

ДО 100-РІЧЧЯ ВІД ДНЯ НАРОДЖЕННЯ БОРИСА ЛЕОНІДОВИЧА КАЩЕЄВА

УДК 523. 68

DOI:10.30837/rt.2020.2.201.04

*Ю.М. ГОРБАНЕВ, канд. физ.-мат. наук, Н.А. КОНОВАЛОВА, канд. физ.-мат. наук,
Н.Х. ДАВРУКОВ*

ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ МЕТЕОРИТНЫХ ГРУПП И ИХ ИСТОЧНИКОВ

Введение

Согласно классическому представлению о модели ядра кометы в виде конгломерата легкоплавких льдов и пылевых частиц метеорные потоки образуются в результате выброса от комет частиц пыли размером до нескольких сантиметров [1]. После выброса частицы движутся по гелиоцентрической орбите, как и ядро родительской кометы. Время, за которое все инжектированные пылевые частицы распространились бы вдоль всей орбиты родительского тела, образуя замкнутый метеороидный рой, оценивается в несколько сотен лет [2]. Таким образом, время образования замкнутого кольца мало по сравнению с возрастом в несколько тысяч лет метеорных частиц в рое. Пылевые кометные частицы, орбиты которых являются землепересекающими, при встрече с Землей вторгаются в земную атмосферу, создавая метеорное явление. Метеорные потоки наблюдались в течение тысячелетий, и в течение этого периода метеорный материал периодически поступал в поток от родителя, а исчерпывался материал в результате внешних воздействий в основном за счет влияния гравитационных планетных возмущений и радиационного давления. Из большей части рассеянного материала формируется спорадический метеороидный фон. Катастрофическое разрушение кометных ядер – еще один механизм создания потоков метеороидов. Такой механизм способен производить большие валуны, как это наблюдалось, например, во время разрушения кометы C / 1999 S4 LINEAR

Идея о метеороидных роях и метеоритах, происходящих из астероидов, рассматривалась еще в прошлых годах [3 – 6]. Halliday et al. [7] из базы данных проекта по наблюдению и обнаружению метеоритов в Канаде и Америке (MORP) и прерийной сети PN анализировали орбиты 89 болидов, которые могли выжить в полете в земной атмосфере с ненулевой конечной массой. Авторы предположили существование четырех возможных групп, образующих метеориты, среди которых группа 1 включает метеорит Innisfree, наблюдавшийся инструментально, и пришли к выводу, что некоторые болидные рои произошли от астероидов. Greenberg и Chapman [8] рассматривали, что железо-каменные мезосидериты сформировались на границах ядра и мантии астероидных родителей диаметром 100 – 200 км, палласиты образовались в более мелких материнских астероидах диаметром 50 – 100 км. Авторы считают, что метеориты могут быть осколками крупных астероидов Главного пояса и получены в основном из кратеров, а не из-за разрушительной фрагментации родительского тела. Shestaka [9] исследовал рой тел, который содержал болиды Innisfree и Ridgedale. В результате было выявлено, что этот рой включает 9 небольших метеорных роев, несколько астероидов и 12 болидов, сфотографированных камерами прерийной сети PN и канадского проекта MORP. Ежегодно орбита этого роя приближается к орбите Земли в начале февраля.

В отличие от комет, когда метеороидный рой регулярно пополняется при прохождении кометы вблизи перигелия орбиты, астероиды могут подвергаться разрушительным событиям редко, и рои астероидных метеороидов, вероятнее всего, создаются одним событием. Таким событием может быть столкновение астероидов между собой, а также с крупными метеороидами. В таком случае пространственная плотность астероидного роя должна быть ниже, а его метеорная активность должна отличаться от активности кометных потоков. Несомненно, что

при столкновениях (импакторный механизм) происходит разрушение родительского тела и часть фрагментированного вещества родительского тела в виде мелких частиц и более крупных осколков – бульжников и гальки продолжает существовать на его орбите. В таком сценарии метеороидный рой может образоваться только при столкновении относительно крупных тел, где радиус астероида-импактора более нескольких десятков метров. Примером астероидного происхождения метеоритов является астероид Веста, из которого при ударе импактором были выброшены фрагменты. Некоторые из этих фрагментов при пересечении с орбитой Земли выпадают на землю метеоритами. Гравитационные возмущения от Юпитера и других планет Солнечной системы, вращательная неустойчивость также могут быть причиной разрушения околоземных объектов (NEOs). О том, что астероидоподобный объект на кометной орбите может быть в действительности «спящей» (dormant) кометой, которая со временем заросла толстой до 10 м коркой и прекратила кометную деятельность, рассматривали в своих работах многие исследователи.

