

## Поиск семейств астероидов в группе Венгрии

© Т. А. Виноградова

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В области группы Венгрии произведен поиск семейств астероидов. Необходимые для этого собственные элементы вычислены эмпирическим методом. Метод основан на использовании наблюдаемого распределения оскулирующих элементов орбит астероидов для определения и исключения вековых возмущений. Для идентификации семейств был применен метод иерархического кластерного анализа. В результате были найдены два семейства: (434) Hungaria и (3854) George. Первое семейство плотное и густонаселенное, занимает большую часть группы Венгрии. Второе семейство расположено в области более высоких наклонов, оно немногочисленное и имеет низкую плотность.

**Ключевые слова:** небесная механика, астероиды, вековые возмущения, оскулирующие элементы орбиты, метод иерархического кластерного анализа.

### Введение

Группа Венгрии представляет собой популяцию, которая занимает самую внутреннюю, ближайшую к Земле, область главного пояса астероидов. Астероиды этой группы вращаются на средних расстояниях 1.8–2.0 а. е. от Солнца, и с одной стороны их движение ограничено орбитой Марса, с другой — вековым резонансом  $\nu_6$  и резонансами средних движений с Юпитером (4:1) и с Марсом (2:3). Орбиты этих астероидов характеризуются большими наклонами, от 20 до 30°, и небольшими эксцентриситетами, менее 0.2. Среди астероидов этой группы нет очень крупных. Название всей группе дает астероид с наименьшим порядковым номером (434) Hungaria, который, возможно, является самым крупным в этой области. Его диаметр равен 10–11 км [1–2]. Все вместе астероиды этой группы смогут образовать тело приблизительно 40 км в поперечнике. Суммарная масса астероидов этой группы составляет  $(5 \pm 3) \times 10^{-14}$  масс Солнца [3].

Впервые предположение о том, что эта группа не является однородной и содержит крупное семейство, было высказано в работе А. Леметр и др. [4]. В дальнейшем это было подтверждено другими авторами (Б. Варнер и др. [5], А. Милани и др. [6]). Эти авторы подробно исследовали динамику астероидов

группы Венгрии и идентифицировали семейство, возглавляемое астероидом (434) Hungaria, дающим название и семейству и всей группе. Таким образом, в настоящее время существование семейства (434) Hungaria не подлежит сомнению. Предположение о существовании второго семейства в области больших собственных наклонов было высказано А. Милани и др. [6]. Но до последнего времени в этой области обнаруживались только небольшие концентрации астероидов [6–7].

Собственные элементы [8], необходимые для поиска семейств, в настоящее время вычисляются, обычно, методом численного интегрирования уравнений движения астероидов на интервалах времени в миллионы лет. Это очень трудоемкий процесс, не позволяющий оперативно использовать вновь открываемые астероиды. Со времени предыдущих работ количество открытых астероидов в группе Венгрии значительно увеличилось. Эмпирический метод вычисления собственных элементов, используемый в предлагаемой работе, позволяет вычислять собственные элементы с достаточной точностью без каких-либо затрат времени. Ранее этот метод был применен для вычисления собственных элементов в таких сложных резонансных областях, как группа Гильды [9] и троянцы Юпитера [10–11], и дал хорошие результаты.

В предлагаемой работе были использованы все имеющиеся на настоящий момент астероиды. Исходные значения оскулирующих элементов были взяты из каталога MPC (Minor Planet Centre), версии 2 Марта 2018. Для группы Венгрии были найдены около 14 тысяч многоопозиционных астероидов, для них вычислены собственные элементы, и произведен поиск семейств. Для идентификации семейств был применен метод, описанный в [9, 11]. Этот метод аналогичен методу иерархического кластерного анализа, разработанному В. Заппала и др. [12]. Для определения таксономического состава семейств были использованы самые последние данные, полученные в результате обзора SDSS (Sloan Digital Sky Survey) [13], а также все более ранние данные, которые собраны в базе NASA SBN PDS (Small Bodies node of NASA Planetary Data System) [14].

### **Собственные элементы и семейства астероидов**

Семейства астероидов являются результатом катастрофического столкновения и разрушения астероидов. Первоначально орбиты фрагментов, возникших при столкновении, были близки, но под действием планетных возмущений претерпели заметные изменения. Основную роль в этом играют наиболее долгопериодические, вековые возмущения. В результате их действия наклоны и эксцентриситеты орбит испытывают периодические изменения с достаточно большой амплитудой. По этой причине оскулирующие элементы орбит не могут быть использованы для отождествления семейств.

Для поиска семейств используются так называемые собственные элементы, так как они не изменяются со временем. Эти элементы вычисляются в результате исключения из оскулирующих элементов долгопериодических и ко-

роткопериодических возмущений. Существуют разные методы вычисления собственных элементов. Во-первых, используются аналитические теории [15]. Классические вековые возмущения, как правило, являются самыми значительными. Для их исключения достаточно воспользоваться результатами теории вековых возмущений [16]. Первые пять семейств астероидов были выделены К. Хираямой [17] в 1918 году с использованием теории вековых возмущений. С тех пор методы вычисления собственных элементов совершенствовались, создавались все более точные динамические теории. Обзор современных аналитических, полуаналитических и синтетических теорий содержится в работе [8]. С появлением быстродействующих компьютеров возникли методы, использующие численное интегрирование уравнений движения астероидов на промежутках времени, сравнимых с периодом долгопериодических возмущений [18].

