

УДК 523.683

АСТЕРОИДЫ, СБЛИЖАЮЩИЕСЯ С ЗЕМЛЕЙ, КАК ВОЗМОЖНЫЕ РОДИТЕЛЬСКИЕ ТЕЛА МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ

М.Г. Соколова, М.В. Сергиенко

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

В настоящее время активно изучается вопрос о генетической связи метеорных потоков с астероидами. Генетическая связь с астероидом возможна только для тех потоков, геоцентрическая скорость метеороидов которых меньше, чем 50 км/с, что означает соразмерность их орбит с орбитами астероидов. Таких наблюдаемых потоков-сирот, для которых пока не найдено родительское тело, на сегодня насчитывается около сорока. При поиске родительского тела метеорного потока среди астероидов речь может идти только об астероидах, пересекающих орбиту Земли.

В статье группы астероидов Атены, Аполлоны, Амуры, Атиры рассмотрены с точки зрения возможного поиска среди них родительских тел метеорных потоков. Сравнение групп проводилось по таким параметрам, как эксцентриситеты, характеризующие форму орбит астероидов, их размеры и химический состав.

На основе результатов исследования выделена группа Аполлоны как наиболее вероятные кандидаты для поиска родительских тел метеорных потоков среди астероидов, сближающихся с Землей.

Ключевые слова: метеороид, метеорный поток, астероид, комета, орбита

Введение

Термин «малое тело Солнечной системы» (*small Solar system body, SSSB*) был принят Международным астрономическим союзом (*IAU*) в 2006 г. для обозначения всех объектов Солнечной системы с размерами от сотен микрон до сотен километров, не являющихся классическими планетами или планетами-карликами (*dwarf planet*). Таким образом, в число малых тел Солнечной системы попадают метеороиды; кометы; астероиды (за исключением Цереры, отнесенной к планетам-карликам); «кентавры» (*centaur*), движущиеся между орбитами планет-гигантов; «троянцы», движущиеся по орбитам планет синхронно с ними, а также почти все объекты за орбитой Нептуна (*trans-Neptunian object, TNO*), кроме Плутона и Эриды, отнесенных к планетам-карликам [1].

Основная масса комет и астероидов (более 98%) сосредоточена в главном поясе астероидов (между орбитами Марса и Юпитера), а также в поясе Койпера (за орбитой Нептуна) и облаке Оорта (на внешней границе Солнечной системы) [1]. Периодически объекты этих областей под воздействием гравитации более крупных объектов изменяют орбиты и могут представлять опасность для Земли.



Рис. 1. Реестр метеорных потоков (Центр метеорных данных МАС, <http://www.astro.amu.edu.pl>)

Падение ядра кометы или астероида на Землю может привести к локальной, региональной, глобальной катастрофе в зависимости от размера космического тела. Прохождение же через метеорные потоки (метеороиды, движущиеся по сходным орбитам) непосредственно для Земли не опасно, но представляет определенную угрозу для космических аппаратов в околоземном пространстве. Ежегодно на поверхность Земли выпадает около тонны метеорного вещества [1].

Международный астрономический союз приводит реестр метеорных потоков из 713 наименований (<http://www.astro.amu.edu.pl/~jopek/MDC2007/>). Среди них выделяют 112 потоков, которые считаются подтвержденными, 105 потоков, параметры которых не определены или не подтверждаются в разные годы наблюдений, 109 временных потоков, наблюдавшихся однократно, 3 кандидаты на исключение из списка потоков. Остальная часть списка – это гипотетические потоки, упоминающиеся однократно в тех или иных источниках. Из 112 достоверно наблюдаемых на сегодня потоков однозначно отождествлены с кометами только 21 поток, 5 потоков генетически связывают с астероидами, 6 потоков связывают и с кометой, и с астероидом, так называемые кометно-астероидные комплексы (рис. 1). Но для 80 потоков, наблюдаемых в окрестностях Земли, родительское тело (РТ) до сих пор не найдено. Условно назовем такие потоки потоками-сиротами.