1. Годовая активность спорадических метеоров и метеоритообразующих болидов

Beech [10] с целью исследования ежегодного профиля болидной активности анализировал данные о времени появления 2373-х болидов, в основном наблюдаемых в Канаде и зарегистрированных в Millman Fireball Archive. Автор получил, что известные кометные метеорные потоки, дающие яркие метеоры и болиды, представлены в ежегодном профиле болидной активности. Но также были найдены несколько пиков болидной активности, которые не связаны с известными кометными метеорными потоками, и некоторые из них могут оказаться астероидными метеоритными потоками. Наш анализ ежегодного профиля активности спорадических ярких болидов и малых метеоров был основан на нескольких источниках: 737 ярких спорадических болидов (ярче -6 mag) из опубликованных источников и международной базы метеорных данных IAU MDC [11], 1416 малых метеоров ($-2.5 - -5.0 \text{ mag}$) из базы данных SonataCo [12]. Отбор болидов проводился при следующем условии: конечная высота болида $H_e \leq 35 \text{ км}$, внеатмосферная скорость $V_\infty \leq 25 \text{ км с}^{-1}$, конечная скорость $V_e \leq 10 \text{ км с}^{-1}$ и конечная масса болида отлична от нуля.

Полученный набор данных сгруппирован с шагом в десять градусов по солнечной долготе L_\odot . Чтобы выявить периоды годовой активности спорадических болидов, метеоров и метеоритов с известными датами падения было построено распределение числа событий исследуемых тел в зависимости от долготы Солнца L_\odot . Полученное распределение активности спорадических метеоров и болидов в течение года показано на рис. 1. Несколько отчетливых пиков активности длительностью 20 – 30 дней наблюдаются на солнечной долготе: $L_\odot \approx 30^\circ, 60^\circ, 140^\circ, 175^\circ, 220^\circ, 270^\circ, 290^\circ$ и 320° .

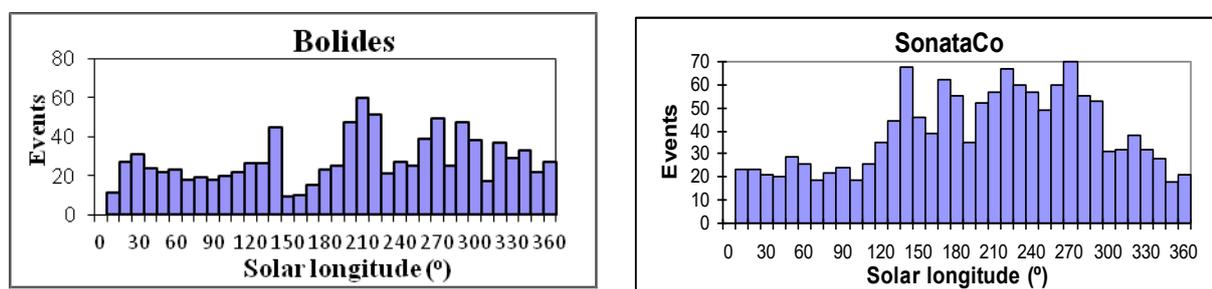


Рис. 1. Годовое распределение числа событий спорадических метеоров (SonataCo) и болидов по долготе Солнца.

2. Метеоритные группы с кометоподобными орбитами семейства Юпитера и их вероятные родительские тела

Полученные гистограммы годовой активности спорадических слабых метеоров и болидов (рис. 1) послужили мотивацией для исследования вопроса о существовании в околозем-

ном пространстве групп спорадических метеороидов и метеоритов обыкновенных хондритов типа L3.5 – H5 с кометоподобными орбитами семейства Юпитера и их связи с потенциальными родительскими телами – околоземными объектами NEOs. В работе [13] авторы выявили шесть групп метеоритообразующих метеороидов и метеоритов обыкновенных хондритов типа L3.5 – H5, наблюдавшихся в определенные периоды повышенной болидной активности. Условием для включения в группы считалась близость орбит членов группы согласно D_{SH} -критерию Southworth и Hawkins [14], который является количественной мерой подобия между орбитами. Для групп метеоритообразующих метеороидов принималось значение критерия $D_{SH} \leq 0,3$. Принято считать, что метод, который только основан на функции D_{SH} , определяющей сходство орбит в настоящее время, чтобы связать группы метеоритообразующих метеороидов с их потенциальными родительскими телами – кометами или астероидами, недостаточно полный. Как и в случае метеороидных роев и их связи с родительскими телами, формирование метеоритных групп и время их существования в околоземном пространстве определяются эволюционными процессами. Связь групп с потенциальными родительскими телами – околоземными объектами (NEOs) – необходимо проверять на основе анализа эволюции их орбит в прошлом на интервале времени в несколько тысяч лет. Возможность идентифицировать вероятное родительское тело с группой и определить возраст образования группы динамически связанных метеороидов имеет большое значение для установления взаимосвязей между метеоритной группой и кометами или астероидами, а также для изучения механизмов образования метеоритных групп.

