

УДК 523.44

АСТРОМЕТРИЯ И ФОТОМЕТРИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО АСТЕРОИДА 65690 (1991 DG)

© 2024 г. А. В. Девяткин ^{a,*}, Д. Л. Горшанов ^a, В. Н. Львов ^a,
С. Д. Цекмейстер ^a, С. Н. Петрова ^a, А. А. Мартюшева ^a,
К. Н. Наумов ^a

^aГлавная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН),
Санкт-Петербург, Россия
*e-mail: a9kin@mail.ru

Поступила в редакцию 10.02.2024 г.

После доработки 07.03.2024 г.

Принята к публикации 03.04.2024 г.

В 2020 г. на двух телескопах ГАО РАН, ЗА-320М и МТМ-500М, были получены ряды наблюдений потенциально опасного астероида 65690 (1991 DG) во время его сближения с Землей и выполнена их астрометрическая и фотометрическая обработка. С использованием полученных координат астероида и наблюдений с сайта MPC были уточнена орбита астероида, определены обстоятельства сближений с Землей и Марсом и сделана оценка влияния на его орбиту негравитационных эффектов. По результатам фотометрической обработки астероида были построена кривая блеска и уточнен периода его осевого вращения: $P = 4.3193 \pm 0.0028$ ч.

Ключевые слова: потенциально опасный астероид, астрометрия, фотометрия

DOI: 10.31857/S0320930X24050061, EDN: LTJYUQ

ВВЕДЕНИЕ

Астероид 65690 (1991 DG) был открыт 20 февраля 1991 г. Р.Х. Макнотом в обсерватории Сайдинг-Спринг (Кунабарабран, Австралия) (MPC web-page). Он принадлежит к группе Аполлона, т.е. пересекает орбиту Земли снаружи, и классифицирован Центром малых планет (MPC) как потенциально опасный для Земли (минимальное расстояние между орбитами MOID = 0.03843 а. е.), а также имеет тесные сближения с Марсом (MOID = 0.07398 а. е.) (MPC web-page). 6 апреля 2020 г. астероид пролетел на расстоянии 0.08451 а. е. (12.7 млн км) от Земли (JPL web-page). Его диаметр оценивается в 527 м, а период осевого вращения лежит в пределах от 7.1111 до 7.1125 ч (Warner, Stephens, 2020). Следующее тесное сближение астероида с Землей произойдет в апреле 2049 г. на расстоянии около 0.1110 а. е. Совокупность

указанных сближений может существенно повлиять на его орбиту.

НАБЛЮДЕНИЯ

В Пулковской обсерватории наблюдения астероида 1991 DG велись на телескопах ЗА-320М (Девяткин, 2004) и МТМ-500М (Кулиш и др., 2009) в период, охватывающий момент его сближения с Землей, — с 9 марта по 26 апреля 2020 г. Характеристики телескопов указаны в табл. 1, обстоятельства наблюдений — в табл. 2. Наблюдения выполнялись без использования светофильтров — в интегральных полосах инструментов.

Всего было проведено 26 наблюдательных сессий астероида на двух телескопах. Для астрометрической и фотометрической обработки было использовано 736 кадров, полученных с телескопом МТМ-500М (Кисловодск), и 1139 кадров, полученных с телескопом ЗА-320М (Пулково).

Таблица 1. Характеристики телескопов

Телескоп	МТМ-500М	ЗА-320М
Местоположение	Шаджатмаз	Пулково
Широта	43° 44' 30"	59° 46' 15"
Долгота	42° 39' 45"	30° 19' 40"
Высота, м	2070	80
Оптическая система	Максутов–Кассегрен	Кассегрен
Диаметр апертуры, мм	500	320
Фокусное расстояние, мм	4100	3200
Масштаб, угл. с/мм	50.3	64.5
ПЗС-камера	SBIG STX-16803	ZWO ASI 1600 (mono)
ПЗС-матрица	KODAK KAF-16803	MN34230
Размеры матрицы, мм	36.8 × 36.8	17.5 × 13.2
Поле зрения, угл. мин	30.9 × 30.9	18.8 × 14.2
Количество пикселей	4096 × 4096	4656 × 3520
Размер пикселя, мкм	9 × 9	3.75 × 3.75
Размер пикселя, угл. с	0.5 × 0.5	0.24 × 0.24
Биннирование	3 × 3	4 × 4
Количество суперпикселей	1365 × 1365	1164 × 880
Размер суперпикселя, мкм	27 × 27	15 × 15
Размер суперпикселя, угл. с	1.4 × 1.4	0.97 × 0.97