Причинами малой доли отождествленных с родительским телом потоков являются следующие: нерегулярность наблюдений потоков, особенно потоков, малых по численности, вследствие чего их наблюдательная исходная база статистически не обеспечена; возмущения орбит комплекса малых тел Солнечной системы со стороны больших планет; различия времени жизни метеорных потоков как компактных образований и времени существования активных кометных ядер и др. Предполагается, что именно процесс дезинтеграции комет является наиболее вероятным источником образования метеорных потоков.

Однако в последнее время активно изучается вопрос о возможной генетической связи метеорных потоков и с астероидами. Эта гипотеза рассматривается в нескольких аспектах. Во-первых, астероид как продукт распада кометы, и в этом случае он сам является частью кометно-метеорного комплекса. Во-вторых, астероид как потухшая комета, в прошлом породившая метеороидный рой. Не исключается возможность распада и самого астероида с образованием пылевого

роя. Наиболее вероятный механизм образования метеороидных роев кометного типа – это распад кометных ядер при сублимации льдов. В случае астероида вероятнее всего его распад под действием приливных и центробежных сил, а также столкновительный сценарий.

Генетическая связь с астероидом возможна только для тех потоков, геоцентрическая скорость метеороидов которых меньше, чем 50 км/с, что означает соразмерность их орбит с орбитами астероидов. Таких потоков-сирот, для которых возможна связь с астероидами, на сегодня насчитывается около сорока. При поиске родительского тела потока среди астероидов речь может идти только об астероидах, пересекающих орбиту Земли.

К настоящему времени открыто более 500 тыс. астероидов, более чем 200 тыс. из них имеют надежно определенные орбиты, то есть пронумерованы и занесены в каталог Центра малых планет (http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi). Орбитальное движение астероидов характеризуется следующими параметрами: размер его орбиты относительно Солнца – большая полуось a – измеряется в астрономических единицах (а.е.), форма орбиты – эксцентриситет e , наклон орбиты к плоскости эклиптики i , минимальное расстояние от Солнца задается перигелийным расстоянием q (а.е.).

Астероиды с $q \leq 1.3$ а.е. называют астероидами, сближающимися с Землёй (АСЗ). Потенциально опасными объектами (ПОО) считаются астероиды ярче, чем $+22^m$ (это астероид размером около 150 м), которые могут приблизиться к Земле на расстояние, меньшее, чем 0.05 а.е. ($7.5 \cdot 10^6$ км). Объекты меньшего размера в случае столкновения будут разрушены в атмосфере Земли. Потенциально опасные для Земли астероиды составляют примерно пятую часть всех АСЗ [1]. По значениям больших полуосей a и перигелийных расстояний q АСЗ делят на четыре группы: Атены, Аполлоны, Амуры, Атиры (табл. 1).

Атиры – группа астероидов, орбиты которых полностью находятся внутри орбиты Земли, их расстояние от Солнца в афелии меньше перигелийного расстояния Земли. Таким образом, даже в самой удалённой точке своей орбиты эти астероиды находятся ближе к Солнцу, чем Земля.

Атены – группа астероидов, орбиты которых пересекают земную орбиту с внутренней стороны, большая полуось их орбит меньше земной $a < 1$ а.е., и они пересекают её в области своего афелия.

Аполлоны – группа астероидов, размеры орбит которых больше земной орбиты, и они пересекают её с внешней стороны в области своего перигелия.

