

Орбитальная эволюция околоземных астероидов, связанных с метеороидным потоком April chi-Librids

© М.В. Сергиенко,¹ Ю.А. Нефедьев,¹ А.О. Андреев²

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008 Казань, Россия

²Казанский государственный энергетический университет,
420066 Казань, Россия

e-mail: maria_sergienko@mail.ru, andreev.alexey93@gmail.com

Поступило в Редакцию 4 мая 2025 г.

В окончательной редакции 17 июля 2025 г.

Принято к публикации 18 июля 2025 г.

Приведены результаты многофакторного и орбитального анализов околоземных астероидов группы Аполлонов (2013 WM, 2015 DU180, 2011 BT59, 2013 YC), у которых имеется генетическая связь с метеороидным потоком April chi-Librids. Подтверждена гипотеза, что астероиды являются угасшими фрагментами распавшегося ранее кометного тела.

Ключевые слова: метеороидный поток, астероид, потухшая комета, околоземные астероиды, орбитальная эволюция, орбитальные резонансы.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61787.231-25

Исследование малых тел Солнечной системы, а именно астероидов, комет, метеороидов и метеороидных потоков, является крайне актуальным направлением в современной астрономии и планетологии. Поскольку эти объекты представляют собой остатки вещества, из которого формировалась Солнечная система, то их изучение позволяет ответить на фундаментальные вопросы о происхождении и эволюции нашей планетной системы [1].

Наш подход к идентификации связей между малыми небесными телами основывается на следующей концепции: некоторые объекты, наблюдающиеся в настоящее время, такие как околоземные астероиды, на самом деле являются угасшими кометными ядрами или их осколками [2]. Кометы представляют собой конгломераты пыли и газа, которые, двигаясь по орбите и проходя вблизи от Солнца, нагреваются, в результате чего происходит дезинтеграция кометного ядра — выбрасываются газ, пыль и т.п. Угасшие кометные ядра появляются в том случае, когда комета утратила свою летучую составляющую и из-за многократного прохождения через перигелий ее поверхность покрылась толстой пылевой коркой, которая препятствует кометной активности, и обладает низким альбедо, что дает возможность наблюдать их как астероиды. Возможность образования на поверхности ядра кометы толстой пылевой корки подтверждают результаты спектральных наблюдений комет и изучение комет с помощью космических аппаратов. Угасшие кометы могут быть источниками метеороидных потоков, даже если они в данный момент не проявляют кометную активность. Данное явление возможно, так как ранее они были кометами, имели кометную активность, и выбросили значительное количество пыли и газа, который остался вдоль орбиты, образуя метеороидный рой с орбитой, схожей с орбитой родительской кометы.

В работах [3,4] описан авторский синтетический метод для отождествления родительских тел. Он был нами дополнен метриками Холшевникова. Дополнение было произведено с помощью добавления еще двух метрик Холшевникова. Первоначально в синтетический метод [3,4] была включена только метрика Холшевникова ρ^2 . Ее особенность в том, что она введена в некоем фактор-пространстве с постоянными значениями фокального параметра p , эксцентриситета e , наклона i и долготой восходящего узла Ω , так как они мало меняются, но с разными направлениями на перицентр ω . В измененный синтетический метод добавлены метрики ρ_1 и ρ_3 . Их особенность в том, что для исключения влияния возмущений некоторые величины в каждой из метрик считаются константами. Изменение метода было произведено с целью расширения синтетического метода для увеличения точности отождествляемых в метеороидным потоком объектов.

С помощью отождествления метеороидного потока April chi-Librids с околоземными астероидами группы Аполлоны, было установлено, что данный поток имеет родственные связи с четырьмя околоземными астероидами — 2013 WM, 2015 DU180, 2011 BT59, 2013 YC. Отождествление метеороидного потока April chi-Librids с околоземными астероидами проводилось с помощью авторского синтетического метода. Метод основан на использовании совокупности критериев генетической общности и подробно описан в работах [3,4]. Синтетический метод является совокупностью критериев генетической общности орбит — критерий Драммонда, натуральная метрика Холшевникова, квазистационарные параметры, постоянная Тиссерана и аргумент перигелия. Критерии, объединенные синтетическим методом, являются критериями, учитывающими гравитационные и негра-

