

УДК 523.44

Н. Тунгалаг¹, В. Г. Шевченко², Д. Ф. Лупишко²

¹НИИ геофизики и астрономии АН Монголии
Монголия, Улан-Батор, Холбооны салбар, 51

²НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина
61022 Харьков, ул. Сумская, 35

Параметры вращения и форма 19 астероидов. Качественный анализ и интерпретация данных

Комбинированным методом (амплитуда—звездная величина плюс метод эпох) определены координаты полюсов, сидерический период вращения и соотношения полуосей фигуры для астероидов 158 Koronis, 167 Urda, 208 Lacrimosa, 211 Isolda, 263 Dresda, 268 Adorea, 277 Elvira, 311 Claudia, 321 Florentina, 344 Desiderata, 347 Pariana, 369 Aeria, 462 Eriphyla, 480 Hansa, 534 Nassovia, 631 Philippina, 720 Bohlina, 1223 Neckar, 4954 Eric. Для девяти из них эти определения сделаны впервые. Используя все имеющиеся данные по определению координат полюсов, направления вращения и параметров формы астероидов, сделан качественный анализ и интерпретация данных о наклонах осей вращения к эклиптике, особенностях обратного вращения и соотношениях полуосей астероидов.

ПАРАМЕТРИ ОБЕРТАННЯ ТА ФОРМА 19 АСТЕРОЇДІВ. ЯКІСНИЙ АНАЛІЗ ТА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ДАНИХ, Тунгалаг Н., Шевченко В. Г., Лупишко Д. Ф. — Комбінованим методом (амплітуда—зоряна величина плюс метод епох) визначено координати полюсів, сидеричний період обертання та співвідношення півосей фігури для астероїдів 158 Koronis, 167 Urda, 208 Lacrimosa, 211 Isolda, 263 Dresda, 268 Adorea, 277 Elvira, 311 Claudia, 321 Florentina, 344 Desiderata, 347 Pariana, 369 Aeria, 462 Eriphyla, 480 Hansa, 534 Nassovia, 631 Philippina, 720 Bohlina, 1223 Neckar, 4954 Eric. Для дев'яти з них ці визначення зроблено вперше. Беручи до уваги всі дані з визначення координат полюсів, напрямку обертання та параметрів форми, зроблено якісний аналіз та інтерпретація даних про нахил осей обертання астероїдів до екліптики, особливості зворотного обертання та співвідношення півосей їх фігури.

ROTATION PARAMETERS AND SHAPES OF 19 ASTEROIDS. QUALITATIVE ANALYSIS AND INTERPRETATION OF DATA, by Tungalag N., Shevchenko V. G., Lupishko D. F. — Using the combined method (amplitude-magnitude method plus the epoch method), we determined pole coordinates, sidereal rotation periods, senses of rotation and axial ratios of threeaxial ellipsoid figures for asteroids 158 Koronis, 167 Urda, 208 Lacrimosa, 211 Isolda, 263 Dresda, 268 Adorea, 277 Elvira, 311 Claudia, 321 Florentina, 344 Desiderata, 347 Pariana, 369 Aeria, 462 Eriphyla, 480 Hansa, 534 Nassovia, 631 Philippina, 720 Bohlina, 1223 Neckar, and 4954 Eric. For nine

of them the determination was obtained for the first time. Using all available data on pole coordinates, sense of rotation and parameters of asteroid shapes, the qualitative analysis and interpretation of data on axis orientation, retrograde rotation and semi-axial ratios of asteroids were carried out.

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья является продолжением наших исследований вращения и формы астероидов [4]. Как и ранее, использовался комбинированный метод (амплитуда — звездная величина плюс метод эпох) определения характеристик вращения и формы астероидов, а также численная фотометрическая модель астероида [5], предусматривающая в данном случае форму астероида в виде трехосного эллипсоида с полуосями $a \geq b \geq c$, однородное распределение альbedo по поверхности и закон отражения света Акимова [1]. Суть и основные формулы комбинированного метода (ЕАМ-метода), в котором используются взаимодополняющие данные об эпохах экстремумов кривых блеска астероидов (Е-метод) и об амплитуде и звездной величине астероида в максимуме кривой блеска (АМ-метод) изложены в работе [4]. Такой метод позволяет определять направление вращения, сидерический период вращения, эклиптические долготу и широту северного полюса и соотношения полуосей фигуры астероида.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПОЛЮСОВ, ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ И ФОРМЫ АСТЕРОИДОВ

В данной работе комбинированным ЕАМ-методом определены координаты полюсов и направления вращения 19 астероидов. В табл. 1 приведены даты наблюдений и эпохи первичных максимумов кривых блеска в долях суток, исправленные за световой промежуток (вторая графа), аспектные данные (эклиптические координаты астероида λ и β на эпоху 2000.0 и фазовый угол

Таблица 1. Исходные данные для определения параметров вращения и формы астероидов

