

УДК 523.532

МОЛОДЫЕ МЕТЕОРНЫЕ РОИ ВБЛИЗИ СОЛНЦА. II. СТАТИСТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ МЕТЕОРОВ С СЕМЕЙСТВАМИ КОРТОКОПЕРИГЕЛИЙНЫХ КОМЕТ

© 2003 г. Ю. М. Горбанев, Е. Ф. Князькова

Одесская астрономическая обсерватория, Украина

Поступила в редакцию 01.10.2002 г.

После исправления 15.01.2003 г.

Работа посвящена исследованию гипотезы о рождении метеорных роев вблизи Солнца. Кандидатами на роль родительских тел этих метеорных роев предполагаются семейства короткоперигелийных комет, многие из которых в перигелии проходят буквально в нескольких радиусах от поверхности Солнца и обладают большим коэффициентом продуктивности пылеобразования. Проведенный статистический анализ орбитальных и кинематических характеристик короткоперигелийных метеорных частиц, зарегистрированных на Земле, и комет семейства Крейца, групп Марседена, Крафта, Мейера позволил сделать некоторые выводы в отношении выдвинутой гипотезы. Найдена корреляция в зависимости эклиптической долготы перигелия кометных и метеорных орбит от перигелийного расстояния, которая может свидетельствовать либо о генетической связи между объектами этих двух классов, либо о пока еще неизвестном механизме, однообразно действующим на короткоперигелийные кометные и метеорные орбиты. Достаточно уверенное заключение о генетической связи можно сделать для метеоров, принадлежащих к рою Ариетид, и кометной группы Марседена.

ВВЕДЕНИЕ

По современным данным, около 99% пылевого вещества комета порождает на короткой перигелийной дуге орбиты (Левин, 1956; Ловелл, 1958). У большинства комет, являющихся общепризнанными родительскими телами метеорных роев (долгопериодических комет Свифта–Туттля, Темпеля–Туттля и Тетчера; короткопериодической кометы Энке и т.д.), перигелийные расстояния составляют не менее 0.3–0.4 а.е. На таких расстояниях (порядка 60–70 радиусов Солнца R_{\odot}) само Солнце можно считать достаточно далеким объектом, оказывающим в основном лишь гравитационное влияние на небесное тело. Рождение пылевых частиц на таких расстояниях подчиняются законам кометной физики. Другая ситуация, если пылевая частица возникла в области до $10 R_{\odot}$. Здесь Солнце уже представляет динамическое явление со своим магнитным полем, циклами активности, температурным и вспышечным режимом. До сих пор большинство авторов околосолнечную область (ближняя корона – термическая и часть F-короны, в среднем до $30 R_{\odot}$) рассматривали как область, где происходит последний этап эволюции метеорного вещества, результат дезинтеграции метеорных роев и ассоциаций под вековым действием негравитационных эффектов. Некоторыми исследователями предлагались гипотезы о формировании короткоживущих (тысячи лет) метеорных ассоциаций в результате гравита-

ционной фокусировки орбит спорадического околосолнечного облака, не получившие особого развития (Дж. Трульсен, В.В. Емельяненко).

Возможно ли рождение метеорного роя родительским телом на расстоянии нескольких радиусов Солнца? И при каких условиях новорожденный рой выживет, сможет наблюдаться с Земли либо околоземных орбитальных станций? Несомненно, что частицы такого роя будут отличаться как физическими (составом, плотностью, размером), так орбитальными и кинематическими характеристиками. Основная ценность обнаружения подобных роев – их молодость и компактность, что важно для изучения структуры метеорных роев, их эволюции, генетических связей с малыми телами Солнечной системы (кометами в первую очередь). Такие метеорные рои принято называть молодыми. В таких роях дисперсия орбитальных элементов метеороидов не превышает исходной, обусловленной процессом формирования роя. Следует ожидать, что орбитальные элементы родительского тела и частиц в молодом рое должны быть близки. Пылевые частицы молодых роев представляют также интерес для физики метеорного вещества.

Работа посвящена поиску метеорных частиц молодых метеорных роев. Статистическое исследование различных характеристик возможных родительских тел молодых метеорных роев и ко-

роткоперигелийных метеорных частиц должно указать на существование взаимосвязи.

СЕМЕЙСТВА КОРОТКОПЕРИГЕЛИЙНЫХ КОМЕТ

Какие малые тела Солнечной системы могут выступать в качестве родительских тел для молодых роев, возникших в околосолнечной области? По современным взглядам на вопросы генетических связей между метеорными роями и малыми телами Солнечной системы от 90 до 99% пылевого межпланетного вещества рождается при выбросах из ядер комет (Кащеев и др., 1967; Лебединец и др., 1972; Волошук и др., 1989). Приведенная величина вклада кометного вещества в общую массу межпланетной материи несколько колеблется в зависимости от методик получения оценки и наблюдательного материала, по которому оценка проводится. Тем не менее, ясно, что большая доля вещества, особенно мелких частиц, которые в атмосфере Земли наблюдаются как слабые радиолокационные метеоры, кометного происхождения. Не открыто и, скорее всего, не существует малых планет с перигелийными расстояниями менее 40–50 R_{\odot} . Следовательно, возможными кандидатами на роль родительских тел молодых метеорных роев, рожденных в околосолнечной области, могут являться семейства комет с очень малыми перигелийными расстояниями. Это – семейство Крейца, до недавнего времени весьма малочисленное, а также открытые в 2002 г. кометные группы Марсдена, Крафта, Мейера.

Кометы семейства Крейца отличаются феноменально малыми перигелийными расстояниями $q < 0.01$ а. е. (порядка нескольких солнечных радиусов). Многие из комет проходят на расстоянии порядка 50–80 тыс. км от солнечной фотосферы. Недаром кометы семейства получили прозвище *sungrazers* – царапающие Солнце. Несмотря на высокие температуры и мощное излучение Солнца, часть комет выживает и проходит перигелий. Известны случаи падения комет на Солнце, сопровождавшиеся активными выбросами коронального вещества, происходящими спустя несколько десятков минут (часов) после падения. Исследования физики подобных процессов показывают, что после того, как комета входит в относительно плотную фотосферу, в кометном ядре происходит серия мощных делений и взрывов, вплоть до его полной дезинтеграции (Sekanina, 1982).

Большинство из этих комет достаточно слабые, около $+20^m$ абсолютной звездной величины. Поэтому массовые наблюдения их с Земли крайне осложнены. Кроме того, если комета становится видна с Земли, то на очень коротком отрезке орбитальной дуги, который она проходит с большой скоростью и исчезает за Солнцем. На-

блюдения комет этого семейства оптимально производить на орбитальных коронографах, так как они позволяют проследить движение комет почти до 0.5–1 R_{\odot} . Эта методика была подтверждена наблюдениями космических миссий SMM (Solar Maximum Mission) в начале 1980-х и SOLWIND в конце 1980-х. Поисковые наблюдения в ходе этих миссий увеличили количество открытых комет с 8 до 24. Но наиболее продуктивно эта программа реализовалась на SOHO (Solar and Heliospheric Observatory). Благодаря SOHO количество открытых комет семейства Крейца на данный период превышает 500. Тем не менее, информация о физических свойствах этих комет еще достаточно ограничена. Можно заметить, что размер их ядер не превышает 20 м (с применением сублимационной модели к космическим наблюдениям), а плотность кометного вещества достаточно мала и составляет порядка 0.5 г/см³ (Григорян и др., 1997).

Кометы групп Марсдена, Крафта, Мейера имеют большие, по сравнению с семейством Крейца, перигелийные расстояния, около 0.04–0.05 а.е. (8–10 R_{\odot}). Детальные исследования этих комет, особенно их физических свойств, находятся на начальной стадии.

НАБЛЮДЕНИЯ SOHO-КОМЕТ

SOHO является совместным проектом Европейского космического общества (ESA) и Национального американского аэрокосмического агентства (NASA) (сайты SOHO-команды, сборник “The first results of SOHO”). SOHO был доставлен космическим кораблем Atlas-IIAS 02.12.1995 г. на почти круговую орбиту около точки Лагранжа L1 (в системе Земля–Солнце), расположенную на расстоянии 0.01 а. е. от Земли, и на протяжении уже почти 7 лет ведет регулярные наблюдения.

