

О следствиях существования планеты 9, полученных в результате моделирования

© Ю. А. Чернетенко

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

В работе Batygin K. E., Brown M. E. «Evidence for a distant giant planet in the solar system» авторы показывают, что необычное распределение орбит ряда открытых небесных тел в области рассеянного диска можно объяснить гравитационным влиянием гипотетической планеты 9. Масса планеты оценивается в 5–20 масс Земли, орбита имеет следующие элементы относительно плоскости эклиптики: $\Omega = 113^\circ$, $i = 30^\circ$, $\omega = 150^\circ$, $e = 0.6$, $a = 700$ а. е.

В работе E. Michaely and A. Loeb «Shaping of the inner Oort cloud by Planet Nine» рассмотрено динамическое взаимодействие такой планеты и 32000 частиц нулевой массы на расстояниях 700–7000 а. е. от Солнца. Масса планеты принята равной 10 массам Земли. Моделирование выполнено методом численного интегрирования на интервале в 4 млрд лет. Получено, что некоторые частицы оказываются динамически нестабильными, достигают значений эксцентриситетов $e > 0.98$ и образуют долгопериодические кометы со значениями больших полуосей $a = 1100$ – 1500 а. е. (до 3000 а. е.) и околосолнечные кометы. Приводятся прогнозируемые распределения значений угловых элементов для этих групп комет. Сравнение их с соответствующими распределениями элементов орбит наблюдавшихся комет не приводится.

В настоящей работе получены распределения значений угловых элементов для наблюдавшихся долгопериодических комет с $a = 1000$ – 2000 а. е. (81 комета) и околосолнечных спорадических комет ($q < 0.1$ а. е., $e = 1.0$) (73 кометы). Из-за относительно небольшого количества этих комет только распределения наклонов орбит можно считать надежными, и они довольно близки для двух рассмотренных групп комет. Однако эти распределения значительно отличаются от распределений, прогнозируемых в работе авторов E. Michaely and A. Loeb. Возможные причины этих расхождений рассматриваются.

Ключевые слова: планета 9, долгопериодические кометы, околосолнечные кометы, элементы орбит, облако Оорта.

Контакты для связи: Чернетенко Юлия Андреевна (cya@iaaras.ru).

Статья поступила в редакцию 29.06.2020, принята к публикации 23.07.2020, опубликована 01.10.2020.

Для цитирования: Чернетенко Ю. А. О следствиях существования планеты 9, полученных в результате моделирования // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 53. С. 60–66.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.60-66>

On the consequences of the existence of planet 9 obtained as a result of simulation

Yu. A. Chernetenko

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

In Batygin K. E., Brown M. E. “Evidence for a distant giant planet in the solar system”, the authors show that unusual distribution of the orbits of a number of open celestial bodies in the region of the scattered disk can be explained by the gravitational influence of a hypothetical planet 9 with a mass of 5–20 Earth masses moving in elliptical orbit with the following elements relative to the ecliptic plane: $\Omega = 113^\circ$, $i = 30^\circ$, $\omega = 150^\circ$, $e = 0.6$, $a = 700$ AU.

In E. Michaely and A. Loeb “Shaping of the inner Oort cloud by Planet Nine”, the authors consider the dynamic interaction of such a planet with the mass of 10 Earth masses and 32,000 zero-mass particles in orbits around the Sun at distances of 700–7000 AU. The simulation was performed by numerical integration over an interval of 4 Gyr. It is found that some particles are dynamically unstable, reach the eccentricities values of $e > 0.98$, and form long-period comets with values of semi-major axes $a = 1100$ – 1500 AU (up to 3000 AU) and near-Sun comets. The predicted distributions of angular elements for these groups of comets are given.

In this paper, distributions of angular elements are obtained for long-period comets with $a = 1000$ – 2000 AU (81 comets) and near-Sun sporadic comets ($q < 0.1$ AU, $e = 1.0$) (73 comets). Due to the relatively small number of comets observed, only the distributions of inclinations can be considered to be reliable, and they are rather close to two considered groups of comets. However, these distributions differ significantly from the corresponding distributions predicted in E. Michaely and A. Loeb “Shaping of the inner Oort cloud by Planet Nine”. The possible reasons for these discrepancies are discussed.

Keywords: planet 9, long-period comets, near-Sun comets, orbital elements, Oort cloud.

Contacts: Yuliya Chernetenko (cya@iaaras.ru).

Received June 29, 2020, accepted July 23, 2020, published October 1, 2020.

