

УДК 523.4

О некоторых свойствах семейств астероидов

Л. Ф. Голубева, Д. И. Шестопалов

Из семейств астероидов, классифицированных Козаи, отобраны наиболее полно представленные в TRIAD. Выполнен сравнительный анализ оптических характеристик, распределений по размерам и угловым скоростям вращения, кинематических свойств астероидов, образующих семейства. На основе наблюдательной информации сделана попытка описания эволюции семейств астероидов.

ON SOME PROPERTIES OF ASTEROIDS' FAMILIES, by Golubeva L. F., Shestopalov D. I. — The authors choose those of asteroids classified by Kozai which are contained in the TRIAD file almost completely. A comparative analysis is carried out of the distribution by their optical types, angular velocities and kinematic properties of asteroids forming families. On the basis of observational data an attempt is made to present some aspects of the evolution of asteroids families.

Введение. История открытия семейств малых планет, эволюция взглядов на их происхождение подробно освещены в ряде обзоров [4, 6, 7, 8]. В работе [11] выполнен сравнительный анализ нескольких независимых классификаций астероидов с точки зрения принадлежности их к тому или иному семейству. В отношении численности семейств или их количества результаты различных классификаций весьма разноречивы, основной причиной чего может быть разнообразие критериев отбора объектов по близости их координат в многомерном пространстве собственных элементов.

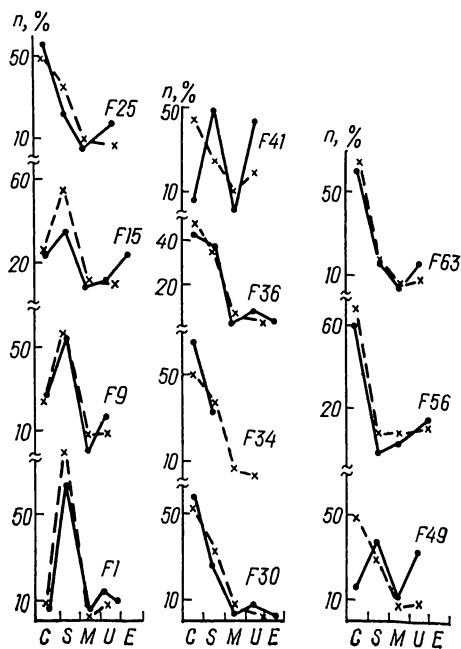
Относительно происхождения семейств существуют несколько мнений. Классическая точка зрения, высказанная в первых работах Хираямы (см. [4]), определяет семейства, как не успевшие рассеяться под действием планетных возмущений продукты дробления одного или нескольких относительно крупных тел при столкновениях. В интерпретации Альвена семейства астероидов — это последняя стадия аккумуляции вещества струйных потоков [1]. Браун и Рабе полагали, что в результате сближения разнородных орбит под действием гравитационных возмущений образовались устойчивые конфигурации, которые наблюдаются сейчас в виде семейств [10, 20].

Кажется маловероятным, что вопрос о происхождении семейств может быть решен только методами небесной механики без привлечения информации о физических свойствах их членов. Несмотря на существенный прогресс в астрофизических исследованиях пояса астероидов, наблюдательных сведений для решения проблемы явно не хватает. Настоящая работа преследует более скромную цель — попытаться представить себе некоторые аспекты физической эволюции семейств, опираясь на данные о физических свойствах астероидов, собранных в [9]. Постановка задачи в таком аспекте интересна сама по себе, если иметь в виду определенную аналогию с теми процессами, которые происходили на ранней (планетезимальной) стадии образования зародышей планет.

Мы использовали классификацию и обозначения Козаи [19] и ограничились рассмотрением только тех семейств, существование которых неоднократно подтверждалось независимыми исследованиями. Из их числа были отобраны те, которые наиболее полно представлены в Tucson revised index of asteroid data (TRIAD) [9].