Свое название Солнечной обсерватории SOHO полностью оправдывает. Его основные цели и задачи – исследование солнечной короны и поверхности, магнитных полей, солнечного ветра. SOHO является открытым для научной общественности проектом. Все наблюдения, выполненные на спутнике, предоставляются после прохождения первичной обработки.

Наблюдение короткоперигелийных комет стало возможным благодаря LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) – широкоугольному спектрометрическому коронографу – системе трех коронографов со взаимоперекрывающимися полями зрения: C1 (наблюдения 1.1–3 R_{\odot}), C2 (наблюдения 1.5–6 R_{\odot} , поле зрения порядка 2.91°), C3 (наблюдения 3.7–30 R_{\odot} , поле зрения порядка 15.56°). Главной задачей LASCO является мониторинг короны до 30 R_{\odot} , исследование активных образований в ней.

Наблюдения LASCO предоставляются корпорацией SOHO в Интернете: FITS-, GIF- и MPEG-файлы (качество в два раза хуже). Именно по ежедневным MPEG-фильмам проводятся поиски короткоперигелийных комет на снимках SOHO. В мае 1997 года появилось первое сообщение об обнаружении слабой кометы на снимках коронографов C2 и C3. Сегодня таким методом на изображениях, полученных SOHO, открыли более 540 объектов, 70% из которых – кометы семейства Крейца, а 11% – кометы групп Марсдена, Мейера и Крафта. Поиск короткоперигелийных комет на снимках SOHO стал делом любителей. Сформировалась целая поисковая команда. Поиск возможно проводить прямо в Интернете, где с опозданием в сутки появляются наблюдения спутниковой обсерватории. Охотники за кометами – J.D. Shanklin, D. Lewis, T. Lovejoy, M. Oates, M. Boschat, X. Leprette, M. Meuer и др. в значительной мере помогают профессиональным кометчикам, которые без регулярного анализа наблюдений со стороны любителей просто не справились бы с обработкой этого огромного материала (сайты MAC). Слабые кометы, которые не заметны на снимках глазом, могут быть найдены с помощью специального программного обеспечения. Сообщение об обнаруженной комете направляется в Центральное бюро астрономических телеграмм при Международном астрономическом союзе. Затем специалистами обрабатываются снимки с целью получения экваториальных SOHO-центрических положений новой кометы, и в завершение рассчитывается и по возможности улучшается орбита. Измерения снимков проводятся Biesecker и Hammer, обработка и редукция положений, расчет и коррекция орбит – Marsden. Предварительные положения и информацию об открывателе публикуют в Циркулярах Международного астрономического союза (IAUCs – International Astronomical Union Circulars), элементы орбит и SOHO-центрические положения комет в Циркулярах малых планет MAC (MPECs – Minor Planet Circulars). Оба вида циркуляров доступны в электронном виде на сайтах MAC.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ В РАСПРЕДЕЛЕНИЯХ ОРБИТАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРТОКОПЕРИГЕЛИЙНЫХ КОМЕТ

Элементы орбит комет семейства Крейца обладают большим сходством. Орбиты комет в пространстве как бы выстраиваются вдоль одной прямой линии, иными словами, имеют общую линию апсид (Sekanina, 1982). На рис. 1 представлены распределения орбитальных характеристик царапающих Солнце комет, полученных в результате анализа компилятивного каталога орбит комет семейства Крейца, составленного нами

по данным MPECs. Общее заключение, которое можно сделать на основе полученных распределений, – большая компактность, свидетельствующая в пользу гипотезы о происхождении семейства в результате распада гигантской кометы в 4 веке до нашей эры (Sekanina, 1967; 1982). Кометы отличаются обратным движением ($i \sim 144^\circ$), и плоскости их орбит отклонены на достаточно большой угол от плоскости эклиптики ($\sim 40^\circ$), что делает их неуловимыми для больших планет (Sekanina, 1967).

Хотя сегодня известно более 450 комет этого семейства, точность получения элементов орбит царапающих Солнце комет достаточно низка, так как кометы наблюдаются на узком перигелийном отрезке орбиты. Почти все орбиты комет Крейца являются параболическими, в частности только в приближении параболических орбит можно считать элементы для так называемых SOHO-комет, к которым относятся и кометы групп Марсдена, Крафта и Мейера.

Для анализа пространственного распределения орбит комет семейства Крейца удобно использовать эклиптические координаты точек перигелия. Их можно рассчитать по формулам, полученным из сферического треугольника:

$$\sin B = \sin \omega \sin i,$$

$$\cos B \cos(L - \Omega) = \cos \omega,$$

$$\cos B \sin(L - \Omega) = \sin \omega \cos i,$$

где L – эклиптическая долгота точки перигелия, B – эклиптическая широта точки перигелия, i – орбитальное наклонение, ω – аргумент перигелия, Ω – долгота восходящего узла.

Расчет долготы по упрощенной формуле $\tan(L - \Omega) = \tan \omega \cos i$ дает не всегда правильный результат.

Зависимость эклиптической долготы (L) от перигелийного расстояния (q) позволяет получить общую картину пространственного распределения орбит в зависимости от их размеров. Зависимость $L(q)$ (см. рис. 2) служит для выявления групп и подгрупп в пределах семейства Крейца. Наиболее известное деление семейства на две группы было проведено Marsden еще в 1967 г. по двум десяткам известных орбит sungrazers (Marsden, 1967; 1989). Это деление традиционно поддерживается и сегодня. Для наших задач рациональнее разбить семейство на две большие группы по эклиптической долготе перигелиев. Обозначим их I и II, каждую из групп I и II можно разделить на подгруппы вдоль прямых вида $L = a \cdot q + b$, где a и b – параметры подгрупп.

Выделяют пары или тройки комет с похожими элементами орбит и очень близко отстоящими во времени моментами прохождения перигелия. Предполагают, что эти кометы связаны между собой общим происхождением, например, вследствие дробления ядра более крупных комет при