For citation: Chernetenko Yu. A. On the consequences of the existence of planet 9 obtained as a result of simulation // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 53. P. 60–66.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.53.60-66>

Введение

В настоящее время продолжают исследования, связанные с поиском массивной планеты (или планет) в поясе Койпера и (или) в облаке Оорта. Это, прежде всего, работа [1], в которой авторы показывают, что необычное распределение орбит ряда открытых небесных тел в области рассеянного диска (концентрация значений аргументов перигелиев) может быть случайным с малой вероятностью 0.007 %. Но его можно объяснить влиянием гипотетической планеты 9 (П9), орбита которой имеет следующие элементы относительно плоскости эклиптики: $\Omega = 113^\circ$, $i = 30^\circ$, $\omega = 150^\circ$, $e = 0.6$, $a = 700$ а. е., $Q = 1120$ а. е., а масса равна 5–20 массам Земли.

Работа [1], приводящая аргументы в пользу существования массивного тела во внутреннем регионе облака Оорта, привела к целому ряду исследований, основанных на полученных в этой работе элементах орбиты (П9). При использовании этих элементов, авторами [2] и [3] предприняты попытки определить положение этой планеты на орбите (т. е., определить шестой элемент орбиты) по наблюдениям КА Cassini и близпараболических комет соответственно. Это важно для понимания того, может ли такая планета наблюдаться современными наблюдательными средствами, и в какой области небесной сферы.

Однако, несмотря на уверенные выводы в работе [1], уже в работе [4] некоторые из оцененных в [1] параметров были даны в более широких диапазонах. Так, масса оценивается в 5–10 масс Земли, наклон плоскости орбиты — в $15\text{--}25^\circ$, большая полуось — в 400–800 а. е., эксцентриситет — в $\sim 0.2\text{--}0.5$, а значения Ω и ω не приводятся. Эти результаты показывают, что элементы орбиты П9, полученные в [1], могут иметь значительные ошибки.

Моделирование динамического взаимодействия планеты 9 и гипотетических малых тел во внутренней области облака Оорта

Безусловно, только наблюдения этой планеты могут подтвердить ее существование. Подробную информацию о П9 и ее поисках можно найти на сайте [5] и на сайте М. Брауна и К. Батыгина [6]. Согласно мнению проф. Ф. Адамса (университет Мичигана [4]), в течение следующих 10–15 лет П9 либо будет наблюдаться, либо будет получено дос-

точно данных для того, чтобы ее существование не подтвердилось [7–8].

Пока таких результатов нет, продолжают исследования другими способами, в том числе и моделированием влияния планеты с полученными параметрами на движение малых тел. Представляют интерес результаты, полученные в работе [9].

В [9] рассматривается динамическое взаимодействие П9 (элементы орбиты Батыгина и Брауна [1]), масса которой принята равной 10 массам Земли, и малых тел (планетеземалий) на орбитах вокруг Солнца. Рассмотрено 32000 частиц нулевой массы. Регион, занятый диском планетеземалий, составляет 700–7000 а. е. Выполняется учет вековых возмущений от четырех больших планет (Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна). Рассматриваются две группы тестовых частиц — первоначальный плоский круговой диск вокруг Солнца (*сценарий а*) и наклонный вытянутый диск (*сценарий б*). Моделирование выполнено методом численного интегрирования на интервале в 4 млрд лет. При моделировании в уравнения движения не включен учет влияния галактического прилива. Авторы ссылаются на работу [10] и на ее основании полагают, что такое влияние значимо для орбит с большими полуосями $a > 10\,000$ а. е. Этот вывод представляется спорным, т. к. влияние галактического прилива обнаруживается в распределении некоторых параметров орбит комет и с меньшими значениями больших полуосей.

Рассмотрим распределение значений галактических широт перигелиев (или афелиев) кометных орбит. В распределении широт афелиев вследствие влияния галактического прилива долженждаться недостаток линий апсид около галактических полюсов и галактического экватора и избыток вблизи широт $b = \pm 45^\circ$ [11], что и видно на рис. 1 для эллиптических комет с 50 а. е. $< Q < 10000$ а. е. Всего в рассмотрение включены орбиты 491 кометы из каталога элементов орбит эллиптических комет Международного планетного центра (MPC) по состоянию на 01.06.2020 [12]. Из рассмотрения исключены кометы Крейца и фрагменты разделившихся комет, кроме первого.