Астероид	Дата: год, месяц, сутки UT	λ_{2000} , град	β_{2000} , град	α , град	ΔV	v
158 Koronis	1984 05 03.3833	204.80	-1.40	6.00	0.32	9.10
	1988 01 24.3080	130.30	-0.60	2.80	0.41	9.45
	1989 05 03.3795	219.20	-1.10	2.30	0.31	9.31
	1993 01 28.2933	143.60	-0.80	6.30	0.42	9.66
	1994 03 21.4317	229.60	-1.00	16.10	0.29	9.97
167 Urda	1994 04 11.1721	230.90	-1.00	11.00	0.37	9.71
	1977 03 08.0708	303.10	2.20	4.70	0.24	9.43
	1989 02 03.2254	77.60	-2.40	17.80	0.33	9.94
	1990 02 21.2042	161.60	-0.30	3.60	0.33	9.39
	1992 10 01.1087	359.40	-0.70	3.90	0.30	9.49
208 Lacrimosa	1993 11 11.6317	90.40	-2.60	14.70	0.39	9.86
	1985 02 15.4133	199.00	0.10	15.80	0.15	9.07
	1989 02 04.2174	106.10	2.10	11.50	0.29	9.79
	1990 03 31.2627	199.10	-0.50	3.60	0.15	9.31
	1992 10 24.1467	20.50	0.70	4.30	0.20	9.45
211 Isolda	1994 01 09.2663	13.10	2.10	2.00	0.25	9.36
	1980 12 09.8083	86.80	0.10	3.60	0.07	9.04
	1980 12 30.0101	82.40	-0.40	6.20	0.08	8.43
	1981 02 01.1384	79.30	-1.20	17.70	0.09	8.41
	1990 10 14.7368	6.00	5.70	5.50	0.10	8.72
263 Dresda	1990 10 20.0965	4.90	5.60	7.80	0.08	8.71
	1992 01 25.0918	126.20	-4.10	1.60	0.08	8.12
	1984 11 27.3179	20.50	0.10	15.00	0.32	10.62
	1988 05 13.2880	287.00	1.30	18.00	0.35	11.00
	1992 04 29.7508	213.40	-0.10	2.20	0.43	10.55
	1993 07 16.1818	198.40	1.70	2.00	0.33	10.39

ПАРАМЕТРЫ ВРАЩЕНИЯ И ФОРМА АСТЕРОИДОВ

Окончание рис. 1

Астероид	Дата: год, месяц, сутки UT	λ_{2000} , град	β_{2000} , град	α , град	ΔV	v
268 Adorea	1977 12 07.3042	96.30	-1.90	6.70	0.15	8.60
	1979 03 25.3417	195.40	3.60	4.20	0.08	8.98
	1995 02 04.1458	147.40	1.40	4.50	0.20	8.72
277 Elvira	1985 02 15.9417	128.40	-1.70	5.80	0.45	10.11
	1992 08 02.2479	302.80	1.40	3.40	0.36	9.98
	1993 10 11.2178	55.30	0.10	15.30	0.57	10.51
311 Claudia	1993 11 21.2254	56.60	-0.10	1.10	0.40	9.86
	1984 04 28.2792	190.20	4.20	9.40	0.32	10.14
	1988 01 26.2032	108.30	2.00	7.00	0.60	10.38
	1993 01 21.4594	114.30	2.30	3.00	0.78	9.95
321 Florentina	1994 02 06.0702	202.30	3.30	19.20	0.38	10.72
	1994 03 05.2224	205.60	3.40	14.90	0.30	10.61
	1955 12 19.2825	57.00	1.70	10.30	0.41	10.02
	1987 05 20.0164	213.10	0.10	10.00	0.49	10.64
344 Desiderata	1992 05 24.0236	221.30	-0.30	8.60	0.48	10.43
	1993 08 15.1144	305.00	-3.20	7.10	0.24	10.36
	1979 05 27.2827	233.50	-7.80	7.80	0.24	8.57
	1983 04 16.0233	203.70	14.30	6.40	0.17	8.00
347 Iana	1983 05 16.1869	196.50	8.60	17.50	0.32	8.04
	1984 11 10.1284	47.50	-0.70	0.30	0.19	8.30
	1984 11 20.3584	44.90	0.30	4.60	0.13	8.33
	1989 12 05.2125	40.45	-9.70	11.20	0.10	13.10
	1991 04 20.9177	77.20	19.10	15.90	0.17	12.88
369 Aeria	1999 01 18.0667	03.30	8.00	6.50	0.26	13.05
	1999 02 24.1684	98.60	9.60	20.90	0.38	13.22
	1980 09 22.1133	7.00	-21.60	9.40	0.05	9.11
	1980 10 12.1261	2.40	-21.10	10.80	0.04	8.99
462 Eriphyla	1983 03 26.2250	219.90	16.70	12.40	0.07	8.90
	1984 08 13.0273	320.90	-15.70	6.40	0.05	9.14
	1983 10 08.3912	53.10	-4.30	13.50	0.19	9.06
	1987 08 28.1591	308.50	-1.90	11.40	0.17	9.87
	1990 02 23.4148	148.00	2.70	2.30	0.17	9.53
	1992 08 21.2430	322.20	-2.60	3.20	0.16	9.63
480 Hansa	1993 09 12.2987	66.40	-2.60	21.60	0.18	10.32
	1993 12 09.3117	74.00	-2.10	1.60	0.17	9.45
	1994 01 02.1450	74.30	-1.70	10.90	0.09	9.96
	1991 04 26.0958	232.90	-6.80	7.00	0.18	8.59
	1992 07 31.1551	332.60	32.20	13.70	0.22	8.77
534 Nassovia	1993 11 12.5943	86.80	-9.00	13.90	0.56	8.56
	1994 02 28.4726	75.50	-16.60	23.00	0.54	8.64
	1977 03 20.4208	166.20	4.80	4.80	0.35	10.01
	1984 09 23.2625	344.10	-4.80	5.90	0.37	10.00
	1987 04 03.2887	186.30	4.10	3.20	0.25	9.98
	1990 11 15.3220	98.00	-0.30	17.00	0.15	10.40
631 Philippina	1992 04 04.1768	195.40	4.00	1.60	0.20	9.92
	1993 06 25.2371	277.10	-0.10	1.30	0.33	9.88
	1981 02 02.1188	147.20	-29.60	11.90	0.13	12.56
	1981 02 06.1208	146.30	-29.70	11.40	0.20	12.54
	1991 04 24.1332	223.80	-2.70	3.90	0.16	12.40
	2001 07 17.8064	278.30	24.30	9.40	0.60	12.15
720 Bohlima	1983 05 16.2292	227.60	-0.90	2.60	0.16	10.04
	1987 04 01.4306	144.60	2.50	16.80	0.34	10.50
	1989 09 07.1943	328.30	-2.70	7.10	0.39	10.11
	1992 03 14.1740	152.20	2.50	9.00	0.50	10.13
	1993 05 26.0265	246.70	-1.50	0.90	0.14	9.86
1223 Neckar	1977 02 13.1608	130.10	3.90	5.10	0.45	-
	1983 05 15.3815	229.50	-0.60	1.40	0.20	-
	1987 04 11.2063	158.10	2.60	12.60	0.44	-
	1989 09 07.2887	328.30	-3.00	7.00	0.41	-
	1990 11 15.1225	71.90	1.40	8.30	0.16	-
4954 Eric	1993 05 24.0754	253.00	-1.60	3.90	0.22	-
	1990 10 26.2500	324.20	20.40	53.20	0.60	-
	1994 02 14.8099	162.46	17.50	13.50	0.67	-
	1994 03 17.8866	150.80	9.00	13.90	0.64	-
	1997 03 12.2929	182.20	-1.40	1.60	0.59	-

