Метеороидный поток Эта-Виргиниды и исследование орбитальной динамики связанных с ним астероидов

© М.В. Сергиенко,[1] Ю.А. Нефедьев,[1] А.О. Андреев[2]

[1] Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008 Казань, Россия
[2] Казанский государственный энергетический университет,
420066 Казань, Россия
e-mail: maria_sergienko@mail.ru, andreev.alexey93@gmail.com

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 13 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Рассмотрен метеороидный поток Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) и обсуждены его происхождение, физические свойства и связанные с ним астероиды. Принадлежность астероидов к рассматриваемому потоку определялась с использованием разработанного авторами интегрального метода. Данные о болидах из Европейской сети болидов использовались для исследования метеороидов потока. Болиды отобраны в диапазоне от 300 до 30° (J2000.0) в пределах заданного интервала солнечной долготы. Изучение длительной эволюции орбит метеорного потока Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) выполнено в обратную сторону за период 10 000 лет с использованием высокопорядкового несимплектического интегратора Эверхарта 15 порядка IAS15 с учетом возмущений от планет, Солнца и влияния эффекта Ярковского.

Ключевые слова: метеороидный поток, метеорный поток, астероид, угасшая комета, околоземные астероиды, орбитальная эволюция, эффект Ярковского, орбитальные резонансы.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64034.294-26

Метеороиды, двигающиеся по схожим орбитам, образуют метеороидный поток. Метеороидные потоки, проходя вблизи орбиты Земли, порождают метеорные потоки. Считается, что метеороиды, которые двигаются по близким орбитам, имеют общее происхождение и произошли от общего родительского тела; как правило, это родительское тело — комета. Однако существуют и метеороидные потоки, связанные с астероидами [1]. В большинстве случаев речь идет об объектах, принадлежащих к астероидно-кометным популяциям. Астероидно-кометные популяции содержат метеороидное вещество, которое движется по схожим орбитам с кометным ядром и его фрагментами, которые могут наблюдаться как астероиды. Механизмы образования метеороидных потоков из комет давно изучены. Комета во время обычной активности при сублимации льдов выбрасывает метеороиды. По различным причинам может происходить распад кометного ядра, сопровождающийся высвобождением значительного количества метеороидов [2]. Распад кометного ядра может происходить из-за тесных сближений с гравитационно сильными объектами, например, с Юпитером. Как только комета оказывается внутри предела Роша, приливные воздействия со стороны гравитационно сильного тела, его разрывают. Предел Роша — это такое расстояние, на котором приливные силы разрывают близко расположенное тело. Если тело непрочное или неправильной формы, то оно разрушается. Еще причиной для разрушения кометного ядра на фрагменты могут стать силы внутреннего напряжения, которые возникают из-за нагрева тела при прохождении его через перигелий. Поверхность кометного ядра покрыта темной тугоплавкой коркой, которая образуется из-за многократного прохождения тела через перигелий орбиты. Как только корка на поверхности нарушается, при разогреве ядра через трещины начинает вырываться газ и пыль, создавая реактивную тягу и силы напряжения внутри кометного ядра. Силы внутреннего напряжения могут поспособствовать распаду ядра на фрагменты. При распаде кометного ядра высвобождается большое количество кометного вещества, движущегося по схожим с ядром кометы, траекториям. Дискуссии подвергается способ образования астероидных метеороидных потоков. Существуют разные точки зрения: одни исследователи считают, что астероиды внутри метеороидного потока — это потухшие кометные ядра, которые произвели метеороиды будучи активными кометами, другие считают, что возможен термический и физический раскол с высвобождением пылевого шлейфа [3], также имеются активные астероиды, которые могут проявлять кометную активность, даже фактически оставаясь астероидами. Под „потухшими кометными ядрами“ понимают кометные ядра, которые утратили свою летучую составляющую. Ранее они были активными кометами, но при многократном прохождении через перигелий, они израсходовали запас летучего вещества — пыли и газа и в данный момент находятся в неактивном состоянии. Таким образом, граница между астероидами и кометами остается весьма условной.

Для более глубокого понимания эволюции малых тел Солнечной системы необходимо учитывать особенности их происхождения и характер их взаимодействия. Идентифицируя связи малых небесных тел между собой,

Орбитальные параметры для астероидов, отождествленных с метеорным потоком Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) по данным Jet Propulsion Laboratory (JPL) (https://www.jpl.nasa.gov/, дата обращения 12.08.2026 г.)