Оптические свойства. Распределения астероидов по оптическим классам в каждом из рассматриваемых семейств и аналогичные данные для астероидов окрестности семейства, согласно работе [14], представлены

на рис. 1. За исключением нескольких случаев, имеет место удивительное совпадение распределений семейство — фон. Основная трудность, возникающая при анализе рис. 1, заключается в плохо контролируемых эффектах селекции. Число астероидов с известным оптическим типом нигде не превышает половины объектов, собранных в семейства. Если предположить, что для самых далеких семейств Eos и Koronis (большая полуось орбиты ~ 3 а. е.) все члены, не прошедшие классификации, принадлежат к типу C, то новая кривая практически полностью повторяет распределение фона. Аналогичное допущение для семейств, расположенных в середине пояса или ближе к его внутренним областям, менее правдоподобно и, по-видимому, неприемлемо. Окончательный вывод зависит от обилия наблюдательного материала. И все же в качестве рабочей можно выдвинуть гипотезу о тождественности распределений по оптическим типам астероидов семейств и фона. Во-первых, не наблюдается корреляция между долей планет в семействе, прошедших оптическую классификацию, и степенью рас-



распределения по оптическим типам астероидов, образующих семейства (непрерывная линия) и астероидов окрестности семейства (штриховая линия)

Рис. 1. Распределение по оптическим типам астероидов, образующих семейства (непрерывная линия) и астероидов окрестности семейства (штриховая линия)

гласования кривых семейство — фон. Во-вторых, попытка учета селекционных ошибок скорее приводит распределение к фоновому, а не наоборот. Наконец, в ряде случаев F15, F25, F41, F49 оптический тип крупнейшего тела не принадлежит к оптическому типу наиболее многочисленных членов в семействе (иными словами, оно может не являться родителем семейства).

Распределение по размерам. Соответствующие гистограммы даны на рис. 2, а частотные индексы α (т. е. показатель обратного степенного закона распределения по диаметрам D) и их ошибки $\Delta\alpha$, рассчитанные методом наименьших квадратов по этим данным, — в таблице. В тех случаях, когда диаметры не были известны, они вычислялись по абсолютной звездной величине астероида и его вероятному альбедо. Последний параметр был рассчитан по формуле $\rho = \sum m_i r_i$, где весовые множители m_i , показывающие долю объектов данного оптического типа на данном расстоянии от Солнца, взяты из [14]; r_i — среднее альбедо в i -м оптическом классе [8]. Для большинства гистограмм при $D \leq 20$ км наблюдается «завал», который, вероятно, вызван влиянием селекции. Эти участки распределений мы не учитывали при расчете α . В таблице приведены также максимальные значения α_{\max} , которые соответствуют максимальному наклону зависимости $\lg n - \lg D$ (n — число тел в единичном интервале диаметров). α_{\max} всегда можно найти по графикам, исключая те участки диаграмм, где наиболее вероятны селекционные пропуски. Как видно, α_{\max} не превышает в большинстве случаев верхнего предела вероятного интервала α , задаваемого его ошибкой. Частотные индексы изменяются в пределах от ~ 1 до ~ 3 соответственно для семейств F34 Alexandra, F49 Eos, F41 Koronis и, вместе с тем, они меньше, чем величина ~ 3.4 , найденная в [12] для пояса астероидов

в целом. Только для F1 Flora наибольшее значение α близко к этой оценке.

В работе [12] высказана гипотеза, согласно которой уменьшение значения α может происходить из-за постепенного распада семейства под действием гравитационных возмущений. Таким образом, чем меньше значение α , тем больше возраст семейств. К этой гипотезе мы