Таблица 2. Результаты определения параметров вращения и формы астероидов

Астероид	Ме- тод, источ- ник	λ_0 , град	β_0 , град	a/b	b/c	$P_{\text{сид}}$, сут	Напр. враще- ния
158 Koronis	EAM [24]	42±25 27	-80±5 -67	1.46±0.01 1.50	1.54±0.01 1.70	0.5919211(2) 0.5919042	обр.
167 Urda	EAM [24]	53±32 39	-75±6 -74	1.32±0.01 1.30	1.19±0.01 1.00	0.5442147(3) 0.5442242	обр.
208 Lacrimosa	EAM [24]	177±8 162	-55±5 -65	1.44±0.02 1.50	1.81±0.02 2.30	0.5865376(4) 0.5865383	обр.
211 Isolda	EAM	320±12	0±15	1.09±0.01	1.50 ± 0.01	0.7649828(5)	—
263 Dresda	EAM	135±6	45±10	1.46±0.03	1.34 ± 0.01	0.6985058(8)	пр.
268 Adorea	EAM	35±8	-8±7	1.26±0.01	1.57±0.01	0.3932498(1)	—
277 Elvira	EAM [24]	70±10 51	-85±10 -79	1.36±0.01 1.50	1.60±0.01 1.90	1.2371818(5) 1.2371729	обр.
311 Claudia	EAM [24]	223±7 209	35±3 43	1.96±0.01 1.90	1.02±0.01 0.90	0.3138086(4) 0.3138075	пр.
321 Florentina	EAM [24]	110±5 94	-53±6 -62	1.47±0.02 1.50	1.56±0.02 1.60	0.1196251(1) 0.1196194	обр.
344 Desiderata	EAM	235±8	-40±10	1.40±0.02	1.41±0.02	0.4486335(5)	обр.
347 Pariana	EAM	30±12	12±8	1.36±0.01	1.30 ± 0.02	0.1688543(1)	—
369 Aeria	EAM	180±15	-12±10	1.27±0.03	1.41±0.02	0.1994420(2)	—
462 Eriphyla	EAM	95±5	-15±10	1.34±0.02	1.06±0.01	0.3599407(4)	—
480 Hansa	EAM	20±20	50±10	1.32±0.02	1.45 ± 0.02	0.6742406(10)	пр.
534 Nassovia	EAM [24]	55±15 55	32±10 46	1.48±0.05 1.40	1.09±0.01 1.50	0.3945330(2) 0.3945392	пр.
631 Philippina	EAM	170±8	10±10	1.40±0.03	1.32±0.02	0.2466285(1)	—
720 Bohlina	EAM [24]	81±10 48	22±7 41	1.44±0.03 1.40	1.04±0.02 1.20	0.3716798(5) 0.3716088	пр.
1223 Neckar	EA [24]	66±15 73	45±5 44	1.40±0.01 1.60	1.34±0.01 1.30	0.3258614(21) 0.325885	пр.
4954 Eric	EA	75±5	-45±8	1.39±0.02	1.34±0.01	0.5020561(5)	обр.

