

## Динамические связи метеороидного потока Northern iota-Aquariids с околоземными астероидами

© М.В. Сергиенко,<sup>1</sup> Ю.А. Нефедьев,<sup>1</sup> А.О. Андреев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
420008 Казань, Россия

<sup>2</sup>Казанский государственный энергетический университет,  
420066 Казань, Россия  
e-mail: star1955@mail.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2024 г.

В окончательной редакции 18 сентября 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Рассмотрено установление генетических связей метеороидного потока Northern iota-Aquariids с околоземными астероидами. Использован авторский синтетический метод. Для отождествленных астероидов с высоким фактором связи  $P \geq 0.6$  проведен многофакторный анализ их взаимосвязи с метеорным потоком Northern iota-Aquariids. По результатам исследований установлено, что связь с потоком Northern iota-Aquariids имеют околоземные астероиды 2016EE27, 2015 DT198, 2019GD1, 2006PF1, 2006LA, 2002JS2, 2002PD11, 2003MT9.

**Ключевые слова:** метеороидный поток, астероид, потухшая комета, генетические связи, околоземные объекты.

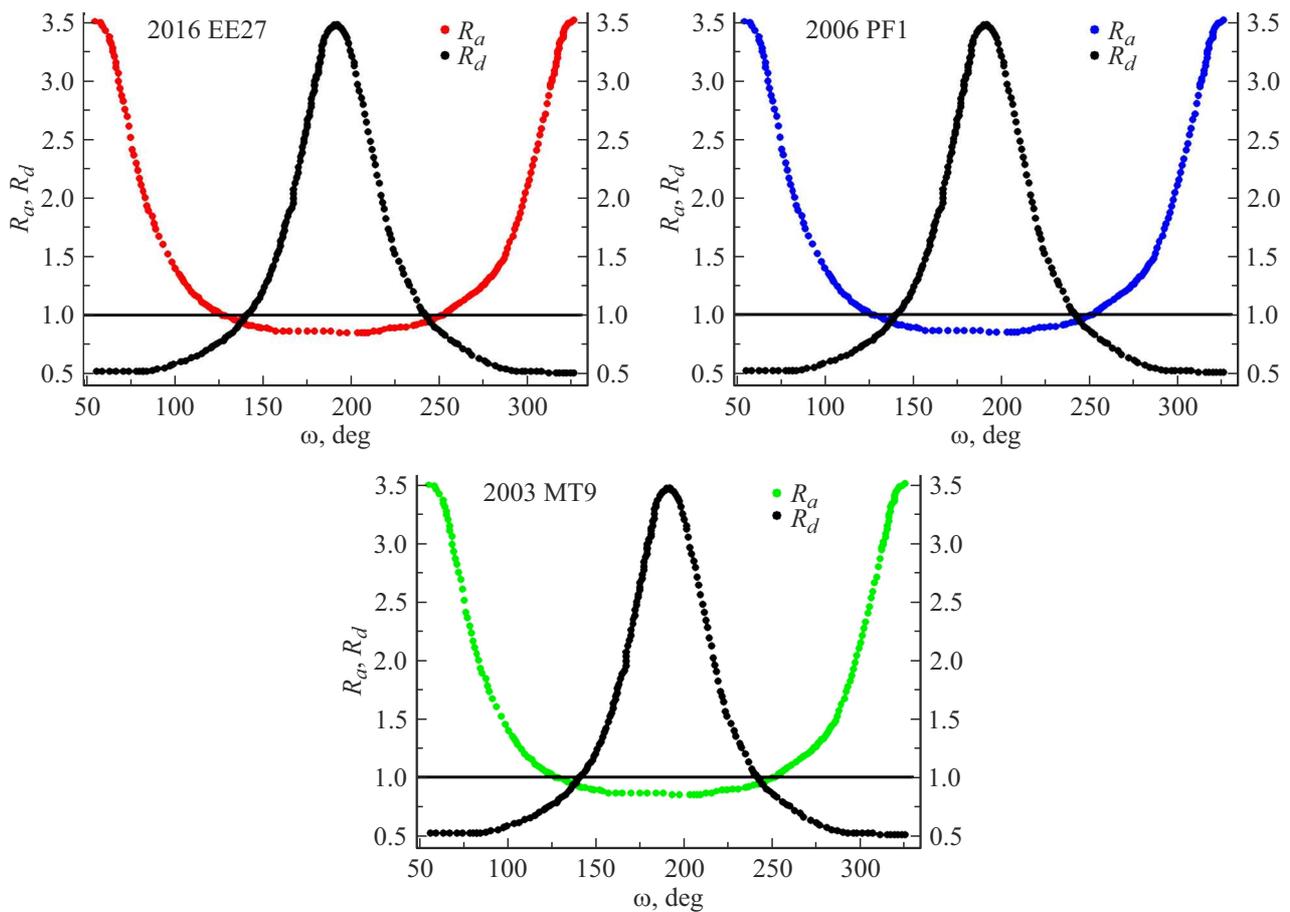
DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59252.381-24