Вычисление собственных элементов в группе Венгрии затруднено тем, что эта область подвержена действию различных резонансов. Кроме того, орбиты астероидов этой группы характеризуются большими наклонами. По этим причинам обычные аналитические методы не могут быть применены в этой области.

В предлагаемой работе был применен эмпирический метод вычисления собственных элементов, разработанный автором [9–11]. Метод основан на вычислении вековых возмущений по наблюдаемому распределению элементов орбит астероидов. Имеются два вида вековых возмущений, которые необходимо исключить: классические возмущения и возмущение Лидова–Козаи. Эмпирический метод позволяет последовательно исключить эти возмущения и вычислить собственные элементы, необходимые для поиска семейств астероидов.

### **Исключение короткопериодических возмущений**

Обычно, в первую очередь из оскулирующих элементов, таких, как большая полуось  $a$ , эксцентриситет  $e$  и наклон орбиты  $i$ , исключают короткопериодические возмущения, и, таким образом, вычисляют средние элементы. В данной работе для исключения короткопериодических возмущений было произведено численное интегрирование уравнений движения всех астероидов в группе Венгрии на интервале 20 лет. Интегрирование производилось методом Эверхарта с учетом возмущений от всех планет. В результате были вычислены средние элементы, а также амплитуды колебаний оскулирующих элементов относительно средних значений. Затем по полученным данным были вычислены средние значения амплитуды колебания элементов. Для большой полуоси, эксцентриситета и наклона получены, соответственно, следующие значения:  $A_a=(3.0 \pm 0.3)10^{-4}$  а е,  $A_e=(2.6 \pm 0.3)10^{-4}$ ,  $A_i=(3.6^\circ \pm 0.5^\circ)10^{-5}$ .

Можно сказать, что для идентификации семейств такие колебания элементов несущественны, так как границы семейств не определяются с такой точностью. Поэтому в данной задаче для вычисления собственных элементов можно использовать оскулирующие элементы без вычисления средних элементов.

### Исключение классических вековых возмущений

Классические вековые возмущения наклонов орбит астероидов объясняются тем, что орбиты прецессируют около некоторой плоскости, не совпадающей с плоскостью эклиптики, не изменяя относительно нее своего наклона. Положение этой плоскости определяется массами и элементами орбит больших планет, а также средним расстоянием астероида от Солнца. Эта плоскость называется вынужденной плоскостью, ее наклон и долгота восходящего узла относительно эклиптики также называются вынужденными. В то время как наклоны орбит остаются неизменными относительно вынужденной плоскости, относительно эклиптики они испытывают периодические колебания в зависимости от долготы восходящего узла. Аналогичные колебания испытывают эксцентриситеты в зависимости от долготы перигея.

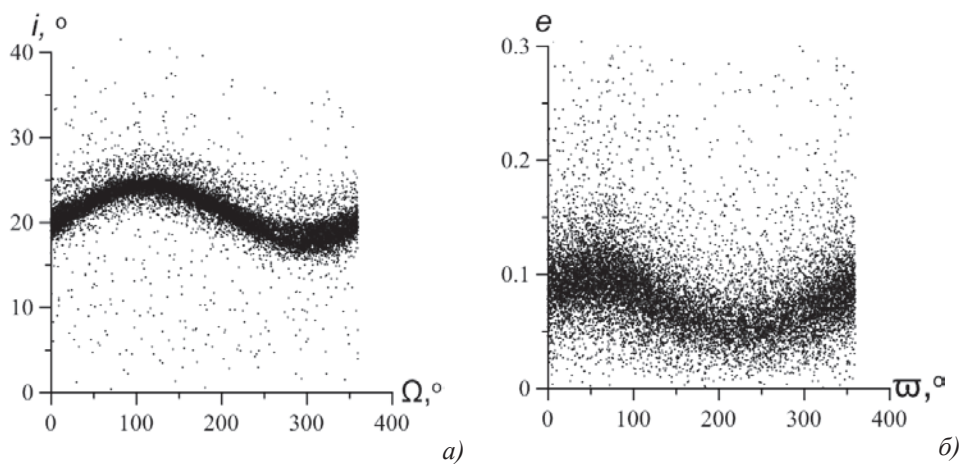


Рис. 1. Распределение оскулирующих элементов орбит астероидов из группы Венгрии: а)  $(i, \Omega)$ ; б)  $(e, \varpi)$

Распределения оскулирующих элементов наклон — долгота восходящего узла  $(i, \Omega)$  и эксцентриситет — долгота перигея  $(e, \varpi)$  для орбит астероидов, принадлежащих группе Венгрии, приведены на рис. 1а и рис. 1б. Первое распределение показывает, как меняются наклоны орбит на большом промежутке времени, в течение которого узел орбиты совершает полный оборот по эклиптике в результате прецессии. Второе распределение показывает аналогичное изменение эксцентриситетов. Форма наблюдаемых кривых обусловлена вынужденными элементами. Амплитуда кривой на рис. 1а представляет собой вынужденный (forced) наклон  $i_f$ , максимальное значение наклона достигается в точке, где узел оскулирующей орбиты  $\Omega$  совпадает с вынужденным узлом  $\Omega_f$ . Аналогично описываются вынужденный эксцентриситет  $e_f$  и вынужденная долгота перигея  $\varpi_f$  на рис. 1б. Для исключения вынужденных составляющих наклона и эксцентриситета можно воспользоваться фор-

мулой преобразования координат. Более подробно метод описан в работах Виноградовой [9–11].