α на момент наблюдений), а также измеренные амплитуды ΔV и звездные величины V астероидов, взятые из работ [8, 11, 12—16, 21, 23, 25, 26]. Все эти данные были использованы для определения параметров вращения и формы астероидов. Табл. 2 содержит полученные результаты для 19 астероидов: эклиптические координаты полюса, соотношения полуосей эллипсоида, аппроксимирующего фигуру астероида, сидерический период, направление вращения и литературный источник. Для девяти астероидов — 211 Isolda, 263 Dresda, 268 Adorea, 344 Desiderata, 347 Pariana, 369 Aeria, 462 Eriphyla, 480 Hansa, 631 Philippina — определение координат полюсов и направления вращения сделано впервые. Для девяти астероидов семейства Коронис приводятся также координаты полюсов и направления вращения, определенные в работе [24]. В пределах ошибок определения они хорошо согласуются с нашими координатами полюсов и полностью совпадают в определении направления вращения.

Для шести астероидов — 211 Isolda, 268 Adorea, 347 Pariana, 369 Aeria, 462 Eriphyla и 631 Philippina — полученные координаты полюсов указывают на то, что их оси вращения лежат вблизи плоскости эклиптики (значение широты полюса сопоставимо с ошибкой ее определения). Для таких «лежащих на боку» астероидов невозможно однозначно определить направление вращения. Это так называемый «промежуточный» (intermediate) случай. Интересно отметить, что число астероидов с обратным вращением (7) в табл. 2 примерно такое же, как и с прямым (6). Это можно

объяснить тем, что среди малых астероидов (почти все астероиды из нашей выборки, кроме 211 Isolda, 268 Adorea и 344 Desiderata, имеют диаметры меньше 60 км) прямое и обратное направления вращения почти равновероятны, о чем будет сказано ниже.

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

В результате наших определений число астероидов с известными координатами полюсов, направлением вращения и параметрами формы увеличилось на 20 % и составляет теперь 190. Этого мало для уверенного статистического анализа, но некоторые качественные выводы можно получить.

Распределение астероидов по наклонам осей вращения. На рис. 1 представлена гистограмма распределения астероидов по эклиптической широте их полюсов вращения. Чтобы компенсировать эффект уменьшения площади на небесной сфере с увеличением широты, в качестве аргумента выбран синус широты полюса ($\sin\beta_0$). Отрицательные значения $\sin\beta_0$ означают обратное вращение астероидов. Хорошо видно, что характер распределения наклона осей вращения к плоскости эклиптики совершенно различный для астероидов с прямым и обратным вращением. Распределение астероидов с обратным вращением почти изотропное (за исключением близнулевых широт), а для астероидов с прямым вращением имеет место явная анизотропия. Максимум распределения соответствует $\sin\beta_0 = 0.65$ ($\beta_0 = 40 \pm 4^\circ$), т. е. примерно средним широтам. Эта оценка согласуется с результатами предыдущего анализа [2] широтного распределения полюсов астероидов (максимум при $\beta_0 = 30\text{—}50^\circ$), сделанного по выборке, в два раза меньшей. В последние годы факт анизотропии распределения полюсов был подтвержден также в работах [9, 17, 22], однако тоже по более чем в два раза меньшей выборке.

Астероиды с прямым направлением вращения преобладают (61 %), и их полюса концентрируются вблизи северного полюса эклиптики. Этот результат согласуется с данными [20], базированными на небольшом числе объектов, и выводами [9] по выборке 73 астероидов главного пояса. В последней работе доля астероидов с прямым вращением составила 64 %. Однако полученное распределение может быть заметно искажено эффектами наблюдательной селекции. Так, дефицит астероидов обоих направлений вращения, оси которых лежат вблизи плоскости эклиптики, частично может быть связан с особенностями (или ограниченными возможностями) некоторых методов определения координат полюсов. В работе [9] автор считает,

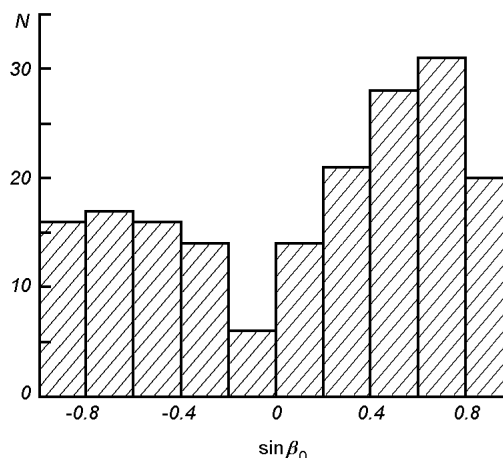


Рис. 1. Гистограмма распределения числа N астероидов по эклиптической широте полюса для 183 астероидов

