

УДК 523.68

## МЕТЕОРИТООБРАЗУЮЩИЕ БОЛИДНЫЕ РОИ. СВЯЗЬ С МЕТЕОРОИДНЫМИ РОЯМИ

Терентьева А. К., Барабанов С. И.

### METEORITE PRODUCING FIREBALL STREAMS. RELATION TO METEOROID STREAMS

Terentjeva A. K., Barabanov S. I.

Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017, Russia  
e-mail: sbarabanov@inasan.ru

*Abstract.* Meteorite producing streams (mainly of asteroidal origin) may contain large bodies, which are capable of causing great damage in the case of their fall on the Earth. Therefore the problem of meteorite producing streams is a part of a general multifaceted space hazard problem.

Analysis of the catalogue of 78 fireball streams has revealed the streams which contain meteorite producing bodies among individual members of stream. There are 11 such fireball streams, and 6 of them (54 %) are related to meteoroid streams. Thus, all meteoroid streams related to these fireball streams are meteorite producing.

We have found 15 fireball streams, which do not belong to the class of meteorite producing streams, but in which fireballs with initial mass  $M_\infty$  of about 50 kg and more are detected. Seven of them (47 %) are related to meteoroid streams.

*Keywords:* meteorite producing fireball stream, meteoroid stream, meteor shower, relationship

Начиная с 1985 г. работает первая служба (Space Watch) по регистрации астероидов и комет, потенциально опасных для Земли. Сейчас таких служб в разных странах, работающих под эгидой национальных космических агентств или национальных академий, существует более десяти. Потенциально опасные астероиды и кометы, как правило, образуют ассоциации или семейства, которые могут входить в метеороидные и болидные рои с метеороидами размером более 1–10 м в диаметре. По современным представлениям тела с размерами порядка 10 м могут нести угрозу локального характера. Обнаружить такие тела можно, в основном, случайным образом, так как на расстояниях около 0,1 а.е. они очень слабы, а ближе они движутся со значительными угловыми скоростями и эффективного накапливания сигнала от них не происходит. Однако статистика метеорных и болидных потоков, особенно связанных с астероидами и кометами, может подсказать, какие именно орбиты, семейства орбит, а значит и теоретические радианты, могут быть

источником опасных тел и, в первую очередь, эффективно мониториться наблюдателями с учетом теоретических радиантов и рассчитанных угловых скоростей по небу.

Метеоритообразующие рои (в основном астероидного происхождения) могут содержать крупные тела, которые при выпадении на Землю способны производить солидные местные разрушения. Поэтому проблема метеоритообразующих роев является частью общей многоплановой проблемы космической угрозы.

### 1. Результаты исследований

В результате анализа 78 болидных роев [1, 2] нами были выявлены рои, у которых среди индивидуальных членов роя присутствуют метеоритообразующие тела. Таких оказалось 11 болидных роев. Элементы орбит этих роев приведены в табл. 1. Орбиты их изображены на рис. 1.

В последнем столбце табл. 1 указан номер метеоритообразующего болида (по соответ-

Терентьева Александра Константиновна, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Института астрономии РАН; e-mail: ater@inasan.ru.

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

Работа была поддержана Программой Президиума РАН № 7 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Скоротечные и взрывные процессы в астрофизике», а также частично поддержана грантом Президента РФ (NSh-9951.2016.2).

Таблица 1. Метеоритообразующие болидные рои (Эпоха 1950.0)