3. Эволюция метеоритных групп и связанных с ними NEOs

За последние годы в работах по исследованию эволюции орбит метеороидов и околоземных объектов сложился общепринятый подход при рассмотрении этого вопроса:

- метеороиды в рое или группе, как и предполагаемое родительское тело (NEOs) должны иметь близкие орбиты согласно D_{SH} -критерию Southworth и Hawkins. Это дает шанс идентифицировать возможное родительское тело с группой и определить возраст группы метеороидов. Определение возраста метеоритных групп имеет большое значение для установления динамической связи между метеоритными группами и их родительскими телами – астероидами и возможно усохшими кометами, а также для изучения механизмов образования исследуемых метеоритных групп;

- при большом количестве обнаруженных на сегодня околоземных астероидов вероятность совпадения двух орбит высока. Поэтому необходимо исследовать эволюцию орбит в прошлом и включать в качестве реальных пар астероидов и групп те, орбиты которых остаются близкими в течение длительного, около 5 тысяч лет, времени [4];

- в дополнение к динамическим свойствам общие таксономические свойства могут также указывать на общее происхождение групп метеороидов и их родительских тел – околоземных объектов в Солнечной системе.

Для анализа эволюции орбит исследуемых в данной работе метеоритных групп численное интегрирование уравнений движения выполнялось методом Эверхарта 11-го порядка. Метод Эверхарта является одним из высокоточных методов исследования эволюции орбит тел Солнечной системы и применяется для исследования движения короткопериодических околоземных объектов, испытывающих тесные сближения с Юпитером. Численное интегрирование орбитального движения членов групп проводилось на интервале 5 тысяч лет в прошлом с использованием программного обеспечения Halley [15]. Гравитационные возмущения основных планет, влияние радиационного давления и сопротивление Пойнтинга – Робертсона учитывались в уравнениях движения.

3.1. Эволюция орбит метеороидов группы, метеорита Venesov (тип L3.5, H5) и NEA 2000JF5

Наблюдались болиды и метеорит группы Venesov в период 1 Min ($L_{\odot} \approx 60^{\circ}$) повышения болидной активности. Численное интегрирование орбитальных элементов средней орбиты группы (Mean) и потенциального родительского астероида NEA 2000JF5 выполнялось на интервале 5 тысяч лет. D_{SH} -критерий близости средней орбиты группы и NEA 2000JF5 оставался ниже 0,25 в течение около 4,5 тысяч лет, что может указывать на время отделения метеороидов группы от родительского астероида в начале этого периода. Перигелии q , эксцентриситеты e и аргумент перигелия ω (рис. 4) эволюционируют аналогичным образом в течение всего этого периода времени.

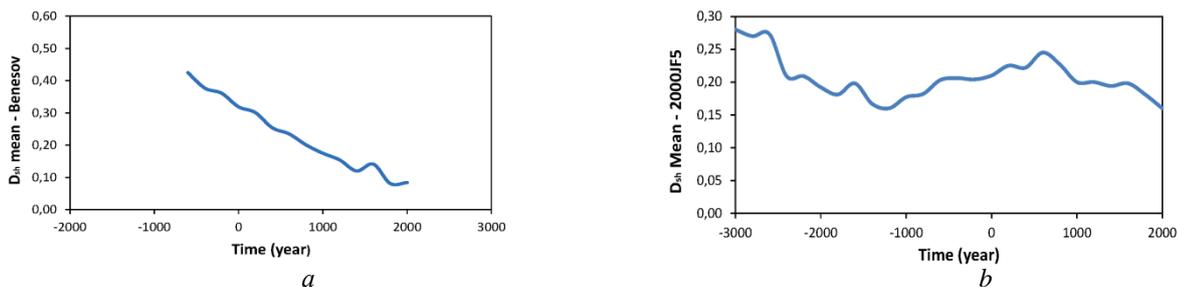


Рис. 3. Эволюция D_{SH} -критерия за 5 тысяч лет орбит: a – Mean и метеорита Venesov, b – Mean и NEA 2000JF5