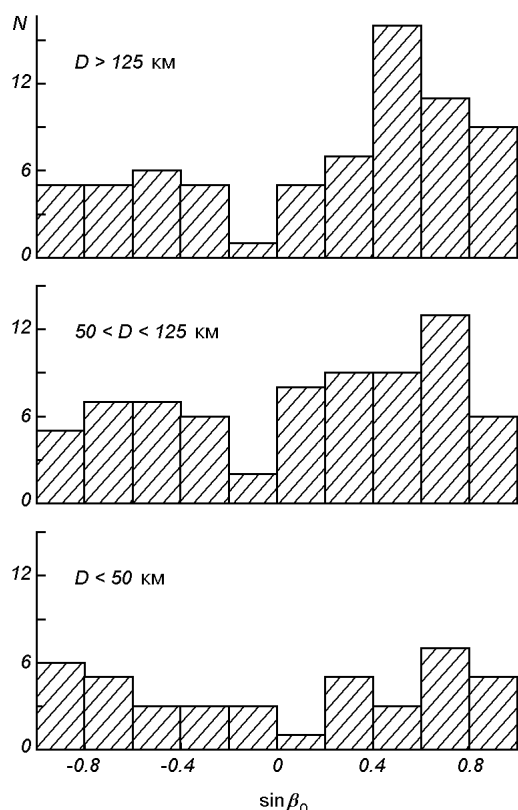


Рис. 2. Гистограмма распределения числа N астероидов по эклиптической широте полюса отдельно для разных диапазонов диаметров

что, вероятно, есть систематические вариации в распределении из-за влияния долгопериодического возмущения на осевые вектора со стороны больших планет. Это может быть более заметно для объектов с высоким орбитальным наклоном и с осевым вектором, расположенным вблизи плоскости эклиптики.

На рис. 2 аналогичные гистограммы распределения построены отдельно для крупных, средних и малых астероидов: $D > 125$ км, $50 < D < 125$ км и $D < 50$ км. Такие значения граничных диаметров выбраны по нескольким соображениям:

а) достаточное количество астероидов в каждой группе; б) считается общепринятым, что астероиды с $D < 50$ км в большинстве своем являются осколками от столкновения более крупных астероидов; в) диаметр $D = 125$ км соответствует минимуму в зависимостях скоростей вращения и амплитуд кривых блеска астероидов от их диаметров [6, 20]. Кроме того, при этом значении диаметров обнаружен и минимум доли астероидов с обратным вращением [2, 3], что, по-видимому, указывает на космогоническую особенность вращения астероидов с $D \approx 125$ км. Видно, что отношение числа астероидов с прямым и обратным вращением увеличивается с увеличением диаметра: примерно 1:1 для малых, 3:2 для средних и 2:1 для крупных астероидов. То есть, среди малых астероидов прямое и обратное направления вращения являются равновероятными. Однако с увеличением размера астероидов увеличивается преобладание прямого вращения над обратным. Этот факт хорошо согласуется с предположением о том, что обратное вращение астероиды приобретают в основном в процессе столкновительных взаимодействий: чем меньше астероид, тем меньшее воздействие к нему нужно приложить, чтобы изменить направление вращения.

Кроме того, с увеличением диаметра изменяется и характер распределения астероидов по наклону оси вращения к эклиптике. Если среди обратного вращения оно почти изотропное для всех трех групп, то для астероидов с прямым вращением анизотропия явно увеличивается с увеличением диаметра (рис. 2). Этот факт согласуется с результатами анализа распределения осей вращения астероидов в работе [9]. Таким образом, чем крупнее астероиды, тем в среднем большие наклоны к плоскости эклиптики имеют их оси вращения. Этот наблюдательный результат согласуется с предположением о том, что в процессе образования астероидов на стадии

аккумуляции вещества они приобретали ориентацию осей, в основном перпендикулярную к плоскости протопланетного диска, т. е. к плоскости эклиптики, а направление вращения — прямое. В дальнейшем в процессе взаимных столкновений наклоны осей астероидов изменялись, изначальная реликтовая ориентация постепенно «забывалась», а многократные столкновения приводили к приобретению астероидами обратного вращения. Вполне очевидно, что чем меньше астероид, тем легче изменить наклон его оси и направление вращения в результате столкновения. Этим как раз и могут быть объяснены: а) наблюдаемая равновероятность обоих направлений вращения среди малых астероидов; б) уменьшение доли обратного вращения с увеличением размеров астероидов и в) увеличение степени анизотропии в распределении по наклонам осей астероидов прямого вращения с увеличением их размеров (рис. 2).