Астероид	a, au	e	Q, au	i, °	ω. °	Ω. °	T	Earth MOID, au	H	α	D, m
2015 FP33	2.56	0.85	0.39	5.95	298.38	353.52	2.77	0.17	24.8	0.06	0.06
										0.18	0.03
										0.40	0.02
2025 FA15	2.61	0.76	0.62	5.51	256.33	19.12	2.91	0.10	25.61	0.06	0.04
										0.18	0.02
										0.40	0.02

мы руководствуемся следующим предположением. Для метеороидных потоков с неустановленным родительским телом в качестве возможного родителя может выступать комета, исчерпавшая летучую составляющую и утратившая способность к сублимации льдов, либо комета, покрытая толстой пылевой оболочкой и вследствие этого наблюдаемая как астероид [4]. Кометное ядро может визуально наблюдаться как астероид, поскольку при многократном прохождении через перигелий оно покрылось толстой пылевой коркой и имеет низкое альбедо, порядка нескольких процентов, к тому же, нет наблюдаемой пылевой активности. Кроме того, родителем может быть и активный астероид [5]. Термин „активный астероид“ объединяет астероиды Главного пояса, которые обладают физическими свойствами кометной активности. Данная группа немногочисленна, в настоящее время их несколько десятков. Их обозначают и как астероид, и как комету. Подобно кометам у активных астероидов наблюдается хвост, кома и другие кометные проявления, но все эти проявления периодичны и наблюдаются около перигелия. Непериодические кометные проявления бывают при столкновениях и при вращательной неустойчивости. По орбитальным характеристикам они имеют критерий Тиссерана относительно Юпитера больше 3.0, что характерно для типичных астероидов.

Целью настоящей работы была идентификация связи метеороидного потока Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) с астероидами из группы околоземных астероидов Аполлоны. Группа Аполлонов была использована нами, как наиболее подходящая для поиска в ней астероидов-родителей, поскольку ранее нами были проведены исследования в группах околоземных астероидов. Астероиды были проанализированы по орбитальным характеристикам, альбедо и по постоянной Тиссерана относительно Юпитера. Мы пришли к выводу, что по всем показателям астероиды из группы Аполлоны могут содержать наибольшее количество тех тел, которые потенциально могу быть родственными метеороидным потокам. Были отобраны вероятные астероиды-родители — астероид 2015 FP33 и астероид 2025 FA15. Для отобранных астероидов были произведены орбитальный и динамический анализы.

В таблице приведены данные по орбитальным параметрам для астероидов, отождествленных с метеорным потоком Эта-Виргиниды (Eta-Virginids). В таблице приведено: большая полуось a (au), e — эксцентриситет, q — перигелийное расстояние (au), i — наклонение орбиты, ω — аргумент перицентра, Ω — долгота восходящего узла, T — постоянная Тиссерана, относительно Юпитера, Earth MOID — минимальное расстояние пересечения орбиты с Землей, H — абсолютная звездная величина, α — альбедо, D — диаметр. Для астероидов нет данных по альбедо, поэтому для вычисления диаметра мы взяли усредненные значения альбедо в диапазоне от 0.06 до 0.40, что соответствует отражательной способности астероида от 6 % до 40 %.

Мы рассматриваем метеороидный поток Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) и хотим выяснить его происхождение и физические свойства. Поток Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) представляет собой малый метеорный поток, проявляющий активность в марте и относящийся к метеороидному комплексу Виргинид. Под малым метеорным потоком понимают такой метеорный поток, который обладает низкой численностью метеоров, зарегистрированных при наблюдении в определенной области неба за 1 h. Соответствующее значение солнечной долготы составляет около 350°. Данный поток имеет орбитальный период примерно 4 года, в другие годы его активность была крайне низкой. Радиант данного потока располагается в пределах созвездия Virgo. В базе Международного астрономического союза он записан под номером 11 и имеет код EVI. Источник данного потока в настоящее время не определен.

Данные о болидах из Европейской сети болидов помогли нам исследовать метеороиды этого потока. Болиды были отобраны в диапазоне от 300 до 30° (J2000.0) по примерному интервалу солнечной долготы.