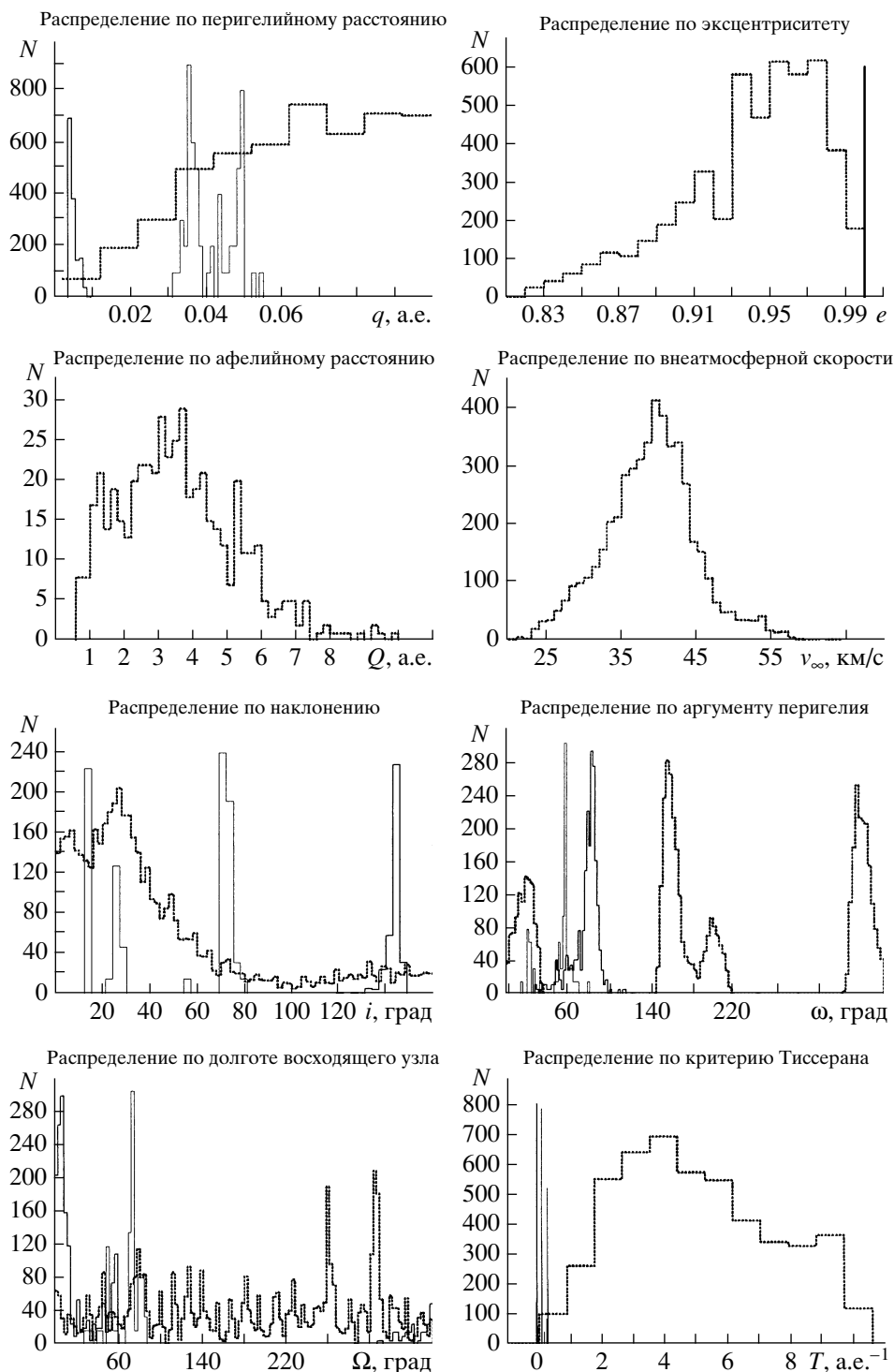


Рис. 1. Распределения орбитальных и кинематических характеристик короткоперигелийных комет и метеоров. Сплошные тонкие линии – распределения для комет групп Марсдена, Мейера, Крафта; сплошные толстые – распределения для комет семейства Крейца; пунктирные – для метеоров. N – число метеоров, число комет приведено к числу метеоров.

их прохождении перигелия. Некоторые из таких кометных пар и троек с течением времени превращаются в целые группы, например, так сформировались группы Марсдена, Мейера, Крафта.

В январе 2002 г. были открыты первые кометы группы Мейера (сегодня известно 34 кометы), в феврале – группы Марсдена (сегодня известно 14 комет), в марте – группы Крафта (сегодня из-

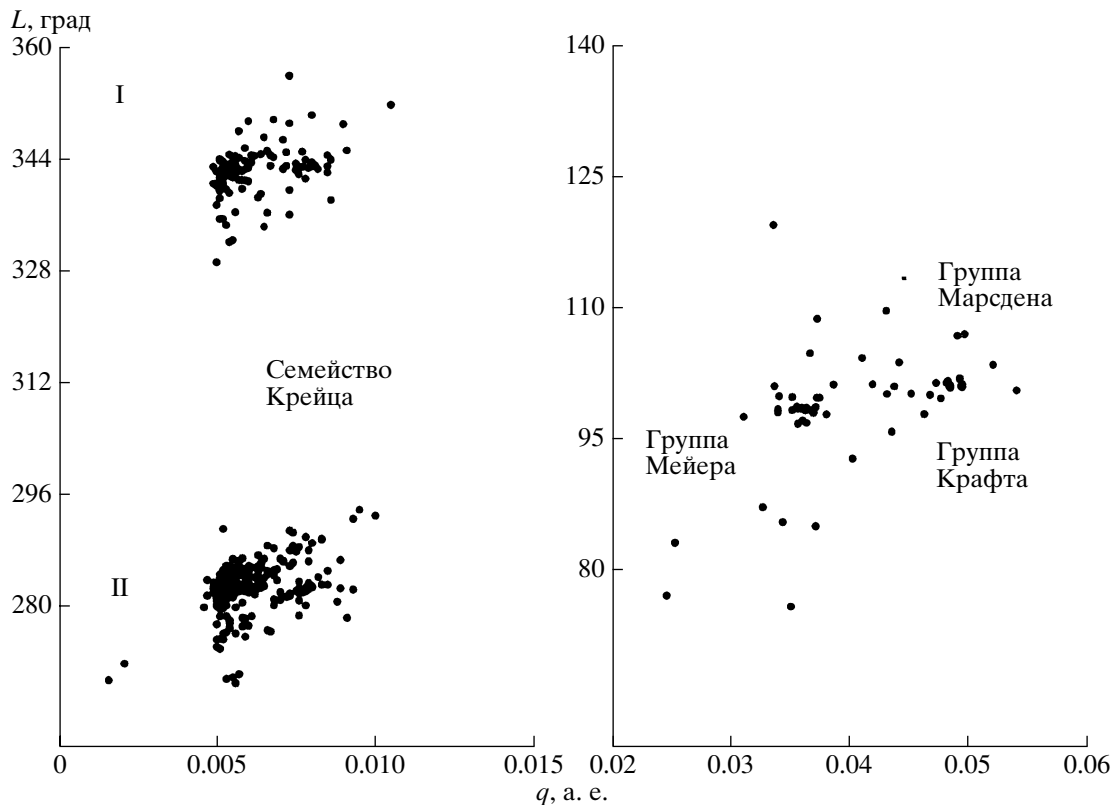


Рис. 2. Деление короткоперигелийных комет на группы по эклиптической долготе точек перигелия. Римские цифры – две основные группы для семейства Крейца.

вестно 14 комет). Элементы кометных орбит внутри каждой из трех групп имеют относительно небольшую дисперсию (см. рис. 1), что указывает на общность происхождения комет в пределах групп. Разделение на группы заметно на зависимости $L(q)$ (см. рис. 2). Близкое расположение точек на диаграмме $L(q)$ для комет групп Марсдена и Крафта указывает на их возможную генетическую связь. Кометы всех трех групп обладают прямым движением ($i \sim 73^\circ$ у группы Мейера, $\sim 26^\circ$ у группы Марсдена, $\sim 13^\circ$ у группы Крафта), в отличие от представительниц семейства Крейца. Кометная группа Марсдена имеет еще одно отличительное свойство: в июне, через месяц после прохождения перигелия кометы этой группы тесно сближаются с орбитой Земли. Возможно, что существуют принадлежащие этой группе мелкие кометы, которые не доступны наблюдению при приближении к Земле, и могут быть кандидатами на роль так называемых мини-комет. Этот вопрос требует отдельного рассмотрения.

ПОИСК СТАТИСТИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИЙ

Для выяснения вопроса о возможности наблюдения с Земли частиц, рожденных вблизи Солнца, мы провели анализ каталогов метеорных орбит.

Нами были проанализированы орбиты индивидуальных метеоров, полученные на протяжении около полувека (с 1957 до 2001 года). Среди имеющихся данных – фотографические, радиолокационные (около 70% всех данных); телевизионные и видеонаблюдения. Эти наблюдения позволяют покрыть достаточно широкий интервал масс метеорных частиц – от крупных болидов ($-2 \dots -1^m$) до совсем слабых радиолокационных метеоров ($+12^m$). Данные прошли тщательную первичную обработку и анализ в Мировом центре метеорных данных (Лунд, Швеция) (Linblad, 1988; Linblad и др., 1993). Каталоги содержат элементы орбит, моменты времени регистрации метеоров, внеатмосферные скорости, координаты радианта и для фотографических метеоров массу, некоторые атмосферные характеристики. Большая часть данных (радиолокационные наблюдения) имеет небольшую точность. Вследствие этого характерное условие, накладываемое на элементы орбит метеорных частиц и диктуемое необходимостью встречи метеороида с Землей:

$$0.983 \leq \frac{p}{1 \pm e \cos \omega} \leq 1.017, \quad (1)$$

где p – параметр метеорной орбиты, e – ее эксцентриситет, не выполняется приблизительно для 1% всех радиолокационных орбит. Тем не менее

большая статистическая значимость результатов, полученных при анализе радиолокационных наблюдений, обусловлена их огромным объемом (более 65 тыс. орбит). Отдельный интерес представляют фотографические и видеонаблюдения последних лет, полученные Голландским и Японским метеорными обществами (Dutch and Nippon Meteor Societies). В отличие от предыдущих, эти каталоги содержат большое количество гиперболических орбит.

При анализе метеорных данных нельзя забывать об их селективности. Геометрический фактор селекции выражен условием (1). Временная дискретность радионаблюдений, направленность антенны или фотографических камер, избирательность аппаратуры и т.д. также влияют на получаемые данные.