№ из [1, 2]	Болидный рой	Дата	Исправленный геоцентр. радиант $\alpha, \delta$ , $^{\circ}$	$V_{\infty}$ , км/сек	$a$ , а.е.	$e$	$q$ , а.е.	$i, ^{\circ}$	$\omega, ^{\circ}$	$\Omega, ^{\circ}$	$\pi, ^{\circ}$	Источники
1	$\mu$ -Orids	I 1-II 4	88 +12	16,4	1,866	0,524	0,854	4,1	51,7	112,5	164,2	Tagish Lake метеорит
20 <sup>1</sup>	$\chi$ -Virids	III 22-IV 28	183 -11	19,6	1,983	0,614	0,742	3,8	71,3	197,0	268,3	31 E
21A <sup>2</sup>	$\alpha$ -Comds	IV 7-10	196 +21	21,6	2,66	0,70	0,782	13,3	241,9	18,3	260,2	Příbram метеорит 8 E
26	$\eta$ -UMads	IV 25-V 25	203 +51	16,6	2,404	0,578	0,995	15,6	194,0	53,3	247,3	240 F
37	$\mu$ -Serds	VII 3- 31	232 -4	14,1	2,447	0,594	0,992	3,3	197,3	114,3	311,6	405 F
38 <sup>1</sup>	$\eta$ -Serds	VIII 14-30	286 -3	13,5	1,73	0,439	0,968	4,5	210,5	150,2	0,7	38 E
44	$\delta$ -Equ- (N) - $\epsilon$ -Gruds(Q) (S)	VIII 18-X 22	319 +9 321 -13 342 -52	18,3 16,3 18,0	2,629 2,294 2,205	0,659 0,607 0,589	0,868 0,898 0,907	9,3 2,8 14,9	228,5 39,7 43,1	169,2 355,5 344,8	37,7 35,2 27,9	- 151 F -
50	$\tau$ -Cetds	IX 28-XI 26	18 -19	20,4	2,442	0,667	0,791	11,6	58,4	27,4	85,8	503 F
64	$\zeta$ am- (N) Lepds (S)	XI 12-XII 8	115 +70 91 -14	14,6 14,8	0,794 0,898	0,287 0,266	0,566 0,658	16,1 12,7	337,0 127,8	228,9 66,4	205,9 194,2	- 275 F
70	$\delta$ -Arids (N) (Q) (S)	XI 22-XII 21	53 +29 55 +18 61 +7	18,4 19,4 18,6	1,826 2,440 1,982	0,560 0,671 0,591	0,766 0,786 0,788	4,2 1,2 5,8	247,3 59,7 62,8	251,1 75,0 75,4	138,4 134,7 138,2	219 I
72 <sup>1</sup>	$\zeta$ -Tauds	XII 1-27	82 +23	26,2	2,164	0,756	0,518	3,8	275,7	260,0	175,7	40 E 470 F, 223 I

<sup>1</sup> Средние значения элементов орбиты перевычислены ввиду добавления новых членов роя.

<sup>2</sup> Болидный рой выявлен после публикации каталога [1].

Источники: McCrosky et al. *Prairie network fireball data (1963-75)*. The IAU Meteor Data Center in Lund, Sweden; Halliday et al. *MORP network fireball data (1971-84)*. The IAU Meteor Data Center in Lund, Sweden; [3, 17].  
F, I and E signify fireballs from the databases of Prairie network fireballs (USA), of MORP network fireballs (Canada) and European network fireballs respectively.

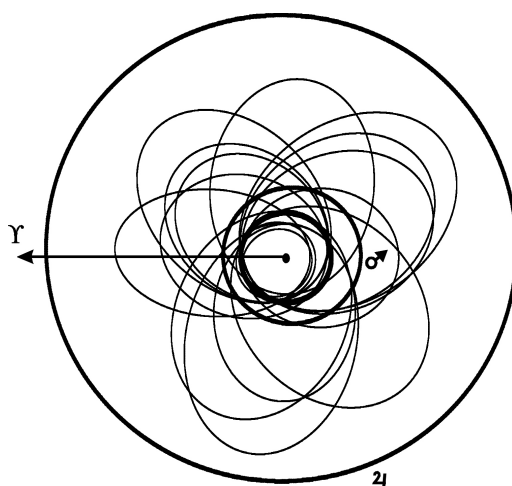


Рис. 1. 11 метеоритообразующих роев

ствующему источнику), входящего в состав данного роя. Поскольку в работе З. Цеплехи [3] в табл. 44 болидов Европейской сети нумерация отсутствует, мы ввели для этой таблицы порядковый номер, который и приведен в последнем столбце табл. 1.