Анализ правой части рис. 1, отражающей годовое распределение числа болидов потока Эта-Виргинид (Eta-Virginids), показывает, что наибольшее количество зарегистрированных событий приходится на 2017, 2021,

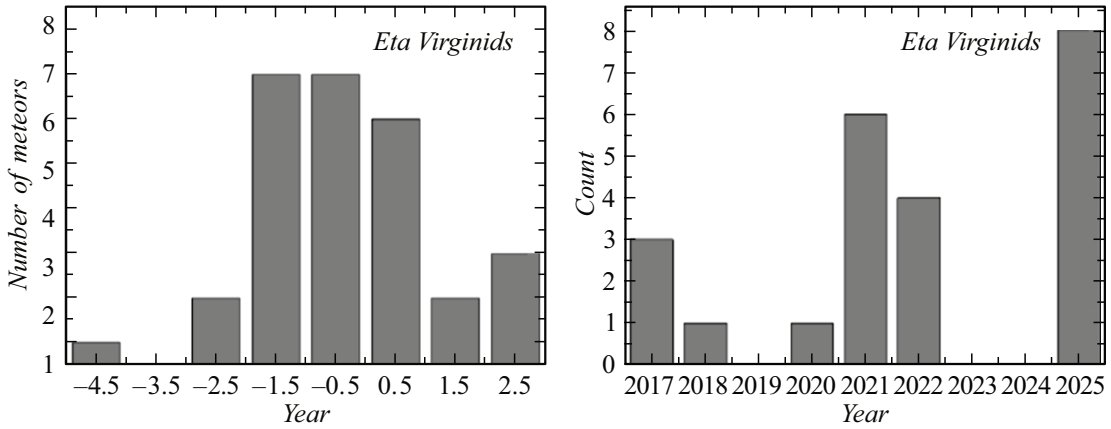


Рис. 1. Распределение звездных величин для метеоров Эта-Виргинид (слева). Распределение по количеству болидов Эта-Виргинид за каждый год (справа).

2022 и 2025 гг. Таким образом, можно увидеть, что активность потока существенна в течение двух лет, а в последующие два года активность либо не наблюдается, либо является слабой. Слабая активность метеороидного потока характеризуется низким числом зарегистрированных метеороидов за 1 h. Таким образом, в распределении болидов проявляется четырехлетняя периодичность, что в целом согласуется с данными о четырехлетнем периоде активности потока Эта-Виргинид (Eta-Virginids). Поток Эта-Виргинид (Eta-Virginids) характеризуется низкой активностью и наблюдается на фоне спорадической метеорной составляющей, в связи с чем, болид, зарегистрированный в 2020 г., вероятно, не связан с данным потоком и, по-видимому, представляет собой случайное событие. Периодичность связана с тем, что метеороиды потока находятся в резонансе с Юпитером 3:1. Анализ орбитальных периодов выполнялся на основе исследования распределения объектов в области больших полуосей. Распределение метеоров потока по орбитальным периодам в зависимости от солнечной долготы показывает, что все метеоры располагаются в области примерно около четырех лет, что согласуется с имеющимися данными о периоде данного потока.

Нами была проделана работа в рамках идентификации метеорного потока, и определены астероиды, родственно связанные с метеороидным потоком Эта-Виргинид (Eta-Virginids). Синтетический метод был использован нами для идентификации и для выявления связей между Эта-Виргинидами (Eta-Virginids) и астероидами [6]. Синтетический метод включает в себя совокупность критериев генетической общности, некоторые из них учитывают гравитационные эффекты, а некоторые — негравитационные. Как правило, критерии для установления генетических связей безразмерные, поэтому, наравне с ними, в синтетический метод включены метрики Холшевникова, которые являются натуральными метриками и имеют размерность. Отличительной особенностью синтетического метода от других методов отождествления связей малых тел Солнечной системы является вычисление связей между астероидом и метеороидным потоком одновременно по нескольким критериям с присвоением фактора в зависимости от вклада этого критерия. Далее происходит вычисление итогового фактора, который показывает связь между малыми телами Солнечной системы. Чем выше значение фактора, тем сильнее проявление связи между телами. Немаловажным является особенное вычисление средней орбиты метеороидного потока. Для вычисления средней орбиты метеороидного потока используются индивидуальные орбиты метеороидов, что помогает учитывать дисперсию при выбросе метеороидов из родительского тела. Важным фактором является вычисление пороговых значений для каждого критерия синтетического метода. С помощью пороговых значений для каждого из критериев синтетического метода задается интервальная оценка, оценивающая вычисленное значение между орбитой родительского тела и средней орбитой метеороидного потока. Интервальная оценка нужна для анализа связи между малыми телами Солнечной системы. Изучение орбитальной эволюции на длительные интервалы времени для метеорного потока Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) было выполнено в обратную сторону за период 10 тыс. лет. Использовался несимплектический интегратор Эверхарта 15 порядка с учетом возмущений от планет, Солнца и влияния эффекта Ярковского. Программная реализация интегратора выполнена на языке Python.