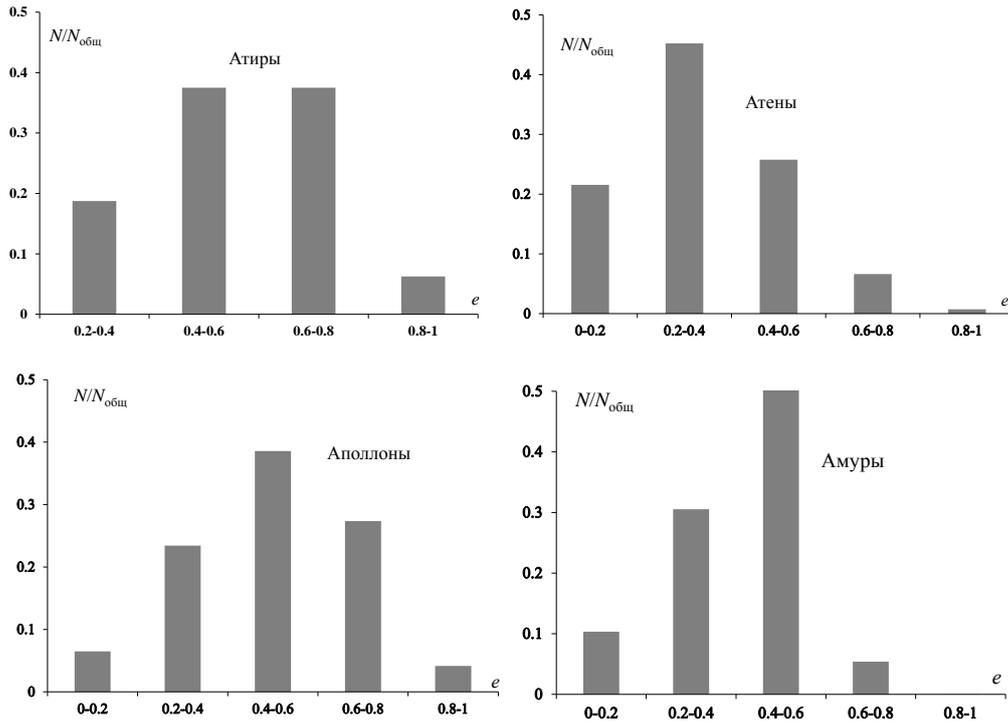
Амуры – группа астероидов, орбиты которых полностью находятся вне орбиты Земли, их расстояние от Солнца в перигелии лежит в интервале 1.017 а.е. $< q < 1.3$ а.е. Амуры могут только сближаться с орбитой Земли, в то время как Аполлоны и Атены заходят внутрь её, увеличивая тем самым вероятность столкновения с планетой.

Рассмотрим данные группы АСЗ с точки зрения возможного поиска среди них родительских тел метеорных потоков. Миграция астероидов происходит вследствие гравитационных возмущений их орбит от планет, в основном Юпитера, и зависит от орбитальных параметров, в большей степени от эксцентриситета e и наклона орбиты к плоскости эклиптики i . Наклон орбит всех АСЗ не превышает порядка 30° , а вот эксцентриситеты могут меняться в очень широких пределах.

Табл. 1

Число открытых АСЗ (по данным http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi)

Группа	Всего открыто	Из них занумеровано	Потенциально опасные	Из них занумеровано
Атиры	16	5	5	1
Атены	951	166	148	62
Аполлоны	7077	1023	1391	451
Амуры	5143	895	93	22

Рис. 2. Относительное распределение астероидов по эксцентриситету в группах (по данным http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi)

В случае более вытянутой орбиты поверхность астероида подвергается сильным перепадам температур, то нагреваясь в перигелии орбиты при сближении с Солнцем, то остывая при удалении от него в область афелия орбиты. При небольших периодах обращения вокруг Солнца (порядка 2–4 лет) периодическая смена температурного режима в совокупности с другими факторами (собственное вращение, центробежные и приливные силы, выпадение метеоритов и др.) может привести к нарушению целостности поверхности астероида, увеличивая тем самым вероятность его фрагментации, распада и порождения метеороидных роев. Гистограмма распределений эксцентриситетов орбит для АСЗ по группам Атены, Аполлоны, Амуры и Атиры представлены на рис. 2 (по вертикальной оси отложена доля астероидов по отношению к общему числу наблюдаемых астероидов в данной группе $N/N_{\text{общ}}$, по горизонтальной оси – значения e эксцентриситетов орбит).