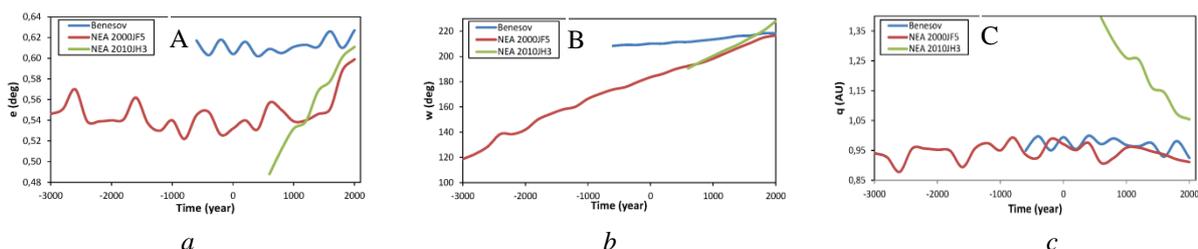


Рис. 4. Эволюция за 5 тысяч лет элементов орбит метеорита Venesov, NEA 2000JF5 и NEA 2010JH3: a – эксцентриситета e ; b – аргумента перигелия ω ; c – перигелия q

3.2. Эволюция орбит метеороидов группы, метеорита Neuschwanstein (тип EL6) и NEA 2010GE35

Наблюдались болиды и метеорит-группы в период 1 Maj ($L_{\odot} \approx 30^{\circ}$) повышения болидной активности. На рис. 5, 6 представлены результаты численного интегрирования орбитальных элементов средней орбиты группы (Mean) и астероида 2010 GE35 за 5 тысяч лет в прошлом. Перигелии q , эксцентриситеты e и аргумент перигелия ω эволюционируют аналогичным образом в течение всего периода времени. D_{SH} -критерий близости средней орбиты группы и NEA 2010GE35 остается ниже 0,2 в течение около 5 тысяч лет, что может указывать на отделение метеороидов группы от родительского астероида в начале этого периода.

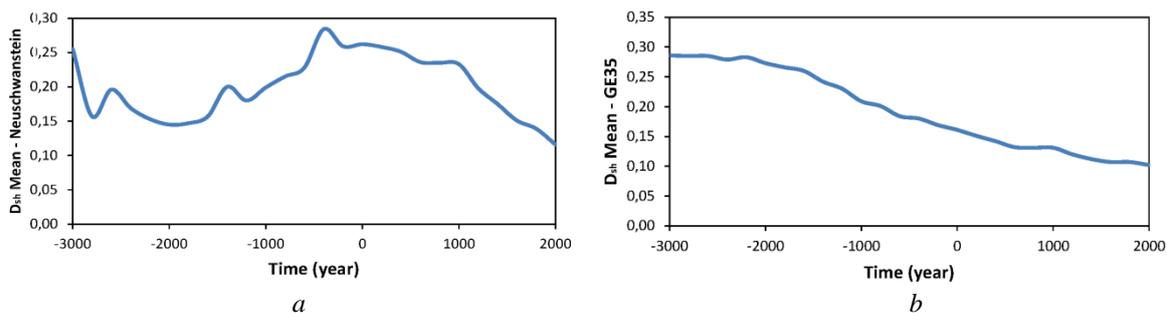


Рис. 5. Эволюция D_{SH} -критерия за 5 тысяч лет орбит: a – Mean и метеорита Neuschwanstein; b – Mean и NEA 2010GE35

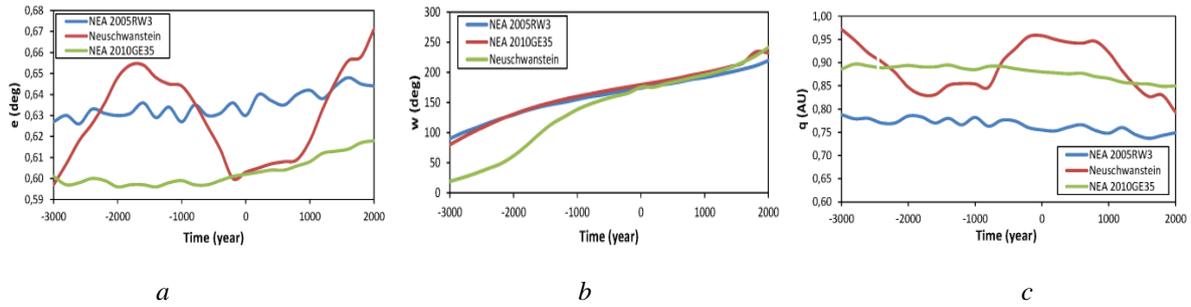


Рис. 6. Эволюция за 5 тысяч лет элементов орбит метеорита Neuschwanstein, NEA 2010GE35 и NEA 2005RW3: *a* – эксцентриситета *e*; *b* – аргумента перигелия ω ; *c* – перигелия *q*

3.3. Эволюция орбит метеороидов группы, метеорита Park Forest (тип L5) и NEA 2013EV108

Метеорит Park Forest наблюдался 27 марта 2003 г. Болиды Группы Park Forest и метеорит наблюдались в период 1 Мај ($L_{\odot} \approx 30^{\circ}$) повышения болидной активности. D_{SH} -критерий близости средней орбиты группы, метеорита Park Forest и NEA 2013EV108 (рис. 7) остается ниже 0,3 в течение около 3,5 тысяч лет, что может указывать на отделение метеороидов группы от родительского астероида в начале этого периода.