Для вычисления вынужденных элементов можно предложить два метода. Во-первых, они могут быть вычислены методом суммирования векторов ( $\sin i \sin \Omega$ ,  $-\sin i \cos \Omega$ ,  $\cos i$ ), а также аналогичных векторов для эксцентриситетов. Этот метод описан в работе [19]. Но для группы Венгрии может быть применен также метод наименьших квадратов, использующий непосредственно форму кривых на распределениях оскулирующих элементов на рис. 1. Возможность применения такого метода объясняется изолированностью и компактностью этой группы.

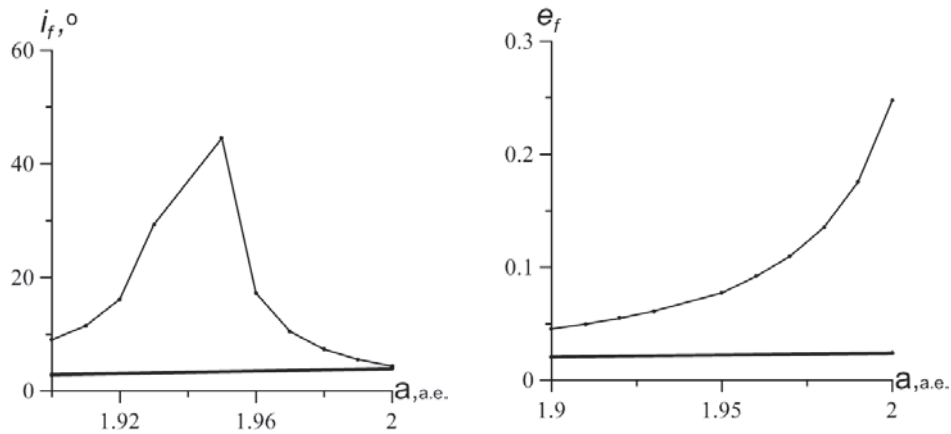


Рис. 2. Сравнение графиков изменения вынужденных элементов  $i_f$ ,  $e_f$ , вычисленных эмпирическим методом (нижние отрезки прямых) и полученных из вековой теории (верхние кривые), в зависимости от большой полуоси

Метод наименьших квадратов позволяет получить значения вынужденных элементов, если предположить, что данная кривая описывается гармоническим колебанием  $i = i_f \cos(\Omega - \Omega_f)$ . В целом для всей совокупности астероидов группы Венгрии вычисляются такие вынужденные элементы:  $i_f = 3.13 \pm 0.02^\circ$ ,  $\Omega_f = 115.6 \pm 0.3^\circ$ ,  $e_f = 0.0202 \pm 0.0004$ ,  $\varpi_f = 47.91 \pm 1.01^\circ$ . Но астероиды этой группы распределены в некотором интервале значений большой полуоси, а вынужденные элементы обнаруживают зависимость от среднего расстояния от Солнца. В настоящее время, количество астероидов, открытых в этой области, достаточно велико. Это позволяет вычислить вынужденные элементы для достаточно узких интервалов большой полуоси и определить закон, по которому эти элементы меняются. В результате такого исследования были получены линейные зависимости всех четырех вынужденных элементов от большой полуоси  $a$ :  $i_f = 10.57^\circ a - 17.24^\circ$ ,  $\Omega_f = 50.83^\circ a + 17.58^\circ$ ,  $e_f = 0.031 a - 0.039$ ,  $\varpi_f = 29.89^\circ a - 9.37^\circ$ .

Эти вынужденные элементы кардинально отличаются от элементов, полученных для этой области пояса астероидов вековой теорией [16]. На рис. 2 приведены для сравнения графики изменения вынужденных элементов, вычисленных эмпирическим методом и полученных из вековой теории. Очевидно, что вековая теория не может быть использована в этой области.

В соответствии с полученными линейными зависимостями задавались вынужденные элементы при вычислении собственных элементов для каждого астероида. Исключение вынужденной составляющей и переход от оскулирующих элементов к собственным осуществлялся с помощью формулы преобразования координат. В случае наклонов это означает переход от плоскости эклиптики к вынужденной плоскости. Аналогичным преобразованием вычислялись собственные эксцентриситеты. После такого преобразования синусоиды на распределениях оскулирующих элементов (рис. 1) превращаются в прямые линии (рис. 3), так как собственные элементы не изменяются со временем.