Для поиска в каталогах метеорных частиц, попавших на Землю из околосолнечной области, мы провели отбор метеорных орбит с малыми перигелийными расстояниями $q \leq 0.1$ а. е. На графиках (см. рис. 1) представлены полученные распределения. Все частицы обладают прямым движением, у большинства частиц плоскости орбит отстоят от плоскости эклиптики не более чем на 20° . Распределения по перигелийному расстоянию, аргументу перигелия, долготе восходящего узла значительно искажены селективностью. Распределение по критерию Тиссерана, достаточно пологое, позволяет сделать заключение о разнообразном происхождении метеоров. Сравнительный анализ полученных распределений для короткоперигелийных метеоров и комет семейства Крейца и групп Мейера, Марсдена, Крафта не обнаруживает большого сходства.

Аналогично, как и для короткоперигелийных комет, для всех отобранных метеоров мы построили зависимость $L(q)$. При анализе зависимости можно обнаружить несколько наклонных полос. Это полосы почти равной эклиптической долготы точек перигелия. В пространстве эти полосы представлены рядом сонаправленных орбит с широким спектром малых перигелийных расстояний. Если на эту диаграмму нанести соответствующие данные для комет семейства Крейца, то они расположатся компактными сгустками в верхнем левом углу диаграммы.

Никакой корреляции в распределении метеорных и кометных данных на диаграмме не наблюдается. Ситуация изменится, если отобразить на графике не эклиптическую долготу перигелиев метеорных орбит, а величину $L' = L + 180^\circ$ (см. рис. 3а). Мы как бы поворачиваем в пространстве метеорную орбиту на 180° относительно линии апсид. Новая долгота L' соответствует положению точки афелия метеорной орбиты, но без изменения эклиптической широты. Теперь одна из полос, образованных метеорными данными, продлеваются в область малых перигелийных рас-

стояний сгущениями точек, которые относятся к кометным орбитам I группы.

Если теперь перейти в координаты $B(L)$, где в качестве L для метеорных данных выступает долгота афелия L' , то можно увидеть на графике под сгущением, образованным точками кометных перигелиев I группы семейства Крейца, сгущение точек перигелиев метеорных орбит, которое на рис. 3а имело вид полосы (см. рис. 4а).

Значительная корреляция на диаграмме $L - q$ будет наблюдаться, если нанести на зависимость $L(q)$ для метеорных данных соответствующие значения L и q , относящиеся к орбитам комет групп Мейера, Марсдена и Крафта (см. рис. 3б). Для обнаружения корреляции нет необходимости оперировать величиной L' для метеорных орбит. На рис. 3б видно, что скопления точек, относящихся к кометным орбитам, придутся как раз на полосу метеорных данных. Справа на рис. 3б представлена диаграмма – распределение по долготе перигелия для орбит комет групп Мейера, Марсдена и Крафта и короткоперигелийных метеоров – из которой видно, что максимумы в распределении величин эклиптической долготы перигелия для орбит комет групп Марсдена, Крафта и метеоров совпадают с точностью до полуградуса. Найденная закономерность подтверждается рис. 4б, на котором отображено распределение положений перигелиев метеоров и комет в пространстве эклиптических координат. Видно, что скопление перигелиев орбит комет групп Марсдена и Крафта расположено весьма компактно и совпадает со сгустком точек перигелиев метеорных орбит. Положение перигелиев комет группы Мейера смещено на несколько градусов относительно метеорного скопления по долготе и более, чем на 40° по широте.

Исследуем метеороидный комплекс, обнаруживший корреляцию в распределении L, B, q с соответствующими кометными величинами. Для этого отделим метеорные орбиты этого комплекса с помощью зависимости $B(L)$. Долготы перигелиев орбит комплекса заключены в пределах от 97° до 110° , широты – от $+7^\circ$ до $+18^\circ$. Подвергнем подробному статистическому анализу орбитальные параметры метеоров, принадлежащих комплексу.

Метеоры данного комплекса наблюдаются в атмосфере Земли достаточно компактно (см. рис. 5), в июне-июле месяце. Наблюдения в основном были получены в 1969 году в ходе Советской экваториальной метеорной экспедиции (1968–1970 гг.). Южные широты и активная программа наблюдений создали благоприятные условия для обнаружения этих метеоров. Основная часть комплекса имеет период обращения порядка трех лет. Большинство распределений достаточно компактно, что указывает на определенную родственность метеороидов (настораживает достаточно широкий диапазон значений критерия Тиссерана и ква-

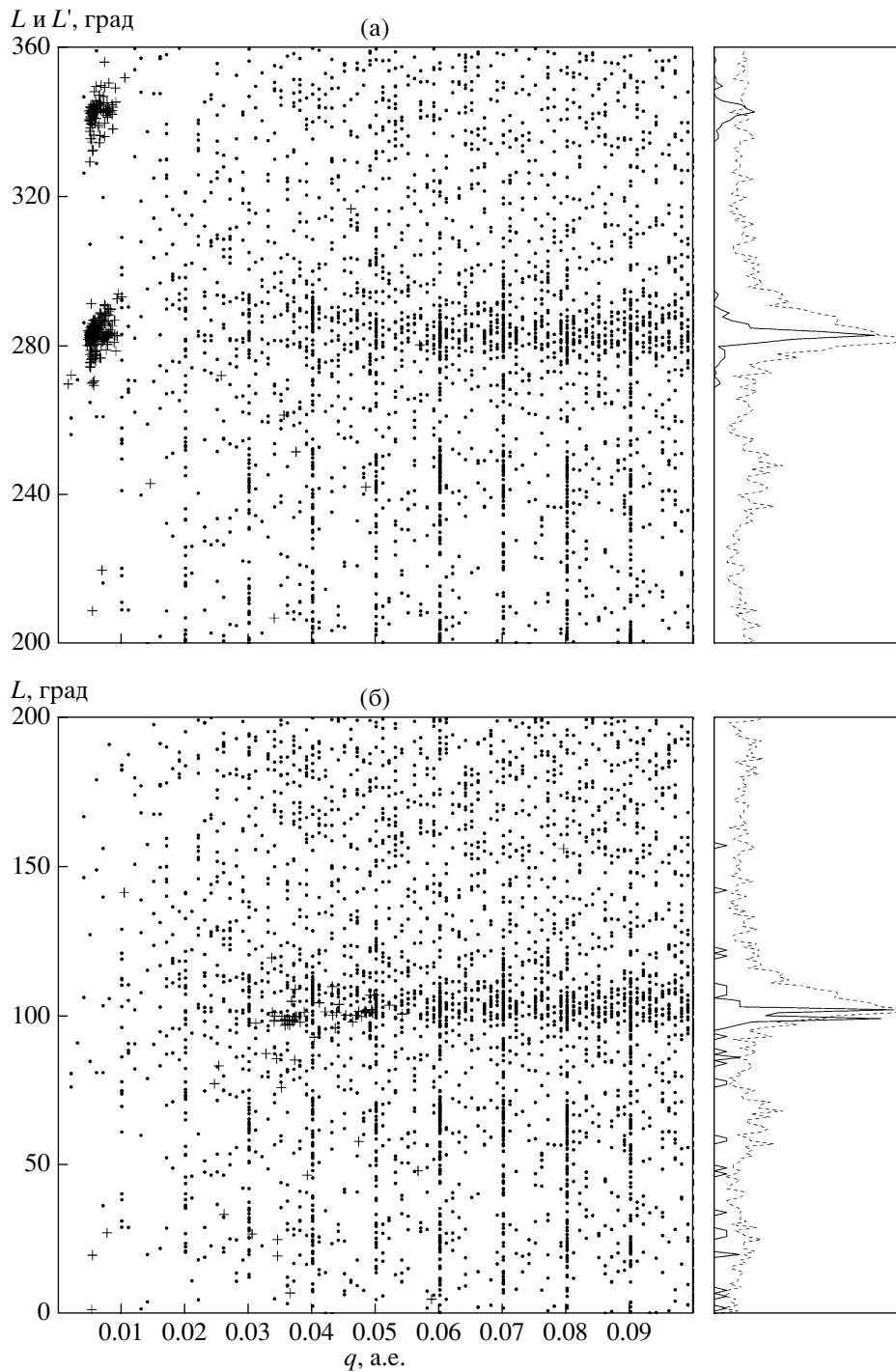


Рис. 3. Обнаруженная статистическая корреляция в распределениях метеорных и кометных данных: (а) – зависимость $L(q)$ для комет семейства Крейца (крестики) и $L'(q)$ для метеоров (точки) соответственно отображена на основном рисунке, вставка справа – распределение по L для комет семейства Крейца (сплошная линия) и L' для метеорных данных (пунктир); (б) – зависимость $L(q)$ для комет групп Марсдена, Мейера, Крафта (крестики) и метеоров (точки) отображена на основном рисунке, вставка справа – распределение по L для комет групп Марсдена, Мейера, Крафта (сплошная линия) и метеорных данных (пунктир).