Показано [9], что в обоих сценариях П9 определяет динамику частиц на расстоянии 1000–5000 а. е. в результате резонансов средних движений и вековых взаимодействий. Как

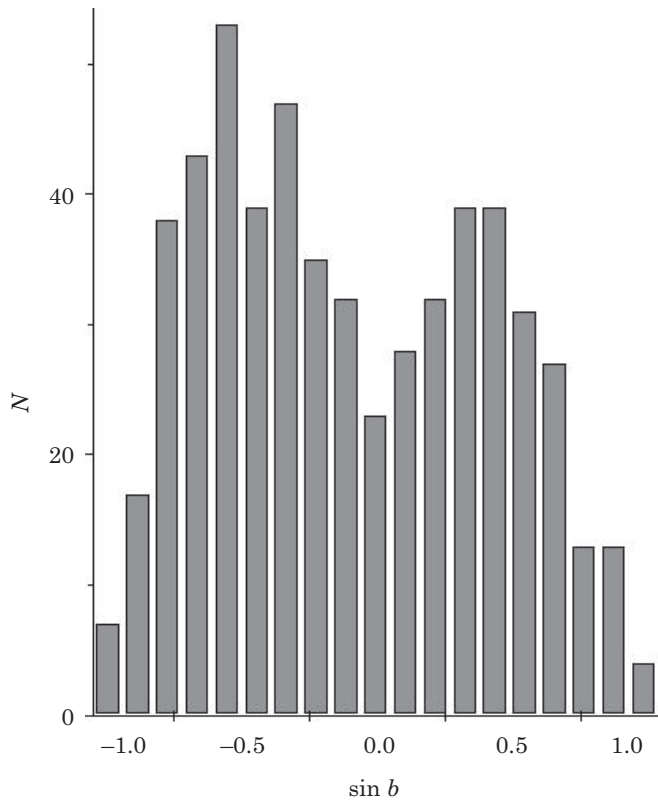


Рис. 1. Распределение эллиптических комет с 50 а. е. $< Q < 10000$ а. е. по галактической широте b , афелия (показаны значения $\sin b$)

следствие динамического взаимодействия тестовых частиц с П9, в обоих сценариях образуются неоднородная сферическая структура на расстоянии 1000–1500 а. е. и наклонный диск (1500–3000 а. е.). Кроме этого, некоторые частицы, первоначально принадлежащие сферическим структурам, оказываются динамически нестабильными и достигают значений эксцентриситетов $e > 0.98$. В этом случае они исключаются из дальнейшего моделирования и могут считаться кометами. Число таких частиц оценивается в $\sim 2\%$, т. е. ~ 640 . Учитывая специфическую ориентацию сферических структур, авторы считают, что для этих комет 1100 а. е. $< a < 1500$ а. е. (до 3000 а. е. для сценария б). По мнению авторов, в результате реализации сценария а) образуются долгопериодические кометы, сценария б) — околосолнечные спорадические кометы. Распределения значений элементов ориентации этих групп комет, приводимые в работе [9], воспроизводятся в настоящей работе на рис. 2 и рис. 4. В заключении авторы пишут: «*This is a prediction of our model that can be tested observationally. The Large Synoptic Survey Telescope (LSST) will survey 20,000 square degrees of the sky about 2,000 times over 10 years (LSST Science Collaboration et al. 2009). This survey is expected to discover 10,000 new comets and potentially*