Астероиды, кометы и метеороиды наряду с планетами составляют население Солнечной системы. Астероиды могут быть каменными, кремниевыми или железными в зависимости от химического состава объекта, тогда как кометы представляют собой конгломерат смерзшейся пыли и газа. При прохождении кометы через перигелий за счет нагрева происходит высвобождение газа, и освобожденные частицы пыли вырываются с поверхности кометы. Скорости высвобожденных частиц малы, и поэтому они движутся по схожим с орбитой кометы гелиоцентрическим орбитам. Однако в момент выброса у метеороидов изменяются большие полуоси и периоды обращений, и начинает действовать солнечное давление, которое меняет периоды обращения метеороидов и их эксцентриситеты. Все это вызывает начальную дисперсию орбит, и под ее действием метеороиды с течением времени распределяются по всей орбите кометы. Некоторые частицы при этом не покидают поверхность ядра кометы или испаряются и возвращаются обратно, образуя тем самым пылевую корку, которая препятствует проникновению солнечного излучения к ядру кометы, что замедляет и/или прекращает истечение кометного вещества. Такие кометы называют потухшими или угасшими, и при наблюдении их трудно отличить от обычных астероидов. С некоторыми из подобных объектов связывают метеороидные потоки, и предполагается, что они образовали метеороидный поток в той фазе, когда существовали в виде активных комет. Кометные ядра образовались в момент формирования Солнечной системы, тогда как время жизни метеороидного потока не превышает нескольких сотен лет, поэтому их одновременное появление невозможно. Также нельзя исключать возможность распада кометного ядра под действием внешних сил, а также импактный (столкновительный)

сценарий, при котором небесные тела сталкиваются друг с другом. Важными научными задачами являются исследование отделения потухших комет из числа обычных астероидов и разработка метода, с помощью которого возможно было бы идентифицировать эти объекты. Исследования в данном направлении уже проводились, например, в работах [1,2].

Нами был разработан авторский синтетический метод, который основан на использовании совокупности критериев генетической общности [3,4]. Главным отличием синтетического метода от других методов определения связей между двумя орбитами является отождествление астероида с метеорным потоком одновременно по нескольким критериям и присваивание индивидуального фактора по каждому критерию. Затем по заданному алгоритму, детально описанному в [5], вычисляется итоговый фактор связи  $P$ . Если фактор связи  $P$  выше 0.5, то мы считаем, что астероид связан с метеорными потоками; чем выше фактор  $P$ , тем более вероятна связь. Важной особенностью синтетического метода является вычисление средней орбиты для метеорного потока и пороговых значений на каждый критерий синтетического метода на основе большого количества индивидуальных орбит метеороидов, что учитывает влияние дисперсии при выбросе частиц из родительского тела, о котором говорилось выше.

Были исследованы генетические связи для метеорного потока Northern iota-Aquariids с околоземными астероидами групп Аполлона, Атона и Амура. Наличие родственных связей между астероидами и метеорным потоком было обнаружено только в группе Аполлоны. В расчетах использовались орбиты астероидов из данных Jet Propulsion Laboratory, орбиты метеороидов — из CAMS [6,7]. Астероид считался связанным с метеорным



Зависимости долготы восходящего и нисходящего узлов от аргумента перигелия для трех астероидов.