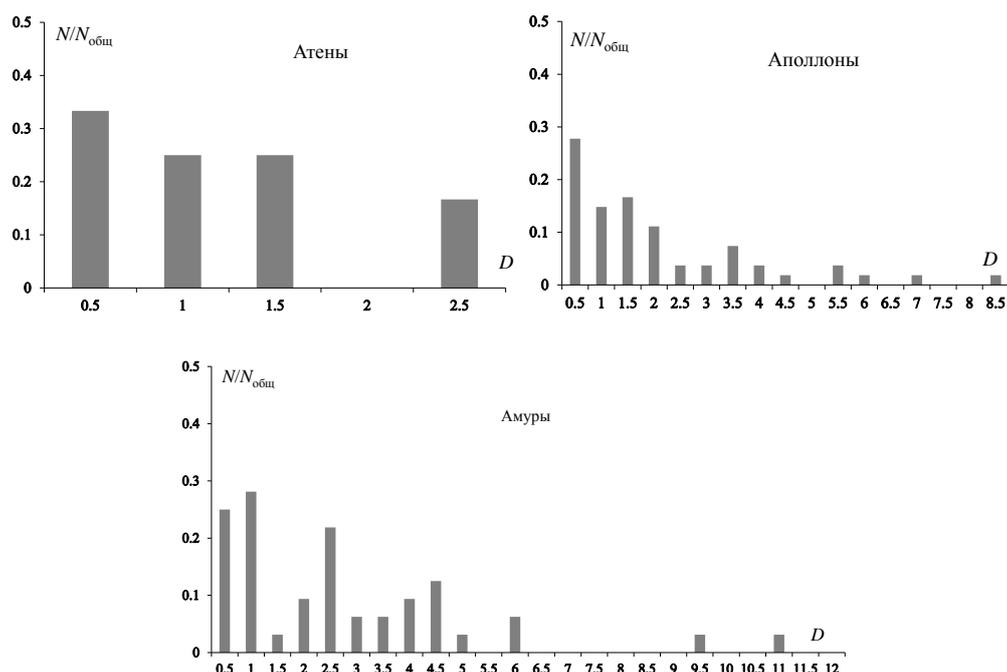


Рис. 3. Относительное распределение астероидов по диаметру в группах (по данным http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi)

Сравнение показывает, что большая часть астероидов с сильно вытянутыми орбитами (e лежит в пределах 0.6–1.0) принадлежит группам Атиры и Аполлоны. Орбиты Атенов и Амуров менее вытянуты, доля орбит с $e > 0.6$ не превышает значения 0.1.

С точки зрения изучения кометно-астероидных комплексов интерес представляют также те группы АСЗ, популяции которых более насыщены астероидами небольших размеров. Такие астероиды, возможно, являются продуктами распада более крупных тел, в результате чего уже имеют на поверхности расколы и трещины, что может привести к их дальнейшему распаду под действием приливных и центробежных сил. Однако не для всех пронумерованных и занесенных в каталог астероидов известны размеры. Например, такие данные отсутствуют для всех Атиров. Из 951 Атена данные о диаметре есть только для 12 астероидов, из 7077 Аполлонов – только для 54, из 5143 астероидов Амуров – для 32 объектов, что не превышает 1% для каждой группы АСЗ. Гистограммы распределений астероидов по диаметрам для каждой группы показаны на рис. 3 (по вертикальной оси отложена доля астероидов с известными размерами по отношению к числу всех наблюдаемых астероидов в группе $N/N_{\text{общ}}$, по горизонтальной оси – значения диаметра D , км).

В группе Атенов соотношение астероидов разных размеров примерно одинаковое. Распределение астероидов по размерам в группе Амуров носит случайный характер. Для группы Аполлонов наблюдается практически экспоненциальная зависимость увеличения числа астероидов с уменьшением их диаметра, что может быть результатом их возможного дробления. При разрушении одного объекта количество образующихся относительно мелких осколков на порядок

больше, чем крупных. Зависимость количества вновь образованных N тел от величины их массы m экспериментально описывается степенным законом

$$dN(m)/dm \sim 1/m^S,$$

где S – показатель соотношения между диапазонами различных масс [2]. Кроме того, стоит заметить, что Аполлоны и Амуры имеют также крупные астероиды в поперечнике более 5 км. Объекты таких размеров типичны для комет, что не исключает предположения о присутствии в данных группах ядер потухших комет.

