

УДК 521.1, 523.64

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ КОМЕТ ВО ВНУТРЕННЕЙ ОБЛАСТИ ОБЛАКА ООРТА

© 2020 О. В. Калиничева<sup>1\*</sup>, Ю. А. Чернетенко<sup>2\*\*</sup><sup>1</sup>Вологодский государственный университет, Вологда, 160000 Россия<sup>2</sup>Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 14 апреля 2020 года; после доработки 31 августа 2020 года; принята к публикации 31 августа 2020 года

Рассмотрены статистические закономерности в распределении орбит долгопериодических комет, принадлежащих внутренней области облака Оорта (афелийные расстояния,  $Q$ , находятся в интервале 50–2000 а.е.). Показано, что распределение афелиев неслучайно, и одной из причин появления подобных закономерностей может быть наличие в этой области пространства массивных гипотетических тел. Варьированием параметров орбит таких тел были получены две орбиты, в 20-градусной окрестности каждой из которых находятся афелии 40 комет. Это количество является статистически значимым. В эклиптической системе координат орбиты имеют параметры:  $P_1$ :  $\Omega_P = 297^\circ$ ,  $i_P = 24^\circ$ ,  $\omega_P = 322^\circ$ ,  $e_P = 0.6$ ,  $a_P = 510$  а.е.;  $P_2$ :  $\Omega_P = 92^\circ$ ,  $i_P = 80^\circ$ ,  $\omega_P = 327^\circ$ ,  $e_P = 0.3$ ,  $a_P = 1000$  а.е. Для принятого значения масс этих тел (20 масс Земли) определены минимальные расстояния между их орбитами и орбитами комет и оценено количество афелиев, находящихся в сферах действия этих тел. Получено, что наибольшее количество афелиев находится вблизи орбиты  $P_1$ . Однако число их недостаточно для того, чтобы сделать вывод о реальности существования массивных тел на полученных орбитах. Примечательно, что плоскости орбит  $P_1$  и  $P_2$  в галактической системе координат имеют одинаковые наклоны ( $40^\circ$ ), а долготы восходящих узлов равны  $10^\circ$  и  $170^\circ$ , т.е. плоскости орбит почти симметричны относительно направления на центр Галактики. Поэтому возможно, что обнаруженная концентрация афелиев орбит рассмотренных комет обусловлена притяжением центра Галактики и/или сложным движением Солнечной системы.

Ключевые слова: пояс Койпера: общее — облако Оорта

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность существования массивных небесных тел в поясе Койпера и в облаке Оорта продолжает оставаться актуальной темой. В качестве индикаторов присутствия крупных тел в этой области пространства традиционно использовались данные об орбитах долгопериодических комет (ДПК).

Происхождение ДПК связано с облаком Оорта, радиус которого оценивается в 50 000–100 000 а.е. ДПК можно разделить на «новые», «молодые» и «старые» (Fernandez 1981). «Новые» кометы, с большой полуосью  $a$  свыше 10 000 а.е., предположительно впервые оказались во внутренних областях Солнечной системы. «Молодые» кометы имеют  $10\,000 \text{ а.е.} \geq a > 1000 \text{ а.е.}$ , а «старые» —  $1000 \text{ а.е.} \geq a > 40 \text{ а.е.}$  На движение ДПК оказывают влияние близкие прохождения звезд, приливные силы со стороны галактического диска и молекулярные облака (Morbidelli 2005). Воздействие звездных возмущений и встреч с гигантскими

молекулярными облаками могут считаться случайными. Галактическая приливная сила является возмущением, которое действует непрерывно, влияя на кометные орбитальные элементы и, в частности, периодически изменяя расстояние перигелия (Heisler and Tremaine 1986) и создавая постоянный кометный поток во внутренние области Солнечной системы.

На распределение орбит ДПК могут оказывать влияние и гипотетические массивные тела в этой области пространства. При наличии такого крупного возмущающего тела афелии комет концентрируются вблизи орбиты тела, образуя семейство этой планеты (известное семейство комет Юпитера). Основным процессом, приводящим к трансформации орбит комет и образованию их семейства, являются тесные сближения комет с этим телом. Поэтому поиски и выявление гипотетических массивных тел основываются, в том числе, и на исследовании распределения орбит ДПК, главным образом, положений афелиев (или перигелиев) кометных орбит (см. обзоры в работах Guliyev and Guliyev 2019, Horner and Evans 2002, Kalinicheva

\*E-mail: olga\_kalinicheva@mail.ru

\*\*E-mail: cya@iaaras.ru

and Tomanov 2008, Matese et al. 1999, Murray 1999).

Исследуя орбиты ДПК, Matese et al. (1999) предположили, что на их орбиты влияет далекая планета с массой, равной трем массам Юпитера, с наклоном  $i = 90^\circ$  и большой полуосью  $a \sim 25000$  а.е. Эти выводы были сделаны на основе данных о 20 кометных орбитах. В работе Horner and Evans (2002) рассмотрены результаты работ Matese et al. (1999) и Murray (1999) и показано, что влияние эффектов селекции на наблюдаемые распределения орбит комет может быть значительным, поэтому, по мнению авторов, более достоверные результаты можно будет получить только после окончания миссии Gaia, в результате которой ожидается открытие около 1000 ДПК.

В работе Guliyev and Guliyev (2019) исследовалась возможность существования массивного возмущающего тела на расстоянии 250–400 а.е., без предположений о его массе. Было рассмотрено распределение перигелиев орбит 1249 ДПК с  $q > 0.1$  а.е. и  $Q > 30$  а.е. и выделены две плоскости, относительно которых концентрация перигелиев максимальна. Одна из них — плоскость эклиптики. Для другой получены следующие параметры орбиты возмущающего тела в эклиптической системе координат (ЭСК):  $\Omega = 272.7^\circ$ ,  $i = 86^\circ$ ,  $\omega = 57^\circ$ ,  $e = 0.16$ ,  $a = 339$  а.е.