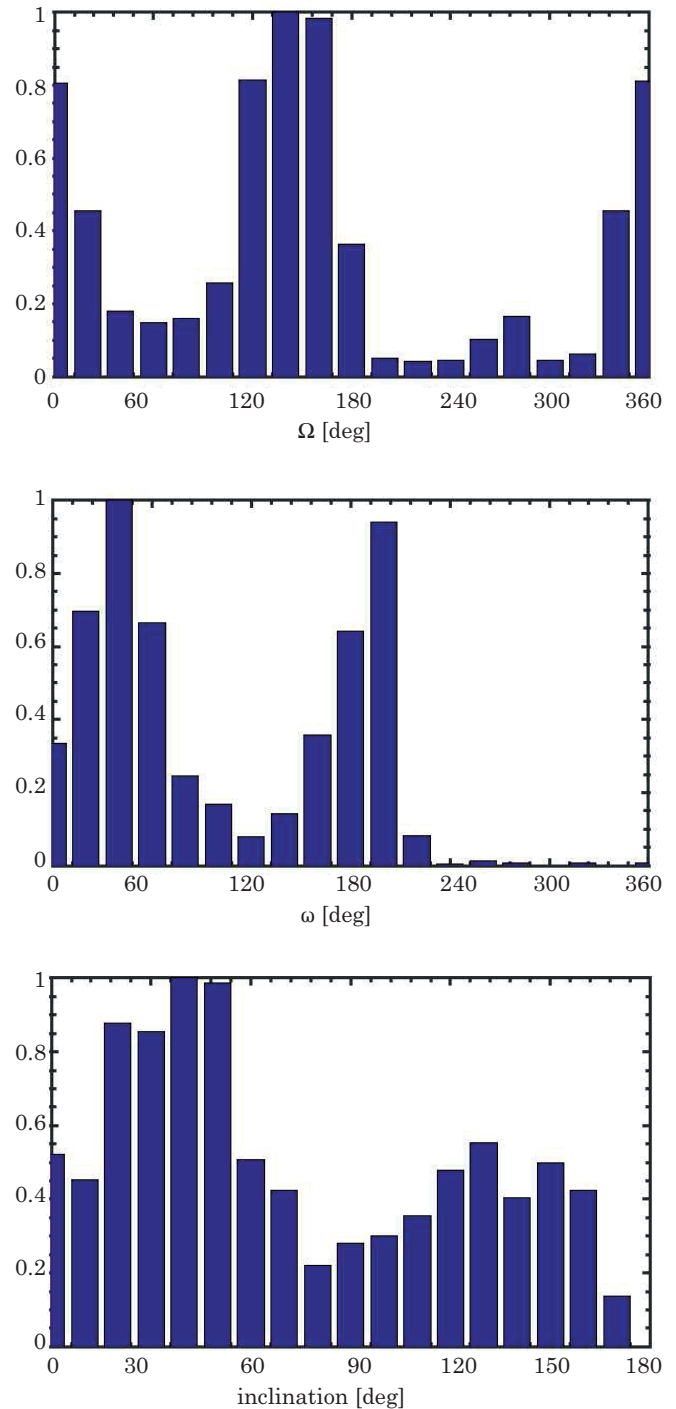
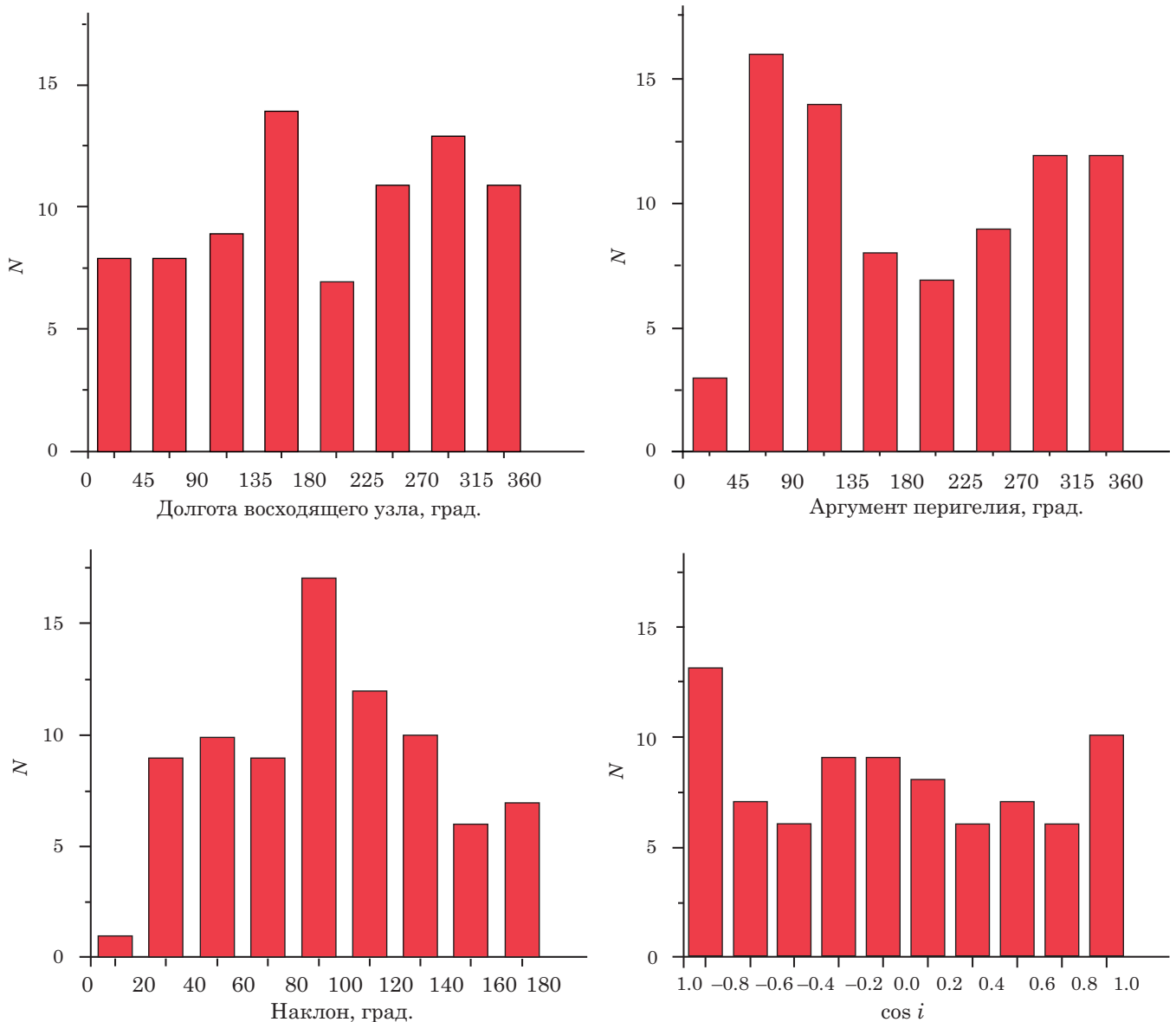