Таблица 2. Обстоятельства наблюдений астероида 1991 DG

Дата (вечер)	Интервал (UTC)	Телескоп	Экспоз., с	N, кадров	m	PA град	PABL град	PABV град
2020-03-09	18:23 – 18:56	ЗА	45	12	16.6	22.7	158.5	–10.5
2020-03-13	19:24 – 20:32	ЗА	120–180	4	16.4	26.9	158.5	–8.7
2020-03-14	18:47 – 23:26	ЗА	90–120	164	16.3	28.2	158.4	–8.2
2020-03-15	17:47 – 20:57	ЗА	85–100	64	16.3	29.5	158.3	–7.7
2020-03-16	21:17 – 23:08	ЗА	120	9	16.3	31.2	158.2	–6.9
2020-03-19	21:01 – 00:34	ЗА	120	87	16.2	36.2	157.8	–4.9
2020-03-22	16:15 – 18:41	МТМ	80	100	16.1	41.7	157.3	–2.4
	20:07 – 23:35	ЗА	90–110	100	16.1	42.1	157.2	–2.2
2020-03-23	18:54 – 23:44	ЗА	110	70	16.1	44.3	157.0	–1.2
2020-03-24	23:18 – 23:21	ЗА	110	2	16.1	46.8	156.7	0.0
2020-03-26	18:42 – 23:48	ЗА	100–120	157	16.1	51.6	156.3	2.4
2020-03-27	17:47 – 20:23	МТМ	60–80	131	16.1	54.0	156.0	3.6
	18:55 – 22:05	ЗА	100	12	16.1	54.2	156.0	3.6
2020-03-29	18:05 – 23:50	ЗА	85–100	181	16.1	59.9	155.5	6.7
2020-03-30	18:22 – 23:34	ЗА	80–85	123	16.2	62.8	155.2	8.3
2020-04-01	19:12 – 00:46	ЗА	75–80	72	16.3	69.1	154.8	12.0
2020-04-03	20:19 – 23:00	МТМ	60	124	16.4	75.3	154.5	16.0
2020-04-04	18:14 – 00:31	ЗА	30–60	72	16.5	78.4	154.5	18.1
2020-04-05	18:43 – 18:54	ЗА	30–60	9	16.6	81.3	154.5	20.1
2020-04-10	19:45 – 20:12	ЗА	100	10	17.2	96.2	156.5	32.5
	22:53 – 23:00	МТМ	60	3	17.2	96.6	156.6	32.8
2020-04-13	18:09 – 18:12	МТМ	60	3	17.7	103.5	159.6	40.1
2020-04-14	16:43 – 18:59	МТМ	60	120	17.8	105.6	161.1	42.7
2020-04-17	17:12 – 19:28	МТМ	60	120	18.3	111.1	167.3	50.3
2020-04-18	17:41 – 18:49	МТМ	60	60	18.4	112.5	170.0	52.6
2020-04-24	17:07 – 18:14	МТМ	60	60	19.1	118.0	195.1	63.7
2020-04-26	22:32 – 23:09	МТМ	60–80	15	19.3	118.9	208.2	65.8
24		27		1884				

Примечание: указаны: дата вечера, интервал времени, телескоп (ЗА – ЗА-320М, МТМ – МТМ-500М), длительности экспозиций, количество кадров, звездная величина (m), фазовый угол (PA), эклиптические долгота (PABL) и широта (PABV) бисектора фазового угла (средние значения за интервал наблюдений). Последние четыре параметра вычислены с помощью программного пакета ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012). В последней строке приведены общее число наблюдательных ночей, сеансов наблюдений на двух телескопах и полученных ПЗС-кадров.

АСТРОМЕТРИЯ И УТОЧНЕНИЕ ОРБИТЫ
АСТЕРОИДА

Астрометрическая редукция произведена методом восьми постоянных с помощью программного пакета АПЕКС-II (Девяткин и др., 2010), разработанного в Пулковской обсерватории. В качестве опорного использовался каталог GAIA DR2 (Gaia Archive web-page).