Необходимо отметить, что выводы, получаемые по распределениям орбит ДПК, основаны на довольно скудном наблюдательном материале. Кроме того, есть безусловное влияние наблюдательной селекции. Поэтому не удивительно, что результаты разных работ плохо согласуются, и интерес к исследованиям транснептуновых объектов (ТНО) кажется оправданным. Это, прежде всего, работа Batygin and Brown (2016), в которой авторы показывают, что необычное распределение орбит ряда ТНО в области рассеянного диска (концентрация значений аргументов перигелиев) может быть случайным с малой вероятностью 0.007%. Но его можно объяснить гравитационным влиянием гипотетической планеты X с массой 5–20 масс Земли, двигающейся по эллиптической орбите со следующими элементами в ЭСК:  $\Omega_X = 113^\circ$ ,  $i_X = 30^\circ$ ,  $\omega_X = 150^\circ$ ,  $e_X = 0.6$ ,  $a_X = 700$  а.е.

Основываясь на этих элементах, в работах Fienga et al. (2016) и Medvedev et al. (2017) предприняты попытки определить положение планеты X на орбите по наблюдениям КА Cassini и близпараболических комет, соответственно. В работе Michaely and Loeb (2016) рассматривается действие планеты X на два ансамбля тестовых частиц. Получено, что некоторое количество частиц переходит на высокоэксцентричные орбиты, близкие к орбитам ДПК. Однако, несмотря на уверенные выводы работы Batygin and Brown (2016),

уже в работе Batygin et al. (2019) некоторые из оцененных в Batygin and Brown (2016) параметров даны в более широких диапазонах, а значения  $\Omega$  и  $\omega$  не приводятся. Так, масса оценивается в 5–10 масс Земли, наклон плоскости орбиты — в  $15\text{--}25^\circ$ , большая полуось — в 400–800 а.е., а эксцентриситет — примерно в 0.2–0.5.

В работе Bailey et al. (2016) показано, что существование на такой орбите массивного тела может объяснить наблюдаемые значения наклонов к плоскости эклиптики осей вращения Солнца и планет. В работе Gomes et al. (2017) были получены возможные значения массы и орбитальных элементов планеты для наблюдаемого значения наклона инвариантной плоскости известных планет к плоскости солнечного экватора. Результаты близки к оценкам, полученным в Batygin and Brown (2016) и Batygin et al. (2019), хотя эксцентриситет несколько больше.

de La Fuente Marcos and de La Fuente Marcos (2014) подтверждают, что избыток ТНО с  $a > 150$  а.е. и  $\omega = 340 \pm 55^\circ$  не может быть объяснен какими-либо особенностями наблюдательной селекции и является особенностью этой популяции. Его возможная причина рассматривается в рамках эффекта Лидова–Козаи. Анализ возможных сценариев показывает, что для объяснения этого эффекта должны существовать по крайней мере две трансептуновые планеты.

В работе Jilková et al. (2015) в результате моделирования показано, что следующие орбитальные параметры ТНО —  $a > 150$  а.е.,  $q > 30$  а.е.,  $\omega = 340 \pm 55^\circ$ ,  $i = 10\text{--}30^\circ$ , характерны для захвата этих объектов из диска планетезималий другой звезды. В предположении, что орбиты ТНО остались неизменными с момента захвата, оценены следующие параметры сближения Солнца со звездой: масса звезды равна 1.8 масс Солнца, минимальное расстояние между звездами 340 а.е., наклон к плоскости эклиптики  $17\text{--}34^\circ$ , относительная скорость на бесконечности приблизительно  $4.3$  км с<sup>-1</sup>. Предсказывается, что в регионе Седноидов (ТНО (90377) Седна) могло оказаться 930 подобных тел, а во внутренней области облака Оорта примерно 440.

Можно отметить также работу Li et al. (2018), в которой приводятся результаты моделирования влияния массивного возмущающего тела ( $e \gtrsim 0.6$ ,  $a \approx 500$  а.е.,  $i \approx 0^\circ$ ,  $m = 10$  масс Земли) на распределение некоторых параметров орбит ансамбля тестовых частиц. Сделан вывод о том, что в плоскости эклиптики в рассеянном диске на такой орбите нет массивного возмущающего тела.

Этот обзор результатов исследований последних лет говорит о том, что выводы о возможности существования массивных тел в различных областях облака Оорта и о параметрах их орбит

довольно противоречивы. Поэтому представляет интерес рассмотрение имеющихся на сегодняшний день данных об орбитах ДПК для выявления особенностей распределения их орбит и формулировке, по возможности, выводов о причинах этих особенностей.

## 2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В настоящей работе используется каталог элементов орбит эллиптических комет Международного планетного центра<sup>1</sup> по состоянию на 25.01.2019 г. Из каталога исключены кометы Крейца и фрагменты разделившихся комет, кроме первого. Рассматривались кометы с афелиями расстояниями  $Q > 50$  а.е. Перигелийные расстояния для этого ряда не превышают 10 а.е. Параметры орбит комет нами не уточнялись. Всего в рассмотрение включены орбиты 491 кометы: 278 афелиев находится в южном полушарии, 213 — в северном.

Орбиты «старых» ДПК сохраняют в некоторой степени особенности «новых» ДПК, но при этом накапливают дополнительные возмущения в элементах своих орбит. Эти возмущения, в частности, могут быть вызваны негравитационными эффектами при приближении комет к Солнцу, некоторыми изменениями элементов орбит при возможных разрушениях комет, гравитационным воздействием неизвестных массивных тел.

Рассмотрим распределение афелиев ДПК в галактической системе координат (ГСК). Распределение долгот афелиев (рис. 1а) имеет примерные минимумы вблизи линии апекс–антиапекс галактического движения Солнца ( $90^\circ$  и  $270^\circ$ ) и примерные максимумы вблизи направления на центр Галактики ( $l \sim 0^\circ$ ) и в противоположном направлении ( $l \sim 180\text{--}230^\circ$ ). Помимо указанных максимумов имеются и максимумы на галактической долготе  $l \sim 135^\circ$  и  $l \sim 315^\circ$ , существование которых было доказано Matese et al. (1999), Matese and Whitmire (2011). Предполагалось, что найденная анизотропия в распределении кажущаяся и вызвана тем, что перигелии (афелии) «новых» ДПК лежат преимущественно на большом круге. Перигелии ДПК на этом большом круге могут быть связаны со звездными столкновениями, имеющими предпочтительные направления, обусловленные апексом пекулярного движения Солнца (Feng and Bailer-Jones 2014).