Сравнение химико-минералогического состава астероидов с наблюдаемым химическим составом метеороидов, метеоритов, выпавших на Землю, и комет дает еще один критерий установления их генетических связей. Однако в настоящее время в основном определяется лишь принадлежность астероида к определенному спектральному классу. Классификация по спектральному классу *SMASS* – это относительно новый метод классификации, который был предложен в 2002 г. по результатам изучения 1447 астероидов проекта «Спектральное изучение малых астероидов главного пояса астероидов». Исследования проводились в небольшом диапазоне длин волн (от 0.44 до 0.92 мкм) и при этом не учитывалось альbedo (отражательная способность поверхности) астероидов. Новая классификация разрабатывалась так, чтобы максимально сохранить связь с более старой классификацией – таксономией Толена, предложенной в 1984 г. на основании широкополосных измерений спектра (от 0.31 до 1.06 мкм) с учетом альbedo астероидов. Астероиды распределяются по трём большим классам, обозначенным *C*, *S* и *X* [1].

Группа углеродных астероидов (*C*-группа) – углеродные объекты, имеющие слабую прочность материала. Основными являются астероиды класса *C* с наиболее типичными спектрами для данной группы. Астероиды класса *Cg*, *Ch* и *Cgh* относятся к астероидам с поглощением на длине волны 0.7 мкм. К классу *Cb* относятся астероиды, соответствующие переходу между объектами, относящимися к классам *C* и *B* в классификации *SMASS*. Согласно [3], астероиды *C*-группы имеют плотность 1.8 г/см³.

Группа кремниевых астероидов (*S*-группа) – силикатные (каменные) астероиды, имеющие большую прочность материала в сравнении с группой *C*. Основным классом являются астероиды класса *S*, имеющие наиболее типичные спектры для *S*-группы. *Sa*, *Sk*, *Sl*, *Sq* и *Sr* – это классы, в которые входят объекты, занимающие промежуточное положение между классом *S* и классами *A*, *K*, *L*, *Q* и *R*. Астероиды *S*-группы имеют плотность 2.4 г/см³ [3].

Группа железных астероидов (*X*-группа) – астероиды с высоким содержанием металлов. Данная группа астероидов сложена из материалов с самыми прочными механическими свойствами, которые так же устойчивы к высоким температурам. Основным классом являются астероиды класса *X*, имеющие наиболее типичные спектры для данной группы. Астероиды класса *Xe* содержат в спектре умеренно широкую полосу поглощения на длине волны 0.49 мкм. Было высказано предположение о том, что это указывает на наличие пирротина (FeS). Астероиды класса *Xc* и *Xk* содержат в спектре довольно широкий максимум на длинах волн 0.55–0.8 мкм, что вызвано большим отражением на этих длинах волн. Спектры *Xc* и *Xk* занимают промежуточное положение между спектрами классов *X*, *C* и *K*.

Табл. 2

Распределение АСЗ по спектральному типу (по данным http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi)

Классификация по спектральному классу SMASS	Амуры	Аполлоны	Атены	Атиры
С-группа углеродных астероидов	7	15	1	–
S-группа кремниевых астероидов	86	103	17	–
X-группа железных астероидов	23	18	7	–
Доля астероидов с известным таксономическим типом в группе	2%	2%	3%	0%

Табл. 3

Метеорные потоки и астероиды, генетически связанные с ними

Метеорный поток	Астероид (РТ)	Группа	Спектральный класс SMASS	e	D , км
Корвиды	2004 HW	Аполлон	–	0.64	–
Сев.Тауриды	2004 TG10	Аполлон	–	0.86	–
Геминиды	3200 Phaethon	Аполлон	С-группа	0.89	5.10
Квадрантиды	2003 EH1	Амур	–	0.62	–
Виргиниды	1998 SH2?	Аполлон	–	0.72	–
Сев. δ-Канкриды	1991 AQ?	Аполлон	–	0.78	1.1
Юж. δ-Канкриды	2001 YB5?	Аполлон	–	0.86	–
Днев. κ-Аквариды	2002 EV11?	Аполлон	–	0.80	–
Юж. χ-Ориониды	2002 XM35?	Аполлон	–	0.84	–

Астероиды X-группы имеют плотность 5.0 г/см^3 [3].