Особенность обратного вращения. На рис. 3 представлена зависимость доли астероидов с обратным вращением от их диаметров. Крупнейшие астероиды с $D \geq 200$ км из-за их малого количества в этом анализе не использовались. Как уже было замечено ранее [2, 3], эта зависимость показывает четкий минимум в области $D = 100...150$ км. Однако возросшая к настоящему времени более чем вдвое выборка астероидов с известным направлением вращения позволяет более детально исследовать эту особенность астероидного вращения. Прежде всего, сам минимум стал немного более глубоким и четким, а положение его сдвинулось от $D = 150$ км в [3] к $D = 125$ км, где как раз находится минимум зависимостей скоростей вращения и амплитуд кривых блеска астероидов от их диаметров [7, 22]. Увеличение доли астероидов с обратным вращением до 0.5 влево от минимума (т. е., с уменьшением их размеров) представляется вполне понятным в силу вышесказанного о происхождении обратного вращения. Однако увеличение этой доли от минимума в сторону более крупных астероидов нуждается в последующем объяснении. Во всяком случае, наличие этой особенности при $D = 125$ км сейчас уже установлено более надежно, чем это было раньше, а совпадение ее с минимумами в зависимостях скоростей вращения и амплитуд кривых блеска действительно указывает на космогоническую природу этой особенности.

На рис. 4 представлена зависимость доли астероидов с обратным вращением от диаметра отдельно для астероидов М-типа (наиболее плотных и прочных), S- и других среднеальбедных астероидов с предположительно одинаковой плотностью вещества (большинство астероидов здесь безусловно S-типа) и наименее плотных и прочных низкоальбедных астероидов C-, V-, G-, F-, P- и D-типов, метеоритными аналогами вещества которых являются углистые хондриты (обозначим эту популяцию C-типом). Поскольку в каждой из этих трех выделенных популяций число астероидов существенно уменьшилось по сравнению со всей выборкой, то крайние участки зависимости с $D < 25$ км и $D > 200$ км (где сильно уменьшилось число астероидов и значительно

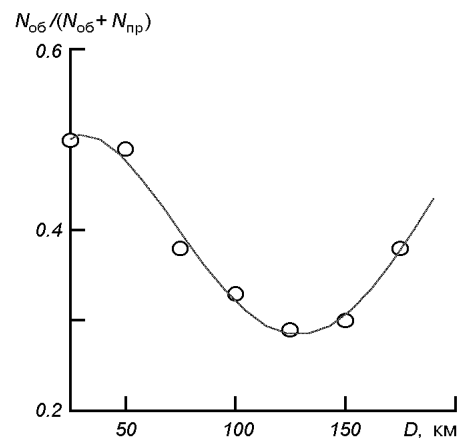


Рис. 3. Зависимость доли астероидов с обратным вращением от их диаметров (все типы, 188 астероидов)

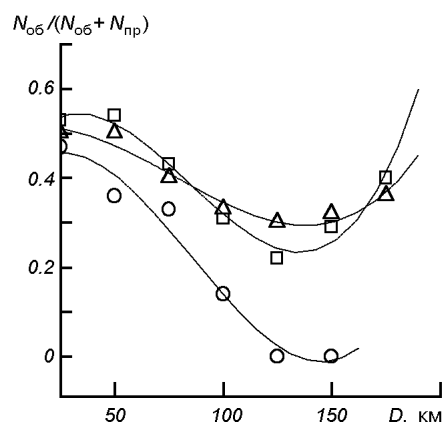


Рис. 4. Зависимость доли астероидов с обратным вращением от их диаметров: квадратики — 91 астероид S-типа, кружки — 22 астероида M-типа, треугольники — 65 астероидов C-типа

увеличился разброс точек) из рассмотрения убраны. Ясно, что на характер зависимости вблизи минимума это никакого влияния не окажет. Как можно видеть из рис. 4, появились две новые особенности: а) очень глубокий минимум для наиболее прочных M-астероидов, точнее, отсутствие M-астероидов с обратным вращением в области мини-

муму ($D = 125\text{—}150$ км) и б) глубина минимума (т. е. доля астероидов с обратным вращением) зависит от типа астероида, а значит, от плотности и прочности вещества астероидов. При этом, чем более плотные и прочные астероиды, тем меньше среди них объектов с обратным вращением. С увеличением плотности вещества при прочих равных условиях увеличивается масса астероида, а с другой стороны, увеличивается упругость при столкновении с ним других тел. Оба фактора действуют в разных направлениях с точки зрения приобретения обратного вращения в результате взаимных столкновений. Значит ли это, что большая масса из-за большей плотности вещества является более эффективной для того, чтобы сохранить исходное вращение? Но тогда должна существовать и зависимость наклона осей вращения к эклиптике от типа, т. е. от плотности астероида (у более плотных M-астероидов оси вращения в среднем должны иметь большие наклоны к плоскости эклиптики, чем у S- и тем более C-астероидов). Однако пока это не наблюдается. Таким образом, эту новую зависимость обратного вращения предстоит еще изучать дополнительно на большем наблюдательном материале.

В любом случае, разгадка и количественное объяснение феномена «космогонический диаметр» ($D = 125$ км) представляются очень важными для понимания процессов столкновительной эволюции в поясе астероидов.