В работе Wiegert and Tremaine (1999) получено распределение долгот перигелиев относительно плоскости Галактики как в результате моделирования, так и для наблюдаемых новых комет. Отмечается, что наблюдаемые и модельные распределения

подтверждают доминирующую роль галактического прилива. Однако есть и отличия, которые могут говорить о некотором влиянии проходящих звезд и молекулярных облаков.

Для рассматриваемой нами группы комет при уровне значимости  $\alpha = 0.01$  критерий  $\chi^2$  показывает, что распределение афелиев по долготе значимо отличается от равномерного. Интересно отметить, что в интервале долгот ( $l \sim 180\text{--}230^\circ$ ) находится долгота восходящего узла эклиптики ( $l_{\text{ekl}} = 192.9^\circ$ ) и долгота восходящего узла планеты X ( $l_X = 197.6^\circ$  (Batygin and Brown 2016)).

В распределении широт афелиев вследствие влияния галактического прилива должен ожидать-ся недостаток линий апсид около галактических полюсов и галактического экватора и избыток вблизи широт  $b = \pm 45^\circ$  (Wiegert and Tremaine 1999), что и видно на рис. 1б для рассматриваемых комет. На рис. 2а представлены положения афелиев в галактической сферической системе координат. Для сравнения, на рис. 2б приводятся галактические сферические координаты положений афелиев 238 ТНО с  $Q > 100$  а.е., демонстрирующие существенно отличный от кометного (рис. 1а) характер распределения.

Мы предполагаем, что возможные неравномерности в распределении положений афелиев во внутренней области облака Оорта вызваны наличием в этой области некоторого массивного тела (или тел) и будем искать такую орбиту (орбиты), относительно которой число афелиев максимально.

## 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТЫ ВОЗМУЩАЮЩЕГО ТЕЛА

Задача нахождения орбиты возмущающего тела состоит из двух этапов. На первом — находим плоскость в ГСК, определяемую углами  $\Omega_P$  и  $i_P$ , относительно которой количество афелиев максимально. На втором — на выбранной плоскости находим орбиту с параметрами  $\omega_P$ ,  $e_P$ ,  $Q_P$ , относительно которой количество афелиев максимально.

Вычислим количество афелиев, находящихся в некоторой окрестности плоскости с заданными долготой восходящего узла  $\Omega_P$  и наклоном  $i_P$ . При расчетах  $\Omega_P$  и  $i_P$  изменяем с шагом  $1^\circ$  в следующих интервалах:  $0^\circ \leq \Omega_P < 360^\circ$ ,  $0^\circ \leq i_P < 90^\circ$ . На рис. 3 представлена относительная частота попадания афелиев комет в  $20^\circ$ -ую окрестность плоскости с заданными значениями  $\Omega_P$  и  $i_P$  для нескольких интервалов значений  $Q$ : 50–150 а.е., 100–400 а.е., 400–1000 а.е., 1000–2000 а.е. А на рис. 4 для этих же интервалов по  $Q$  показана относительная частота попадания афелиев комет в  $10^\circ$ -ую окрестность плоскости. Уменьшение окрестности плоскости до  $5^\circ$  мы посчитали нецелесообразным, т.к. в этом случае значительно уменьшается количество рассматриваемых комет.

<sup>1</sup><https://www.minorplanetcenter.net/iauMPCORB/CometEls.txt>

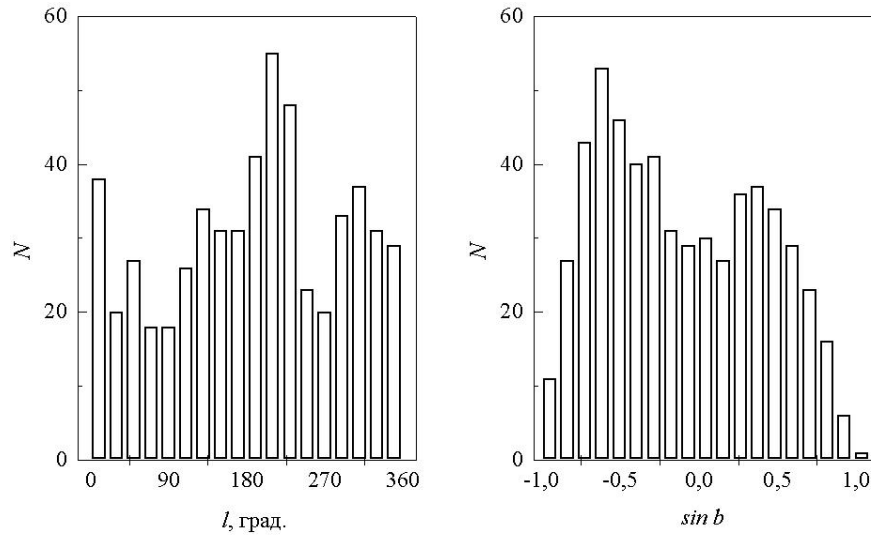


Рис. 1. Распределения эллиптических комет с  $Q > 50$  а.е.: а) по галактической долготе афелия  $l$ , б) по широте афелия  $b$  ( $\sin b$ ).