На рис. 8 представлены результаты численного интегрирования орбитальных элементов средней орбиты группы (Mean) и астероида NEA 2013EV108 за 5 тысяч лет. Перигелии *q*, эксцентриситеты *e* и аргументы перигелия ω эволюционируют аналогичным образом в течение этого периода времени.

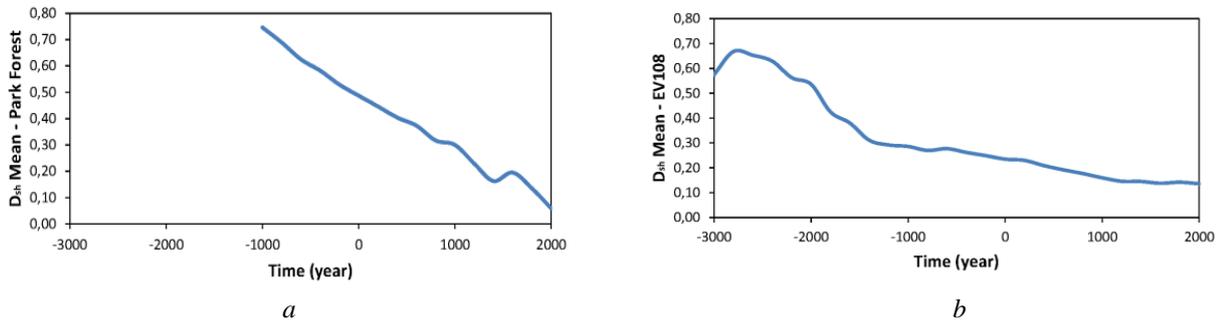


Рис. 7. Эволюция D_{SH} -критерия за 5 тысяч лет орбит: *a* – Mean и метеорита Park Forest; *b* – Mean и NEA 2013 EV108

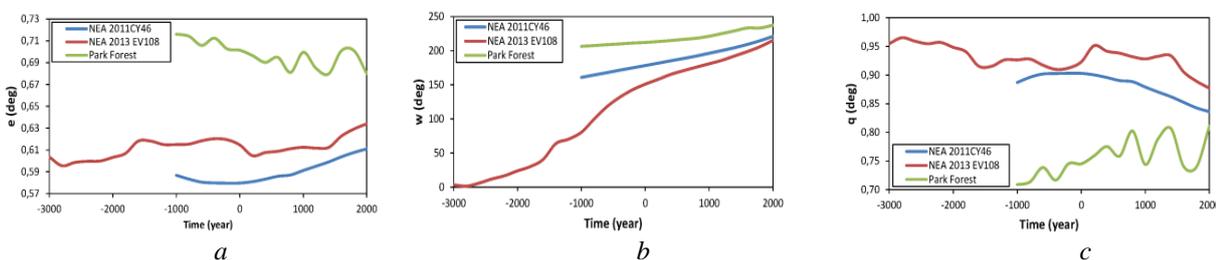


Рис. 8. Эволюция за 5 тысяч лет элементов орбит метеорита Park Forest, NEA 2013EV108 и NEA 2011CY46: *a* – эксцентриситета *e*; *b* – аргумента перигелия ω ; *c* – перигелия *q*

3.4. Эволюция орбит метеороидов группы, метеорита Kosice (тип H5) и NEA 2011KG13

Метеорит Kosice наблюдался 28 февраля 2010 г. Группа метеорита Kosice и метеорит наблюдались в период 6 Мај ($L_{\odot} \approx 300^{\circ}$) повышения болидной активности. На рис. 9, 10

представлены результаты численного интегрирования орбитальных элементов средней орбиты группы (Mean) и околоземного астероида 2011KG13 за 5 тысяч лет. Как следует из рис. 9, D_{SH} -критерий, определяющий близость средней (Mean) орбиты Группы и метеорита Kosice, оставался меньше 0,4 в течение около 2 тысяч лет, а средняя орбита группы и потенциально-го родителя околоземного астероида 2011KG13 были близкими ($D_{SH} < 0.35$) около 3,5 тысяч лет. В течение этого периода перигелии q , эксцентриситеты e и аргументы перигелия ω (рис. 10) эволюционируют аналогично, что может указывать на возраст группы метеорита Kosice.