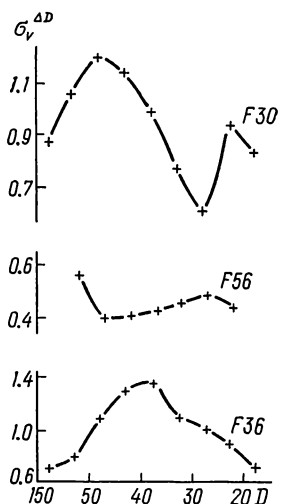
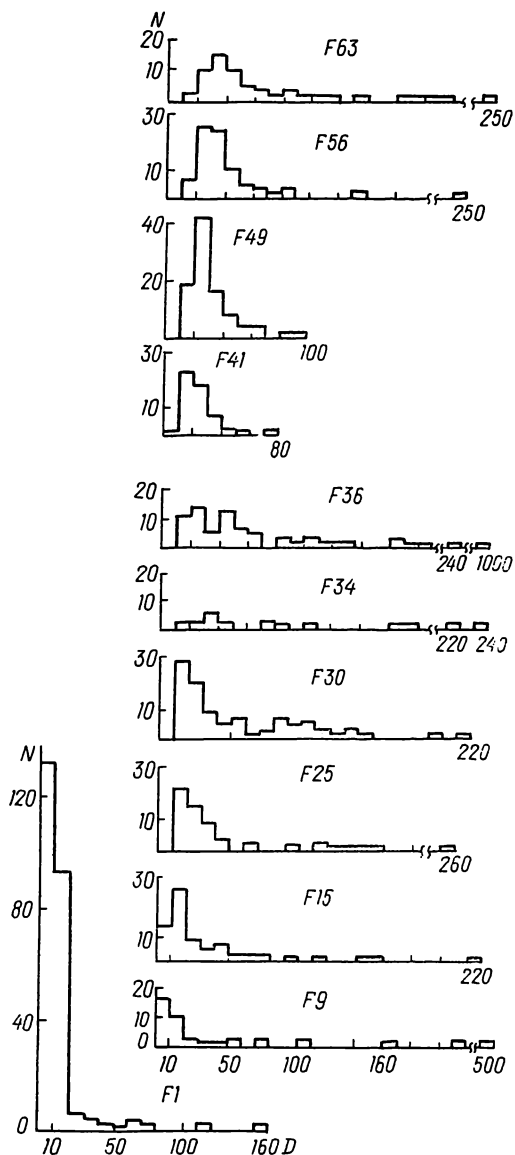


Рис. 3. Распределение средних квадратичных отклонений относительной скорости астероидов данного семейства по диаметрам $\sigma_v^{\Delta D}$ (рассчитывались в интервале изменения $D_0 \pm \Delta D$, где $\Delta D = 25$ и 2.5 км)

Рис. 2. Распределение астероидов в семействах по диаметрам (D — в км)

вернемся в следующем разделе при рассмотрении относительных скоростей астероидов, составляющих семейство. Здесь отметим, что мы не нашли наблюдательных данных, подтверждающих это мнение.

Относительные скорости. Легко убедиться, что угол наклона орбит астероидов к плоскости эклиптики не сильно варьирует внутри конкретного семейства. Поэтому, чтобы определить относительную скорость астероидов в семействе, рассмотрим следующую упрощенную схему. Предположим, что астероиды данного семейства движутся в одной плоскости, расположенной под некоторым углом к плоскости эклиптики. Определим некоторую «базисную» круговую орбиту в этой плоскости, по отношению к скорости, на которой будем оценивать скорости тел

Некоторые характеристики семейств астероидов

Название семейства	Диаметр (км) и оптимальный тип крупнейшего тела	α (в скобках — опт.)	\tilde{v} , км/с	σ_v , км/с	D_M/D_U	Наклон зависимости $IgR-IgM$	Примечания
F1Flora	160S	2.0±0.4 (3.5)	2.5	0.8	2.0 (80)	0.6±0.1	Семейство содержит тела с $D \geq 80$ км, поэтому у крупнейшего астероида мало шансов сохраниться при соударениях.
F9Vesta	515U	1.4±0.1 (1.6)	1.5	0.7	1.4 (370)	0.8±0.2	Крупнейший астероид сохранится при соударениях с остальными членами семейства. Частотный индекс рассчитан без 4 Vesta.
F15Nysa	226C	1.8±0.1 (1.9)	2.4	1.0	1.9 (119)	0.7±0.2	Существуют, по крайней мере, 4 тела, способных при столкновении разрушить крупнейшее.
F25Eunomia	261S	1.9±0.2 (2.1)	2.8	0.9	2.2 (118)	нет данных	При столкновении 5 астероидов семейства способны разрушить крупнейшее тело.
F30Lydia	214	1.90±0.2 (2.3)	2.4	0.9	1.9(109)	0.6	Крупнейшее тело не сохранится при столкновениях с астероидами семейства с $D \geq 100$ км.
F34Alexandra	236CMEU	0.9±0.3 (1.3)	3.7	0.7	2.6(90)	0.9±0.6	При столкновениях с членами семейства крупнейший астероид не сохранится.
F36Ceres	1025C	1.5±0.2 (3.1)	1.2	1.0	1.2(840)	0.7±0.2	При столкновениях крупнейший астероид сохранится. Частотный индекс рассчитан без 1 Ceres.
F41Koronis	75CEU	2.3±0.4 (3.3)	0.9	0.4	1.02(73)	0.6	Крупнейший астероид сохранится при столкновениях с членами семейства.
F49Eos	98U	2.7±0.2 (3.1)	1.3	0.5	1.3(74)	нет данных	Столкновение со вторым по размеру телом может разрушить крупнейший астероид.
F56Themis	249C	1.3±0.5 (2.6)	1.8	0.4	1.6(155)	0.6	Крупнейший астероид сохранится при соударениях.
F63Undina	291C	1.5±0.2 (1.8)	1.5	0.8	1.47(198)	нет данных	Столкновение со вторым по размеру телом в семействе может привести к распаду крупнейшего астероида.