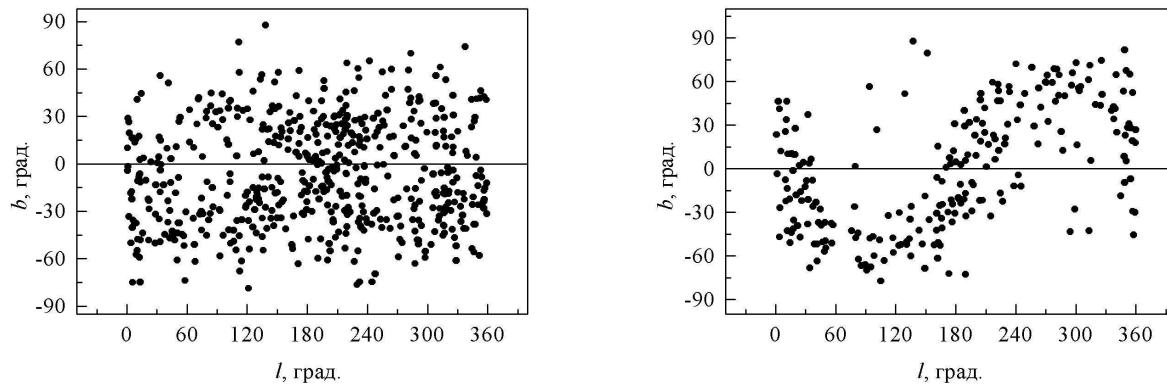


Рис. 2. Координаты афелиев эллиптических комет с  $Q > 50$  а.е. в ГСК (а), и координаты афелиев ТНО с  $Q > 100$  а.е. в ГСК (б).

Рассмотрим, как изменяются результаты и выводы в зависимости от выбора окрестности каждой плоскости. Для нашего набора данных о координатах афелиев для  $10^\circ$ -ой окрестности минимальное число афелиев составило 9% (45 комет) от общего числа, максимальное — 29% (140 комет). Таким образом, число афелиев различается более чем в 3 раза, что существенно больше, чем при равномерном распределении. Для  $20^\circ$ -ой окрестности минимальное число афелиев составило 21% (104 кометы) от общего числа, максимальное — 43% (211 комет), т.е. различаются в 2 раза. В последнем случае исследуемое распределение более сглажено, максимумы и минимумы менее четкие, что и видно при сравнении

рис. 3 и рис. 4. Однако необходимо отметить, что распределение и положение максимумов на этих рисунках имеет примерно одинаковый характер, кроме интервала  $Q = 50\text{--}150$  а.е., для которого в случае  $20^\circ$ -градусного интервала обнаруживается больше максимумов по сравнению с  $10^\circ$ -градусным.

Остановимся на варианте  $10^\circ$ -ой окрестности (рис. 4). При значениях  $Q < 400$  а.е. влияние эллиптичности преобладает (плоскость эклиптики имеет координаты  $l_{ekl} = 192.9^\circ$ ,  $b_{ekl} = 60^\circ$ ), а концентрация афелиев к плоскости Галактики минимальна. Для интервала  $400 \text{ а.е.} < Q < 1000 \text{ а.е.}$  наблюдается увеличение концентрации афелиев к плоскости Галактики, а также к плоскости, перпендикулярной эклиптике. Для  $1000 \text{ а.е.} < Q < 2000 \text{ а.е.}$  влияние

эклиптики отсутствует и остается только концентрация к плоскости, ей перпендикулярной. Эти результаты суммируются в таблице 1, где приводятся значения  $\Omega_P$  и  $i_P$  для центров областей с максимальной концентрацией афелиев. Наибольшие максимумы на рис. 4 соответствуют двум плоскостям: для  $Q = 100\text{--}1000$  а.е. — плоскости ( $\Omega_P = 170^\circ$ ,  $i_P = 40^\circ$ ), для  $Q = 400\text{--}2000$  а.е. — плоскости ( $\Omega_P = 10^\circ$ ,  $i_P = 40^\circ$ ). Эти плоскости и рассмотрены в дальнейшем.

Оценим размеры областей одинаковой яркости с частотой попадания больше 0.3 (рис. 4а, б, с) и 0.4 (рис. 4д) по  $i_P$  и  $\Omega_P$ . Для рис. 4а) это составляет примерно  $5^\circ \times 5^\circ$ , для рис. 4б) —  $\sim 10^\circ \times 10^\circ$ , для рис. 4с) —  $\sim 15^\circ \times 5^\circ$  и  $\sim 10^\circ \times 15^\circ$ , для рис. 4д) —  $\sim 10^\circ \times 10^\circ$ .

На втором этапе определим на рассматриваемой плоскости остальные параметры орбиты возмущающего тела —  $\omega_P$ ,  $e_P$  и  $Q_P$ . Так же, как и на первом этапе, ищем максимум числа афелиев, находящихся в некоторой окрестности орбиты возмущающего тела при условии, что орбита кеплерова и находится в плоскости, определяемой оцененными на первом этапе значениями  $\Omega_P$  и  $i_P$ . На этом этапе тоже надо было бы использовать  $10^\circ$ -ую окрестность. Но если на первом этапе используются все афелии из этой окрестности плоскости, то на втором этапе используется только их часть. И этой части становится мало, чтобы делать статистически значимые выводы. Для того чтобы увеличить число афелиев в статистике, приходится увеличить размеры используемой окрестности плоскости до  $20^\circ$ . Это приводит к уменьшению точности результатов, но позволяет эти результаты получить.

В качестве критерия близости орбиты планеты и афелия кометы используем величину  $x = k r$ , где  $k$  — некоторый эмпирический коэффициент (зависит от массы планеты),  $r$  — гелиоцентрическое расстояние планеты. Пределы изменения определяемых параметров следующие:  $100 \leq Q_P < 2000$  а.е. (311 орбит),  $0 \leq e_P < 1$ ,  $0^\circ \leq \omega_P < 360^\circ$ . Величины варьировались с шагами:  $\Delta Q_P = 25$  а.е.,  $\Delta e_P = 0.1$ ,  $\Delta \omega_P = 10^\circ$ . Уменьшение шага не приводит к значимому изменению определяемых параметров и не сказывается на увеличении точности их оценки.

