0,21
2061Anza	-0929	269,1	-6,2	8,4	1,047	2,264	0,537	3,8	156,5	207,7	0,15
2001 PE1	-1004	281,9	-9,1	10,0	1,105	2,763	0,600	3,5	190,7	183,2	0,19

Таблица 2. Группа метеорита Tagish Lake и малых тел с близкими орбитами (J2000.0)

Номер	ггммдд	α_R (°)	δ_R (°)	v_∞ км/с	q а.е.	a а.е.	e	i (°)	ω (°)	Ω (°)	D_{SH}
Mean (28)	-0119	86,4	23,6	15,9	0,895	2,122	0,567	4,2	217,2	300,8	0,00
Северная (С) ветвь											
Tagish L.	000118	90,4	29,6	15,8	0,884	1,980	0,560	2,0	224,4	297,9	0,06
4183 Cuno	-0102	92,6	36,6	20,4	0,721	1,981	0,636	6,8	235,4	295,7	0,11
Южная (Ю) ветвь											
μ -Orionids	1/1÷2/4	88,0	12,0	16,4	0,854	1,866	0,524	4,1	51,7	112,5	0,07
60-Orionid	-0112	90,0	0,0	17,2	0,860	2,040	0,580	9,0	49,0	112,0	0,12

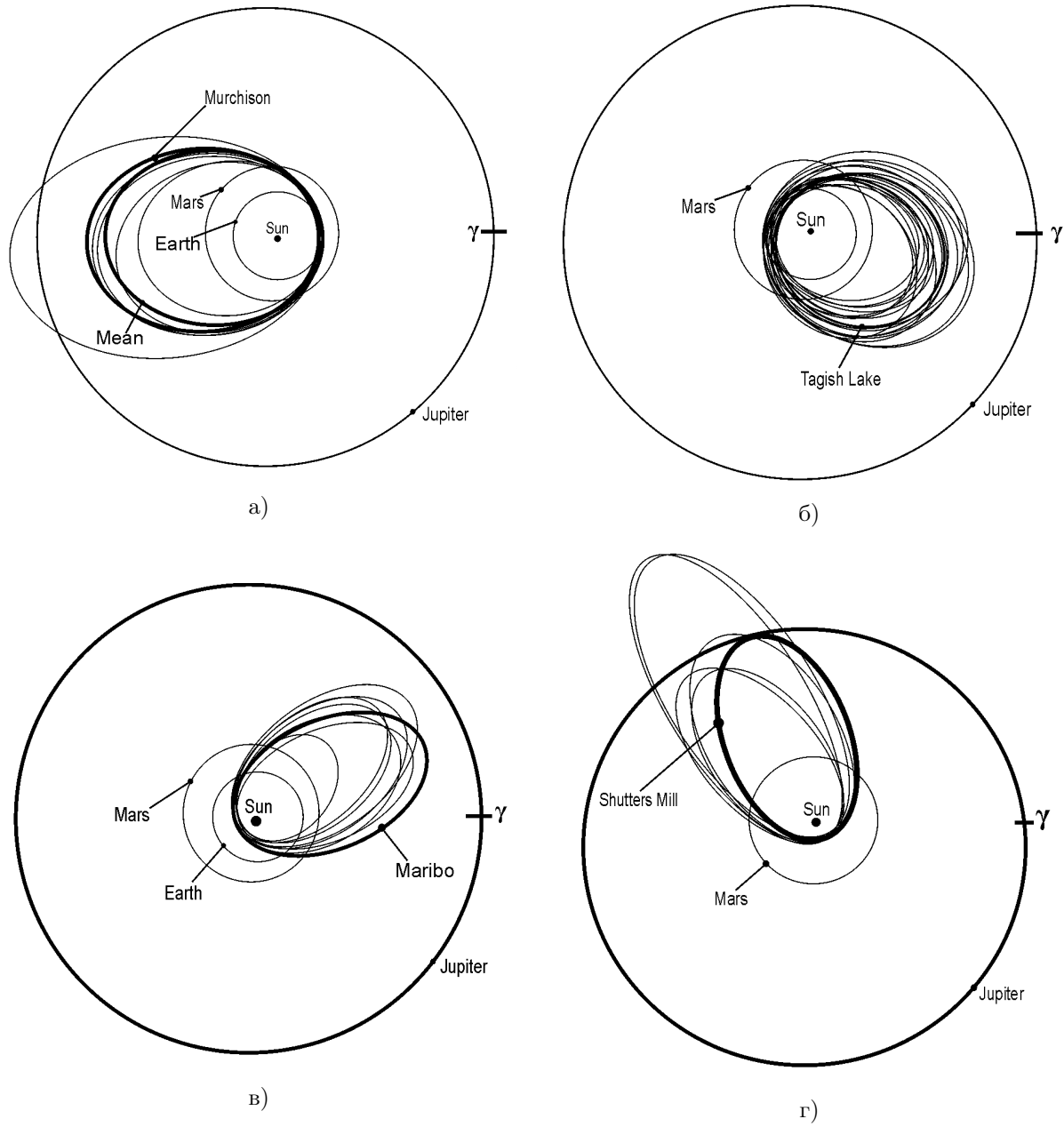


Рис. 2. Проекция на плоскость эклиптики орбит метеороидов и метеороидо-производящих спорадических болидов из 4-х групп: а — метеороид Murchison и его группа; б — метеороид Tagish Lake и его группа; в — метеороид Maribo и его группа; г — метеороид Shutters Mill и его группа.

Таблица 3. Группа метеороида Maribo и малых тел с близкими орбитами (J2000,0)

Номер	ГГММДД	α_R ($^\circ$)	δ_R ($^\circ$)	v_∞ км/с	q а.е.	a а.е.	e	i ($^\circ$)	ω ($^\circ$)	Ω ($^\circ$)	$D_{SH}/$ Лит.
Mean (8)	-0111	119,7	18,4	27,3	0,462	2,021	0,766	2,8	102,8	111,1	0,00
Maribo	090117	124,6	9,7	28,0	0,479	2,340	0,795	0,7	99,0	117,6	0,06
Taurid N.	-1005	58,6	21,6	28,3	0,350	2,120	0,835	3,1	294,9	226,2	[13]
2004TG ₁₀	-	54,7	22,3	29,9	0,315	2,242	0,859	3,6	298,4	223,9	[13]
Taurid S.	-1005	49,4	3,0	28,0	0,352	2,070	0,830	5,4	115,4	37,3	[13]
2P/Encke	-	56,0	16,5	29,1	0,339	2,217	0,847	3,9	115,8	44,9	[13]

Таблица 4. Группа метеорита Shutter's Mill и малых тел с близкими орбитами (J2000.0)

Номер	ггммдд	α_R ($^\circ$)	δ_R ($^\circ$)	v_∞ км/с	q а.е.	a а.е.	e	i ($^\circ$)	ω ($^\circ$)	Ω ($^\circ$)	D_{SH}
Mean (6)	-0409	23,7	13,0	30,8	0,430	3,196	0,856	3,4	99,8	22,1	0,00