семейства. Круговую скорость на базисной орбите определим из условия $V_c = \frac{1}{N} \sum \mu_i a_i$, где N — число астероидов в семействе, μ_i , a_i — среднее движение и большие полуоси, взятые из «Эфемерид малых планет» за 1979 г. Относительная скорость астероида, движущегося по эллиптической орбите, в точке ее пересечения с круговой равна [5]:

$$\tilde{v}^2 = e^2 V_c^2 \left[1 - \frac{3}{4} \cos^2 \varphi - e \left(\cos \varphi - \frac{7}{8} \cos^2 \varphi \right) + \dots \right],$$

где φ — истинная аномалия, e — эксцентриситет орбиты выбранного тела. Отбрасывая в этом выражении члены второго порядка по e и усредняя по $\cos^2 \varphi$, получим среднее квадратичное значение скорости по всей орбите (по отношению к V_c): $\tilde{v} \approx e V_c \left(1 - \frac{3}{4} \overline{\cos^2 \varphi} \right)^{1/2} \approx 0.8e V_c$.

В таблице приведены значения этой скорости для крупнейшего тела в каждом семействе.

Интересно проследить последствия столкновения (если оно произойдет) крупнейшего тела в семействе с телами меньших размеров, полагая в первом приближении, что последние двигаются по базисной орбите. Для этого воспользуемся формулой [2]: $D_M/D_Y = 5.1 \cdot 10^{-4} u_0^2/3$, где u_0 — средняя скорость (в км/с), необходимая для дробления мишени (с диаметром D_M) при столкновении с телом-ударником (D_Y). В 6-м столбце таблицы приведены отношения D_M/D_Y , соответствующие значению \tilde{v} для крупнейшего тела (мы приняли $\tilde{v} \sim u_0$). В скобках дан диаметр тела (в км), столкновение с которым приводит к катастрофическому распаду мишени (диаметр ее равен диаметру крупнейшего тела в семействе).

Для оценки разброса относительных скоростей v членов семейства по отношению к скорости V_c на круговой орбите мы определили величину $\sigma_v = \sigma_e V_c$, где σ_v и σ_e — средние квадратичные отклонения относительной скорости и эксцентриситета соответственно. Значения σ_v приведены в таблице для каждого семейства в целом. Видно, что наиболее компактные семейства F41, F49, F56 имеют наименьшие σ_v .