Значение спектрального типа астероида, таким образом, можно использовать в качестве еще одного критерия для отбора гипотетических РТ потоков-сирот, так как вероятность разрушения менее плотных тел выше. Но проблема в том, что на сегодня только для 7% наблюдаемых астероидов определен спектральный тип. В табл. 2 на основе имеющихся данных выполнено сравнение групп астероидов по их спектральному типу. Анализ показывает, что астероиды с более низкими показателями плотности материала, принадлежащие группам С и S, составляют: в Амурах – 80%, Аполлонах – 87%, Атенах – 72%. При этом углеродные астероиды (группа С) преобладают в Аполлонах (11%), для Амуров и Атенов их число составляет 6% и 4% соответственно.

Итак, сравнение по форме орбиты астероидов и их физико-химическим параметрам позволяет среди других групп АСЗ выделить астероиды группы Аполлоны как наиболее вероятные кандидаты для поиска родительских тел потоков-сирот. Не противоречат полученным результатам и данные, приведенные в табл. 3, где представлены характеристики астероидов, которые отождествляют или для которых предполагают возможную связь (отмечены знаком «?») с наблюдаемыми метеорными потоками. В табл. 3 дано название наблюдаемого метеорного потока, принятое название астероида (РТ) по каталогу и его принадлежность

к группе, а также спектральный класс (если известен), эксцентриситет (e) его орбиты и диаметр (D).

Как видим, практически все астероиды, представленные в табл. 3, относятся к группе Аполлоны, при этом их орбиты достаточно вытянуты, эксцентриситеты больше значения 0,6. К сожалению, данные о химическом составе и размерах большинства указанных астероидов отсутствуют. Что касается астероида Фазтон (3200 *Phaethon*), то его спектральный класс и размер являются типичными для ядер комет, а метеорный поток Геминиды проявляет все признаки потока кометного происхождения [4]. Поэтому нельзя исключать, что астероид Фазтон является ядром потухшей кометы.

Сегодня для обнаружения потенциально опасных для Земли астероидов функционируют наземные станции обнаружения, по данным которых с высокой точностью вычисляются орбиты астероидов, однако физико-химические параметры определяются лишь для незначительной доли астероидов. По причине высокой стоимости космических миссий к настоящему времени космическими аппаратами был совершен облет только двенадцати астероидов и совершено всего четыре выхода на околоастероидные орбиты. В то же время без знания минералогического состава, плотности, размеров и точных оценок масс астероидов невозможно не только изучать их динамику и эволюцию, связь с другими малыми телами Солнечной системы, но и реалистично оценивать последствия столкновения АСЗ и продуктов их распада с Землей, разрабатывать средства ее противоастероидной защиты.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентноспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров, а также при поддержке РФФИ (проект № 15-02-01638-а).

Литература

1. *Бережной А.А., Бусарев В.В., Ксанфомалити Л.В., Сурдин В.Г., Холшевников К.В.* Солнечная система – М.: ФИЗМАЛИТ, 2009. – 400 с.
2. *Dohnanyi J.S.* Collisional model of asteroids and their debris // *J. Geophys. Res.* – 1969. – V. 74, No 10. – P. 2531–2554.
3. *Orbital Ephemerides of the Sun, Moon, and Planets: Ch. 5 // Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac / Ed. by S. Urban, P.K. Seidelmann.* – Sausalito, California: Univ. Sci. Books, 2006. – P. 279–324.
4. *Sokolova M.G., Kondratyeva E.D., Nefedyev Y.A.* A comparative analysis of the D-criteria used to determine genetic links of small bodies // *Adv. Space Res.* – 2013. – V. 52, No 7. – P. 1217–1220. – doi: 10.1016/j.asr.2013.06.027.