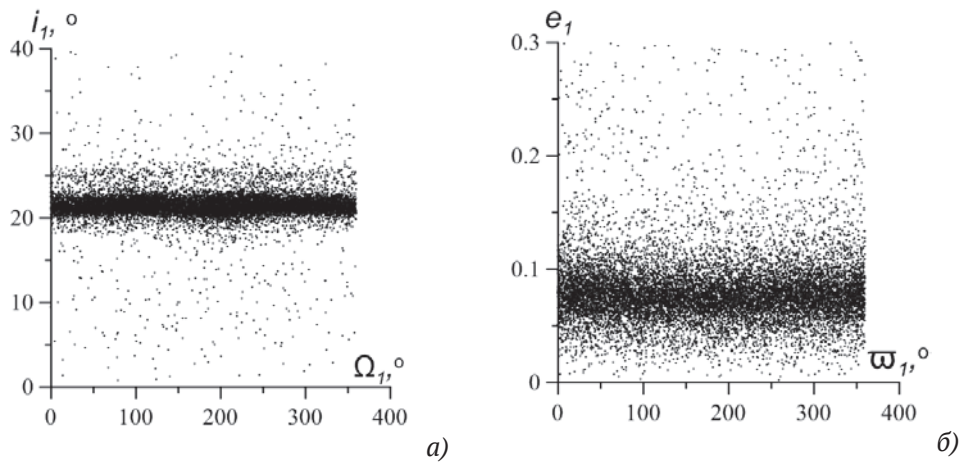


Рис. 3. Распределение собственных элементов первого порядка ( $i_1, \Omega_1$ ) и ( $e_1, \omega_1$ ) после исключения классических вековых возмущений

Будем называть собственные элементы, вычисленные в результате исключения классических вековых возмущений, собственными элементами первого порядка, и обозначим их подстрочным символом единица:  $i_1, \Omega_1, e_1, \omega_1, \omega_1$ . А в результате последующего исключения вековых возмущений Лидова–Козаи будут получены просто собственные элементы, обозначаемые подстрочной буквой  $p$  (proper).

### Исключение возмущения Лидова–Козаи

Благодаря большим наклонам орбит в области группы Венгрии существенным является также возмущение Лидова–Козаи [20–21]. Механизм Лидова–Козаи (МЛК) индуцирует согласованные долгопериодические колебания

наклона и эксцентриситета орбит астероидов в зависимости от аргумента перицентра  $\omega$ , связанного с вынужденной плоскостью. Наклон  $i$  и эксцентриситет  $e$  под действием МЛК меняются согласованно, так как связаны условием  $(1-e^2) \cos^2(i) = h^2$ , где  $h = \text{const}$ . В случае достаточно больших наклонов орбит МЛК вызывает либрацию аргумента перицентра. В группе Венгрии такой эффект наблюдается, например, для астероида (3040) Козаи, орбита которого имеет в настоящее время наклон около  $46^\circ$ . Но для подавляющего числа астероидов этой группы наклоны орбит недостаточно велики, и для них имеет место циркуляция аргумента перицентра. В случае циркуляции,  $\omega$  пробегает все значения от 0 до  $360^\circ$ , и на этом интервале наклон и эксцентриситет имеют два максимума и два минимума. При уменьшении наклона эксцентриситет возрастает и достигает максимума в точках  $\omega = 90^\circ, 270^\circ$ , в то время как наклон достигает в этих точках минимума.

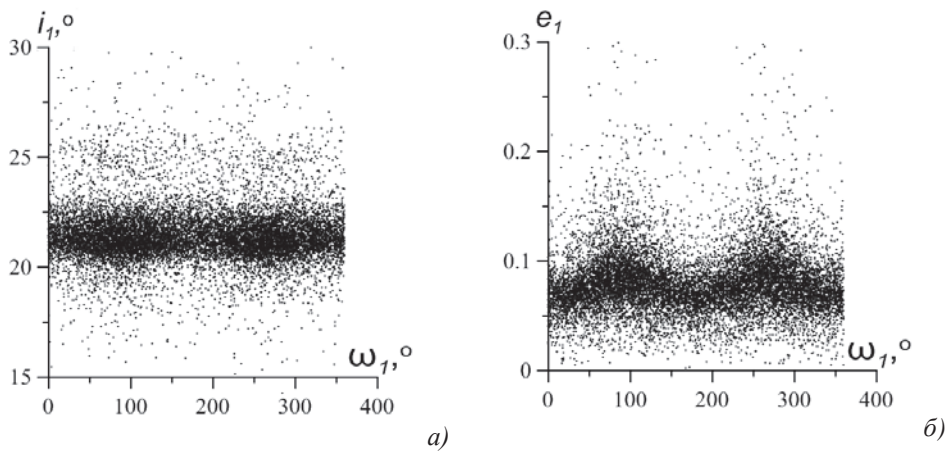


Рис. 4. Распределение собственных элементов первого порядка для орбит астероидов из группы Венгрии: а)  $(i_1, \omega_1)$ , б)  $(e_1, \omega_1)$

Колебания наклона и эксцентриситета орбит астероидов из группы Венгрии под действием МЛК можно видеть на распределениях собственных элементов первого порядка на рис. 4. Методом наименьших квадратов амплитуда колебания эксцентриситета для группы Венгрии оценена, как  $0.009 \pm 0.001$ . Соответствующее колебание наклона характеризуется амплитудой  $0.05^\circ \pm 0.02^\circ$ . Амплитуда колебания возрастает с ростом наклонов орбит. На рис.3а можно видеть, что группа Венгрии расслоена по собственным наклонам на две области. Первая область включает в себя астероиды с наклонами орбит  $20-23^\circ$ , в том числе астероид (434) Венгрия. Во второй области находятся астероиды с наклонами орбит  $24-26^\circ$ , и самым ярким астероидом в этой области является (1019) Strackea. Колебания элементов здесь становятся более сильными, для эксцентриситета амплитуда достигает 0.025, а для наклона  $0.25^\circ$ . Полученные значения согласуются с результатом, полученным в работе

А. Милани и др. [6]. Этими авторами была исследована эволюция астероида (43369) 2000 WP3, принадлежащего этой области. Движение астероида было исследовано методом численного интегрирования на интервале 10 млн. лет. Интегрирование показало дополнительные периодические колебания эксцентриситета с амплитудой 0.023 и наклона орбиты с амплитудой  $0.25^\circ$ .