Уточнение орбиты проводилось посредством программы OrbImpg программного пакета (ПП) ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012) с использованием числовых эфемерид DE405 (JPL web-page 2). Учитывались возмущения, вызванные планетами, Луной, четырьмя массивными астероидами и сжатием Земли. В качестве исходных приняты элементы орбит из базы данных MPCORB (MPC web-page 2) для эпохи JD2459600.5. Начальное значение среднеквадратичной ошибки представления наблюдений RMS оказалось равным 2".765, конечная величина RMS составила 0".271. Результаты улучшения, а также сравнение полученной орбиты с орбитой MPC представлены в табл. 3.

СБЛИЖЕНИЯ АСТЕРОИДА С ДРУГИМИ
ТЕЛАМИ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

С помощью пакета программ ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012) были исследованы особенности орбитального движения астероида 1991 DG. На левой панели рис. 1 изображена его орбита на фоне орбит Марса, Земли и Венеры. Сближения астероида с планетами на расстоянии менее 0.1 а. е. немногочисленны. Так, например, на промежутке времени в два столетия отмечены лишь два сближения с Землей (2020-04-06, 0.085 а. е. и 2194-04-07, 0.081 а. е.) и одно с Марсом (2186-03-10, 0.080 а. е.). Однако астероид имеет многократные сближения на расстоянии 0.1–0.3 а. е. с Землей, Марсом и даже Венерой. Орбита астероида заходит внутрь земной орбиты, и на этом участке

он подвергается достаточно длительным возмущениям от Земли. Бывают конфигурации, когда Земля и Венера воздействуют на астероид либо с одной стороны, либо с противоположных сторон на сравнимых расстояниях. Не следует забывать и о возмущениях от Юпитера. Все это “расшатывает” орбиту, которая из регулярной может постепенно стать хаотической.

На рис. 2 приведен график изменения большой полуоси орбиты астероида на тысячелетнем интервале (1500–2500 гг. н. э.). Частые мелкие изменения, а также почти периодические более крупные колебания обусловлены совместным влиянием планет в разных конфигурациях. На это накладываются резкие скачки, которые соответствуют сближениям астероида с одной из трех планет, либо сразу с двумя планетами (Земля и Венера) на некоторых промежутках времени. Астероид 1991 DG имел и будет иметь многочисленные тесные и умеренные сближения с Землей на указанном интервале времени, что провоцирует резкие скачки величины большой полуоси. Такие скачки, хоть пока и невелики, но на гораздо более длительных интервалах времени способны привести либо к столкновению астероида с планетой, либо к очень тесному с ней сближению, что может радикально изменить орбиту. В качестве примеров выбраны некоторые из тесных (до расстояния 0.1 а. е. и менее) сближений с Землей, вызывающих такие резкие изменения величины большой полуоси. Они обозначены цифрами на рис. 2 и в табл. 4. Вычисления выполнены с помощью ПП ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012) с использованием данных элементов орбит тел Солнечной системы (JPL web-page 2, MPC web-page 2).

Табл. 5 содержит перечень предстоящих умеренных и тесных сближений астероида с Землей и Марсом за два столетия (2025–2199 гг.), вычисленных с ПП ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012).

Афелий орбиты 1991 DG располагается вблизи Главного пояса астероидов. Поэтому представляет интерес отслеживать возможные

Таблица 3. Элементы начальной (MPC) и уточненной по наблюдениям орбит астероида 1991 DG на эпоху JD2459600.5

Элементы орбиты	Начальные	Улучшенные	Поправки	Ошибки
<i>M</i> , град	354.59650	354.59651	0.00001	0.000001
<i>ω</i> , град	63.32288	63.32287	–0.00001	0.000003
<i>Ω</i> , град	180.11979	180.11980	0.00001	0.000002
<i>i</i> , град	11.14409	11.14409	0.00000	0.000003
<i>e</i>	0.3630028	0.3630029	0.0000001	0.00000001
<i>a</i> , а. е.	1.42770210	1.42770222	0.00000012	0.000000001