Рис. 2. Воспроизводит рис. 12 из работы [9]. Распределения орбитальных параметров частиц, удаленных из дальнейшего моделирования (сценарий а), т. к. $e > 0.98$. Аргумент перигелия имеет два четких максимума вблизи $\sim 40^\circ$ и $\sim 200^\circ$. Распределение наклонов растянуто с двумя широкими максимумами вблизи $\sim 20^\circ$ – 50° и $\sim 120^\circ$ – 150° . Долгота восходящего узла имеет два четких широких максимума вблизи $\sim 0^\circ$ и $\sim 140^\circ$. Все распределения нормированы к соответствующему максимальному значению

Рис. 3. Долгопериодические кометы, 1000 а. е. < a < 2000 а. е.

shed light on the size distribution of long period comets, which is currently unknown. The Starshot Breakthrough Initiatives could also explore the solar system»¹ [13].

¹ Это прогноз нашей модели, который может быть проверен с использованием наблюдений. Большой синоптический обзорный телескоп (LSST) будет обследовать 20 000 квадратных градусов неба примерно 2000 раз за 10 лет (LSST Science Collaboration et al. 2009). Ожидается, что в ходе этого обследования будет обнаружено 10 000 новых комет и, возможно, эти открытия прольют свет на распределения параметров долгопериодических комет, которые в настоящее время неизвестны. При реализации проекта “the Starshot Breakthrough Initiatives” может быть исследована также Солнечная система (<http://breakthroughinitiatives.org/Concept/3/>).

Необходимо отметить, что полученные авторами распределения интересны особенно относительно значений наклонов орбит комет. Для первой группы комет максимумы близки к $\sim 20\text{--}50^\circ$ и $\sim 120\text{--}150^\circ$, т. е. образуются кометы с прямым и обратным движением, значения наклонов орбит которых близки к значению наклона П9 (30°), что фактически говорит о формировании семейства комет П9. Для второй группы комет максимум значений наклонов находится в интервале $\sim 10\text{--}50^\circ$, и практически отсутствует максимум для соответствующих обратных движений.

В работе [9] не рассматривается движение комет в планетной области Солнечной системы, хотя тесные сближения комет с планетами могут оказаться более значимым фактором для эволюции их орбит, чем влияние П9. Авторы статьи понимают это и пишут об этом так: «*The gravitational*

interaction of the comet candidates with the solar systems planets was not explored here. An extensive study on this interaction and its observational signatures will be studied elsewhere.²

Не вполне понятно, почему в [9] не выполнено сравнение модельных распределений угловых элементов с соответствующими распределениями для реальных комет. Хотя количество наблюдавшихся долгопериодических и околосолнечных комет пока невелико, можно и в настоящее время выполнить такое сравнение. Эта задача и является целью предлагаемой работы.

Элементы орбит наблюдавшихся комет

С учетом выводов работы [9], рассматривались кометы, большие полуоси которых удовлетворяют условию $1000 \text{ а. е.} < a < 2000 \text{ а. е.}$ Элементы орбит комет взяты из каталога элементов орбит эллиптических комет Международного планетного центра по состоянию на 01.06.2020. Таких комет оказалось 81. Распределения значений углов ориентации этих комет показаны на рис. 3 (необходимо отметить, что наряду с распределением значений наклонов в литературе рассматривают также распределения косинусов наклонов, поэтому в настоящей работе приводятся и распределения косинусов наклонов орбит реальных комет).

Рис. 3 показывает, что распределение долготы восходящего узла скорее случайно, что, возможно, связано с недостаточным количеством рассмотренных орбит. Для аргумента перигелия можно выделить максимумы вблизи 90° и 330° . Распределение наклонов практически симметрично относительно 90° , имеет четко выраженный максимум вблизи 90° и минимум вблизи 0° , что указывает на их близкое к равномерному распределению на небесной сфере. Можно указать на некоторый максимум для значений наклонов $\sim 80\text{--}105^\circ$. В связи с этим интересно отметить, что угол между плоскостями Галактики и эклиптики составляет $\sim 63^\circ$, что близко к этому максимуму.

Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что распределение значений наклонов орбит наблюдавшихся комет не согласуется с выводом работы [9] относительно распределения наклонов гипотетических долгопериодических комет.