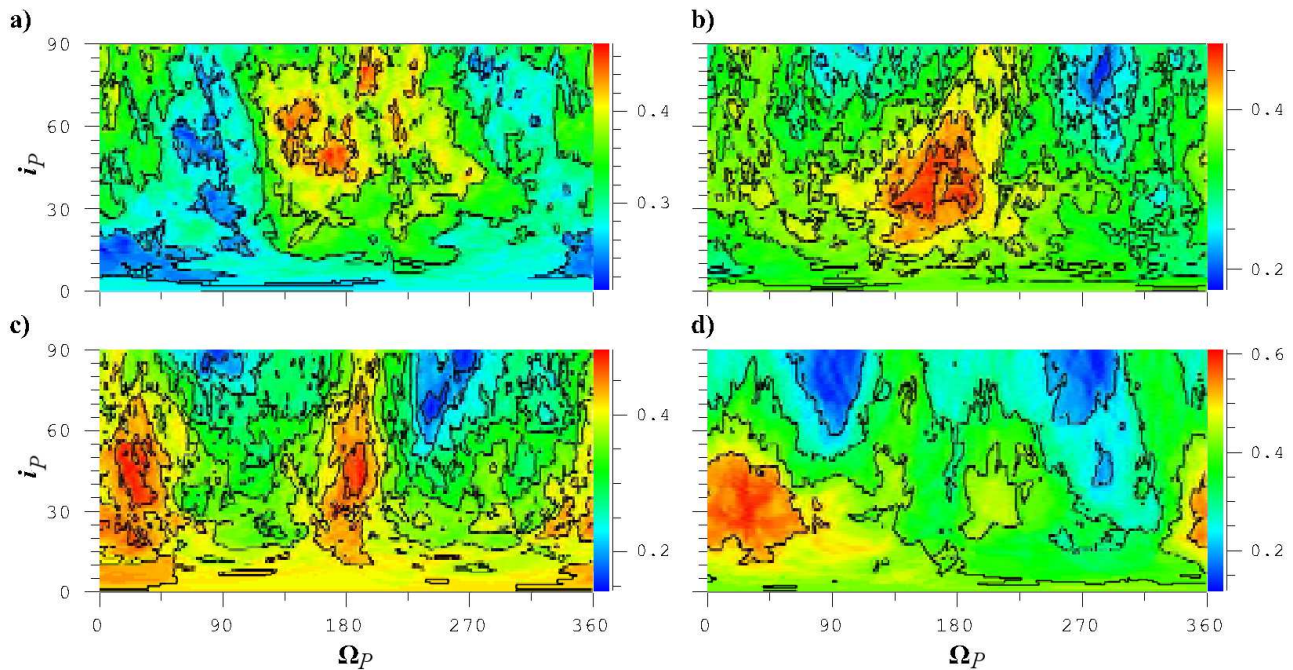
В таблице 2 суммируются результаты этих определений. В столбцах последовательно приводится следующая информация: 1) обозначение орбиты тела; 2) долгота восходящего узла  $\Omega_P$  и наклон  $i_P$  плоскости орбиты к плоскости галактического экватора; 3) рассматриваемый интервал значений афелиальных расстояний кометных орбит,  $Q$ ; 4) количество комет в этом интервале значений  $Q$ ,  $N_t$ ; 5) количество комет в  $20^\circ$ -ной окрестности плоскости,  $N_{20^\circ}$ ; 6) значение коэффициента  $k$ ; 7) — 9)

параметры орбиты на плоскости; 10) число комет,  $N$ , по которым определены значения орбитальных параметров; 11) — 12) число комет  $N$  в процентах от общего количества  $N_t$ , и от их количества в  $20^\circ$ -ой окрестности плоскости,  $N_{20^\circ}$ . Необходимо отметить, что для каждой из орбит возможен вариант обратного движения, который мы не рассматриваем.

Видно, что наилучшая сходимость определяемых параметров для разных значений  $k$  получена для  $P_2$ . Для этой же орбиты можно отметить наибольший процент комет, на которых основано решение. При уровне значимости  $\alpha = 0.01$  критерий  $\chi^2$  показывает, что полученные количества комет, на которых основаны результаты для  $P_1$  и  $P_2$ , являются статистически значимыми. В таблице 2 курсивом выделены параметры орбит, которые мы используем в дальнейшем рассмотрении.

Оценим ошибки полученных параметров орбит, полагая наши измерения прямыми. Для случайной погрешности прямых измерений,  $\Delta x$ , имеем:  $\Delta x = \sqrt{A^2 + S^2}$ , где  $A$  — абсолютная погрешность средства измерения;  $S = S_x t_{\alpha, (N-1)}$ , где  $S_x$  — стандартная ошибка среднего,  $t_{\alpha, (N-1)}$  — квантиль распределения Стьюдента для числа степеней свободы  $(N - 1)$  и уровня значимости  $\alpha$ . Для параметров  $\omega_P$ ,  $e_P$  и  $Q_P$  принимаем погрешности измерений равными значениям шагов при варьировании, а  $N = 3$  по числу рассмотренных вариантов в таблице 2. Для  $i_P$  и  $\Omega_P$  воспользуемся методом Корнфельда оценки погрешности как половины разности между максимальным и минимальным результатами измерений. Так как среднее значение максимального размера области с частотой попадания более, чем 0.3 (рис. 4) можно оценить в  $10^\circ$ , то значения ошибок среднего принимаем равными  $5^\circ$ . Для  $\alpha = 0.9$   $t = 2.9$ . Результаты оценок погрешностей приводятся в таблице 3. В 5-ом и 6-ом столбцах в скобках приводятся общие погрешности принятых нами окончательными значений параметров  $Q_P$ ,  $e_P$ ,  $\omega_P$  (в таблице 2 они выделены курсивом).

Рассмотрим плоскости орбит тел  $P_1$  и  $P_2$ . Угловое расстояние между ними составляет примерно  $80^\circ$ . Плоскости симметричны относительно плоскости Галактики и почти перпендикулярны друг другу. Положения восходящих узлов близки к линии направления на центр Галактики. На рис. 5 показаны полученные орбиты в прямоугольной эклиптической системе координат. Их периоды обращения равны, соответственно, 11 500 и 31 600 лет, что не исключает наличие соизмеримости их средних движений. Минимальное расстояние между орбитами  $P_1$  и  $P_2$  составляет приблизительно 80 а.е. На рис. 6 показаны в ГСК положения афелиев комет, на которых основаны



**Рис. 3.** Частота попадания афелиев комет в  $20^\circ$ -ую окрестность плоскости с наклоном  $i_P$  и долготой восходящего  $\Omega_P$  в ГСК для следующих значений  $Q$ : а)  $50 \text{ а.е.} < Q < 150 \text{ а.е.}$ , б)  $100 \text{ а.е.} < Q < 400 \text{ а.е.}$ , в)  $400 \text{ а.е.} < Q < 1000 \text{ а.е.}$ , д)  $1000 \text{ а.е.} < Q < 2000 \text{ а.е.}$