витационные взаимодействия. Основными критериями синтетического метода являются критерий Драммонда и метрика Холшевникова. Критерий Драммонда — это D -критерий, являющийся безразмерным, а метрика Холшевникова размерная, является натуральной и имеет размерность квадратный корень из расстояния между орбитами. Несмотря на разную специфику определения расстояния между орбитами, оба эти критерия, и критерий Драммонда и метрика Холшевникова, позволяют вычислить расстояние между орбитами малых тел. Квазистационарные параметры не идентифицируют расстояние между орбитами, но они включены в метод так как учитывают динамическую эволюцию орбит. Постоянная Тиссерана относительно Юпитера является способом разделения орбит по кометному и астероидному типу, включена в синтетический метод для того, чтобы выявлять ядра потухших комет или их осколки. Долгота перигелия π является суммой долготы восходящего узла Ω и аргумента перигелия ω , этот параметр постоянен на длительных временных интервалах и добавлен в метод для анализа характера изменения орбит исследуемого метеороидного потока и связанного с ним астероида. Для отождествления принадлежности астероида к конкретному метеороидному потоку был разработан метод интервальной оценки для вычисленных значений критериев синтетического метода между орбитами астероидов и средней орбиты метеороидного потока. Метод интервальной оценки подразумевает: 1) вычисление значений для каждого из критериев синтетического метода между орбитой астероида и средней орбитой метеороидного потока; 2) выявление попадания значения, рассчитанного в п. 1, в интервал, который задается для каждого критерия синтетического метода как пороговое значение $\pm$ среднеквадратичное отклонение σ . Для этого изначально были рассчитаны пороговые значения по каждому из критериев синтетического метода. Пороговые значения вычислялись с использованием индивидуальных орбит метеороидов и рассчитанной средней орбиты метеороидного потока. Такой подход применен для уменьшения влияния рассеяния метеороидного роя и для учета выбросов метеороидов из родительского тела. Далее применяется аналогичный вероятностному подход с использованием фактора P индивидуально по каждому критерию синтетического метода. Если значение, вычисленное между средней орбитой метеороидного потока и орбитой астероида, попадает в интервал — пороговое значение критерия 2σ , то присваивается высокий фактор связи P , если в интервал — пороговое значение критерия $\pm 2\sigma$, то присваивается средний фактор связи P , если в интервал — пороговое значение критерия $\pm 3\sigma$, то присваивается низкий фактор связи P . Далее вычисляется итоговый фактор связи P , как произведение присвоенных факторов связи.

Для отождествленных астероидов были проанализированы значения постоянной Тиссерана относительно Юпитера. Как уже было упомянуто выше, постоянная Тиссерана относительно Юпитера является способом

разделения орбит по кометному и астероидному типу. Если значения постоянной Тиссерана относительно Юпитера меньше, чем 3, то считается, что объект движется по орбите кометной природы, если значение примерно 3, то по переходной орбите, т.е. такой объект можно отнести как к кометным, так и к астероидным, если же значение больше, чем 3, то предполагается, что данный объект астероидного типа. Анализ постоянной Тиссерана относительно Юпитера проводился с целью выявления ядер потухших комет или их фрагментов среди отождествленных астероидов. Значения постоянной Тиссерана относительно Юпитера T для астероидов, отождествленных с потоком April chi-Librids, лежат в интервале от 2.5 до 3. Согласно критериям разделения орбит на кометные, астероидные орбиты и орбиты переходной природы по данным постоянной Тиссерана относительно Юпитера, можно заключить, что движение данных астероидов происходит по орбитам кометной и переходной природы. Диаметры D и альбедо α для отождествленных астероидов неизвестны, поэтому было проведено дополнительное вычисление эквивалентного диаметра по трем значениям альбедо для темного (0.06), светлого (0.18) и яркого объектов (0.40). Анализ вычисленных данных показал, что значения эквивалентного диаметра при указанных значениях альбедо, лежат в интервале от 0.14 до 0.37 km. Отождествленные объекты небольшого размера, что может свидетельствовать о том, что эти астероиды являются фрагментами распавшегося ранее кометного тела [5].