Из рассматриваемых 11 метеоритообразующих роев особенно замечательными являются два болидных роя. Один  $\mu$ -Orids (№ 1, табл. 1) дал метеорит Tagish Lake (а точнее метеоритный дождь) [4]. Начальная масса метеорита возможна в пределах 50–180 тонн [5]. Другой рой  $\alpha$ -Comds породил (№ 21A, табл. 1) породил метеорит Píbram с начальной массой 21500 кг [3], принадлежащий по составу и структуре к телам группы I, обладающих наибольшей структурной прочностью. Средняя плотность тел группы I принята равной  $3,7 \text{ г/см}^3$ . К этой группе относятся также метеориты Lost City и Innisfree.

Группа I соответствует обыкновенным хондритам. К таковым относится также метеоритообразующий болид, входящий в состав роя  $\eta$ -Serds (№ 38, табл. 1). Рой  $\zeta$ -Tauds (№ 72, табл. 1) имеет 3 метеоритообразующих болида с начальными массами  $M_\infty$  17 000 кг, 240 кг и 100 000 кг. У остальных 8 роев  $M_\infty$  находится в пределах от 47 кг до 340 кг за исключением роя  $\tau$ -Cetds (№ 50, табл. 1), в состав которого входит болид с  $M_\infty = 35 000 \text{ кг}$ .

Из 11 орбит метеоритообразующих роев 5 орбит имеют афелии  $q'$ , расположенные внутри кольца астероидов, 5 — с внешней стороны в окрестности орбит астероидов типа Гильды, которые находятся на расстоянии около 3,95 а.е. от Солнца. И лишь один рой (№ 64,

табл. 1) с афелием  $q' \approx 1 \text{ а.е.}$  относится к Земной группе.

Рассмотрев связь метеоритообразующих роев с метеороидными роями, мы нашли, что из 11 роев 6 (54 %) связаны с метеороидными роями (табл. 2). Таким образом, все метеороидные рои, связанные с данными болидными роями, также являются метеоритообразующими.

К найденным 11 метеоритообразующим болидным роям надо добавить еще два роя.

Во-первых, это метеороидный рой  $\iota$ -Piscids (№ 131 [6]), так как к нему относится очень яркий болид, пролетевший над Чехией и Польшей 29 сентября 2003 г. и давший метеорит весом 400 г [7]. Доклад на эту тему был нами сделан на IX Международной конференции «Околосемная астрономия–2015» 31 авг. – 5 сент., Терскол, Россия [8]. Материал готовится к печати.

Во-вторых, это найденный нами метеороидный рой большого Челябинского болида 15 февраля 2013 г. Этот рой был назван нами Daytime Peg–Aquarids [9]. Болид дал метеорит «Челябинск». Масса наибольшего фрагмента этого метеорита — 570 кг или более [10].

Другие исследователи могут значительно расширить наш список метеоритообразующих роев.

Нами были выявлены 15 болидных роев, в которых не была обнаружена метеоритообразующая составляющая, но которые содержат массивные метеороидные тела с начальной массой  $M_\infty$  около 50 кг и более (табл. 3). В этой совокупности роев встречаются рои с более разнообразными орбитами (рис. 2). Например, один рой имеет афелий  $q' = 7,4 \text{ а.е.}$ ,

Таблица 2. Метеоритообразующие болидные рои, связанные с метеороидными роями

Метеоритообразующие болидные рои № из [1]	Метеороидные рои
1	№ 2 [6]
20	№ 41, 45 [6]
26	№ 75 [6]
50	№ 131, 132, 133 [6]
70	№ 145 [6]
72	№ 148 [6]

Таблица 3. Болидные рои с начальной массой  $M_\infty$  около 50 кг и более и их связь с метеороидными роями