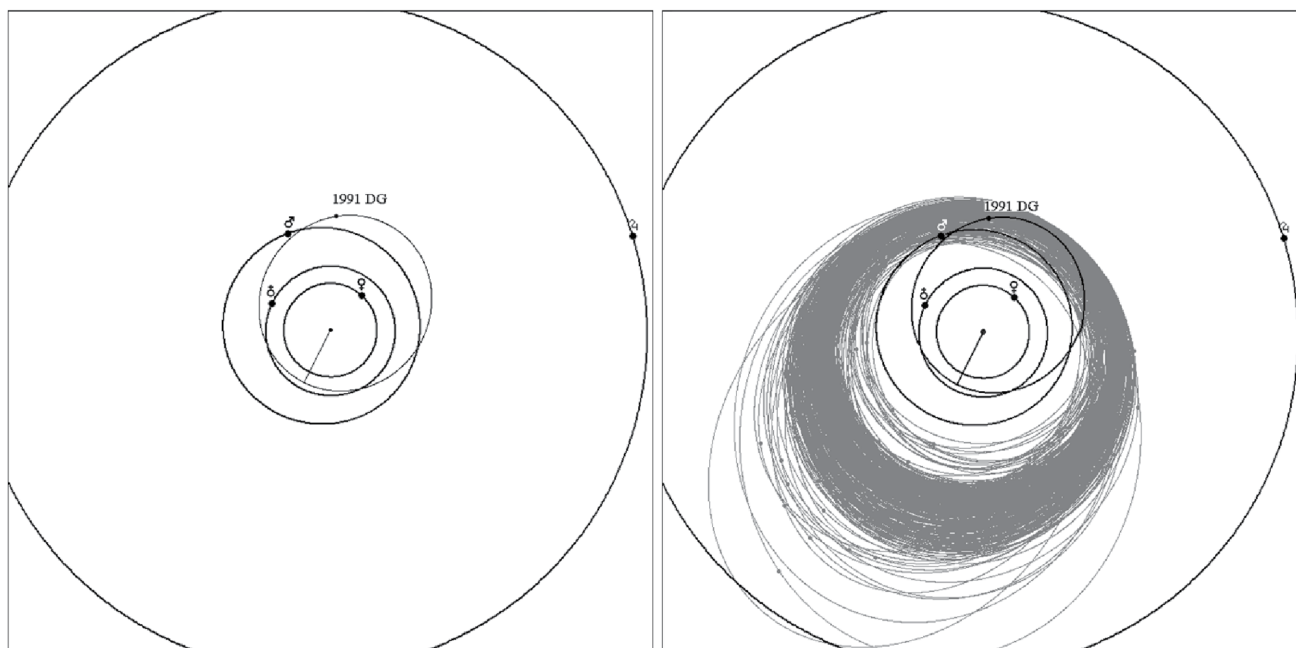


Рис. 1. Особенности орбитального движения астероида 1991 DG: левая панель — орбиты астероида 1991 DG и трех планет; правая панель — орбиты объектов, с которыми возможны сближения астероида 1991 DG.

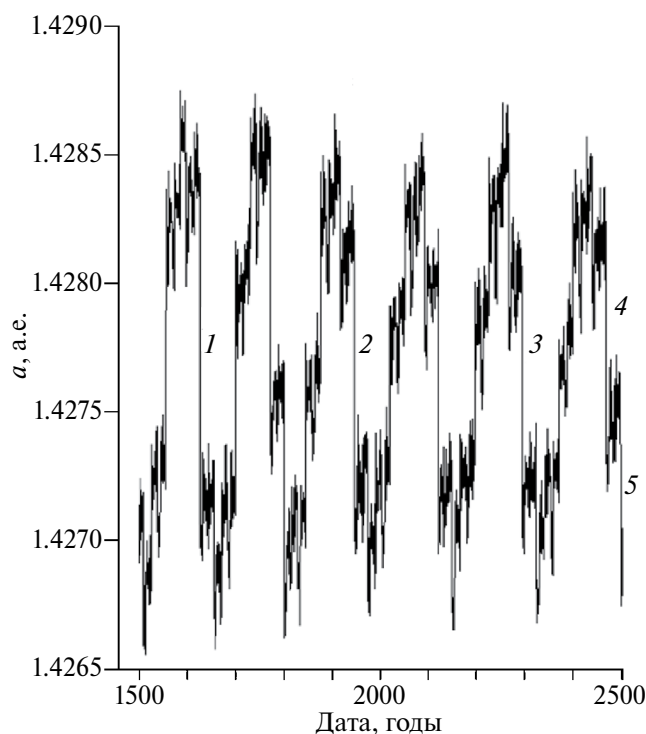


Рис. 2. Изменения большой полуоси орбиты 1991 DG на тысячелетнем интервале.