Для более детального исследования астероидов, входящих в группу родительских тел для метеороидного потока April chi-Librids, было произведено исследование их орбитальной эволюции на интервал времени 10 000 лет. Интегрирование орбит астероидов было произведено вперед и назад на 10 000 лет с учетом возмущений от планет, Солнца и влияния эффекта Ярковского. Использовалась авторская программа, написанная на языке Python с привлечением библиотеки REBOUND, так как данная библиотека позволяет моделировать гравитационные взаимодействия в Солнечной системе и учитывать влияние дополнительных сил, таких как эффект Ярковского. Эффект Ярковского проявляется в появлении реактивного импульса за счет неравномерно нагретой поверхности малого тела. Поверхность малого тела днем нагревается только с одной стороны и ночью она же остывает, придавая малому телу дополнительное ускорение. Эффект Ярковского почти не зависит от формы малого тела, поэтому можно производить вычисления для формы условно сферического тела. Влияние эффекта Ярковского проявляется для всех элементов орбиты, но больше всего он проявляется в изменениях значений большой полуоси — он приводит к вековым возмущениям большой полуоси орбиты объекта. Различают суточный и сезонный эффекты Ярковского. Суточный эффект Ярковского приводит как к увеличению, так и к уменьшению значений большой полуоси малого тела. Сезонный эффект всегда приводит к увеличению