**Таблица 1.** Координаты центров локальных максимумов на рис. 4 (углы в ГСК)

$Q$ , а.е.	Число комет	$\Omega_P, i_P$ , °				
50–150	94	–	–	140–142, 70–71	–	–
100–400	144	–	–	–	172, 36	200, 69–70
400–1000	98	2–8, 32–40	46–47, 59–62	–	169–177, 42–45	–
1000–2000	60	11, 38	–	–	–	222–224, 35–39

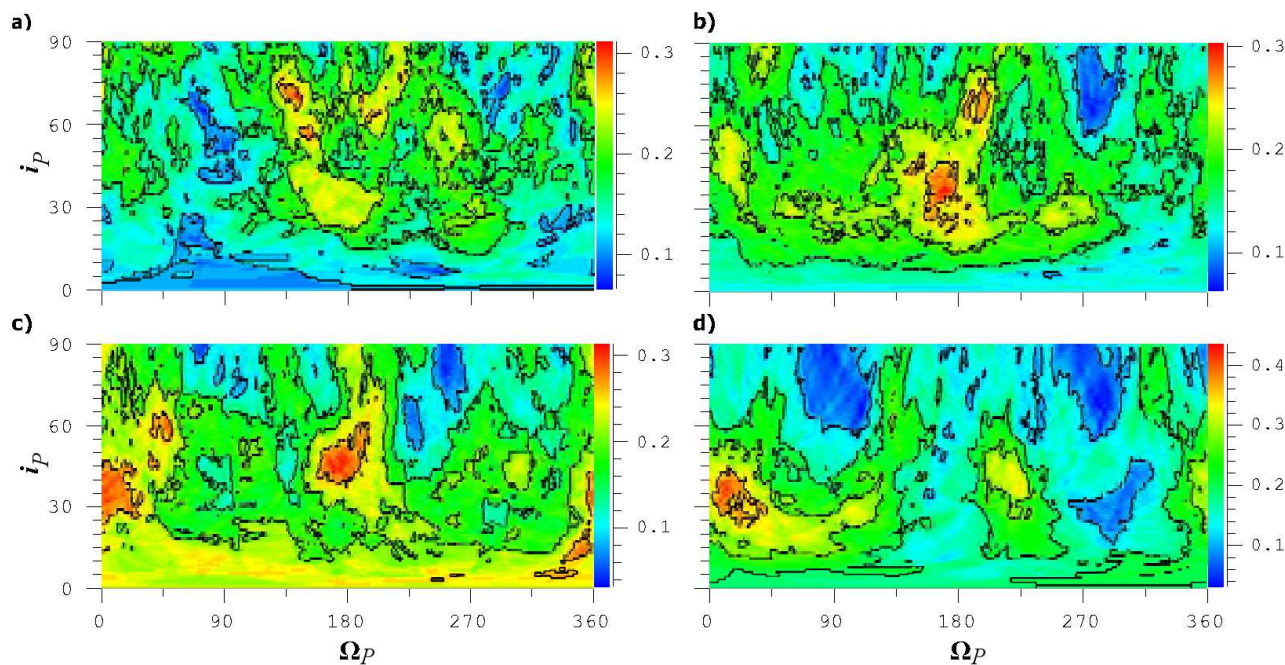
приведенные в таблице 2 решения. Восемь комет оказываются общими при определении параметров этих орбит, их афелии расположены вблизи галактической долготы  $\sim 180^\circ$ . Можно отметить довольно равномерное распределение положений соответствующих афелиев.

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ ОРБИТАМИ КОМЕТ И ВОЗМУЩАЮЩИХ ТЕЛ

Рядом авторов (см. ВВЕДЕНИЕ), в том числе и нами, получены орбиты возмущающих гипотетических тел. При этом не всегда принимались в расчет предположения об их массах и соответствующих им сферах действия,  $R$ .

Оценим количество афелиев вблизи орбит некоторых из этих тел в предположении, что масса

тела равна 20 массам Земли. Для тела, большая полуось орбиты которого,  $a$ , равна 1000 а.е.,  $R \approx 20$  а.е., для  $a = 500$  а.е.  $R \approx 10$  а.е. Подсчитаем количество афелиев, минимальные расстояния которых от орбит соответствующих возмущающих тел не превышают 20 а.е. Минимальные расстояния будем фиксировать в окрестности афелиев орбит для интервалов истинной аномалии кометы  $v = 178\text{--}182^\circ$ . Полагаем, что этот интервал включает ошибки элементов орбит и комет, и гипотетических планет. Результаты приводятся в таблице 4. В столбцах указаны: 1) орбита; 2–8) элементы орбиты возмущающего тела в ЭСК; 9) рассмотренный интервал значений  $Q$ ,  $\Delta Q$ ; 10) общее число комет,  $NN$ , афелии которых находятся в интервале  $\Delta Q$ ; 11) число афелиев,  $N$ , которые находятся на расстоянии  $r < 20$  а.е. от орбиты возмущающего



**Рис. 4.** Частота попадания афелиев комет в  $10^\circ$ -ую окрестность плоскости с наклоном  $i_P$  и долготой восходящего  $\Omega_P$  в ГСК для следующих интервалов значений  $Q$ : а)  $50 \text{ а.е.} < Q < 150 \text{ а.е.}$ , б)  $100 \text{ а.е.} < Q < 400 \text{ а.е.}$ , в)  $400 \text{ а.е.} < Q < 1000 \text{ а.е.}$ , д)  $1000 \text{ а.е.} < Q < 2000 \text{ а.е.}$