зистационарных параметров $\mu = \sqrt{q(1+e)} \cos i$ и $\nu = e^2(0.4 - \sin^2 \omega \sin^2 i)$ – указателей родственности), все метеоры имеют сильно вытянутые орбиты и прямое движение.

Распределения аргумента перигелия и долготы восходящего узла и исследование положений индивидуальных радиантов (см. рис. 6) показывают, что комплекс распадается на два потока-близ-

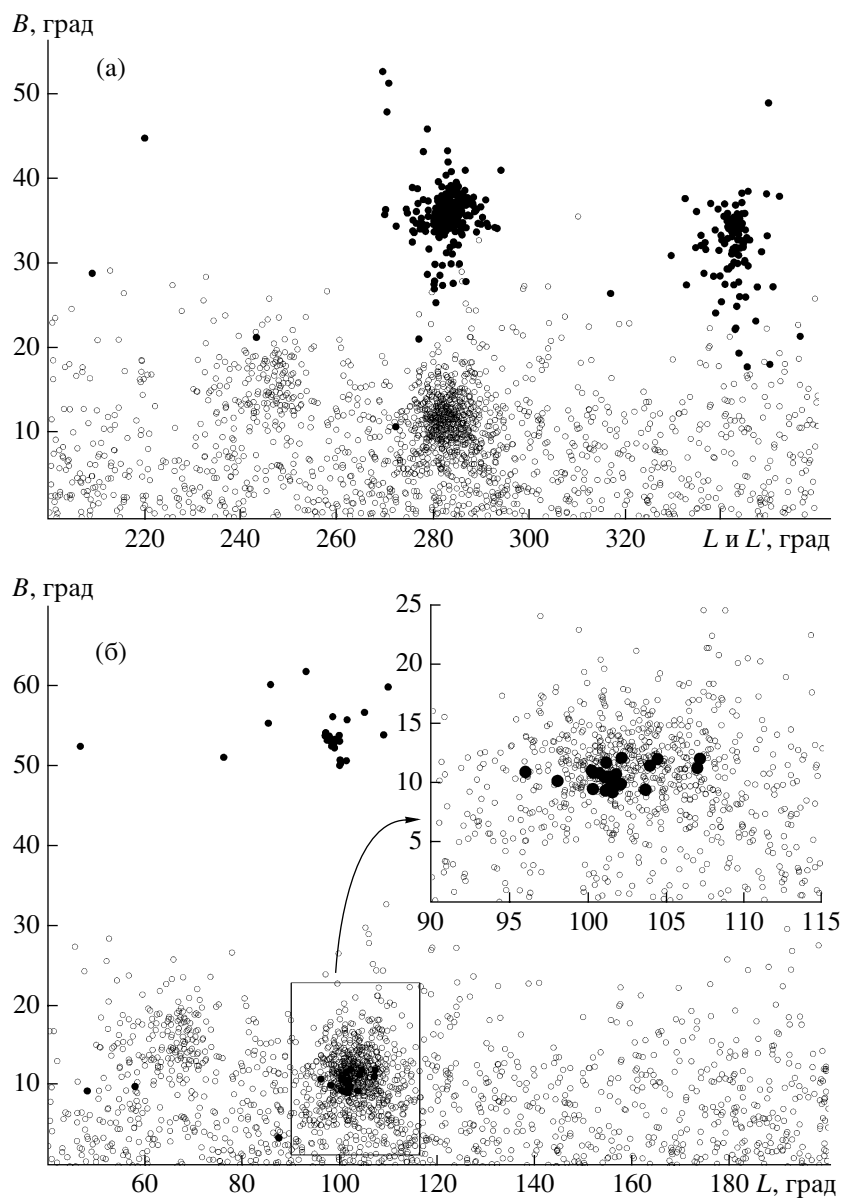


Рис. 4. Обнаруженная статистическая корреляция в распределениях метеорных и кометных данных: (а) – зависимость $B(L)$ для комет семейства Крейца (точки) и $B(L)$ для метеоров (кружки) соответственно; (б) – зависимость $B(L)$ для комет групп Марседна, Мейера, Крафта (точки) и метеоров (кружки) отображена на основном рисунке, в верхнем правом углу – увеличенная область из основного рисунка для групп Марседна и Крафта.

неца в атмосфере Земли (с радиантами, примерно симметричными относительно эклиптики). После проведенного поиска средних радиантов этих потоков в каталогах радиантов, например, в работе (Кашцев и др., 1967), мы сопоставили поток №1 (см. на рис.6) с Июньскими, или Дневными, Ариетидами ($\alpha = 43^\circ$, $\delta = +23^\circ$, период действия 04.05–20.06). Метеоры потока № 2 принадлежат к Южным δ -Акваридам ($\alpha = 341^\circ$, $\delta = -16^\circ$, период действия 14.07–14.08). Поток Дневных Ариетид наблюдается только радиолокационным методом, а Южных δ -Акварид – также фотографическим, видео-, телевизионным методами.

Еще раз проанализируем распределения по орбитальным параметрам метеорных частиц, принадлежащих комплексу. Сопоставим эти распределения с соответствующими для комет групп Мейера, Марседна и Крафта. Ранее мы уже отмечали, что распределения по элементам орбит и критерию Тиссерана для метеоров и комет семейства Крейца не отличаются особым сходством, и прежде всего, большое отличие характерно для наклона и аргумента перигелия. Проанализируем теперь аналогичные распределения для комет групп Мейера, Марседна и Крафта. Из рис. 1 и 5 следует, что наблюдается почти полное совпа-