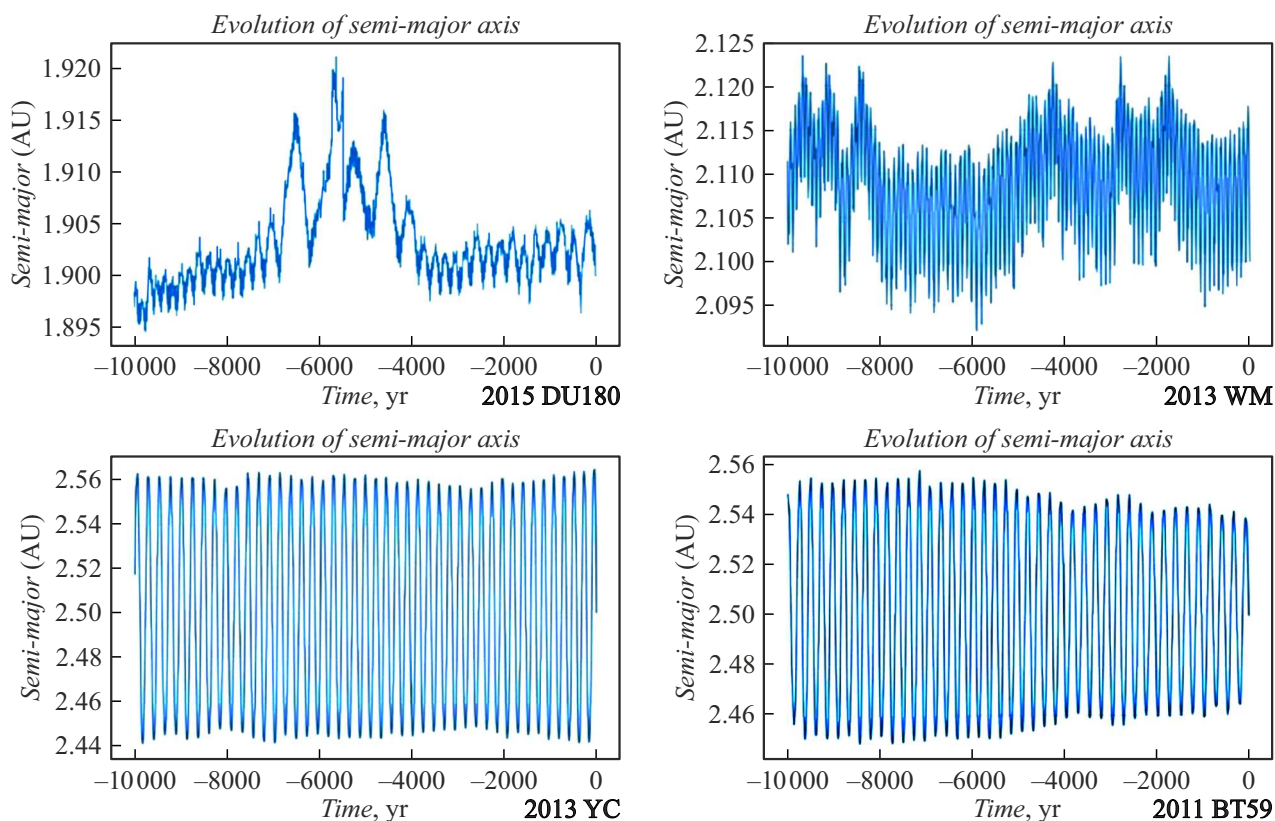


Рис. 1. Зависимости от времени больших полуосей астероидов 2015 DU180, 2013 WM, 2013 YC, 2011 BT59 при интегрировании орбит назад на 10 000 лет.

значений большой полуоси объекта. Суточный эффект обычно проявляется более обширно, чем сезонный. Данный эффект проявляется в дополнительном сдвиге положения малого тела относительно своего положения на орбите. Влияние эффекта приводит к тому, что астероиды попадают в зону резонанса 1 : 3 с Юпитером, или в зону векового резонанса, и выбрасываются из Главного пояса в область движения планет.

Изначально поведилась инициализация симуляции — была создана симуляция с Солнцем и астероидом, а также добавлены планеты Солнечной системы. Использовался интегратор IAS15, который является интегратором по умолчанию в библиотеке REBOUND и может интегрировать вариационные уравнения. Интегратор Эверхарта IAS15 — это интегратор 15-го порядка с адаптивным управлением и возможностью выбора размера временного шага (этот параметр управляет точностью). Интегратор IAS15 — это несимплектический интегратор высокого порядка, который может обрабатывать произвольные силы, а также силы, зависящие от скорости. При интегрировании орбит на длительные временные интервалы учитывался эффект Ярковского, он был реализован в модели упрощенного вида. В рамках данной модели эффект Ярковского добавляет небольшое ускорение астероиду, всего 10^{-15} m/s^2 , которое имитирует реактивную силу от теплового излучения астероида. Для

каждого отождествленного астероида были построены и проанализированы графики зависимости для каждого орбитального элемента в зависимости от временного интервала 10 000 лет.

Для определения эволюции элементов орбиты (большая полуось a (AU), перигелийное расстояние q (AU), эксцентриситет e , наклонение i° , аргумент перигелия ω° , долгота восходящего узла Ω°), были вычислены эволюционные изменения орбиты околоземных астероидов 2011 BT59, 2013 WM, 2013 YC, 2015 DU180 в интервале 10 000 лет при интегрировании назад и вперед. На рис. 1 приведены зависимости от времени большой полуоси астероидов 2015 DU180, 2013 WM, 2013 YC, 2011 BT59 при интегрировании назад на 10 000 лет. Согласно нашим исследованиям, большие полуоси орбит отождествленных астероидов лежат в интервале от 1.9 до 2.5 AU.

Анализируя представленные графики, можно отметить, что большие полуоси орбит астероидов претерпевают гравитационные возмущения от планет. Астероид 2011 BT59 имеет резонанс 4 : 1 с Землей, 1 : 3 с Юпитером, 2 : 1 с Марсом, 6 : 1 с Венерой. Астероид 2015 DU180 имеет резонанс 3 : 1 с Землей, 1 : 4 с Юпитером, 1 : 1 с Марсом, 4 : 1 с Венерой. Астероид 2013 WM имеет резонанс 3 : 1 с Землей, 1 : 4 с Юпитером, 2 : 1 с Марсом, 5 : 1 с Венерой. Астероид 2013 YC имеет