Анализируя орбитальную динамику астероидов-родителей для метеороидного потока Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) можно отметить следующее (рис. 2). Изменения большой полуоси, эксцентриситета и аргумента перигелия минимальны. Вероятно, большая полуось сохраняет свое постоянство из-за резонанса с Юпитером 3:1. Наклонение, напротив, меняется в значительном диапазоне, и диапазон усиливается, увеличивая наклон орбиты из-за резонанса 3:1 среднего движения с Юпитером. Период изменения наклона варьируется от 7 до

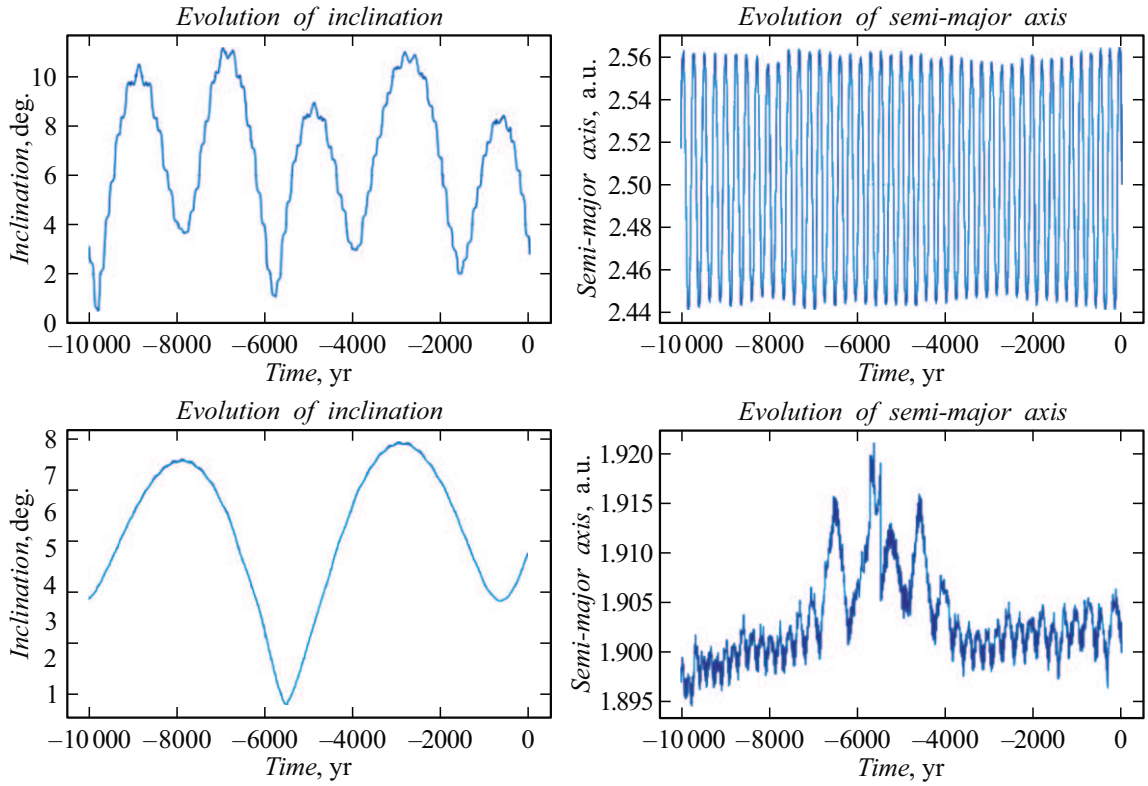


Рис. 2. Ретроспективный анализ орбитальной эволюции объектов 2015 FP33 (верхние графики) и 2025 FA15 (нижние графики) за предшествующие 10 000 лет. Показана зависимость наклона и большой полуоси от временного интервала.