Рассмотрим околосолнечные кометы. Околосолнечные кометы включают несколько групп комет, образовавшихся предположительно в результате разрушения нескольких родительских тел. Это кометы групп Крейца, Марсдена, Майера и Крахта. В работе [14] выделено 142 околосолнечные кометы, не принадлежащие ни одной группе.

² Гравитационное взаимодействие частиц-кандидатов в кометы с планетами солнечной системы в работе не исследовалось. Это взаимодействие и его наблюдательные проявления будут подробно исследованы в другой работе.

Список этих комет, которые авторы называют «non-group comets» (кометы, не входящие в группы), не приводится в [14].

По данным, приведенным на сайте [15] (по наблюдениям с 1996 г. по 2016 г. число околосолнечных комет составляет 2039), кометы перечисленных групп составляют 95 % всех комет, наблюдавшихся обсерваториями SOHO и STEREO.

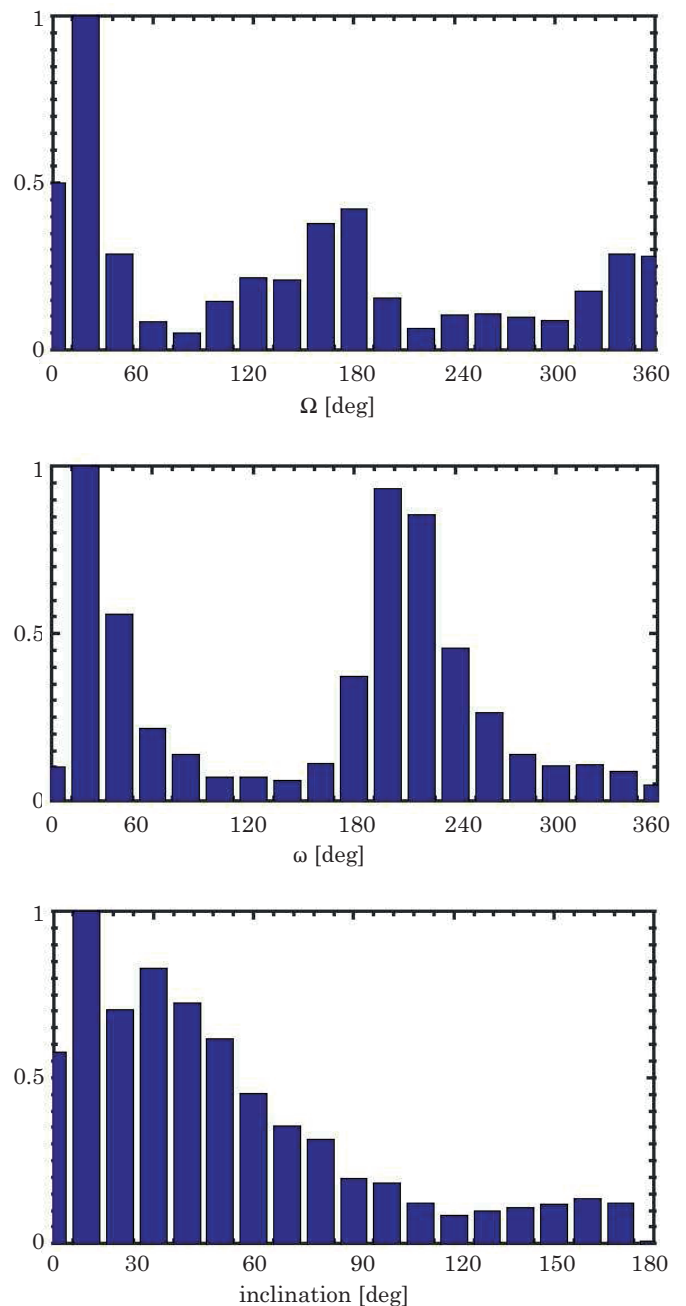


Рис. 4. Воспроизводит рис. A4 из работы [9]. Распределения орбитальных параметров частиц, удаленных из дальнейшего моделирования (сценарий б), т. е. комет-кандидатов в околосолнечные кометы. Аргумент перигелия имеет два четких максимума вблизи $\sim 30^\circ$ и $\sim 200^\circ$. Распределение наклонов растянуто. Долгота восходящего узла имеет два четких широких максимума вблизи $\sim 20^\circ$ и $\sim 180^\circ$. Все распределения нормированы к соответствующему максимальному значению