Возвращаясь к гипотезе, связывающей возраст семейства и его частотный индекс, отметим, что уменьшение наклона зависимости $\lg n - \lg D$ в заданном интервале размеров тел для конкретного семейства возникает за счет систематического уменьшения числа астероидов с малыми диаметрами. Если астероиды по какой-либо причине покидают семейство, то этот процесс должны отражать гистограммы, связывающие $\sigma_v^{\Delta D}$ внутри семейства с диаметрами тел ($\sigma_v^{\Delta D}$ — среднее квадратичное отклонение относительной скорости астероидов данного семейства в интервале диаметров ΔD). Можно представить себе две крайние ситуации. В первой — малые тела приобретают критические скорости под действием гравитационных возмущений и диссипируют из семейства [18]. Тогда должно наблюдаться систематическое возрастание значений $\sigma_v^{\Delta D}$ с уменьшением диаметров тел. Во втором случае астероиды могут терять скорость при неупругих столкновениях друг с другом, и тогда ход $\sigma_v^{\Delta D} - D$ должен смениться на обратный. Последний вариант в определенной степени аналогичен представлениям Альвена [1] об эволюции струйных потоков. Тела наибольших и средних размеров как бы смещаются по отношению к «уплотнившемуся» потоку астероидов малых размеров.

Гистограммы, построенные для каждого семейства ($\sigma_v^{\Delta D} - D$), достаточно индивидуальны и не подтверждают ни одну из гипотез. Не наблюдается также корреляции между конфигурацией гистограмм и величиной частотного индекса. По внешнему виду гистограммы можно распределить на три группы (рис. 3).

Периоды вращения. Среди физических характеристик астероидов, представленных в [9, 15], о периодах вращения P и амплитудах колебания блеска Δm астероидов — членов семейств известно меньше всего. Доля объектов с измеренными значениями периодов колеблется в разных семействах в пределах 7 — 18 %. Поэтому мы не приводим распределений по P и Δm , поскольку они носят пока весьма предварительный характер. Интересно отметить, что практически в каждом семействе встречается хотя бы один астероид с очень длинным периодом вращения (порядка десятков часов) и один астероид (не обязательно тот же и не обязательно крупнейший), отличающийся от остальных по крайней мере на порядок меньшим значением Δm . Для сравнения укажем средние значения для всего пояса астероидов $\bar{P}=8-10^h$ и $\Delta m=0.1-0.3^m$. Исключением в этом смысле являются семейства $F41$, $F49$, $F36$. Отличительная черта $F36$ и $F41$ состоит в том, что распределение по периодам почти равномерно «разбросано» по всему диапазону от $\sim 2^h$ до $\sim 18^h$. Семейство Eos практически не представлено данными по периодам вращения, так как только для 8 % малых планет этого семейства имеются такие данные.

По-видимому, дальнейшее накопление наблюдательного материала не отразится на самом факте существования в семействах астероидов с очень медленным вращением (если, конечно, классификация семейств правильна), а скорее откорректирует их число. Мы не можем сейчас дать объяснение этой интересной закономерности.

Сопоставление периода вращения и диаметра тел внутри конкретного семейства не обнаруживает взаимосвязи между этими величинами. Этот же результат подтверждается исследованием взаимосвязи между удельным моментом вращения и массой астероидов отдельно для каждого семейства (расчеты выполнены на основе предпосылок, принятых в [3]). В уравнении $\lg k = p \lg M + \text{const}$ коэффициент наклона оказался близким к $2/3$, а вероятный интервал его изменения, задаваемый средней квадратичной ошибкой, и по-прежнему содержал это значение (см. таблицу). К такому же результату можно прийти, рассматривая астероиды, не образующие семейства [22].

Конечно, заключения, основанные на наблюдательном материале, следует принимать со всей осторожностью, поскольку пока очень мало известно о вращении астероидов с размерами порядка нескольких десятков километров. Правильнее будет сказать, что выводы, сделанные выше, справедливы по крайней мере для объектов с $D \sim 10^2$ км.

Обсуждение. Если допустить, что «семейственность» в кольце астероидов — правило, а не исключение, то становится понятным, почему по некоторым физическим признакам семейства не отличаются от астероидов фона. Вместе с тем это обстоятельство не объясняет механизм происхождения скоплений астероидов. В самом деле, если семейство возникает в результате сближения разнородных орбит под действием гравитационных сил [10, 20], или же оно представляет собой последнюю стадию роста тел в струйном потоке [1], то по своим оптическим свойствам оно и не должно сильно отличаться от астероидов фона. Труднее объяснить попарную корреляцию распределений на рис. 1, представляя семейство как обломки «родительских» тел при их однократном или двукратном столкновении (см. [4]). Однако и здесь можно допустить, что дробящееся тело в среднем имеет тип S , C или U . Такое тело может состоять из блоков разнородного вещества, и в среднем его композиционный состав должен соответствовать составу пылевой среды, из которой оно выросло. Процесс дробления как бы возвращает тело в исходное состояние, некогда предшествовавшее последней стадии аккреции. $F41$ Koronis, $F49$ Eos можно было бы представить как результат дробления двух тел, различающихся по оптическим свойствам, если бы не селекционные ошибки, которые в данном случае могут существенно изменить картину.