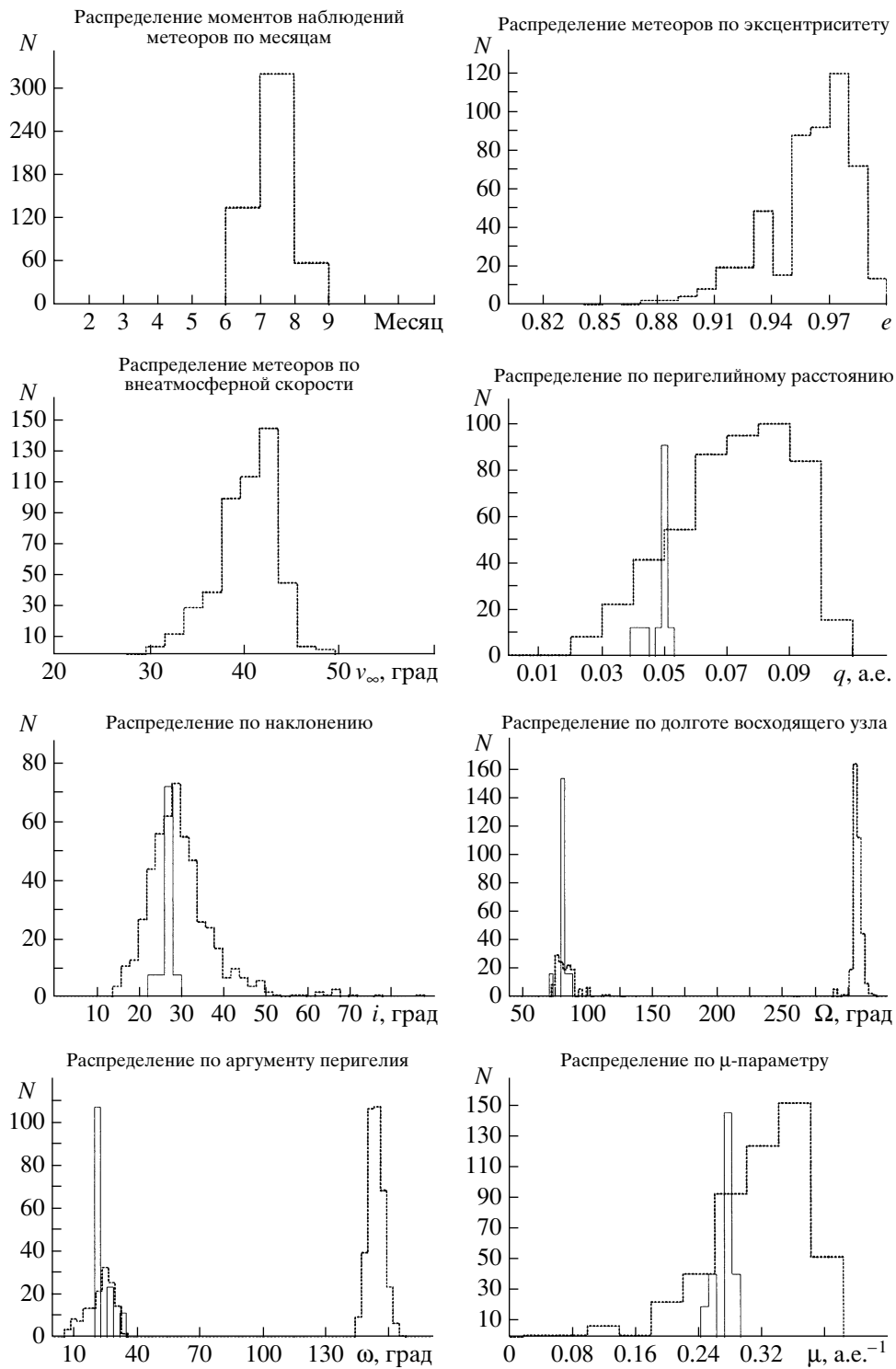


Рис. 5. Распределения орбитальных и кинематических характеристик для метеорного комплекса (пунктирные линии) и кометной группы Марсдена (сплошные линии). N – число метеоров, число комет приведено к числу метеоров.

дение между всеми распределениями, построенными для кометной группы Марсдена и части метеорного комплекса, ответственного за поток Дневных Ариетид. Для групп Мейера и Крафта

заметной корреляции с метеорными распределениями не наблюдается.

Заметим, что анализ зависимостей $L(q)$ и $B(L)$, а также распределений по орбитальным и дина-

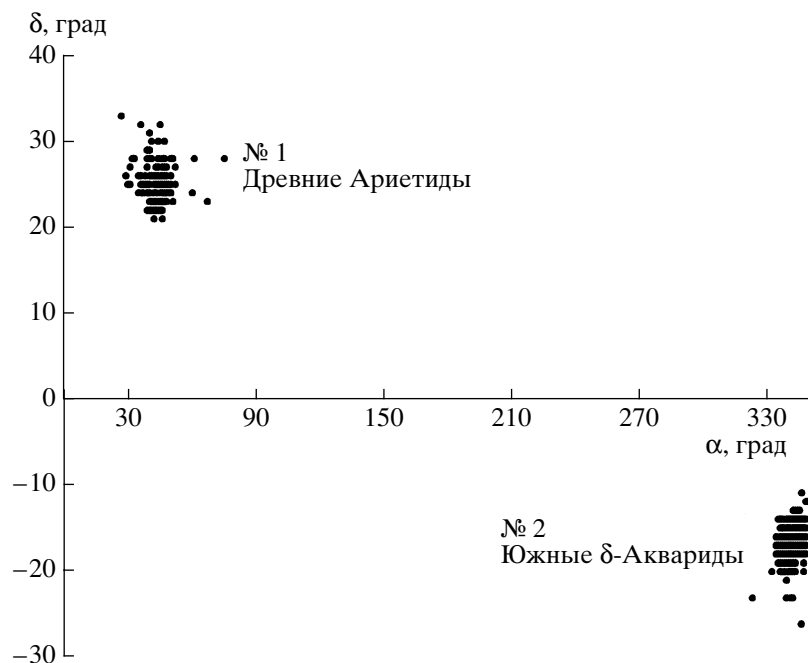


Рис. 6. Индивидуальные радианты метеоров комплекса. Арабскими цифрами обозначены два потока-близнеца.

мическим параметрам для всех долго- и короткопериодических комет с $q > 0.1$ а. е. не показывает никаких корреляций с метеорными данными. Это же касается известных комет с малыми перигелийными расстояниями, таких как 1680 года, 1689, 1816, 1954 II, не принадлежащих к семейству Крейца, группам Мейера, Марсдена и Крафта.

Как интерпретировать полученные зависимости?

Возможны две альтернативные гипотезы.

С одной стороны, можно предположить, что какая-то часть исследуемого комплекса является непосредственно генетически связанной с кометами семейства Крейца. Учитывая малые расстояния, на которые кометы подходят к Солнцу, и физические условия, можно предположить, что коэффициент продуктивности пылеобразования у этих комет гигантский. С крупными кометами этого семейства ассоциируется ряд метеорных потоков (с кометой 1882 II, например, около 6 потоков (Крамер, 1963)). Необязательно приписывать обнаруженный комплекс какой-то определенной комете, скорее всего это результат пыления нескольких комет (а то и десятков), прошедших через фильтр солнечного давления, сублимации, гравитационного притяжения и селективности земных наблюдений. Если это так, то данный комплекс – ничтожная доля от родившегося когда-то вещества вблизи Солнца из ядер комет-самоубийц.

Средние плоскости орбит метеорных пылинок и комет семейства Крейца пересекаются под достаточно большим углом – порядка 20° . Распреде-

ления элементов орбит, критерия Тиссерана и квазистационарных параметров, применение к полученным объектам эмпирических критериев (D -критерия) не позволяют сделать заключения о генетической связи. Обычно принято считать, что орбиты метеорных роев и их родительских тел должны быть весьма близки, а скорости выброса вещества из кометного ядра не должны превышать 100 м/с (Куликова, 1975).

Эта эмпирическая закономерность хороша для удаленных от Солнца перигелиев комет. А если рождение роя происходит в условиях, типичных для комет семейства Крейца, которые в перигелии достигают скоростей около 500 км/с? Инициатором выброса из ядра может стать столкновение с микрочастицами в околосолнечной области, импульс, переданный активным явлением на Солнце и т.д. На таких скоростях энергия выброса столь велика, что отличие орбиты нового молодого роя от родительской может быть весьма существенным.

Создание модели динамики выброшенного из кометного ядра вещества на расстоянии нескольких радиусов Солнца – задача достаточно сложная. В ряде работ встречаются подобного рода численные модели (Krivov и др., 1998), результаты расчетов по которым очень сильно отличаются друг от друга в зависимости от принятых параметров частиц (масса, размер, отражательная способность и т.д.). Поэтому численные оценки для подтверждения гипотезы, без подробной информации по физике комет семейства Крейца, бессмысленны.

С другой стороны, можно привести альтернативную гипотезу, которая объяснила бы полученные статистические результаты. Возможно, на метеорные и кометные орбиты такого типа влияют эффекты (их природу предстоит выяснить), которые выстраивают такого типа орбиты в определенных направлениях (вдоль линий одинаковых эклиптических долгот). Этим эффектом не могут быть ни сила Лоренца, ни релятивистский эффект прокручивания линии апсид, ни вековые негравитационные эффекты типа Пойнтинга–Робертсона или Яркковского–Радзиевского.

Подобного рода заключения можно применить к кометной группе Мейера. Что касается кометной группы Марсдена, то наблюдаемое сходство в распределениях элементов орбит может быть объяснено генетической связью между ро-ем Ариетид и кометами группы Марсдена. Применение эмпирических критериев, основанных на анализе элементов орбит, например, D -критерия, подтверждает этот вывод. На рис. 7 представлен результат применения метода Олсона–Стила (Olson–Steel, 1988) к орбитам частиц метеорного роя Ариетид и средней орбите группы Марсдена ($\langle q \rangle = 0.048$ а. е., $\langle e \rangle = 1$, $\langle i \rangle = 26^\circ$, $\langle \omega \rangle = 24^\circ$, $\langle \Omega \rangle = 82^\circ$). Мы не будем в подробностях описывать метод Олсона–Стила, отметим лишь, что его суть заключается в следующем. Долгота восходящего узла (Ω) орбиты кометы, подозреваемой в генетической связи с метеорами роя, принимает последовательно ряд значений от 0° до 360° с выбранным шагом. Для каждого значения Ω кометной орбиты проводится поиск количества метеоров (N) из выборки метеоров, для которых величина D -критерия ниже пороговой (до 0.3). Если при значении Ω , совпадающей с реальной долготой восходящего узла кометной орбиты, зависимость $N(\Omega)$ имеет явно выраженный локальный максимум, то данный метеорный рой и комету можно считать генетически связанными. В нашем случае мы предполагали пороговое значение D -критерия весьма низким, вплоть до 0.1, и все равно получали картину, подобную изображенной на рис. 7. Совпадение в положении максимума зависимости $N(\Omega)$ с $\langle \Omega \rangle$ для группы Марсдена с точностью до полуградуса можно трактовать, как явное указание на родственность объектов.