Соотношение осей фигуры астероидов. Данные экспериментов по лабораторному моделированию катастрофических столкновений астероидов показали, что если аппроксимировать форму фрагментов, образующихся в результате разрушения мишени, трехосным эллипсоидом с полуосями $a > b > c$ то наиболее вероятным соотношением их осей будет $2 : \sqrt{2} : 1$ [10]. Такое соотношение осей неоднократно использовалось для астероидов при компьютерном моделировании их формы, рассеивающих свойств поверхности и т. п. (например, [1, 18]). Вопрос о том, насколько соответствует соотношение осей лабораторных фрагментов наиболее вероятному соотношению для реальных астероидов, представляется достаточно актуальным.

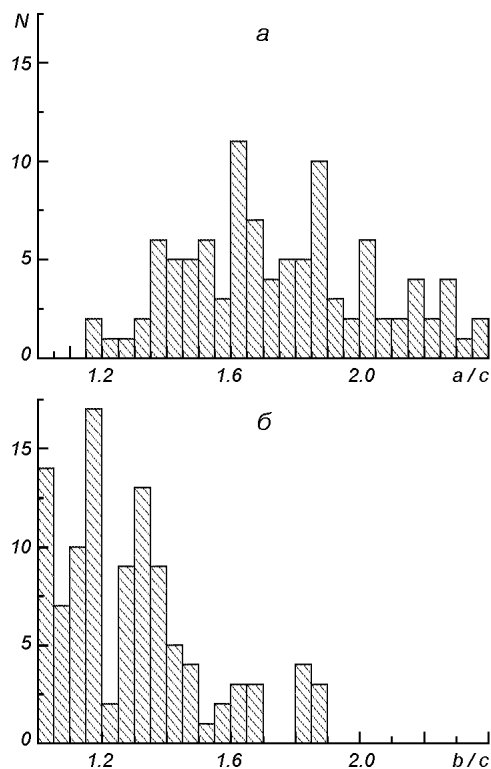
По имеющейся выборке астероидов, для которых имеются оценки соотношения осей (176 астероидов), средние соотношения составляют $a : b = 1.38 \pm 0.21$ и $b : c = 1.27 \pm 0.18$. Обращает на себя внимание довольно большие значения средних квадратичных отклонений, что является следствием больших диапазонов значений этих отношений у астероидов (см. рис. 5). С учетом величины этих отклонений невозможно однозначно ответить на вопрос о соответствии формы лабораторных фрагментов реальным астероидам.

Рис. 5. Гистограммы распределения астероидов с диаметром $D < 125$ км по соотношениям полуосей $a : c$ и $b : c$

Считая, что 113 астероидов с диаметром $D < 125$ км являются большей частью осколками, образованными в результате столкновения более крупных тел (и поэтому они могут быть более подходящими для сравнения с лабораторными фрагментами), получаем средние соотношения полуосей для них $a:b = 1.45 \pm 0.24$ и $b:c = 1.29 \pm 0.18$. То есть, и для этого интервала размеров соотношения полуосей фактически остались прежними.

На рис. 5 представлены гистограммы распределения астероидов с диаметром $D < 125$ км по соотношениям полуосей $a : c$ и $b : c$ (или по значениям полуосей a и b , поскольку полуось c нормирована на единицу). По своей форме эти распределения разные, причем оба они показывают некоторую бимодальность с минимумами в области $a = 1.70 \dots 1.75$ и $b = 1.20 \dots 1.25$. Можно предположить, что эти минимумы отражают деление астероидов на две популяции: низкоальбедные менее плотные, и следовательно, менее прочные объекты (слева от минимума) и среднеальбедные (в основном S- и M-типов) более плотные и прочные объекты (справа от минимума). Проверка показала, что низкоальбедных астероидов в обоих распределениях мало (всего 14 объектов), и распределены они относительно минимумов практически симметрично (6 и 8 в распределении по $a : c$ и 7 и 7 в распределении по $b : c$). Среднеальбедных астероидов справа от минимума оказалось на 18 % больше в распределении по $a : c$ и на 32 % в распределении по $b : c$. Однако в обоих распределениях из 16 астероидов M-типа слева от минимума находятся только четыре M-астероида, т. е. справа их в три раза больше. А M-астероиды, как было показано ранее [2, 6], как и фрагменты железных метеоритов [3] (как более прочные по сравнению с остальными) имеют более вытянутые формы. Таким образом, анализ имеющихся данных по форме астероидов также свидетельствует в пользу того, что форма астероидов (кроме самых крупных), как и их вращение, приобретены главным образом в процессе столкновений.

Подводя итог качественного анализа данных о вращении и форме астероидов, можно сделать вывод о том, что они свидетельствуют об интенсивной столкновительной эволюции в поясе астероидов.



1. Акимов Л. А., Лупшико Д. Ф., Шевченко В. Г. О законе рассеяния света поверхностями астероидов. Распределение яркости по диску // Астрон. вестник.—1992.—26, № 4.— С. 62—67.