Колебания наклона и эксцентриситета под действием МЛК в разных семействах были исследованы Т. Виноградовой в работе [22]. Воспользовавшись результатами этой работы, мы предположили линейную зависимость амплитуды колебаний от произведения  $e_1 \sin i_1$  и исключили это возмущение из наклонов и эксцентриситетов с помощью формул преобразования координат.

### Распределение собственных элементов

После исключения вековых возмущений в пространстве собственных элементов семейства астероидов становятся более компактными. Для сравнения на рис. 5 приведены распределения оскулирующих ( $i, e$ ) и собственных ( $i_p, e_p$ ) элементов для астероидов группы Венгрии. Как было сказано ранее, амплитуда колебания наклонов орбит в этой группе превышает  $3^\circ$ , поэтому исключение вековых возмущений уменьшает разброс наклонов на  $6^\circ$ .

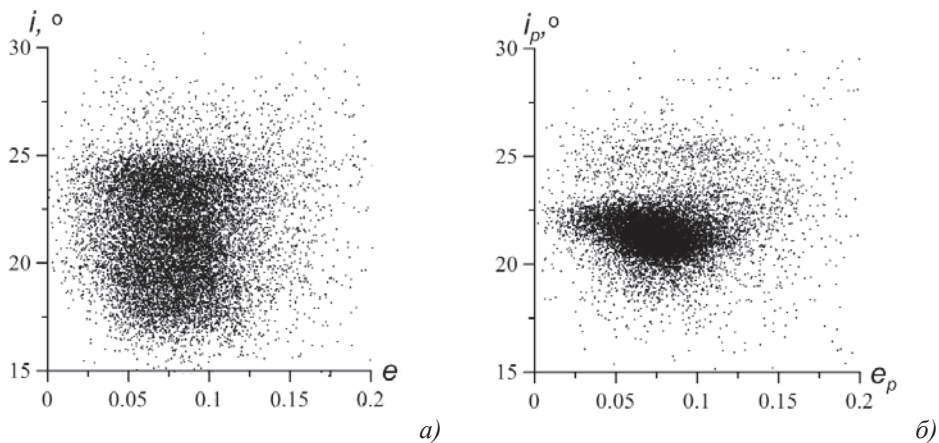


Рис. 5. Распределение оскулирующих ( $i, e$ ) и собственных ( $i_p, e_p$ ) элементов для астероидов группы Венгрии

На рис. 6 приведены также распределения собственных элементов ( $i_p, a_p$ ) и ( $e_p, a_p$ ). Вид этих распределений не отличается от аналогичных распределений, полученных другими авторами, которые использовали значительно более сложные и трудоемкие способы вычисления собственных элементов [5–6]. Это говорит о том, что эмпирические собственные элементы вычисляются с хорошей точностью. Во всяком случае этой точности достаточно для эффективного поиска семейств.



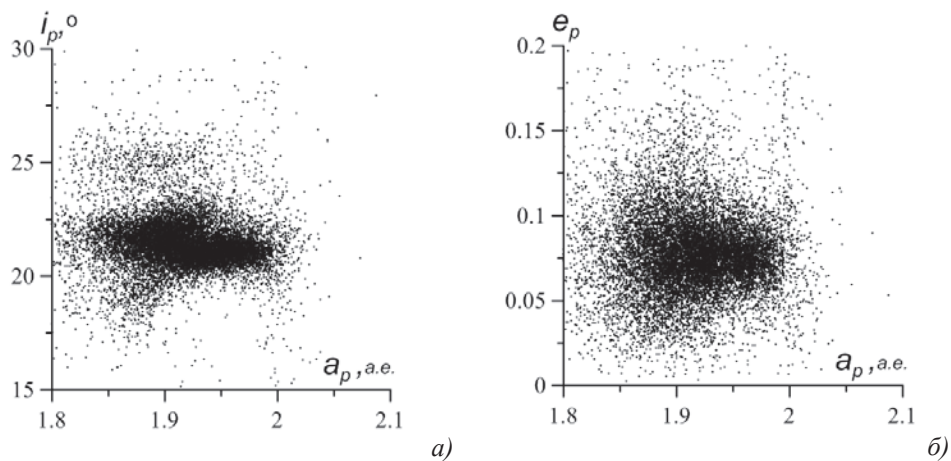


Рис. 6. Распределение собственных элементов ( $i_p, a_p$ ) и ( $e_p, a_p$ ) орбит астероидов из группы Венгрии

### Идентификация семейств астероидов

Идентификация семейств основывается на поиске плотных скоплений точек в трехмерном пространстве собственных элементов ( $a, e_p, i_p$ ). Используемый в данной работе метод описан в работах Виноградовой [10–11], он является аналогом иерархического кластерного метода, разработанного В. Заппала и др. [12]. В качестве собственной большой полуоси в данной работе использовалась большая полуось оскулирующей орбиты. В результате в группе Венгрии очень надежно выделено семейство (434) Hungaria, возглавляемое одним из самых крупных астероидов этой группы.