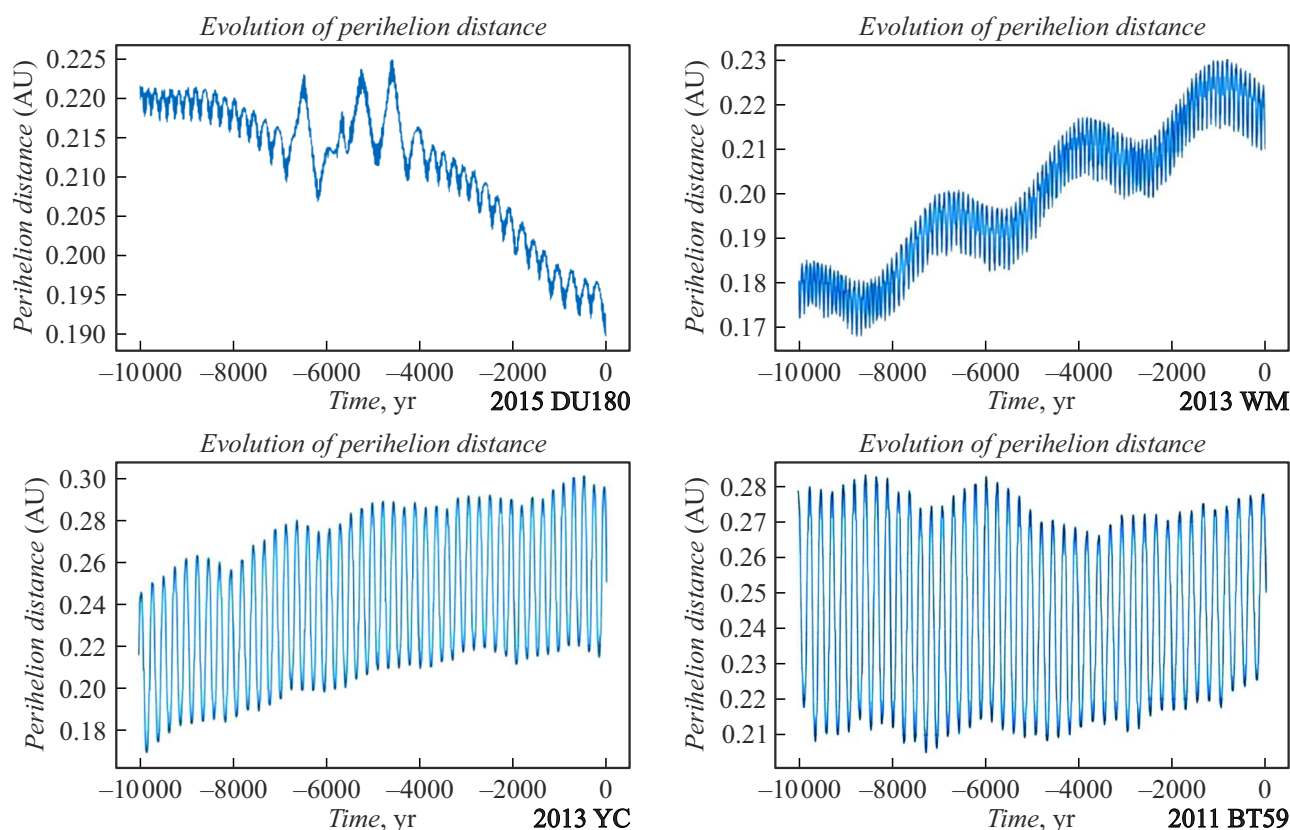


Рис. 2. Зависимости перигелийных расстояний q астероидов 2015 DU180, 2013 WM, 2013 YC, 2011 BT59 от времени при интегрировании орбит назад на 10 000 лет.

резонанс 4 : 1 с Землей, 1 : 3 с Юпитером, 2 : 1 с Марсом, 6 : 1 с Венерой.