Итак, мы хотели еще раз подчеркнуть, что существующего объема информации (астрофизических наблюдений) недостаточно, чтобы отдать предпочтение той или иной гипотезе о происхождении семейств. Тем не менее отдельные этапы их дальнейшей эволюции можно проследить, опираясь на результаты предыдущих разделов. В ряде случаев крупнейший астероид не будет разрушен при столкновениях с другими членами семейства.

В теоретических работах [16, 17, 22] показано, что в случае столкновений, не заканчивающихся катастрофическим распадом, мишень, имеющая в поперечнике $\sim 10^2$ км, потеряв часть массы, снова увеличивает ее за счет накопления рыхлых отложений — продуктов ударного взаимодействия. Таким образом, если время жизни семейства значительно больше, чем период между последовательными столкновениями, то крупнейший объект способен увеличивать свою массу и в пределе, можно полагать, постепенно «поглотит» остальные астероиды семейства. Описанный процесс, по-видимому, может происходить в F_9 , F_{36} , F_{41} , F_{56} . В остальных семействах всегда найдется такой астероид, что возможное столкновение с ним крупнейшего тела грозит закончиться для последнего полным распадом. Для малых тел, составляющих «хвосты» распределений по размерам (рис. 2), процесс дезинтеграции при ударах статистически преобладает.

Как мы уже убедились выше, нельзя соотносить различия частотных индексов в семействах с процессом диссипации из них астероидов. Как правило, индексы заметно ниже, чем значение, полученное для пояса астероидов в целом. В этом нет ничего удивительного, если иметь в виду, что в системе дробящихся и объединяющихся тел при взаимных столкновениях значение $\alpha \sim 3 \div 3.5$ можно рассматривать как близкое к предельному, которое устанавливается после достаточно длительной эволюции системы. То же значение для α получается и в том случае, если рассматривать систему, в которой нет аккумуляции, а происходит только дробление тел [5]. Эксперименты на дробильной машине показывают, что величина α в распределении по размерам продуктов дробления стремится к 4 только после нескольких сотен часов работы машины [7].

Если рассматривать семейства как результат дробления тел при однократном их соударении, то распределение осколков после удара в сильной мере определяется относительной скоростью мишени и ударяющего тела, их размерами и внутренней структурой. В самом деле, при очень малых относительных скоростях из ударного кратера мишени возможен выброс осколков (каменные «брызги»). Промежуточные скорости, достаточные для разрушения мишени, приводят к возникновению как мелких, так и крупных кусков. Наконец, очень высокие относительные скорости способствуют полному размельчению тел. Здесь мы рассмотрели только один случай, когда размер мишени заметно больше размера ударяющего тела, а их средние плотности примерно одинаковы и не сильно отличаются от минералогической плотности вещества. Если же в рыхлое тело мишени попадает прочное ударяющее тело, то при определенных значениях скорости происходит как бы смягчение удара: мишень не разрушается, а «поглощает» упавшее тело. Таким образом, даже на качественном уровне видно, что при однократном соударении тел, в зависимости от конкретной ситуации, мы вправе ожидать любых значений α .