Кроме того, было выделено семейство с низкой плотностью в области больших собственных наклонов  $24\text{--}25^\circ$ . Это семейство хорошо видно в верхней части распределений собственных элементов на рис. 5б, рис. 6а, рис. 3а и даже на распределении оскулирующих элементов на рис. 1а. До последнего времени здесь не обнаруживалось единого семейства. В зависимости от разных исходных данных в этой области идентифицировались две незначительные концентрации с главными астероидами (1453) Fennia и (4483) Petofi [6], или (1453) Fennia и (3854) George [7]. За истекшие годы количество открытых астероидов значительно возросло. При использовании элементов орбит из каталога MPC версии 2 Марта 2018 было достаточно уверенно идентифицировано семейство (3854) George, включающее 181 астероид.

Ниже приведена таблица, содержащая различные характеристики обнаруженных семейств. В первой графе приводится имя астероида, давшего название семейству. Этот астероид имеет наименьший порядковый номер среди членов семейства. Во второй графе (Diam) приводится диаметр главного астероида семейства, а также, после знака плюс, диаметр тела, составлен-

ного из всех остальных астероидов семейства. Численность семейства определяется для двух составов населения. Первая ( $N$ ) включает все открытые на настоящий момент астероиды семейства, другая ( $N_{H<17}$ ) вычисляется только по астероидам, абсолютная звездная величина которых не превышает значения, до которого все астероиды в данной области практически уже открыты, то есть до  $17^m$ . Численность семейства, определенная во втором случае, не должна меняться с открытием новых астероидов. Количество фоновых астероидов, включенных в семейство, не анализировалось.

Кроме того, приводятся два значения заданного расстояния между точками ( $D$ ). Первое из них определяет максимальную плотность ядра семейства. Оно соответствует расстоянию, при котором обнаруживаются первые 30 самых тесно расположенных в пространстве собственных элементов астероидов данного семейства. Второе значение определяет плотность внешней границы семейства. Чем больше разность между этими двумя расстояниями, тем надежнее определяется семейство, так как оно более контрастно выделяется относительно фоновой плотности. Был определен также таксономический состав семейств (Tax). Таксономические классы, введенные в работах [23–24], являются важными характеристиками, определяющими физические свойства астероидов. В таблице приводится доля двух самых распространенных классов и общее количество астероидов с известной таксономией в каждом семействе. Последние колонки таблицы содержат интервалы собственных элементов, в которых заключено семейство ( $\Delta a$ ), ( $\Delta e$ ), ( $\Delta i$ ).

Таблица

Семейства астероидов в группе Венгрии

Name	Diam (км)	$N / N_{H<17}$	$D$ ( $10^{-3}$ )	Tax	$\Delta a$ (а. е.)	$\Delta e$	$\Delta i$ (°)
434 Hungaria	10+27	11473/2131	4.5–16	C–0.5, X–0.4 (529)	1.80–2.03	0.01–0.14	18.2–23.6
3854 George	2+10	181/39	16–21	L–0.3, S–0.3 (14)	1.81–1.93	0.08–0.13	24.3–26.0

### Сравнение двух семейств

Обнаруженные семейства очень разнятся по своим характеристикам. Семейство (434) Hungaria плотное и густонаселенное, включает подавляющую часть астероидов группы Венгрии. Семейство (3854) George немногочисленное и имеет низкую плотность. Члены реального семейства, возникшего в результате распада родительского тела, демонстрируют распределение специфического треугольного вида на плоскости ( $a, H$ ), где  $a$  — большая полуось,  $H$  — абсолютная звездная величина. Такой вид распределения объясняется тем, что фрагменты меньшего размера разлетаются при столкновении с большей скоростью по сравнению с крупными. Поскольку диаметры опреде-

лены в настоящее время не для всех астероидов, абсолютная звездная величина служит аналогом размера астероида. Дополнительное смещение мелких фрагментов по большой полуоси, в разные стороны от центрального тела, вызывается эффектом Ярковского [25].

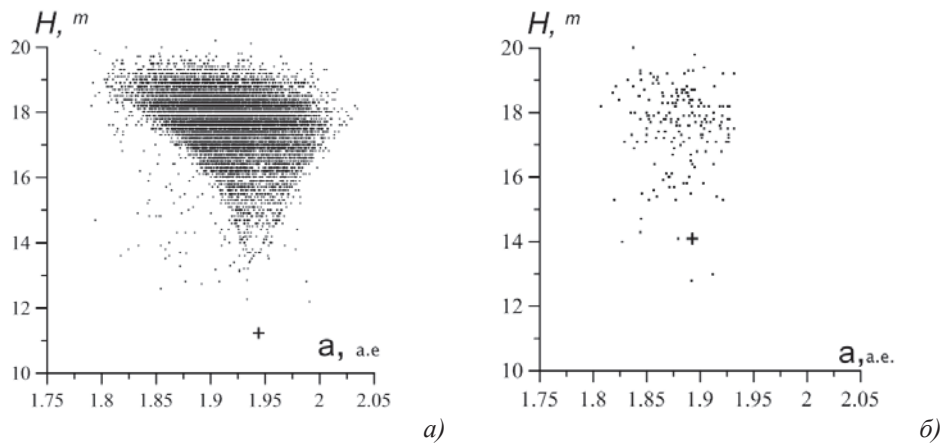


Рис. 7. Распределение  $(a, H)$ , построенное для астероидов семейств а) (434) Hungaria и б) (3854) George. Крестиком показано положение главного астероида