Болидный рой № из [1]	Начальная масса, $M_\infty$ кг	Метеороидный рой
3	60	—
4	3200	—
6 (a)	81	№ 8, 21 [6]
(b)		
(c)		
9	51	—
18	48	№ 28, 42 [6]
22 (N)	5000	№ 38 [6]
(S)		
33	1000	№ 84 [6], № 215 [12], № 82 [13]
35	410	
40	810	
42 (a)	4000	[14], [15], № 122 [16]
(b)		
45	270	№ 237 [12]
51 (a)	47	—
(b)		
52 (N)	57	—
(S)	68	—
76		
77	59	—

расположенный между орбитами Юпитера и Сатурна, у трех роев орбитальное наклонение  $i = 18^\circ, 28^\circ$  и  $30^\circ$  (у метеоритообразующих роев  $i \leq 16^\circ$ , табл. 1). Меньшее число афелиев (6 из 15, т.е. 40 %) находятся в кольце астероидов. Остальные рои, за исключением одного вышеупомянутого, имеют орбиты типичных «аполлонцев» с афелиями между внешней границей кольца астероидов и орбитой Юпитера  $q' = 3,8 - 4,8$  а.е.

В четырех роях зафиксированы болиды, относящиеся к группам II и IIIВ по классификации Цеплехи и МакКроски. Тела группы II имеют плотность порядка  $2,1 \text{ г/см}^3$  и, вероятно, связаны с углитыми хондритами [3]. Тела группы IIIВ имеют плотность порядка  $0,2 \text{ г/см}^3$ , которой обладают довольно большое число болидов, являющихся представителями наиболее рыхлого кометного материала.

Обратим внимание на то, что скорости входа метеороидных тел в атмосферу (у 11

роев из 15) были заключены в пределах  $V_\infty = 14-26 \text{ км/сек}$  и, таким образом, не превышали принятого значения верхнего предела скорости входа метеоритообразующих тел в атмосферу [11]. И при всем этом, крупные тела с большой начальной массой  $M_\infty$  не могли «пробить» земную атмосферу. Конечно, в действительности разного рода зависимости нередко оказываются здесь гораздо более сложными, чем принято думать, как замечает Цеплеха [3]. Тем не менее, по-видимому, можно предположить, что в группе 15 болидных роев с массивными телами мы имеем дело с рыхлым кометным материалом. Семь болидных роев этой группы из 15 (47 %) связаны с метеороидными роями (табл. 3).

### Заключение

В связи с тем, что метеоритообразующие рои являются объектом особого повышенного интереса, необходимо обратить внимание

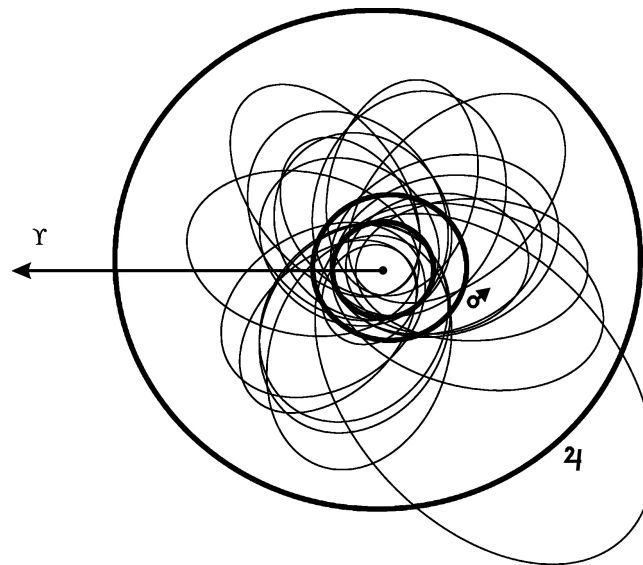


Рис. 2. 15 болидных роев

наблюдателей и исследователей метеоров на следующее.

1. Следует сравнить имеющиеся в настоящее время новые обширные ряды наблюдений болидов с приведенными метеоритообразующими роями, расширив тем самым знания об этих болидных роях.

2. Дополнить эти рои новыми данными о наличии метеоритообразующей составляющей в этих роях и найти новые метеоритообразующие рои.