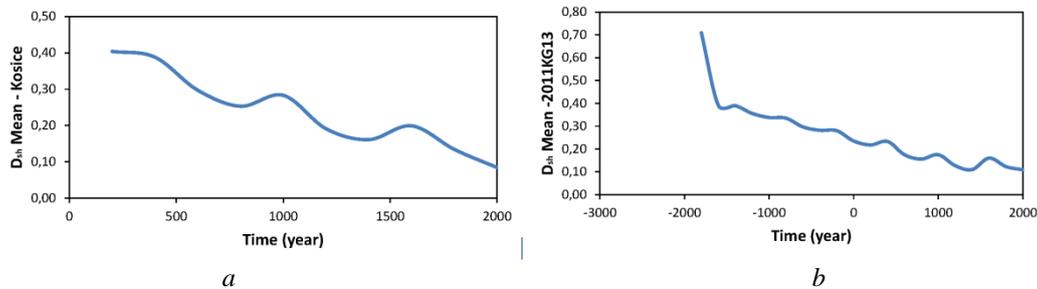


Рис. 9. Эволюция D_{SH} -критерия за 5 тысяч лет орбит:
 a – Mean и метеорита Kosice; b – Mean и NEA 2011KG13.

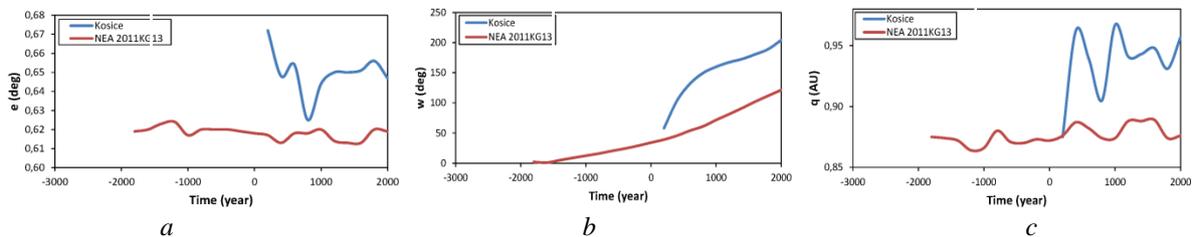


Рис. 10. Эволюция за 5 тысяч лет элементов орбит метеорита Kosice и NEA 2011KG13:
 a – эксцентриситета e ; b – аргумента перигелия ω ; c – перигелия q

3.5. Эволюция орбит метеороидов Группы метеорита Mason Gully (тип H5) и NEA 2009FS

Метеорит Mason Gully (13 апр. 2010 г.) и группа болидов наблюдались в период 1 Мај ($L_{\odot} \approx 30^{\circ}$) повышения болидной активности. На рис. 11, 12 представлены результаты численного интегрирования орбитальных элементов средней орбиты группы (Mean) и околоземного астероида 2009FS за 5 тысяч лет. Из рис. 11 видно, что D_{SH} -критерий, определяющий близость средней (Mean) орбиты Группы и метеорита Mason Gully, оставался меньше 0,35 в течение 5 тысяч лет, а средняя орбита группы и потенциального родителя околоземного астероида 2009FS были близкими ($D_{SH} < 0,35$) около 3,5 тысяч лет, что может указывать на время образования группы. В течение этого периода перигелии q , эксцентриситеты e и аргументы перигелия ω (рис. 12) эволюционируют аналогично.

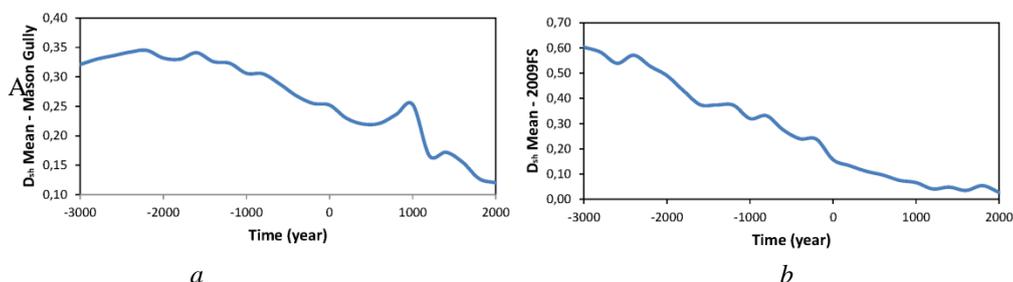


Рис. 11. Эволюция D_{SH} -критерия за 5 тысяч лет орбит:
 a – Mean и метеорита Mason Gully; b – Mean и NEA 2009FS