Отчетливый треугольник на рис. 7а, образованный астероидами семейства (434) Hungaria, является признаком динамического семейства, возникшего в результате относительно недавнего дробления астероидов. Ф. Спото и др. [26] оценивают возраст этого семейства, как 200 млн. лет. Астероиды, которые не вписываются в треугольник, должны быть отброшены, как не принадлежащие семейству. Несимметричность распределения объясняется тем, что часть правого крыла этого распределения уничтожена вековым резонансом  $\nu_6$  и резонансами средних движений астероидов с Юпитером и Марсом. Крестиком в нижней части рисунка, около значения большой полуоси 1.94 а. е., отмечено положение астероида (434) Hungaria. Предполагается, что это самый крупный фрагмент, оставшийся после распада родительского тела, он находится ровно в вершине треугольника. Для семейства (3854) George построено аналогичное распределение на рис. 7б. На нем не наблюдается такого четкого распределения, но необходимо помнить, что в настоящее время в этой области полностью открыты только астероиды с  $H < 17^m$ .

Можно также оценить насколько быстро возрастает количество мелких астероидов в отдельном семействе. Известно, что для популяции, возникшей в результате столкновения и дробления тел, количество астероидов с уменьшением их размера или с увеличением абсолютной звездной величины должно нарастать по экспоненциальному закону. В логарифмической шкале такой график представляет собой прямую линию с коэффициентом наклона около 0.5 [27]. На рис. 8 представлены графики дифференциального распределения

астероидов по размерам, построенные для семейства (434) Hungaria и (3854) Georg. В результате линейной аппроксимации на интервале  $12^m < H < 17^m$ , коэффициент наклона графика для астероидов, принадлежащих семейству (434) Hungaria, получен равным  $0.65 \pm 0.03$ . Надо заметить, что такое большое значение коэффициента ( $>0.6$ ) не может поддерживаться на всем протяжении оси  $H$ , так как при этом суммарная масса астероидов этой популяции окажется бесконечной [3]. Для второго семейства аппроксимация производилась на интервале  $14^m < H < 18^m$ , несмотря на то, что не все астероиды с  $H < 18^m$  открыты. В результате вычислен коэффициент  $0.42 \pm 0.06$ . Очевидно, что в действительности этот коэффициент должен быть больше.

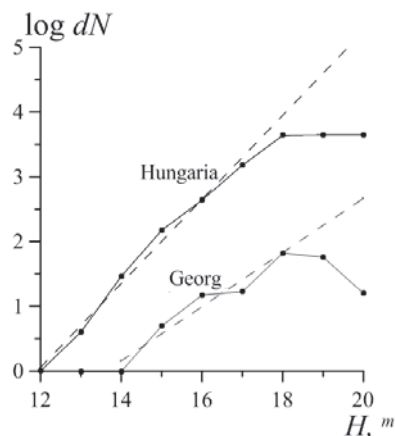


Рис. 8. Графики дифференциального распределения количества астероидов в зависимости от абсолютной звездной величины  $H$  для семейств (434) Hungaria и (3854) Georg. Распределения построены с шагом  $1^m$ . Пунктиром изображены аппроксимирующие прямые

Обнаруженные семейства имеют различный таксономический состав. Семейство (3854) George образовано каменными астероидами класса  $S/L$ , тогда как в состав семейства (434) Hungaria входят в основном астероиды класса  $C/X$ . Астероид (434) Hungaria принадлежит таксономическому классу  $E$  [23]. Поэтому всегда предполагалось, что семейство, возглавляемое этим астероидом, образовано астероидами этого же типа. Полученное для этого семейства большое количество астероидов класса  $C$ , которые родственны углистым хондритам и свойственны внешним областям пояса астероидов, требует специального исследования.

### Заключение

Группа Венгрии расположена в области резонансов. Это осложняет вычисление собственных элементов, необходимых для поиска семейств. В данной работе собственные элементы для астероидов этой группы были вычислены эмпирическим методом. Этот метод позволяет исключить из оскулиру-

ющих элементов классические вековые возмущения и возмущения Лидова-Козаи. Полученные собственные элементы имеют достаточную точность для поиска семейств. Предложенный метод идентификации семейств позволил выделить в этой области два семейства: (434) Hungaria и (3854) George. Найденные семейства различаются по своим характеристикам. Семейство (434) Hungaria имеет все признаки реального семейства, возникшего в результате столкновения астероидов. Оно включает большую часть астероидов этой группы, более 11 тысяч. Второе семейство, (3854) George, немногочисленно, включает в настоящий момент только 181 астероид и образовано более мелкими астероидами. Найденные семейства имеют различный таксономический состав. Семейство (3854) George образовано каменными астероидами класса *S/L*, тогда как (434) Hungaria — астероидами класса *C/X*. По-видимому, класс *C* в группе Венгрии является в действительности классом *E*. Этот вопрос требует специального исследования, он будет рассмотрен в дальнейшем.