2. *Величко Ф. П., Лушишко Д. Ф.* Вращение астероидов // *Астрон. вестник.*—1991.—25, № 3.—С. 259—276.
3. *Лушишко Д. Ф.* Фотометрия и поляриметрия астероидов: результаты наблюдений и анализ данных. Дис.... д-ра физ.-мат. наук. — Харьков, 1998.—259 с.—(Машинопись).
4. *Тунгалаг Н., Шевченко В. Г., Лушишко Д. Ф.* Параметры вращения и форма 15 астероидов // *Кинематика и физика небес. тел.*—2002.—18, № 6.—С. 508—516.
5. *Шевченко В. Г.* Фотометрия астероидов: фазовые зависимости блеска, фотометрическая модель: Дис. канд. физ.—мат. наук. — Харьков, 1996.—140 с.—(Машинопись).
6. *Belskaya I. N., Lagerkvist C.-L.* Physical properties of M class asteroids // *Planet and Space Sci.*—1996.—44, N 8.—P. 783—794.
7. *Binzel R. P., Farinella P., Zappala V., Cellino A.* Asteroid rotation rates: distributions and statistics // *Asteroids II* / Eds R. P. Binzel, T. Gehrels, M. S. Matthews. — Tucson: Univ. Arizona Press, 1989.—P. 416—441.
8. *Bisque M. L., Bisque D. R., Bisque S. M., Bisque T. M.* Automated minor planet lightcurve generation // *Minor Planet Bull.*—2001.—28, N 4.—P. 62—64.
9. *Erikson A.* The present distribution of asteroid spin vectors and its relevance to the origin and evolution of main belt asteroids. — Berlin, 2000.—273 p.—(Dissertation, vorgelegt von M. S. Physics).
10. *Fudjiwara A., Kamimoto G., Tsukamoto A.* Expected shape distribution of asteroids obtained from laboratory impact experiments // *Nature.*—1978.—N 272.—P. 602—603.
11. *Holiday B.* Lightcurve observations of minor planet 268 Adorea // *Minor Planet Bull.*—1995.—22, N 3.—P. 33—34.
12. *Lagerkvist C.-I., Barucci M. A., Capria M. T., et al.* Asteroid Photometric Catalogue. — CNR, Istituto di Astrofisica Spaziale, Roma, 1987.—1120 p.
13. *Lagerkvist C.-I., Barucci M. A., Capria M. T., et al.* Asteroid Photometric Catalogue. First update. — CNR, Istituto di Astrofisica Spaziale, Roma, 1988.—370 p.
14. *Lagerkvist C.-I., Barucci M. A., Capria M. T., et al.* Asteroid Photometric Catalogue. Second update. — Astronomiska observatoriet, Uppsala, Sweden, 1992.—168 p.
15. *Lagerkvist C.-I., Magnusson P., Belskaya I., et al.* Asteroid Photometric Catalogue. Third update. — Astronomiska observatoriet, Uppsala, Sweden, 1993.—298 p.
16. *Lagerkvist C.-I., Magnusson P., Belskaya I., et al.* Asteroid Photometric Catalogue. Fourth update. — Astronomiska observatoriet, Uppsala, Sweden, 1996.—440 p.
17. *La Spina A., Paolicchi P., Kryszczyńska A., Pravec P.* Pole anisotropy and spin statistics // *Proceedings of the Conference “Asteroids, Comets, Meteors”.* — Berlin: Technical Univ. Berlin, 2002.—P. 529—533.
18. *Lupishko D. F., Shevchenko V. G., Tungalag N.* Asteroid photocentre displacement: influence of the scattering law // *Mem. Soc. astron. ital.*—2002.—73, N 3.—P. 650—654.
19. *Lupishko D. F., Velichko F. P.* What is the cosmogonic meaning of the asteroid diameter 100-125 km? // *XXII Lunar and Planet. Science Conf., March 18—22, 1990.* — Houston (USA), 1990.—Part 1.—P. 837—838.
20. *Magnusson P.* Spin vectors of 22 large asteroids // *Icarus.*—1990.—85, N 1.—P. 229—240.
21. *Majcen S., Wetterer C. J.* CCD photometry of asteroids 347 Pariana at the US air force academy observatory // *Minor Planet Bull.*—1999.—26, N 4.—P. 29—30.
22. *Pravec P., Harris A. W., Michalowski T.* Asteroid Rotations // *In Asteroids III* / Eds W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel. — Tucson: Univ. Arizona Press, 2002.—P. 113—123.
23. *Slivan S. M., Binzel R. P.* Forty-eight new rotation lightcurves of 12 Koronis family asteroids // *Icarus.*—1996.—124, N 2.—P. 452—470.
24. *Slivan S. M., Binzel R. P., Crespo da Silva L. D., et al.* Spin vectors in the Koronis family: comprehensive results from two independent analyses of 213 rotation lightcurves // *Icarus.*—2003.—162, N 2.—P. 285—308.
25. *Wisniewski W. Z., Michalowski T. M., Harris A. W., McMillan R. S.* Photometric observations of 125 asteroids // *Icarus.*—1997.—126, N 2.—P. 395—449.
26. *Zeigler K. W., Monsec R. D., Brown L.* CCD photometry of asteroids 2270 YAZHI, 4954 Eric and (5534) 1941 UN // *Minor Planet Bull.*—1998.—25, N 2.—P. 13—15.

Поступила в редакцию 10.07.03