При попадании астероидов в резонанс с планетами сильно и резко увеличиваются эксцентриситеты орбит астероидов и, следовательно, сильно уменьшаются перигелийные расстояния. Астероиды все время находятся под гравитационным воздействием больших планет, но самое большое влияние на малые тела оказывает Юпитер. Когда тело попадает в резонанс 3 : 1 с Юпитером оно может длительное время двигаться по орбите с маленьким эксцентриситетом, а потом резко увеличить его до больших величин. Это происходит потому, что астероид попал в зону хаоса. Зоны хаоса сильно меняют характер движения малого тела. Резонанс 3 : 1 с Юпитером добавляет нерегулярные колебания эксцентриситету орбиты с 0.1 до 0.4 на временных масштабах десяти-сотни лет. Следствием является то, что при увеличении эксцентриситета уменьшается перигелийное расстояние, таким образом, объект приобретает возможность пересечения орбиты Марса. Влияние Марса и его зона хаоса может увеличить эксцентриситет до значения 0.9 и больше. Под влиянием зоны хаоса меняется орбита, и астероид приобретает возможность сближений с Землей и Венерой. Если перигелийное расстояние сильно уменьшится, станет меньше радиуса Солнца, то объект становится околосолнечным и может выпасть на Солнце.

Влияние резонанса с Юпитером 5 : 2 тоже вызывает аналогичный механизм изменения орбиты малого тела. Еще одним механизмом увеличения эксцентриситета орбиты является наличие вековых резонансов. Вековые резонансы возмущают эксцентриситет орбиты и наклон тел с периодами обращения десятки или сотни лет. Таким образом, увеличение эксцентриситета орбиты малого тела влечет за собой сближение с планетами, а это, в свою очередь, способствует миграции астероидов из Главного пояса в пространство движения планет.

На рис. 2 показаны зависимости перигелийных расстояний q для астероидов 2015 DU180, 2013 WM, 2013 YC, 2011 BT59 от времени при интегрировании орбит назад на 10 000 лет. Согласно анализу графиков зависимости изменения эксцентриситета и перигелийного расстояния орбит астероидов от времени, можно отметить, что астероидные объекты испытывают орбитальные резонансы, поскольку наблюдается резкое увеличение эксцентриситетов орбит и резкое уменьшение перигелийного расстояния. В некоторые моменты времени перигелийное расстояние достигает $q < 1$ AU при интегрировании орбит астероидов назад на 10 000 лет, следовательно, астероиды испытывают влияние Солнца, что сказывается на разрушении поверхности и пополнении астероидным веществом метеороидного потока [6].

В результате выполнения настоящей работы было проведено многофакторное исследование астероидов, генетически связанных с метеороидным потоком April chi-Librids (см. таблицу). Многофакторное исследование подразумевает анализ орбитальных и таксономических параметров, анализ по значениям постоянной Тиссерана с целью обнаружения малых тел, движущихся по орбитам кометного типа и переходным орбитам, а также для выявления родственных связей внутри группы отождествленных родительских тел. Родственные связи проверялись в группах родительских тел классическими D критериями Саутворта–Хоккинса и Ашера. Критерий Саутворта–Хоккинса с течением времени может значительно изменяться в большую сторону, поскольку долгота восходящего узла Ω и аргумент перигелия ω меняются со временем. Таким образом, критерий Саутворта–Хоккинса нужно осторожно использовать на длительных временных интервалах, так как долгота восходящего узла Ω и аргумент перигелия ω могут значительно измениться. Поэтому используется еще один критерий — критерий Ашера. Критерий Ашера зависит только от трех элементов орбит, поэтому не имеет такой сильной зависимости от временных параметров. Пороговое значение для D критериев Саутворта–Хоккинса и Ашера использовалось $D < 0.2$. Было установлено, что отождествленные астероиды по значениям постоянной Тиссерана преимущественно являются объектами кометной и переходной природы, так как обладают значениями постоянной Тиссерана меньше 3, для астероидов 2011 BT59, 2013 YC, и ровно 3, для астероида 2013 WM. А астероид 2015 DU180 объект явно астероидной природы, поскольку имеет постоянную $T = 3.17$. Анализ по дополнительным критериям Саутворта–Хоккинса и Ашера показал, что данные астероиды имеют связь внутри своей отождествленной группы и пороговое значение для них не превышает $D < 0.2$.