потоком, если фактор связи  $P$  был выше или равен 0.6 сразу по трем использованным метеорным базам. Такие астероидные объекты включались в исследование, и для них был проведен многофакторный анализ взаимосвязи с метеорным потоком Northern iota-Aquariids как родительских тел, а также была изучена их орбитальная эволюция.

Группы родительских тел проверялись на связи внутри группы критериями Саутворта-Хоккинса и Ашера. Критерии Саутворта-Хоккинса и Ашера являются классическими безразмерными критериями для установления генетической общности малых тел Солнечной системы. Критерий Саутворта-Хоккинса представлен в пятимерном пространстве элементов орбит и очень зависим от перигелийного расстояния. Критерий Ашера является более модифицированным, выведенным для трехмерного пространства элементов орбит. Для двух вышеописанных критериев будем считать, что тела генетически связаны, если значение, рассчитанное для пары орбит, ниже, чем некий установленный авторами критериев порог величины. Поскольку долгота восходящего узла  $\Omega$  и аргумент перигелия  $\omega$  меняются с течением времени, критерий Саутворта-Хоккинса может принимать большие значения только из-за этих изменений и поэтому становится непригодным для расчетов на длительных временных интервалах. В таком случае было принято

решение ввести еще один элемент проверки — критерий Ашера, который позволяет избежать этой неточности. Пороговое значение для критериев Саутворта-Хоккинса и Ашера  $D < 0.2$ . Учитывая все вышесказанное, было обнаружено, что астероиды 2016EE27, 2015DT198, 2019GD1, 2006PF1, 2006LA, 2002JS2, 2002PD11, 2003MT9 связаны друг с другом. Значения критериев, полученных внутри групп родительских тел, лежат в интервале от 0.02 до 0.19, что указывает на связи внутри групп отождествленных родительских тел. Еще одним критерием проверки для астероидов групп родительских тел являлась постоянная Тиссерана относительно Юпитера —  $T$ . Считается, что если у объекта  $T \approx 3$ , то его орбита имеет переходную природу — кометную или астероидную; объекты с  $T < 3.1$  движутся по кометоподобным орбитам, объекты с  $T > 3.1$  — по астероидноподобным. Дополнительным критерием для проверки стал анализ по диаметру и альбедо, так как потухшие кометы имеют очень низкие значения альбедо (от 0.02 до 0.15).

При выбросе метеороидов из родительского тела разлетающиеся частицы имеют разные диапазоны скоростей, но эти скорости ниже орбитальных, поэтому сначала частицы будут двигаться по орбитам, которые схожи с орбитой родительского тела. Следует отметить, что у некоторых частиц отличаются значения больших

полуосей и, следовательно, будет отличие в орбитальном периоде между частицей и родительским телом, таким образом некоторые метеороиды будут отставать, а некоторые, наоборот, обгонять своего родителя, распространяясь по своей орбите. Так как на метеороиды, расположенные вокруг родительского тела, по-разному будут действовать планетные возмущения, их орбитальная эволюция будет происходить по-разному. Следовательно, будут наблюдаться изменения в значениях аргумента перигелия  $\omega$ , в долготе восходящего узла  $\Omega$  и в наклоне  $i$ . Для того чтобы метеорный поток можно было наблюдать с Земли, его орбита должна пересекаться с орбитой Земли, а это возможно только для тех метеороидов, узловое расстояние которых составляет примерно 1 а.у.

На рисунке показаны зависимости для долготы восходящего и нисходящего узла от аргумента перигелия для трех астероидов. Использован метод, который был разработан Бабаджановым и Обрубовым и хорошо описан в [8]. Согласно приведенным зависимостям, можно увидеть, что пересечение орбиты Земли с орбитой метеороидного потока происходит для каждого астероида четыре раза, так как существует четыре различных значения аргумента перигелия  $\omega$ , и для всех рассматриваемых астероидов значения аргумента перигелия  $\omega$  очень близки. Согласно методу [9], считается, что количество пересечений с орбитой Земли показывает количество созданных данным астероидом метеорных потоков. Из полученных нами зависимостей можно предположить, что все три астероида создают четыре метеороидных потока — два ночных и два дневных.