Поступила в редакцию
29.09.16

Соколова Марина Геннадьевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры астрономии и космической геодезии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *smarina.63@mail.ru*

Сергиенко Мария Викторовна, аспирант кафедры астрономии и космической геодезии

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: *maria_sergienko@mail.ru*

ISSN 1815-6169 (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2016, vol. 158, no. 4, pp. 583–592

Near-Earth Asteroids as Possible Parent Bodies of Meteor Streams

M.G. Sokolova^{*}, *M.V. Sergienko*^{**}

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia

E-mail: ^{*}*smarina.63@mail.ru*, ^{**}*maria_sergienko@mail.ru*

Received September 29, 2016

Abstract

The genetic relationship of meteor streams with near-Earth asteroids (NEAs) is being actively studied. A genetic link with the asteroid is possible only for streams in which meteoroids have the geocentric speed smaller than 50 km/s, thereby meaning the proportionality of their orbits with the orbits of asteroids. To date, there are about 40 such orphan streams with unknown parent bodies.

In the paper, NEA groups (Aten, Apollo, Amor, and Atira) have been considered from the perspective of possible search for the parent bodies of meteor streams among them. The groups have been compared based on the following parameters: eccentricity of asteroid orbits, as well as size and chemical composition of asteroids. Currently, it is considered that the surface of asteroids with elongated orbits is subjected to temperature fall: it is heated in perihelion and cooled in aphelion. Due to small orbital periods around the Sun (about 2–4 years), this may lead to formation of meteoroid clusters.

Therefore, comparison of asteroids by their orbit shape and physicochemical parameters enables us to distinguish between NEA groups of asteroids and the Apollo group as most probable candidates to search for the parent bodies of meteor streams among NEAs.

Unfortunately, finding physicochemical parameters poses great difficulties, since they are only detectable for some asteroids. At the same time, it is impossible to study asteroids dynamics, evolution, and relation with other bodies of the Solar system, as well as to realistically assess the impact of NEAs and products of their disintegration collision with the Earth and to develop systems of anti-asteroid protection without knowing the following parameters of asteroids: mineralogical composition, density, size, and accurate mass.

Keywords: meteoroid, meteor stream, asteroid, comet, orbit

Acknowledgments. This study was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University as part of the state program for increasing its competitiveness among the world's leading centers of science and education, as well as by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 15-02-01638-a).

Figure Captions

Fig. 1. The register of meteor streams (Meteor Data Center (MDC), <http://www.astro.amu.edu.pl>).

Fig. 2. The relative distribution of asteroids based on eccentricity in the groups (according to data from http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi).

Fig. 3. The relative distribution of asteroids based on diameter in the groups (according to data from http://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb_query.cgi).

References

1. Bereznoi A.A., Busarev V.V., Ksanfomaliti L.V., Sudrin V.G., Kholshevnikov K.V. Solar System. Moscow, FIZMATLIT, 2009. 400 p. (In Russian)
2. Dohnanyi J.S. Collisional model of asteroids and their debris. *J. Geophys. Res.*, 1969, vol. 74, no. 10, p. 2531–2554.
3. Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. *Ch. 5. Orbital Ephemerides of the Sun, Moon, and Planets*. Urban S., Seidelmann P.K. (Eds.). Sausalito, Calif.: Univ. Sci. Books, 2006, pp. 279–324.
4. Sokolova M.G., Kondratyeva E.D., Nefedyev Y.A. A comparative analysis of the D-criteria used to determine genetic links of small bodies. *Adv. Space Res.*, 2013, vol. 52, no. 7, pp. 1217–1220. doi: 10.1016/j.asr.2013.06.027.

⟨ **Для цитирования:** Соколова М.Г., Сергиенко М.В. Астероиды, сближающиеся с Землей, как возможные родительские тела метеорных потоков // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2016. – Т. 158, кн. 4. – С. 583–592. ⟩

⟨ **For citation:** Sokolova M.G., Sergienko M.V. Near-Earth asteroids as possible parent bodies of meteor streams. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2016, vol. 158, no. 4, pp. 583–592. (In Russian) ⟩