## Литература

1. Morrison D., Zellner B. TRIAD Radiometric Diameters and Albedos V1.0 // EAR-A-COMPIL-5-TRIADRAD-V1.0. NASA Planetary Data System. — 2007.
2. Usui F., Kasuga T., Hasegawa S. et al. Albedo Properties of Main Belt Asteroids Based on the Infrared All-Sky Survey of the Astronomical Satellite AKARI // The Astrophysical Journal. — 2013. — Vol. 762, Issue 1, article id. 56, 14 pp.
3. Виноградова Т. А. Масса пояса астероидов и его отдельных зон // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2015. — Вып. 33. — С. 22–37.
4. Lemaître A. Hungaria: A potential new family // In: Kozai Y., Binzel R. P., Hirayama T. (Eds.), Seventy-five Years of Hirayama Asteroid Families: The Role of Collisions in the Solar System History. Astronomical Society of the Pacific Conference Series — 1994. — Vol. 63. — P. 140–145.
5. Warner B. D., Harris A. W., Vokrouhlický D., Nesvorný D., Bottke W. F. Analysis of the Hungaria asteroid population // Icarus — 2009. — Vol. 204. — P. 172–182.
6. Milani A., Knežević Z., Novaković B., Cellino A. Dynamics of the Hungaria asteroids // Icarus. — 2010. — Vol. 207. — P. 769–794.
7. Vinogradova T., Shor V. Asteroid families in the Cybele and Hungaria groups // ACM-2014, Abstracts. — 2014. — P. 588.
8. Knežević Z., Lemaître A., Milani A. The Determination of Asteroid Proper Elements // Asteroids III, University of Arizona Press. — 2002. — P. 603–612.
9. Виноградова Т. А. Семейства астероидов в группе Гильды // Труды ИПА РАН. — СПб.: ИПА РАН, 2014. — Вып. 31. — С. 73–78.
10. Виноградова Т. А. Вычисление собственных элементов и поиск семейств среди троянцев // Известия ГАО. — СПб.: ГАО, 2013. — Вып. 220. — С. 195–200.
11. Vinogradova T. A. Identification of Asteroid Families in Trojans and Hildas // MNRAS 2015. — Vol. 454. — P. 2436.
12. Zappalà V., Bendjoya Ph., Cellino A., Farinella P., and Froeschlé C. Asteroid families: Search of a 12487 asteroid sample using two different clustering techniques // Icarus. — 1995. — Vol. 116 — P. 291–314.
13. Hasselmann P. H., Carvano J. M., Lazzaro D. SDSS-based Asteroid Taxonomy V1.1. EAR-A-I0035-5-SDSSTAX-V1.1. NASA Planetary Data System. — 2012.

14. Asteroid Taxonomy V6.0. EAR-A-5-DDR-TAXONOMY-V6.0 / Neese C. Ed. — NASA Planetary Data System. — 2010.
15. *Milani A, Knežević Z.* Secular perturbation theory and computation of asteroid proper elements // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy* — 1990 — Vol. 49/4 — P. 347–411.
16. *Brouwer D., van Woerkom A. J. J.* The secular variations of the orbital elements of the principal planets // *Astron. Papers Amer. Ephem.* — 1950.
17. *Hirayama K.* Groups of asteroids probably of common origin // *Astron. J.* — 1918 — Vol. 31. — P. 185–188.
18. *Knežević Z., Milani A.* Synthetic proper elements for outer main belt asteroids // *Cel. Mech. Dyn. Astron.* — 2001. — Vol. 78 — P. 17–46.
19. *Виноградова Т. А.* Вычисление вынужденных элементов орбит астероидов // *Труды ИПА РАН.* — СПб.: Наука, 2010. — Вып. 21. — С. 205–210.
20. *Lidov M. L.* The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies // (English translation of the paper published in: *Iskusstvennyye sputniki Zemli*, 1961. — No 8. — P. 5–45). *Planetary and Space Science.* — 1962. — Vol. 9 (10). — P. 719–759.
21. *Kozai Y.* Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity // *The Astronomical Journal.* — 1962. — Vol. 67. — P. 591.
22. *Vinogradova T. A.* Amplitude of the Lidov-Kozai *i*- and *e*-oscillations in asteroid families // *MNRAS.* — 2017. — Vol. 468. — P. 4719.
23. *Tholen D. J., Barucci M. A.* Asteroid taxonomy // In *Asteroids II* (R. P. Binzel et al., eds.). Univ. of Arizona, Tucson. 1989. — P. 298–315.
24. *Bus S. J.* Compositional structure in the asteroid belt: results of a spectroscopic survey. PhD thesis — Boston. Massachusetts Institute of Technology. — 1999. — P. 367.
25. *Bottke W., Vokrouhlický D., Rubincam D., Nesvorný D.* The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for Asteroid Dynamics // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* — 2006. — Vol. 34. — P.157–191.
26. *Spoto F., Milani A., Knežević Z.* Asteroid family ages // *Icarus.* — 2015. — Vol. 257 — P. 275–289.
27. *Dohnanyi J. S.* Collisional model of asteroids and their debris // *J. Geophys. Res.* — 1969. — Vol. 74. — P. 10.

## Identification of Asteroid Families in the Hungaria Group

T. A. Vinogradova

Asteroid families have been searched in the Hungaria group. Proper elements are calculated using the empirical method. This method considers distributions of orbital elements to define and to exclude secular perturbations. An approach similar to the hierarchical clustering method has been used to identify families. As a result, two asteroid families are identified: (434) Hungaria and (3854) George. The (434) Hungaria family is densely populated. It includes a large part of asteroids in this region. (3854) George is a small and low density family located in the higher inclination region.

**Keywords:** celestial mechanics, asteroids, secular perturbations.