**Таблица 2.** Параметры орбит гипотетических тел в ГСК

Орбита	$\Omega_P, i_P,$ °	$Q,$ а.е.	$N_t$	$N_{20^\circ}$	$k$	Параметры орбиты			N	N (%) от	
						$Q_P, \text{ а.е.}$	$e_P$	$\omega_P, ^\circ$		$N_t$	$N_{20^\circ}$
$P_1$	170, 40	100–	242	110	0.1	750	0.4	210	25	17	36
		1000			0.15	850	0.5	220	33		
					0.2	825	0.6	180	40		
$P_2$	10, 40	400–	167	85	0.1	1425	0.3	210	26	24	48
		2000			0.15	1325	0.3	220	34		
					0.2	1300–1350	0.3	210	41		

**Таблица 3.** Оценка погрешностей параметров орбит  $P_1$  и  $P_2$

Параметр орбиты	Методическая погрешность	Ошибка среднего		Общая погрешность	
		$P_1$	$P_2$	$P_1$	$P_2$
$Q_P, \text{ а.е.}$	25	30	33	91 (100)	100 (120)
$e_P$	0.1	0.06	0	0.19 (0.3)	0.1 (0.1)
$\omega_P, ^\circ$	10	12	3	36 (60)	14 (16)
$i_P, ^\circ$	1	5	5	15	15
$\Omega_P, ^\circ$	1	5	5	15	15

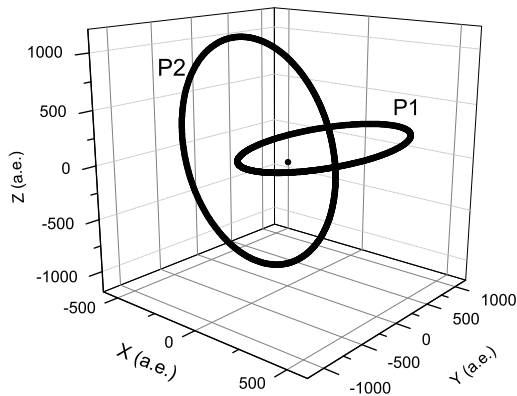


Рис. 5. Орбиты  $P_1$  и  $P_2$  в прямоугольной эклиптической системе координат.

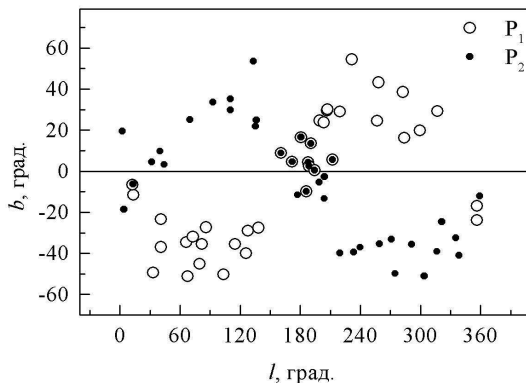


Рис. 6. Афелии комет в ГСК, определяющие орбиты  $P_1$  и  $P_2$ .

тела; 12) число  $N$  в процентах от  $NN$ . Орбиты  $P_1^*$  и  $P_2^*$  получены варьированием параметров  $\omega_P$  и  $i_P$  для орбит  $P_1$  и  $P_2$  с целью получения максимального количества сближающихся комет. Была также рассмотрена, как «случайная», орбита ТНО (90377) Седна, масса которого значительно меньше массы Земли.

Результаты таблицы 4 показывают, что наибольшее количество афелиев находится вблизи орбит  $P_1$  и  $P_1^*$ , хотя ни для одного из рассмотренных возмущающих тел это количество не является статистически значимым. Для «случайной» орбиты (90377) получено значение 0.

## 5. ВЫВОДЫ

Рассмотрены орбиты ДПК с афелиями расстояниями 50–2000 а.е. Методом вариации параметров орбит гипотетических возмущающих тел

получены значения этих параметров, соответствующие наибольшей концентрации афелиев в их  $10^\circ$ -ти и  $20^\circ$ -ти окрестностях. Количество комет в каждой из групп является статистически значимым (критерий  $\chi^2$ ). Элементы орбит двух тел,  $P_1$  и  $P_2$ , а также полученных в работах Batygin et al. (2019), Batygin and Brown (2016), приводятся в таблице 5 в ГСК и ЭСК. Полученные нами значения параметров орбиты  $P_1$  не противоречат выводам работы Batygin et al. (2019).

Так как число рассмотренных нами комет относительно невелико, то приходится выбирать достаточно большие угловые интервалы ( $20^\circ$  и  $10^\circ$ ) для определения параметров орбиты возмущающего тела. Эти интервалы значительно превышают радиусы сфер действия,  $R$ , возмущающих тел при разумных предположениях об их массах. Так, при массе тела, равной 20 массам Земли, и большой полуоси орбиты, равной 1000 а.е.,  $R \approx 20$  а.е. Исходя из этой оценки, мы вычислили минимальные расстояния между орбитами гипотетических тел и орбитами комет. Оценено число комет, окрестности афелиев которых находятся на расстояниях от орбиты планеты, не превышающих  $R$ . Полученные результаты не являются статистически значимыми и не позволяют сделать вывод о реальности существования массивных тел на орбитах  $P_1$  и  $P_2$ , а также на орбитах, полученных в работах Batygin and Brown (2016), Guliyev and Guliyev (2019) (при предположении о том, что массивное возмущающее тело должно сформировать семейство комет).

Мы полагаем, что существование двух возмущающих тел является не единственной (основной) причиной выявленного неравномерного распределения афелиев ДПК во внутренней области облака Оорта. Тот факт, что плоскости орбит этих тел имеют одинаковые наклоны к плоскости Галактики ( $40^\circ$ ), а восходящие узлы различаются примерно на  $180^\circ$  и лежат вблизи линии направления на центр Галактики, может говорить об определяющем гравитационном влиянии центра Галактики, преобразующем случайно распределенные орбиты комет, а возможно, и гипотетических возмущающих тел. Возможно также, что на орбиты комет оказывает влияние движение Солнца вокруг центра Галактики (скорость солнечной системы и других ближайших звезд относительно центра Галактики приблизительно равна  $217 \text{ км с}^{-1}$ ) и относительно близлежащих звезд (скорость движения к апексу составляет примерно  $20 \text{ км с}^{-1}$ ).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за критические замечания, позволившие улучшить статью.