Мы придерживались концепции, что связь с метеороидным потоком возможна для спящих кометных ядер или фрагментов кометного ядра [10]. В результате проведенных исследований было установлено, что связь с потоком Northern Iota-Aquariids имеют околоземные астероиды 2016EE27, 2015 DT198, 2019GD1, 2006PF1, 2006LA, 2002JS2, 2002PD11, 2003MT9. Они были отождествлены с метеорным потоком Northern Iota-Aquariids, и для этих объектов были получены высокие факторы связи  $P \geq 0.6$ . Все астероиды из групп родительских тел для метеорного потока Northern Iota-Aquariids движутся по схожим орбитам. При анализе болидной базы CNEOS нами было установлено, что в потоке имеются метеороиды больших размеров, способных вызвать болиды. Таким образом, можно заключить, что в потоке существуют осколки распавшегося кометного ядра. Приведенные в работе аргументы подтверждают, что поток Northern Iota-Aquariids имеет связь с околоземными астероидами, которые, вероятно, могут быть фрагментами распавшегося кометного ядра.

Поскольку, как уже было упомянуто выше, одной из важных научных задач является исследование отделения потухших комет из числа обычных астероидов и разработка метода, с помощью которого возможно было бы идентифицировать эти объекты и связанные с ними метеороидные потоки. Результаты настоящей работы

вносят свой неотъемлемый вклад в идентификацию и установление связей между малыми небесными телами и в дальнейшем будут использованы для создания общей концепции распределения метеороидного вещества в околоземном пространстве. Создание общей концепции распределения метеороидного вещества и изучение метеороидного содержания очень важно при планировании различных космических миссий, экстраполировании метеороидной обстановки на траектории полетов от Земли до Марса и при решении вопросов астероидно-кометной опасности.

### Финансирование работы

Выполненные работы поддержаны Российским научным фондом, грант 22-72-10059.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов

### Список литературы

- [1] G.I. Kokhirova, P.B. Babadzhinov. *Solar System Research*, **57**, 467 (2023). DOI: 10.1134/S0038094623050039
- [2] P. Jenniskens, D. Robertson, C.A. Goodrich, M.H. Shaddad, A. Kudoda, A.M. Fioretti, M.E. Zolensky. *Meteoritics Planetary Science*, **57** (9), 1641 (2022). DOI: 10.1111/maps.13892
- [3] M.V. Sergienko, M.G. Sokolova, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev. *Astron. Rep.*, **64**, 1087 (2020). DOI: 10.1134/S1063772920120124
- [4] M. Sokolova, M. Sergienko, Y. Nefedyev, A. Andreev, L. Nefediev. *Adv. Space Res.*, **62** (8), 2355 (2018). DOI: 10.1016/j.asr.2017.11.020
- [5] M.V. Sergienko, M.G. Sokolova, K.V. Kholshchikov. *Astron. Rep.*, **64**, 458 (2020). DOI: 10.1134/S1063772920060050
- [6] J. Vaubaillon, C. Loir, C. Ciocan, M. Kandeepan, M. Millet, A. Cassagne, L. Lacassagne, P. Da Fonseca, F. Zander, D. Buttsworth, S. Loehle, J. Toth, S. Gray, A. Moingeon, N. Rambaux. *A&A*, **670**, A86 (2023). DOI: 10.1051/0004-6361/202244993
- [7] P. Matlovič, A. Pisarčíková, J. Tóth, P. Mach, P. Čermák, S. Loehle, L. Kornoš, L. Ferrière, J. Šilha, D. Leiser, R. Ravichandran. *Monthly Notices Royal Astronomical Society*, **513** (3), 3982 (2022). DOI: 10.1093/mnras/stac927
- [8] G.I. Kokhirova, A.I. Zhonmuhammadi, U.H. Khamroev, M.N. Latipov, T.J. Jopek. *Planetary Space Sci.*, **243**, 105869 (2024). DOI: 10.48550/arXiv.2305.15823
- [9] T.J. Jopek, M. Hajduková, R. Rudawska, M. Koseki, G. Kokhirova, L. Neslušan. *New Astron. Rev.*, 101671 (2022). DOI: 10.1016/j.newar.2022.101671
- [10] R. Sennlaub, M. Hofmann. *Monthly Notices Royal Astronomical Society*, **516** (1), 811 (2022). DOI: 10.1093/mnras/stac1948