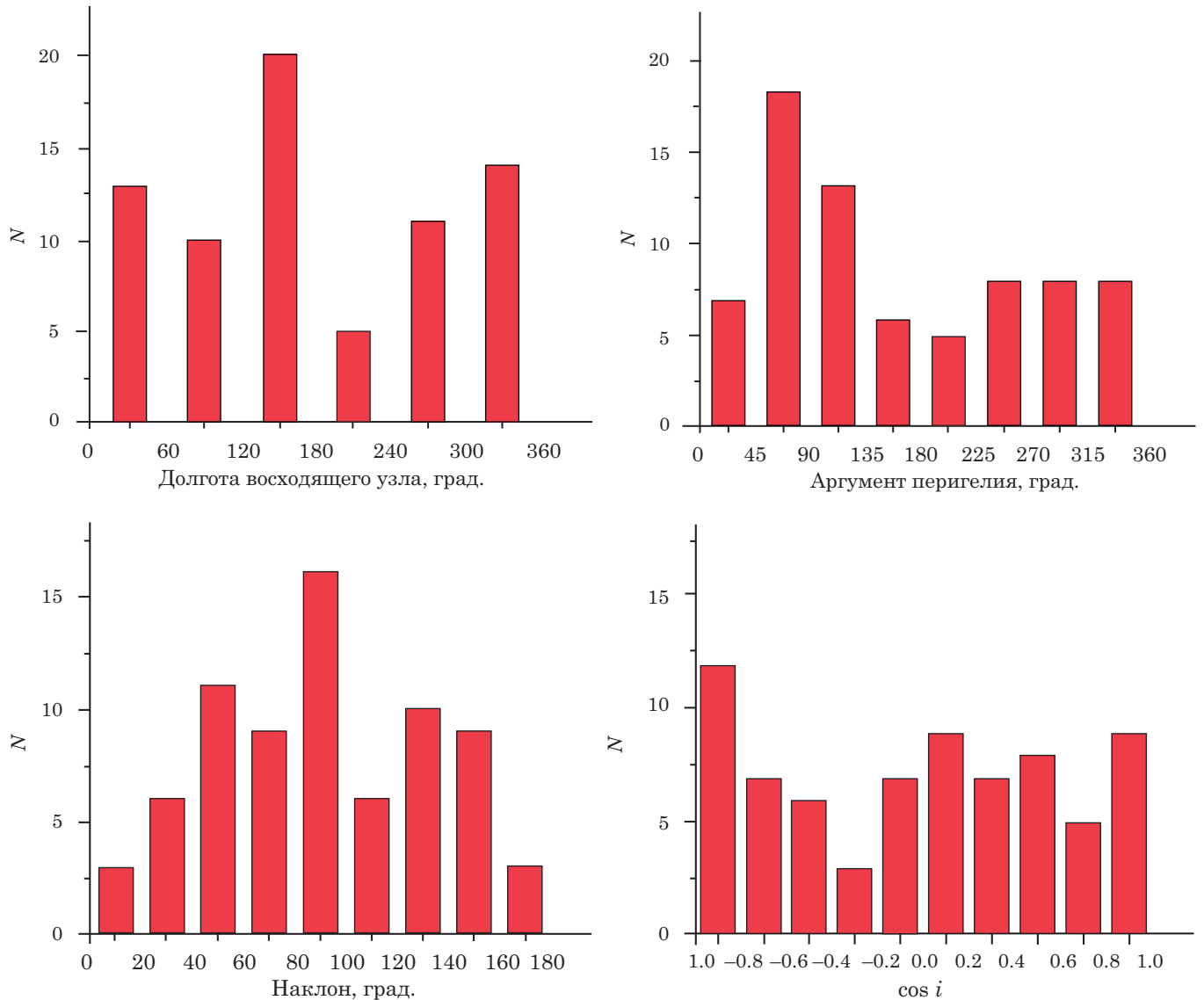


Рис. 5. Околосолнечные спорадические кометы: $q < 0.1$ а. е., $e = 1.0$

И всего 102 кометы отнесены к «другим кометам». Список их приводится на этом же сайте. Из него для целей настоящей работы исключены периодические кометы и кометы с перигелийными расстояниями, большими 0.1 а. е. Для оставшихся комет значения $e = 1.0$, и их можно отнести к спорадическим кометам. Таких комет оказалось 73, их обозначения приводятся:

C/1997: B4, S4, V7, V9
 C/1998: G3
 C/1999: O4, Y2
 C/2000: J2, Q1, V4, Y6, Y7, Y8, Y9
 C/2001: C5, N1, P1, Q3, T5
 C/2002: G1, G3, Q6, Q9
 C/2003: G3, H6, H7, R4, S9
 C/2004: U2, Y4, Y10
 C/2005: C4, D1, H7, M3, Q3, Q6, V8, Y1
 C/2006: K5, T6, Y12
 C/2007: A7, C7, C12, M5, M8, S11, X1

C/2008: C3, C9, E7, N10, O4, O6, O7, R8, T7, V5, Y14

C/2009: G8, M8, N1, N3, U10, W8

C/2010: C6, C7, C8, D5, O4, S9

C/2015: D1

Элементы орбит этих комет также были взяты из каталога MPC. Для этого набора комет получены распределения значений элементов ориентации, которые приводятся на рис. 5.