3. Разумно было бы вести эффективный мониторинг метеоритообразующих потоков.

Некоторым наблюдателям метеоров малые метеорные потоки казались малопривлекательными из-за их слабой активности. Но было немало случаев, когда эти «слабые» потоки оборачивались неожиданным фейерверком ярких метеоров и болидов и даже преподносили сюрпризы в виде метеоритного дождя, как было, например, с болидным роем  $\mu$ -Orids, давшего метеорит Tagish Lake (см. выше).

Таким образом, метеоритообразующие рои должны быть всегда в зоне повышенного внимания метеорных исследователей.

### Литература

1. Terentjeva A.K. Fireball streams. In: Lagerkvist C.-I., Rickman H., Lindblad B.A., Lindgren M. (eds.) Asteroids, Comets, Meteors III. Uppsala University, Sweden, 1990. P. 579–584.
2. Terentjeva A.K. Fireball streams // The Journal of the IMO (WGN). 1989. Vol. 17. No. 6. P. 242–245.
3. Цеплева З. Болиды Европейской сети // Метеоритика. 1978. Вып. 37. С. 60–68.
4. Terentjeva A., Barabanov S. The fireball stream of the Tagish Lake meteorite // The Journal of the IMO (WGN). 2004. Vol. 32. No. 2. P. 60–62.
5. Brown P., Re Velle D., Hildebrand A. The Tagish Lake meteorite fall: interpretation of fireball physical characteristics. In: Warmbein B. (ed.) Proc. of the Meteoroids 2001 Conference, 6–10 August 2001, Kiruna, Sweden. 2001. Noordwijk: ESA Publications Division, ESA SP-495. P. 497–505.
6. Терентьева А.К. Малые метеорные рои // Резулт. исслед. по междунар. геофиз. проектам, Исслед. метеоров. 1966. № 1. С. 62–132.
7. Spurný P. Atmospheric trajectory and heliocentric orbit of the EN290903 Oświęcim fireball from photographic records // The Journal of the IMO (WGN). 2003. Vol. 31. No. 6. P. 171–173.
8. Терентьева А.К., Барабанов С.И. Метеоритообразующий рой крупных метеорных тел // Тез. IX Междунар. конф. «Околосемная астрономия». 31 августа – 5 сентября 2015. Россия, Терскол. 2015. С. 64.
9. Terentjeva A., Bakanas E. Meteor stream of the large Chelyabinsk fireball // The Journal of the IMO (WGN). 2013. Vol. 41. No. 2. P. 39.
10. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization // Science. 2013. Vol. 342. P. 1069–1073.
11. Терентьева А.К. Малые тела Солнечной системы: орбиты метеоритов, взаимосвязь, «зеркальная симметрия» в  $C$ -распределении // Письма в Астрон. журнал. 1989. Т. 15. № 3. С. 258–269.
12. Terentjeva A.K. Investigation of minor meteor