**Таблица 4.** Оценка количества комет, афелии орбит которых находятся вблизи орбит возмущающих тел

Орбита	Элементы орбиты тела в ЭСК							$\Delta Q$ , а.е.	$NN$	$N$	$N$ , %
	$\omega_P$ , °	$\Omega_P$ , °	$i_P$ , °	$e_P$	$a_P$ , а.е.	$q_P$ , а.е.	$Q_P$ , а.е.				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Batygin and Brown (2016)	150	113	30	0.6	700	280	1120	260–1140	196	4	2.0
Guliyev and Guliyev (2019)	57	272.7	86	0.16	339	285	393	265–413	60	2	3.3
$P_1$	322	297	24	0.6	510	240	870	220–890	157	7	4.5
$P_1^*$	40	297	24	0.5	510	250	760	230–780	141	10	7.1
$P_2$	327	92	80	0.3	1000	700	1300	680–1320	76	2	2.6
$P_2^*$	30	92	80	0.3	1000	700	1300	680–1320	76	3	4.0
(90377)	311	145	12	0.85	516	77	955	260–975	155	0	0

**Таблица 5.** Элементы орбит гипотетических возмущающих тел

Орбита	ГСК, °			ЭСК, °			$e$	$a$ , а.е.	$q$ , а.е.	$Q$ , а.е.
	$\omega$	$\Omega$	$i$	$\omega$	$\Omega$	$i$				
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
$P_1$	180	170	40	322	297	24	0.6	510	200	825
$P_2$	210	10	40	327	92	80	0.3	1000	700	1300
Batygin and Brown (2016)	170	198	88	150	113	30	0.6	700	280	1120
Batygin et al. (2019)	—	—	—	—	—	15–25	0.2–0.5	400–800	200–640	480–1200

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Bailey, K. Batygin, and M. E. Brown, *Astron. J.* **152** (5), 126 (2016).
2. K. Batygin, F. C. Adams, M. E. Brown, and J. C. Becker, *Physics Reports* **805**, 1 (2019).
3. K. Batygin and M. E. Brown, *Astron. J.* **151** (2), 22 (2016).
4. C. de La Fuente Marcos and R. de La Fuente Marcos, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **443**, L59 (2014).
5. F. Feng and C. A. L. Bailer-Jones, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **442** (4), 3653 (2014).
6. J. A. Fernandez, *Astron. and Astrophys.* **96** (1-2), 26 (1981).
7. A. Fienga, J. Laskar, H. Manche, and M. Gastineau, *Astron. and Astrophys.* **587**, L8 (2016).
8. R. Gomes, R. Deienno, and A. Morbidelli, *Astron. J.* **153** (1), 27 (2017).
9. A. S. Guliyev and R. A. Guliyev, *Acta Astronomica* **69** (2), 177 (2019).
10. J. Heisler and S. Tremaine, *Icarus* **65** (1), 13 (1986).
11. J. Horner and N. W. Evans, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **335** (3), 641 (2002).
12. L. Jilková, S. Portegies Zwart, T. Pijloo, and M. Hammer, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **453** (3), 3157 (2015).
13. O. V. Kalinicheva and V. P. Tomanov, *Dynamical connection of comets with planets* (VGPU publishing house, Vologda, 2008).
14. G. Li, S. Hadden, M. Payne, and M. J. Holman, *Astron. J.* **156** (6), 263 (2018).
15. J. J. Matese, P. G. Whitman, and D. P. Whitmire, *Icarus* **141** (2), 354 (1999).
16. J. J. Matese and D. P. Whitmire, *Icarus* **211** (2), 926 (2011).
17. Y. D. Medvedev, D. E. Vavilov, Y. S. Bondarenko, et al., *Astronomy Letters* **43** (2), 120 (2017).
18. E. Michaely and A. Loeb, arXiv:1609.08614 (2016).
19. A. Morbidelli, astro-ph/0512256 (2005).

20. J. B. Murray, Monthly Notices Royal Astron. Soc. 21. P. Wiegert and S. Tremaine, Icarus **137** (1), 84 (1999).  
**309** (1), 31 (1999).

## Specifics of the Distribution of the Orbits of Long-Period Comets in the Inner Region of the Oort Cloud

O. V. Kalinicheva<sup>1</sup> and Yu. A. Chernetenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Vologda State University, Vologda, 160000 Russia

<sup>2</sup>Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 191187 Russia

We investigate statistical patterns in the distribution of the orbits of long-period comets that belong to the inner region of the Oort cloud (with aphelion distances,  $Q$ , lying in the 50–2000 AU interval). We show that the distribution of aphelia is not random and such patterns can be due, in particular, to the presence of hypothetical massive bodies in the region considered. We varied the orbital parameters of such bodies to obtain two orbits such that each of them has the aphelia of 40 comets located within the 20-degree neighborhood of the orbit. This number is statistically significant. The orbits have the following parameters in the ecliptic coordinate system:  $P_1$ :  $\Omega_P = 297^\circ$ ,  $i_P = 24^\circ$ ,  $\omega_P = 322^\circ$ ,  $e_P = 0.6$ ,  $a_P = 510$  AU;  $P_2$ :  $\Omega_P = 92^\circ$ ,  $i_P = 80^\circ$ ,  $\omega_P = 327^\circ$ ,  $e_P = 0.3$ ,  $a_P = 1000$  AU. For the adopted masses of these bodies we determined the minimum distances between their orbits and the orbits of the comets and estimated the number of aphelia located within the spheres of influence of these bodies. We found that the greatest number of aphelia are located near orbit  $P_1$ . However, their number is insufficient to conclude that massive bodies actually move in the inferred orbits. It is remarkable that the planes of orbits  $P_1$  and  $P_2$  in the Galactic coordinate system have the same inclinations ( $40^\circ$ ) and longitudes of their ascending nodes are equal to  $10^\circ$  and  $170^\circ$ , i.e., the orbital planes are almost symmetric with respect to the direction toward the Galactic center. The concentration of orbital aphelia of the comets considered found in this study can therefore be due to the attraction from the Galactic center and/or complex motion of the Solar system.

Keywords: *celestial mechanics: comets: general: Kuiper belt: general: comets: individual: Oort cloud*