Согласно таблице, данных относительно диаметров астероидов и их альбедо недостаточно. Используя оптические наблюдения, диаметры могут быть рассчитаны только примерно, на основе значения абсолютной звездной величины астероида H и альбедо α . Поэтому, определяя диаметр подобным образом, нужно понимать, что это только оценки размера. Абсолютная звездная величина H является оценкой средней яркости. Эта величина находится при использовании видимой звездной величины при наблюдениях под разными фазовыми углами на разных расстояниях от Солнца и Земли. Форма астероида неизвестна, поэтому он принимается сферическим. Под альбедо α подразумевается отражательная способность астероида и она, обычно, тоже неизвестна. Существует связь между таксономическим типом астероидов и его альбедо, но таксономический класс тоже, как правило, неизвестен. Принимая во внимание все вышеперечисленные факторы, мы рассчитали диаметры астероидов по формуле эквивалентного диаметра [7]. Формула эквивалентного диаметра

использует связь между диаметром D в km, абсолютной звездной величиной H и значением альбедо α . Значения альбедо для данных астероидов неизвестны, поэтому вычисления проводились для трех усредненных значения альбедо α . Для темных астероидов альбедо принималось равным 0.06, для светлых $\alpha = 0.18$, и для ярких альбедо составляет 0.40. Для тех астероидов, для которых размеры неизвестны, а именно для астероидов 2013 YC, 2011 BT59, 2013 WM, были вычислены значения эквивалентного диаметра при трех различных значениях альбедо. Анализируя данные по сближению с Землей, можно отметить, что все объекты из отождествленных астероидов, сближаются с Землей на минимальные расстояния, следовательно, являются потенциально опасными.

Обсуждается изменение орбит астероидов из-за наличия орбитальных резонансов с планетами для отождествленных астероидов. Орбитальные резонансы рассчитываются, как отношения периодов обращения астероида и планеты, т.е. астероид и планета находятся в резонансе, когда отношение их периодов близко к отношению целых чисел. При попадании в резонанс с планетами у орбит астероидов значительно и резко увеличиваются эксцентриситеты орбит и, следовательно, значительно уменьшаются перигелийные расстояния, что можно отметить на построенных в работе графиках. Согласно анализу графиков зависимости от времени эксцентриситета и перигелийных расстояний астероидов, можно отметить, что астероидные объекты подвержены орбитальным резонансам. В некоторые моменты времени перигелийное расстояние достигает $q < 1$ AU при интегрировании орбит астероидов назад на 10 000 лет, следовательно, астероиды испытывают влияние Солнца, что сказывается на разрушении поверхности и пополнении астероидным веществом метеороидного потока. Проведенный многофакторный, орбитальный и анализ эволюции орбит на длительные интервалы времени показывает, что отождествленные с потоком астероиды 2015 DU180, 2013 WM, 2013 YC, 2011 BT59, согласно своим характеристикам, с большой вероятностью удовлетворяют концепции, которой придерживаются авторы, что отождествленные с потоком астероиды являются угасшими фрагментами распавшегося ранее кометного 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] J. Vaubaillon, Q.-Z. Ye, A. Egal, M. Sato, D.E. Moser, *Astron. Astrophys.*, **680**, L10 (2023). DOI: 10.1051/0004-6361/202348137
- [2] G.I. Kokhirova, P.B. Babadzhanov. *Solar System Research*, **57** (5), 467 (2023). DOI: 10.1134/S0038094623050039
- [3] M.V. Sergienko, M.G. Sokolova, Y.A. Nefedyeu, A.O. Andreev. *Astron. Rep.*, **64**, 1087 (2020). DOI: 10.1134/S1063772920120124
- [4] M.V. Sergienko, M.G. Sokolova, Yu.A. Nefedyeu, A.O. Andreev. *St. Petersburg State Polytech. Univer. J.: Phys. Mathem.*, **16** (1.2), 523 (2023). DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.161.280>
- [5] M.G. Sokolova, M.V. Sergienko, Y.A. Nefedyeu, A.O. Andreev, L.A. Nefedyeu. *Adv. Space Res.*, **62** (8), 2355 (2018). DOI: 10.1016/j.asr.2017.11.020
- [6] M.V. Sergienko, Y.A. Nefedyeu, A.O. Andreev. *Solar System Res.*, **59**, 49 (2025). DOI: 10.1134/S0038094624602032
- [7] A. Harris. *Icarus*, **126** (2), 450 (1997).