45° за 100–300 лет. При этом наклоны рассмотренных болидов меняются незначительно. Долгота узла и аргумент перигелия имеют тенденцию к группированию около значений, которые связаны между собой через 180°. Небольшой период, меньше 1 млн лет, характеризуется некоторыми факторами. Среди них выброс массы при вращении с большим ускорением, разрушение под воздействием высоких температур, столкновительный сценарий с мелкой фракцией астероидов и метеороидов. Орбиты астероидов также эволюционно изменяются и под действием негравитационных эффектов и под действием эффекта Ярковского. С уменьшением размеров объекта возрастает степень его подверженности эффекту Ярковского. Эффект Ярковского — это реактивная тяга, которая появляется у объекта, когда одна часть поверхности нагревается, и переизлучение энергии создает силу, которая вызывает изменения большой полуоси объекта и скорость вращения, так как закручивает траекторию спиралевидно внутрь или наружу. Таким образом, эффект Ярковского способен изменять скорость вращения астероидов и метеороидов и ориентацию их осей. Изменяется большая полуось и эксцентриситет (в меньшей степени), поэтому маленькая сила, создаваемая эффектом Ярковского, способна существенно изменить орбиту малого тела.

В заключении необходимо отметить, что настоящая работа посвящена исследованию связей метеороидного потока Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) с потенциальными родительскими телами. Сам поток записан под номером 11 и имеет код EVI. В работе обсуждаются происхождение метеороидного потока Эта-Виргиниды (Eta-Virginids), его физические свойства и связанные с ним астероиды, являющиеся потенциальными родительскими телами. Принадлежность астероидов к рассматриваемому потоку определялась с использованием разработанного авторами интегрального метода. Данные о болидах из Европейской сети болидов использовались для исследования метеороидов потока. Болиды были отобраны в диапазоне от 300 до 30° (J2000.0) в пределах заданного интервала солнечной долготы. Изучение длительной эволюции орбит метеорного потока Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) было выполнено в обратную сторону за период 10 000 лет с использованием высокопорядкового несимплектического интегратора Эверхарта 15 порядка IAS15 с учетом возмущений от планет, Солнца и влияния эффекта Ярковского. Были отобраны вероятные астероиды-родители — астероид 2015 FP33 и астероид 2025 FA15. Для отобранных астероидов были произведены орбитальный и динамический анализы. Анализируя орбитальную динамику астероидов-родителей для метеороидного потока Эта-Виргиниды (Eta-Virginids) отмечается, что изменения большой полуоси, эксцентриситета и аргумента перигелия минимальны. Тогда как наклон меняется в значительном диапазоне. Диапазон

усиливается, увеличивая наклон орбиты из-за резонанса 3:1 среднего движения с Юпитером. Период изменения наклона варьируется от 7 до 45° за 100–300 лет. При этом наклоны рассмотренных болидов меняются незначительно. Долгота узла и аргумент перигелия имеют тенденцию к группированию около значений, которые связаны между собой через 180°. Небольшой период, меньше 1 млн лет, характеризуется некоторыми факторами. Среди них выброс массы при вращении с большим ускорением, разрушение под воздействием высоких температур, столкновительный сценарий с мелкой фракцией астероидов и метеороидов. Орбиты астероидов также эволюционно изменяются и под действием негравитационных эффектов и под действием эффекта Ярковского. Чем меньше размер объекта, тем больше на него влияет эффект Ярковского. Изменяется большая полуось и эксцентриситет (в меньшей степени), поэтому маленькая сила, создаваемая эффектом Ярковского, способна существенно изменить орбиту малого тела.

Финансирование работы

Авторы выражают благодарность за поддержку выполненных работ Российскому научному фонду, грант 22-72-10059-П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M.V. Sergienko, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev. Solar System Research, **59**, 49 (2025). DOI: 10.1134/S0038094624602032
[2] J. Vaubaillon, Q.-Z. Ye, A. Egal, M. Sato, D.E. Moser. Astron. Astrophys., **680**, L10 (2023). DOI: 10.1051/0004-6361/202348137
[3] H. Jo, M. Ishiguro. Astron. Astrophys., **683**, A68 (2024). DOI: 10.1051/0004-6361/202347898
[4] G.I. Kokhirova, P.B. Babadzhanov. Sol. Syst. Res., **57** (5), 467 (2023). DOI: 10.1134/S0038094623050039
[5] Q. Zhang, Q. Ye, K. Battams, M.M. Knight, W. Boonplod, R. Kracht. Planet. Sci. J., **7** (2), 31 (2026). DOI: 10.3847/PSJ/ae31ef
[6] M.V. Sergienko, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev. Moscow Univer. Phys. Bull., **80** (Sl), S465 (2025). DOI: 10.3103/S0027134925702133