- streams. In: Kresák L., Millman P.M. (eds.) *Physics and dynamics of meteors*. Dordrecht-Holland, 1968. P. 408–427.
13. Терентьева А.К. Орбиты малых метеорных роев // *Астрон. циркуляр АН СССР*. 1967. № 423. С. 1–7.
  14. Терентьева А.К. Исследование метеорного роя  $\delta$ -Акварид // *Бюлл. Комиссии по кометам и метеорам АН СССР*. 1965. № 11. С. 17–32.
  15. Cook A.F. A working list of meteor streams. In: Hemenway C.L., Millman P.M., Cook A.F. (eds.) *Evolutionary and physical properties of meteoroids*. Washington, 1973. P. 183–191.
  16. Lindblad B.A. Two computerized stream searches among meteor orbits: 1. Among 865 precise photographic orbits; 2. Among 2401 photographic orbits // *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. 1971. No. 12. P. 1–24.
  17. McCrosky R.E., Shao C.-Y., Posen A. Prairie network fireball data. I Summary and orbits // *Preprint Series No. 665*. 1976. Cambridge, Center for Astrophysics.
  - projects, *Meteors research*], 1966, no 1, pp. 62–132. (In Russian)
  7. Spurný P. Atmospheric trajectory and heliocentric orbit of the EN290903 Oświęcim fireball from photographic records. *The Journal of the IMO (WGN)*, 2003, vol. 31, no. 7, pp. 171–173.
  8. Terent'eva A.K., Barabanov S.I. Meteoritoo-brazuyushchiy roy krupnykh meteornykh tel. In: *Proc. IX Int. conf. "Near-Earth astronomy" 31 aug. – 5 sep. 2015*. Russia, Terskol, 2015, p. 64. (In Russian)
  9. Terentjeva A., Bakanas E. Meteor stream of the large Chelyabinsk fireball. *The Journal of the IMO (WGN)*, 2013, vol. 41, no. 2, p. 39.
  10. Popova O. P., Jenniskens P., Emel'yanenko V., Kartashova A. et al. Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*, 2013, vol. 342, pp. 1069–1073.
  11. Terent'eva A.K. Small bodies of the solar system: meteorite orbits, interrelation, "mirror symmetry" in  $C$ -distribution. *Pis'ma v Astronomicheskiiy zhurnal* [Letters to the Astronomical Journal], 1989, vol. 15, no. 3, pp. 258–269. (In Russian)
  12. Terentjeva A.K. Investigation of minor meteor streams. In: Kresák L., Millman P.M. (eds.) *Physics and dynamics of meteors*. Dordrecht-Holland, 1968, pp. 408–427.
  13. Terent'eva A.K. Orbits of small meteor showers. *Astronomicheskiiy tsirkulyar AN SSSR* [Astronomical circular of the Academy of Sciences of the USSR], 1967, no 423, pp. 1–7. (In Russian)
  14. Terent'eva A.K. Study of the meteor swarm  $\delta$ -Aquarriage. *Byulleten' Komissii po kometam i meteoram AN SSSR* [Bulletin of the Commission on Comets and Meteors of the USSR Academy of Sciences], 1965, № 11, pp. 17–32. (In Russian)
  15. Cook A.F. A working list of meteor streams. In: Hemenway C.L., Millman P.M., Cook A.F. (eds.) *Evolutionary and physical properties of meteoroids*. Washington, 1973. P. 183–191.
  16. Lindblad B.A. Two computerized stream searches among meteor orbits: 1. Among 865 precise photographic orbits; 2. Among 2401 photographic orbits. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 1971, no. 12, pp. 1–24.
  17. McCrosky R.E., Shao C.-Y., Posen A. Prairie network fireball data. I Summary and orbits. *Preprint Series No. 665*. 1976. Cambridge, Center for Astrophysics.

### References

1. Terentjeva A.K. Fireball streams. In: Lagerkvist C.-I., Rickman H., Lindblad B.A., Lindgren M. (eds.) *Asteroids, Comets, Meteors III*. Uppsala University, Sweden, 1990. P. 579–584.
2. Terentjeva A.K. Fireball streams. *The Journal of the IMO (WGN)*, 1989, vol. 17, no. 6, pp. 242–245.
3. Tseplekha Z. Bolides of the European network. *Meteoritika*, 1978, iss. 37, pp. 60–68. (In Russian)
4. Terentjeva A., Barabanov S. The fireball stream of the Tagish Lake meteorite. *The Journal of the IMO (WGN)*, 2004, vol. 32, no. 2, pp. 60–62.
5. Brown P., ReVelle D., Hildebrand A. The Tagish Lake meteorite fall: interpretation of fireball physical characteristics. In: Warmbein B. (ed.) *Proc. of the Meteoroids 2001 Conference, 6–10 August 2001, Kiruna, Sweden. 2001*. Noordwijk, ESA Publications Division, ESA SP-495, pp. 497–505.
6. Terent'eva A.K. Small meteor showers. *Rezultaty issledovaniy po mezhdunarodnym geofizicheskim proektam, Issledovanie meteorov* [Research results on international geophysical