Явное совпадение в распределениях орбитальных элементов может служить указанием не только на родственность, но также на относительную молодость метеорного роя Ариетид. Для большинства известных метеорных роев и их прародительниц-комет такого совпадения в элементах орбит не наблюдается, что связано, в первую очередь, с возрастом роя. Обратим еще раз внимание, что область, где в перигелии движутся пылевые частицы такого метеорного роя и возможные кометы-прародительницы, отличается экстремальными условиями, связанными, как мы

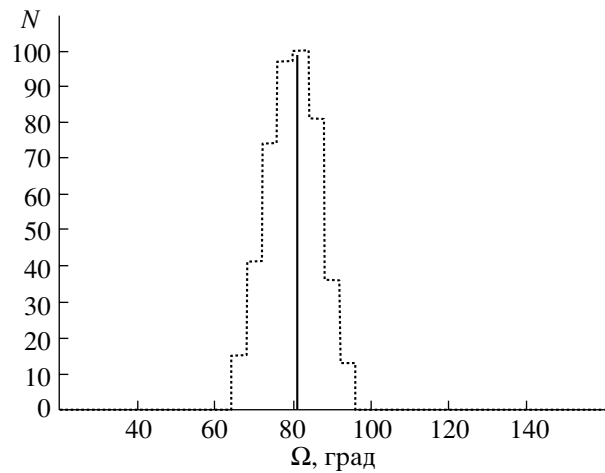


Рис. 7. Зависимость $N(\Omega)$ орбитальных элементов метеоров комплекса, принадлежащих к Дневным Ариетидам, полученная по методу Олсона–Стила. Вертикальная линия указывает положение долготы восходящего узла для средней орбитальной плоскости кометной группы Марсдена.

уже упоминали, с близостью Солнца. Тем более удивительно, что метеорный рой сохранил память о родительском теле (телах). Что касается группы Крафта, то с нашей точки зрения, нет необходимости подвергать параметры комет этой группы отдельному анализу, так как, скорее всего, эта группа является ветвью группы Марсдена, отделившейся в результате какого-то катаклизма.

Благодаря тому, что планетные возмущения на протяжении длительного времени почти не искажают орбит комет семейства Крейца, мы попробовали поискать дополнительные аргументы в пользу одной из гипотез и проанализировали распределение узлов метеорных орбит в средней орбитальной плоскости комет I группы ($\langle i \rangle = 144^\circ$, $\langle \omega \rangle = 67^\circ$, $\langle \Omega \rangle = 46^\circ$). Координаты узлов метеорных орбит рассчитываются по формулам:

$$A = R_x^0 P_x + R_y^0 P_y + R_z^0 P_z,$$

$$B = R_x^0 Q_x + R_y^0 Q_y + R_z^0 Q_z,$$

$$\cos v_* = \frac{B}{\sqrt{B^2 + A^2}}, \quad \sin v_* = \frac{-A}{\sqrt{B^2 + A^2}},$$

где R_x^0 , R_y^0 , R_z^0 — направляющие косинусы кометной орбиты, P_x , P_y , P_z , Q_x , Q_y , Q_z — направляющие косинусы метеорной орбиты, v_* — истинная аномалия одного из узлов, аномалия второго узла отличается на 180° .

На рис. 8а приведен график положений узлов метеорных орбит с плоскостью кометной орбиты в орбитальных координатах, из которого видно, что в скоплении узлов метеорных орбит, распо-

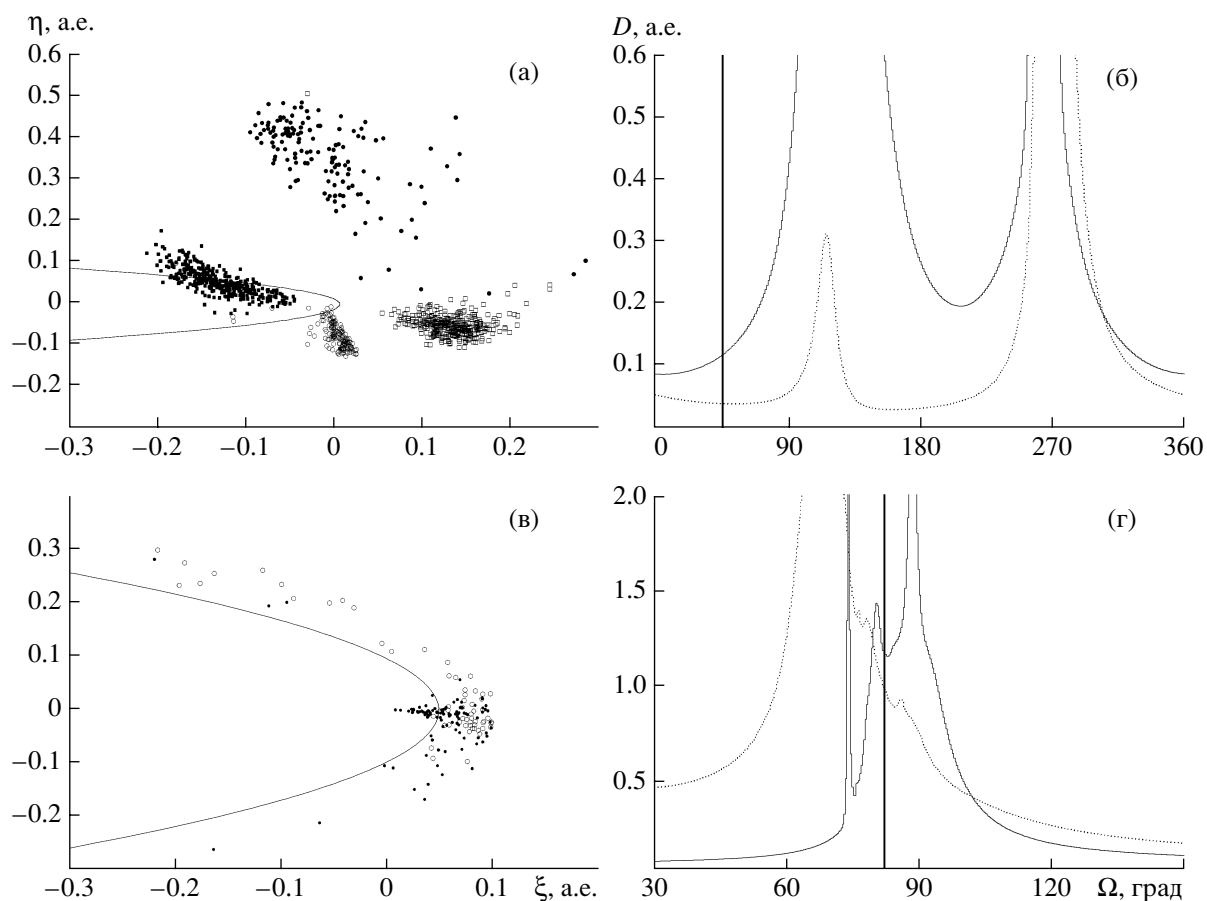


Рис. 8. Иллюстрации небесномеханических вычислений, полученных в результате анализа метеорного комплекса и комет: (а) – узлы метеорных орбит со средней орбитальной плоскостью кометной группы I семейства Крейца. Точки и кружки – восходящие и нисходящие узлы части комплекса, которая в атмосфере Земли образует поток Дневных Ариетид; сплошные и полые квадратики – восходящие и нисходящие узлы части комплекса, которая в атмосфере Земли образует поток Южных δ -Акварид. Сплошная линия – средняя орбита кометной группы I семейства Крейца; (б) – тест-функция для средней орбитальной плоскости кометной группы I семейства Крейца и метеоров комплекса, принадлежащих к Дневным Ариетидам. Сплошная линия – для восходящих, пунктир – для нисходящих узлов, вертикальная линия указывает положение долготы восходящего узла для средней орбитальной плоскости кометной группы I семейства Крейца; (в) – узлы метеорных орбит со средней орбитальной плоскостью кометной группы Марсдена. Точки и кружки – восходящие и нисходящие узлы орбит части комплекса, которая в атмосфере Земли образует поток Дневных Ариетид. Сплошная линия – средняя орбита кометной группы I семейства Крейца; (г) – то же, что на рис. б) для кометной группы Марсдена.