Sh.Mill	120422	24,0	12,7	28,6	0,456	2,590	0,824	2,4	77,8	32,8	0,16
α -Pscds N	-0910	20,0	11,0	25,8	0,479	1,780	0,728	1,6	283,8	196,4	0,17

Ω ($^\circ$) и в последнем столбике критерий близости орбит D_{SH} .

С целью анализа физических характеристик исследуемых спорадических болидов из четырех метеорито-производящих групп были получены оценки структурной прочности и объемной плотности метеороидов. Во время полета болида в атмосфере на него действует давление набегающего атмосферного потока. Когда аэродинамическое давление P_{dyn} превышает критическое значение структурной прочности метеороида, происходит его разрушение, которое сопровождается яркой вспышкой. На высоте максимальной яркости H_{max} болидов в группах 4-х метеоритов были вычислены значения аэродинамического давления $P_{dyn} = \Gamma \rho_a v^2$, характеризующего структурную прочность метеороида, где $\Gamma = 1$ — коэффициент торможения, ρ_a — плотность атмосферы на высоте H_{max} , v — скорость болида. По величине вычисленного аэродинамического давления P_{dyn} были получены оценки объемной плотности ρ_m метеороидов. В группе метеорита Murchison объемные плотности метеороидов лежат в интервале $\rho_m = 1100 \div 2100$ кг/м³, в группе метеорита Tagish Lake $\rho_m = 1000 \div 1600$ кг/м³, в группе метеорита Maribo $\rho_m = 1150 \div 2050$ кг/м³ и в группе метеорита Shutter's Mill $\rho_m = 1600 \div 2200$ кг/м³.

2. Результаты и их обсуждение

Среди рассмотренных в данной работе тел в группах 1, 3, 4 присутствуют тела с кометными орбитами, в группе 2 метеорита Tagish Lake присутствуют тела с пограничными комето-астероидными орбитами. Некоторые члены групп, для которых критерий близости орбит превышает предельное значение $D_{SH} = 0,2$, могут быть ассоциативно связанными с группой, согласно общепринятому критерию для ассоциаций $0,2 < D_{SH} < 0,3$.