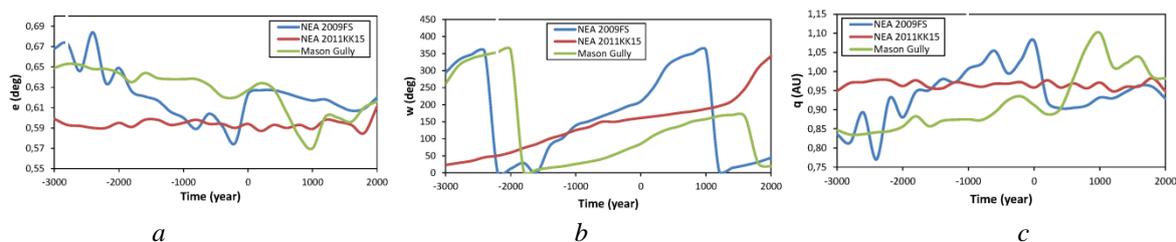


Рис. 12. Эволюция за 5 тысяч лет элементов орбит метеорита Mason Gully, NEA 2009FS и NEA 2011KK15: *a* – эксцентриситета *e*; *b* – аргумента перигелия ω ; *c* – перигелия *q*

На рис. 4, 6, 8, 12 эволюция элементов орбит метеоритов и их вероятных родительских астероидов (NEAs) показана для двух околоземных астероидов, из которых один (красная линия) выбран как родительский астероид, а второй (зеленая линия) показывает эволюцию орбиты, отличающуюся от средней орбиты группы и метеорита.

3.6. Эволюция орбит метеоритов Příbram (тип H5) и Neuschwanstein (тип EL6)

Метеорит Příbram наблюдался 27 марта 2003 г. Группа Příbram наблюдалась в 1Maj ($L_{\odot} \approx 30^{\circ}$) повышения болидной активности. На рис. 13 представлены результаты численного интегрирования орбитальных элементов метеоритов Příbram и Neuschwanstein за 5 тысяч лет. По результатам интегрирования вычислены критерии близости D_D и D_{SH} орбит метеоритов с шагом 200 лет. В настоящее время (эпоха 2000.0) оба критерия имеют исключительно малое значение ($D_D = 0.009$ и $D_{SH} = 0,025$), что свидетельствует о сильном подобии орбит этих метеоритов. И как видно из рис. 13, за 5 тысяч лет в прошлом D_D -критерий не превышал значения 0,043, а D_{SH} -критерий не превышал значения 0,060, из чего следует вывод, что орбиты метеоритов Příbram и Neuschwanstein на рассматриваемом интервале времени эволюционировали подобным образом, сохраняя близость своих орбит.

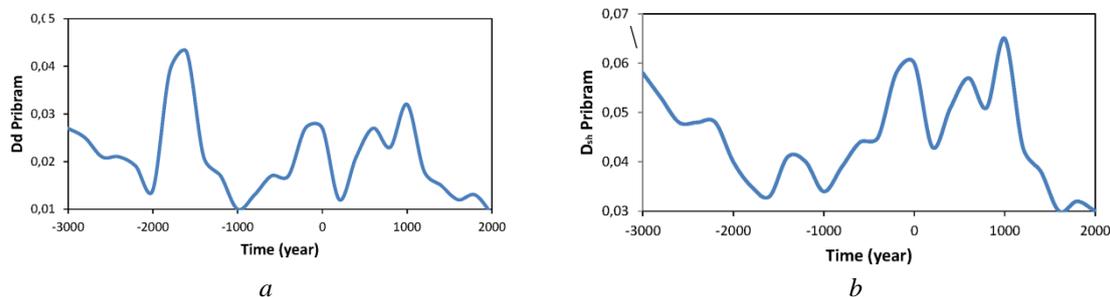


Рис. 13. Эволюция за 5 тысяч лет D_D -критерия (*a*) и D_{SH} -критерия (*b*) близости орбит метеоритов Příbram и Neuschwanstein

В работе [8] в качестве возможного родительского тела метеоритов Příbram и Neuschwanstein рассматривался околоземный астероид, который по структуре должен быть подобен астероиду Itokawa. В такой модели при разрушении астероида возможен выброс как крупных фрагментов (валуны, галька), так и более мелких (метеороиды), которые могли сформировать группу метеоритных метеороидов на околоземной орбите.