Так же как и для долгопериодических комет (рис. 2 и 3), распределение долготы восходящего узла и аргумента перигелия на рис. 5 значительно отличаются от соответствующих распределений на рис. 4, что, возможно, связано с недостаточным количеством рассмотренных нами орбит реальных комет. Распределение значений наклонов имеет максимум вблизи 90° , в отличие от выводов работы [9], где максимум значений наклонов приходится на интервал $\sim 10^\circ-50^\circ$.

Выводы

В работе [9] методом моделирования гравитационного взаимодействия гипотетической планеты 9 [1] с ансамблем планетеземалий на орбитах с большими полуосями $a = 700\text{--}7000$ а. е. в течение 4 млрд лет показано, в частности, что возможно образование семейства долгопериодических комет этой планеты. Получены прогнозируемые распределения значений угловых элементов для двух групп комет — долгопериодических и околосолнечных, однако сравнение их с соответствующими распределениями для наблюдавшихся комет не проводится. Наша работа восполняет этот пробел.

Для наблюдавшихся долгопериодических (81) и околосолнечных спорадических (73) комет только распределения значений наклонов представляются относительно надежными. Они имеют максимумы вблизи 90° , что отличает их от распределений значений наклонов орбит соответствующих групп комет, полученных в работе [9].

Можно указать следующие возможные причины этих расхождений:

1. Планета 9, если она существует, имеет отличные от принятых в [9] значения орбитальных параметров и массу.

2. При моделировании в уравнения движения не включен учет влияния галактического прилива, что является недостаточно обоснованным.

3. Авторы [9] (и они сами пишут об этом) не рассматривают вопрос о движении комет во внутренней области солнечной системы и, следовательно, о влиянии тесных сближений комет с большими планетами на распределение значений элементов их орбит.

4. Количество наблюдавшихся комет недостаточно для статистически уверенных выводов — 81 долгопериодическая комета и 73 околосолнечных спорадических комет.

Автор благодарит рецензентов, Э. И. Ягудину и В. Б. Кузнецова, за внимательное прочтение рукописи и высказанные замечания.

Литература

1. *Batygin K. E., Brown M. E.* Evidence for a distant giant planet in the solar system // *Astron. J.* 2016. Vol. 151:22. 12 p.
2. *Fienga A., Laskar J., Manhe H., Gastineau M.* Constraints on the location of a possible 9th planet derived from the Cassini data // *Astron. and Astrophys.* 2016. Vol. 587. doi: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628227>.
3. *Медведев Ю. Д., Бондаренко Ю. С., Вавилов Д. Е. и др.* Уточнение положения планеты X по движению близпараболических комет // *Письма в астроном. журн.* 2017. Т. 43. С. 143–148.
4. *Batygin K., Adams F. C., Brown M. E., Beker J. C.* The Planet Nine Hypothesis // *Phys. Rep.* 2019. Vol. 805. P. 1–53.
5. Planet Nine. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Planet_Nine (accessed 04.05.2020).
6. Blog by Brown and Batygin “The Search for Planet Nine”. URL: <http://www.findplanetnine.com/> (accessed 10.05.2020).
7. *Carter J.* Are we getting closer to finding 'Planet Nine'? // *Future tech. TechRadar.* URL: <https://www.techradar.com/news/are-we-getting-closer-to-finding-planet-nine>.
8. *Paul S. A.* Planet 9 hypothesis gets a boost // *Earth Sky.* URL: <https://earthsky.org/space/review-paper-physics-reports-planet-9-feb-2019> (accessed 10.04.2020).
9. *Michaely E. and Loeb A.* Shaping of the inner Oort cloud by Planet Nine. 2017. Arxiv: 1609.08614v2. URL: https://www.researchgate.net/publication/308718307_Shaping_of_the_inner_Oort_cloud_by_Planet_Nine.
10. *Veras D., Evans N. W.* Exoplanets beyond the Solar neighbourhood: Galactic tidal perturbations // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2013. Vol. 430, no. 1. P. 403–415.
11. *Wiegert P. and Tremaine S.* The Evolution of long-period comets // *Icarus.* 1999. Vol. 137(1). P. 84.
12. The Minor Planet Center. URL: <https://www.minorplanetcenter.net> (accessed 04.05.2020).
13. Breakthrough Starshot. URL: <http://breakthroughinitiatives.org/Concept/3/> (accessed 11.03.2020).
14. *Battams K., Knight M. M.* SOHO comets: 20 years and 3000 objects later // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 2017. Vol. 375. P. 2097.
15. British Astronomical Association. Comet Section. URL: <https://people.ast.cam.ac.uk/~jds/> (accessed 11.03.2020).