Ряд авторов [6, 14] считают, что в кометном материале могут присутствовать элементы, подобные углистым хондритам. Метеори-

ты углистые хондриты являются древнейшим веществом, из которого образовалась около 4.6 миллиардов лет тому назад Солнечная система, и поэтому представляют большое значение для их исследования. Крупные метеороиды углистые хондриты могут выжить в земной атмосфере и выпасть на поверхность метеоритами. В метеоритной коллекции более 50 тыс. метеоритов, из них около 9 тыс. углистые хондриты, среди которых известный крупнейший метеорит углистый хондрит Аленде, возраст которого 4,567 млрд. лет, имеет вес около 3 т. Сведения, полученные в результате космических миссий к кометам Солнечной системы, говорят о большом разнообразии разных участков поверхности комет. Анализ частиц кометы 81P/Wild 2 [14], захваченных гелиевыми ловушками показал, что в их минералогическом составе обнаружены железомagneзиальные силикаты, которые присутствуют в метеоритах углистых хондритах и межпланетных частицах пыли. Высокотемпературные компоненты, обнаруженные в образцах частиц кометы 81P/Wild 2 и структурно, минералогически и композиционно подобные хондрам в углистых хондритах CI, могут указывать на континуум между астероидами и кометами.

Выводы

1. Исследование существования групп метеорито-производящих метеороидов и их источников помимо практической необходимости проведения мониторинга этих объектов в установленные периоды активности метеорито-производящих болидов, также важно и в фундаментальном аспекте: формирование Солнечной системы.

2. Данные о средней орбите группы метеорито-производящих метеороидов позволяют связать группу с ее вероятным источником — астероидом и астероидным семейством или кометой, и таким образом иметь возможность получить информацию об этом источнике. Полученные результаты о существовании групп

метеорито-производящих метеороидов на кометных и пограничных комето-астероидных орбитах показывают, что относительно прочные и крупные фрагменты с кометными орбитами могут выжить в земной атмосфере и выпасть на поверхность метеоритами.

3. Четыре исследованные группы с метеоритами углистыми хондритами, включающие в общей сложности 44 метеорито-производящих метеороида, могут быть группами динамически связанных тел. В этих группах все еще могут содержаться метеорито-производящие метеороиды, которые могут вторгаться на Землю в современную эпоху. Это может быть мотивацией для мониторинга болидов из найденных групп метеорито-производящих метеороидов в областях их радиантов в установленные периоды активности.

Литература

1. Ibadinov K.I., Buriev A.M., Safarov A.G., Rahmonov A.A. Active processes in cometary nucleus and new meteoroid swarms // *Advances in Space Research*. 2015. Vol. 56. P. 187–189.
2. Pieters C.M., Binzel R.P., Bogard D., Hiroi T., Mittlefehldt D.W., Nyquist L., Rivkin A., Takeda H. Asteroid-meteorite links: the Vesta conundrum. *Asteroids, Comets, Meteors* // *Proc. of the 229th Symposium of the IAUS held in Búzios, Rio de Janeiro, Brasil August 7-12, 2005.* / Ed.: Daniela L., Sylvio F.M., Angel F.J. Cambridge. Cambridge University Press, 2006. Vol. 229. P. 273–288.
3. Seargent D. Is the Murchison meteorite a fragment of periodic comet Finlay? // *WGN, Journal of the IMO*. 1988. Vol. 16. No. 4. P. 111–1176.
4. Terentjeva A.K., Barabanov S.I. Complexes of minor bodies in the Solar system // *Astronomical School's Report*. 2011. Vol. 7. Iss. 2. P. 271–276.
5. Terentjeva A.K., Barabanov S.I. The fireball stream of the Tagish Lake meteorite // *WGN, Journal of the IMO*. 2004. Vol. 32. Iss. 2. P. 60–62.
6. Gounelle M., Spurný P., and Bland P. The orbit and atmospheric trajectory of the Orgueil meteorite from historical records // *Meteorit. & Planet. Sci.* 2006. Vol. 41. P. 135–150.
7. Brown P.G., Revelle D.O., Tagliaferri E. and Hildebrand A.R. An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infrasound records // *Meteorit. & Planet. Sci.* 2002. Vol. 37. P. 661–676.
8. Spurný P., Borovička J., Haack H., Singer W., Keuer D., Jobse K. Trajectory and orbit of the Maribo CM2 meteorite from optical,

photoelectric and radar records // *Proc. Meteoroids 2013 conf., Poznan, Poland, August 26–30, 2013.*