Выводы

Анализ эволюции методом численного интегрирования орбитальных элементов средней орбиты группы, метеорита и потенциального родительского околоземного астероида на интервале 5 тысяч лет в прошлом показал, что перигелии, эксцентриситеты и аргументы перигелия эволюционируют аналогичным образом в течение исследуемого периода времени. D_{SH} -критерий, который является количественной мерой подобия между орбитами, остается ниже 0,3 в течение примерно 5 тысяч лет в группах метеоритов Neuschwanstein и Mason

Gully и примерно 3,5 – 4,5 тысячи лет в группах метеоритов Benesov и Park Forest. В группах метеоритов Kosice и Příbram средняя орбита групп и орбиты их потенциальных родительских тел остаются близкими согласно D_{SH} -критерию сравнительно на небольшом промежутке времени около 2 – 3 тысяч лет.

Полученные результаты позволяют сделать выводы о связи спорадических болидов и спорадических метеоров с обыкновенными хондритами типа H5, L3.5 и их потенциальными родительскими телами – околоземными астероидами в группах метеоритов Neuschwanstein и Mason Gully, а также в группах метеоритов Benesov и Park Forest. Интервалы времени, в течение которых эволюционирующие орбиты членов групп демонстрируют хорошее сходство, указывают на относительно недавнее образование рассмотренных метеоритных групп в результате фрагментации их родительских тел. Данные о средней орбите метеоритной группы позволяют связать группу с ее вероятным источником – астероидом или кометой. Полученные результаты о существовании групп метеороидов на кометоподобных землепересекающих типа JFCs орбитах показывают, что относительно крупные и прочные метеороиды из групп могут выжить в земной атмосфере и выпасть на поверхность в виде метеоритов, являющихся образцами кометного материала, который можно изучать в лабораториях.

В исследованных группах все еще могут содержаться потенциально опасные для биосферы Земли объекты, которые могут падать метеоритами на Землю в наше время. Это может служить мотивацией для целенаправленного мониторинга болидов и метеоров из этих групп в областях их радиантов в установленные периоды активности групп.

Список литературы:

1. Whipple F.L. A Comet Model // *Astrophys. J.* 1951. Vol. 113. P. 579–587.
2. Jones J., Hawkes R. The structure of the Geminid meteor stream-II. The combined action of the cometary ejection process and gravitational perturbations // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* 1986. Vol. 223. P. 479–486.
3. Mommert M., Harris A. W., Mueller M. et al. Dormant Short-period Comets in the Near-Earth Asteroid Population // *Astron. Journal.* 2015. Vol.150, Is.4. P. 106–115.
4. Porubcan V., Kornos L., Williams I. P. Associations between asteroids and meteoroid streams // *Earth, Moon, Planets.* 2004. Vol. 95. P. 697–711.
5. Trigo-Rodríguez M.J., Lyytinen E., Jones D.C. et al. Asteroid 2002NY40 as a source of meteorite-dropping bolides // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 2007. Vol. 382, Is.13. P. 1933–1939.
6. Toth J., Veres P., Kornos L. Tidal disruption of NEAs – a case of Příbram meteorite // *Mon Not. R. Astron. Soc.* 2011. Vol. 312. P. 1527–1533.
7. Halliday I, Blackwell A.T., Griffin A.A. Evidence for the existence of groups of meteorite-producing asteroidal fragments // *Meteoritics.* 1990. Vol. 25. P. 93–99.
8. Greenberg R., Chapman C. R. Asteroids and meteorites: Origin of stony-iron meteorites at mantle-core boundaries // *Icarus.* 1984. Vol. 57, Is. 2. P. 267–279.
9. Shestaka I. S. A complex of meteorite-forming bodies (the Innisfree – Ridgedale family) // *Astronom. Vestnik.* 1994. T. 28, No. 6. P. 94–100.
10. Beech M. Canadian fireball activity from 1962 to 1989 // *WGN, the Journal of WGN IMO.* 2006. Vol. 34. P. 104–110.
11. IAU MDC database [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.astro.sk/~ne/IAUMDC/Ph2007/database.html>
12. SonotaCo database [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://sonotaco.jp/doc/SNM/index.html>
13. Ибадинов Х.И., Коновалова Н.А., Давруков Н.Х. О существовании групп метеоритообразующих болидов и метеоритов на орбитах типа JFCs // *Вестник ТНУ.* 2018. № 4. С. 84–98.
14. Southworth R.B., Hawkins G.S. Statistics of meteor streams // *Smith. Contrib. Astrophys.* 1963. Vol. 7. P. 261–285.
15. Bondarenko Yu. // *Halley software.* 2010.

Астрономическая обсерватория
Одесского национального университета, Украина;
Институт астрофизики
АН Республики Таджикистан

Поступила в редколлегию 02.04.2020