Концепцию однократного соударения можно попытаться проверить при рассмотрении вращательных свойств членов семейства. Согласно экспериментальным данным по сверхскоростному удару, крупные куски мишени вращаются медленнее, чем мелкие осколки [13]. Такое распределение скорости вращения объясняется следующим образом. Крупные блоки возникают в результате раскола вдоль макроскопических трещин, поверхностей раздела, которые всегда присутствуют в теле. Мелкие

осколки образуются благодаря сильным напряжениям при ударе в монолитном материале мишени. Так ли это для астероидов в семействах, сказать пока трудно. Существующие наблюдательные данные указывают скорее на то, что по скоростям вращения астероиды рассматриваемых семейств существенно не отличаются от астероидов фона. Следовательно, приходится признать, что либо мы упускаем из вида какие-то характерные свойства вращательной эволюции астероидов, либо в настоящее время действует эффективный механизм, стабилизирующий вращение малых планет. Конечно, подробный анализ этих возможностей прямым образом зависит от объема наблюдательного материала, в первую очередь для слабых астероидов.

1. *Альвен Х., Аррениус Г.* Эволюция солнечной системы. — М.: Мир, 1979.—511 с.
2. *Бронштэн В. А.* О происхождении иррегулярных спутников Юпитера. — *Астрон. вестн.*, 1968, 2, с. 29—35.
3. *Голубева Л. Ф., Шестопалов Д. И.* О вращательных свойствах астероидов. — *Астрон. журн.*, 1983, 60, с. 1009—1015.
4. *Демин В. Г., Журавлев С. Г.* Астероиды: Происхождение, статистика и эволюция. — М., 1979.—115 с. — (Итоги науки и техники. Сер. Астрономия; Т. 15).
5. *Сафронов В. С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. — М.: Наука, 1969.—244 с.
6. *Чеботарев Г. А., Шор В. А.* Структура пояса астероидов. — *Тр. Ин-та теорет. астрономии АН СССР*, 1976, № 15, с. 60—90.
7. *Шор В. А.* Происхождение малых планет. — В кн.: *Малые планеты*. М.: Наука, 1973, с. 283—333.
8. *Asteroids* / Ed. by T. Gehrels. — Tucson (Ariz.): Univ. Ariz. Press, 1979.—1182 p.
9. *Bender B., Bowell E., Chapman C. et al.* The Tucson revised index of asteroid data. — *Icarus*, 1978, 33, p. 630—632.
10. *Brown E. W.* Observation and gravitational theory in the solar system. — *Publs Astron. Soc. Pacific*, 1932, 44, p. 257—268.
11. *Carusi A., Valsecchi G. B.* On asteroid classification in families. — *Astron. and Astrophys.*, 1982, 115, p. 327—335.
12. *Dohnanyi J. S.* Collisional model of asteroids and their debris. — *J. Geophys. Res.*, 1969, 74, p. 2531—2554.
13. *Fujiwara A., Tsukamoto A.* Rotation of fragments in catastrophic impact. — *Icarus*, 1981, 48, p. 329—334.
14. *Hansen O.* Search for correlation between asteroid families and classes. — *Ibid.*, 1977, 32, p. 229—232.
15. *Harris A. W., Young J. W.* Asteroid rotation. IV. 1979 observations. — *Ibid.*, 1983, 54, p. 59—109.
16. *Hounsen K. R., Wilkening L. L., Chapman C. R., Greenberg R.* Asteroidal regoliths. — *Ibid.*, 1979, 39, p. 317—351.
17. *Hörz F.* Asteroidal collisional and regoliths: some additional model considerations. — *Lunar and Planets Sci. Conf.: Abstr. Pap.*, 1980, N 3, p. 480—482.
18. *Jaschek G., Jaschek M.* Some considerations on the asteroid families. — *Astron. J.*, 1963, 68, p. 108—110.
19. *Kozai Y.* The dynamical evolution of the Hirayama family. — In: *Asteroids* / Ed. by T. Gehrels, Tucson (Ariz.): Univ. Arizona Press, 1979, p. 334—358.
20. *Rabe E.* On the origin of the Kirkwood gaps and the minor planet families. — *Astrophys. J.*, 1956, 40, p. 107—119.
21. *School R. B., Hörz F.* Asteroidal agglutinate formation and implication for asteroidal surfaces. — *Icarus*, 1981, 46, p. 337—353.
22. *Tedesco E., Zappala V.* Rotational properties of asteroids: correlation and select effects. — *Ibid.*, 1980, 43, p. 33—50.

Шемах. астрофиз. обсерватория
АН АзССР

Поступила в редакцию 03.09.84,
после доработки 17.10.84