9. Jenniskens P., and et al. Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia // *Science*. 2012. Vol. 338. P. 1583–1587.
10. Solar System Dynamics. Version 2016. Режим доступа: <https://jpl.nasa.gov/> (дата доступа 5.10.2017).
11. NEO Dynamic site 2. Version 2016. Режим доступа: <http://newton.am.inipi.it/neodys2> (дата доступа 5.10.2017).
12. IAU meteor data center photographic and video databases. Version 2016. Available at: <http://www.astro.sk/~ne/IAUMDC/PhV2016/> (accessed date 5.10.2017).
13. Tabiana C., Snodgrass C., Michelsen R., Haack H. 2P/Encke, the Taurid complex NEOs and the Maribo and Sutter's Mill meteorites // *Astronomy & Astrophysics*. 2015. Vol. 584. P. A97–A107.
14. Zolensky M.E., Zega T.J., Yano H., et al. Mineralogy and petrology of comet 81P/Wild 2 nucleus samples // *Science*. 2006. Vol. 314. P. 1735–1739.

References

1. Ibadinov K.I., Buriev A.M., Safarov A.G., Rahmonov A.A. Active processes in cometary nucleus and new meteoroid swarms. *Advances in Space Research*, 2015, vol. 56, pp. 187–189.
2. Pieters C. M., Binzel R. P., Bogard D., Hiroi T., Mittlefehldt D. W., Nyquist L., Rivkin A., Takeda H. Asteroid-meteorite links: the Vesta conundrum. In: Daniela L., Sylvio F.M., Ange F.J. (eds.) *Asteroids, Comets, Meteors. Proc. of the 229th Symposium of the IAUS*. Búzios, Rio de Janeiro, Brasil August 7–12, 2005. Cambridge: Cambridge University Press, 2006, vol. 229, p. 273.
3. Seargent D. Is the Murchison meteorite a fragment of periodic comet Finlay? *WGN, Journal of the IMO*, 1988, vol. 16, no. 4, pp. 111–1176.
4. Terentjeva A.K., Barabanov S.I. Complexes of minor bodies in the Solar system. *Astronomical School's Report*, 2011, vol. 7, iss. 2, pp. 271–276.
5. Terentjeva A.K., Barabanov S.I. The fireball stream of the Tagish Lake meteorite. *WGN, Journal of the IMO*, 2004, vol. 32, no. 2, pp. 60–62.
6. Gounelle M., P. Spurný, and P. Bland. The orbit and atmospheric trajectory of the Orgueil meteorite from historical records. *Meteorit. & Planet. Sci.*, 2006, vol. 41, pp. 135–150.
7. Brown P.G., Revelle D.O., Tagliaferri E. and Hildebrand A.R. An entry model for the Tagish Lake fireball using seismic, satellite and infra-

- sound records. *Meteorit. & Planet. Sci.* 2002, vol. 37, pp. 661–676.
8. Spurný P., Borovička J., Haack H., Singer W., Keuer D., Jobse K. Trajectory and orbit of the Maribo CM2 meteorite from optical, photoelectric and radar records. *Meteoroids 2013 conference*, Poznan, Poland, August 26-30, 2013.
 9. Jenniskens P. and et al. Radar-enabled recovery of the Sutter's Mill meteorite, a carbonaceous chondrite regolith breccia. *Science*, 2012, vol. 338, pp. 1583–1587.
 10. Solar System Dynamics. Version 2016. Available at: <https://jpl.nasa.gov/> (accessed date 5.10.2017).
 11. NEO Dynamic site 2. Version 2016. Available at: <http://newton.am.inipi.it/neodys2> (accessed date 5.10.2017).
 12. IAU meteor data center photographic and video databases. Version 2016. Available at: <http://www.astro.sk/~ne/IAUMDC/PhV2016/> (accessed date 5.10.2017).
 13. Tabiana C., Snodgrass C., Michelsen R., and Haack H. 2P/Encke, the Taurid complex NEOs and the Maribo and Sutter's Mill meteorites. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, vol. 584, pp. A97–A107.
 14. Zolensky M.E., Zega T.J., Yano H., et al. Mineralogy and Petrology of Comet 81P/Wild 2 Nucleus Samples. *Science*, 2006, vol. 314, pp. 1735–1739.

© Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества, 2017

© Коновалова Н. А., Ибрагимов А. А., Калашникова Т. М., 2017

Статья поступила 5 октября 2017 г.