ложенных ближе к средней кометной орбите, дисперсия ниже, чем в отстоящих на 180° . Достаточно компактное расположение узлов метеорных орбит и их близость к кометной орбите является необходимым условием существования генетической связи между кометой и метеорами. Таким образом, оно выполняется для метеорного комплекса и I группы семейства Крейца.

На рис. 8в приведен аналогичный график для узлов орбит метеорного комплекса, относящихся к Дневным Ариетидам, со средней плоскостью кометной группы Марсдена. Заметно, что восходящие узлы расположены весьма компактно. Положения узлов метеорных частиц, относящихся к Южным δ -Акваридам, не приведены на графике, так как рассеяны широкой полосой и значитель-

но удалены от средней кометной орбиты. Таким образом, график 8в является подтверждением к выводу о достаточно уверенной генетической связи Дневные Ариетиды – группа Марсдена.

Проверим следующего рода закономерность. Если когда-то существовала область на кометной орбите, где возник рой, то распределение метеорных узлов должно сохранить память о месте рождения. Поэтому, если варьировать положение кометной орбиты в пространстве, дисперсия в расположении метеорных узлов должна быть минимальной для орбиты кометы-“родоначальницы”. Достаточно изменять один из угловых элементов кометной орбиты. В качестве углового элемента мы выбрали долготу восходящего узла, как параметр метеорных орбит, наименее искаженный

селекцией. За меру компактности распределения метеорных узлов в кометной плоскости мы приняли среднеквадратичное отклонение (D):

$$D = \sqrt{\frac{\sum [(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2]}{N}}, \quad (2)$$

$$X = \frac{\sum x_i}{N}, \quad Y = \frac{\sum y_i}{N},$$

где x_i, y_i – координаты узлов в кометной плоскости, N – число метеоров комплекса.

Применим изложенные соображения к средней плоскости орбит комет I группы семейства Крейца и обнаруженному метеорному комплексу. Для каждого значения Ω плоскости кометной орбиты от 0° до 360° с шагом в 5° мы получаем свое значение D , рассчитанного по формулам (2). Зависимость $D(\Omega)$ является своего рода тест-функцией, которая подлежит дальнейшему анализу. Из рис. 7б видно, что при значении долготы, присущем кометной орбите, на диаграмме наблюдается достаточно пологий локальный минимум. Тот факт, что минимум не является абсолютным, не должен смущать: это связано с определенной симметрией в пространстве и наблюдается даже для весьма уверенно генетически связанных роев и комет. Наличие минимума на тестовой зависимости $D(\Omega)$ при значении Ω кометной орбиты, присущей средней орбите группы I семейства Крейца, указывает на выполнение еще одного необходимого условия для установления факта родственности “Метеорный комплекс Дневных Ариетид и Южных δ -Акварид – группа I семейства Крейца”.

Результат применения этого же метода к Дневным Ариетидам и кометам группы Марседна (рис. 8г) подтверждает выше установленное заключение о родственности этих двух объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Открытие новых комет с помощью космических миссий типа SOHO влечет за собой пересмотр многих проблем метеорной астрономии, в частности, проблемы возникновения метеорных роев. Вклад в межпланетное пылевое облако этих комет значителен, так как обнаруженные кометы, хотя и имеют малые размеры, весьма многочисленны, и условия вблизи Солнца способствуют активному пылеобразованию. Можно предполагать, что в настоящее время открыта малая доля короткоперигелийных комет, общее число которых оценивается тысячами.

Итак, можно заключить в результате проведенного анализа, что обнаруженный метеорный комплекс может быть как следствием непосредственного пыления короткоперигелийных комет

при их движении вблизи Солнца, либо является следствием неизвестного механизма, одинаково влияющего как на кометные, так и на метеорные орбиты. Обе гипотезы равносильны для комет группы I семейства Крейца. Проведенный анализ орбитальных параметров позволяет утверждать, что необходимые условия для возможной генетической связи Метеорный комплекс Дневных Ариетид и Южных δ -Акварид – группа I семейства Крейца выполняются.

Для группы Марседна можно с большой уверенностью утверждать, что имеется генетическая связь между кометами этой группы и той частью метеорного комплекса, которая в атмосфере Земли наблюдается в виде потока Дневных Ариетид. Это заключение подтверждено всеми статистическими и небесномеханическими исследованиями, которые можно провести на сегодняшний день при наличии приближенной и ограниченной информации о кометах этой группы.

Для дальнейших заключений требуется проводить регулярные радиолокационные наблюдения в июне–июле в областях радиации метеорных потоков Дневных Ариетид и Южных δ -Акварид. Другое направление исследований – физика короткоперигелийных комет.

Принесим благодарности всем специалистам, принявшим участие в обработке наблюдений SOHO/LASCO, и отдельно Brian Marsden за ценные советы при обработке данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Григорян С.С., Ибодов Ф.С., Ибодов С. Об эволюции комет вблизи Солнца: кометы семейства Крейца // Доклады РАН. 1997. Т. 354. № 2. С. 187–189.
- Волощук Ю.И., Кащеев Б.Л., Кручиненко В.Г. Метеоры и метеорное вещество / Ред. Крамер Е.Н. Киев: Наук. Думка, 1989. 292 с.
- Кащеев Б.Л., Лебединец В.Н., Лагутин М.Ф. Метеорные явления в атмосфере Земли. М.: Наука, 1967. 265 с.
- Крамер Е.Н. Кометные радианты и связь метеорных потоков с кометами // Изв. Одесск. астрон. obs. 1963. № 3. С. 163–247.
- Куликова Н.В. К теории образования метеорных роев // Астрон. вестн. 1975. Т. 9. № 2. С. 16–21.
- Лебединец В.Н., Корпусов В.Н., Соснова А.И. Потоки радиометеоров // Тр. ИЭМ. 1972. № 1(34). С. 88–118.
- Левин Б.Ю. Физическая теория метеоров и метеорного вещества в Солнечной системе. М.: изд-во АН СССР, 1956. 293 с.
- c.http://lasco-www.nrl.navy.mil
http://sohowww.nascom.nasa.gov
http://sungrazer.nascom.nasa.gov
- Krivov A., Kimura H., Mann I. Dynamics of the dust near the Sun // Icarus. 1998. V. 134. P. 311–327.
- Linblad B.A. The IAU Meteor Data Center in Lund, at Second Globmet Symp. Kazan. USSR. 1988. P. 1–11.

- Lindblad B.A., Steel D.I.* Meteoroid orbits available from the IAU Meteor Data Center / Ed. Milani A., Di Martino M., Cellino A. Proc. of the 160th Intern. Astron. Union. Belgirate. Italy. June 14–18. 1993 // Asteroids, comets, meteors. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. P. 497–501.
- Ловелл Б.* Метеорная астрономия. М.: Физматлит, 1958. 452 с.
- Marsden B. G.* The sungrazing comet group // Astron. J. 1967. V. 72. P. 1170 – 1183.
- Marsden B. G.* The sungrazing comet group. II // Astron. J. 1989. V. 98. P. 2306–2321.
- Olsson-Steel D. I.* A radar orbit search for meteors from comet Lexell // Astron. and Astrophys. 1988. V. 195. № 1–2. P. 338–344.
- Sekanina Zd.* On the origin of the Kreutz family of sungrazing comets // Bull. Of the Astron. Inst. Czechoslov. 1967. V. 18. № 3. P. 198–199.
- Sekanina Zd.* The path and surviving tail of a comet that fell into the Sun // Astron. J. 1982. V. 87. № 7. P. 1059–1072.
- The first results from SOHO / Eds Fleck B., Svestka Z. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1997. 820 p.