тесные сближения подобных объектов с другими крупными астероидами. Для этого можно использовать следующий алгоритм выборки

Таблица 4. Некоторые тесные сближения астероида 1991 DG с Землей на тысячелетнем интервале времени. Порядковый номер в первом столбце соответствует номеру скачка на рис. 2

Сближение	Дата	Расстояние, а. е.
1	1626-03-23	0.0337
2	1945-03-26	0.0539
3	2293-03-31	0.0555
4	2467-04-02	0.0688
5	2496-03-30	0.1026

из каталога всех известных астероидов (нулем помечены величины, относящиеся к изучаемому астероиду): абсолютная звездная величина H от 15^m и менее (объекты размером около четырех километров и более), перигелийное расстояние меньше исходного афелийного расстояния (в нашем случае $q < Q_0 = 1.95$ а. е.), долгота перигелия ($\pi = \omega + \Omega$) в промежутке $(\pi_0 \pm 180^\circ) \pm \Delta$, где Δ — некоторая малая величина (в нашем случае $\pi_0 = 243^\circ$, $53^\circ < \pi < 73^\circ$). Для $H \leq 15.0$ выбрано множество из 386 астероидов. Правая панель на рис. 1 показывает орбиты этих астероидов, ориентированные в направлении, противоположном линии апсид астероида 1991 DG. Полученный список можно использовать при поиске тесных сближений изучаемого астероида с другими астероидами Главного пояса.

Таблица 5. Предстоящие тесные сближения астероида 1991 DG за два столетия

Дата	Планета	Расстояние, а. е.	Относительная скорость, км/с
2025-08-18	Земля	0.41961	20.52
2032-03-13	Земля	0.28971	18.23
2037-03-01	Земля	0.47502	6.56
2037-08-01	Земля	0.17081	10.48
2039-06-24	Марс	0.08721	9.70
2049-04-10	Земля	0.11100	8.31
2049-08-17	Земля	0.36745	6.18
2054-08-21	Земля	0.46124	21.82
2061-03-17	Земля	0.22352	16.39
2066-08-06	Земля	0.19618	12.59
2078-05-12	Земля	0.18892	7.75
2090-03-23	Земля	0.11173	13.28
2095-08-11	Земля	0.26695	15.60
2102-03-07	Земля	0.45775	23.03
2107-06-22	Земля	0.20754	7.01
2119-03-28	Земля	0.06174	11.78
2119-09-04	Земля	0.47158	7.90
2124-08-13	Земля	0.29192	16.50
2131-03-07	Земля	0.46136	23.13
2136-06-04	Земля	0.20708	7.54
2148-03-22	Земля	0.14870	14.30
2153-08-09	Земля	0.21259	13.50
2165-04-21	Земля	0.14751	7.76
2165-08-11	Земля	0.33587	5.50
2170-08-23	Земля	0.46584	22.04
2177-03-17	Земля	0.26286	17.49
2182-03-02	Земля	0.47974	6.75
2182-08-04	Земля	0.16804	10.73
2186-03-10	Марс	0.08038	9.74
2194-04-07	Земля	0.08028	9.03
2194-08-24	Земля	0.39521	6.70
2199-08-21	Земля	0.40992	20.33

ФОТОМЕТРИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ОСЕВОГО ВРАЩЕНИЯ АСТЕРОИДА

Фотометрическая обработка наблюдений выполнялась также с помощью программного пакета АПЕКС-II (Девяткин и др., 2010), разработанного в Пулковской обсерватории. Фотометрическая редукция осуществлялась с опорой на каталог GAIA DR2 (Gaia Archive web-page).

В базе данных параметров астероидов, которую ведет P. Pravets (Pravets web-page), указано значение периода осевого вращения астероида 65690 (1991 DG) $P = 7.1125 \pm 0.0005$ ч. В работе (Warner, Stephens, 2020, стр. 207), указаны два возможных периода. Один из них близок к вышеуказанному, $P = 7.1111 \pm 0.0007$ ч, но ему соответствует всего лишь пятый по величине пик на периодограмме, построенной по наблюдениям Центра исследований Солнечной системы (Center for Solar System Studies). Второй период, $P = 4.7383 \pm 0.0008$ ч, соответствует наибольшему пику на периодограмме. При этом отмечается, что кривая блеска астероида, приведенная к периоду 7.1 ч, имеет три максимума, что, хотя и встречается редко, но вполне возможно при больших углах фазы, при которых проводились наблюдения (до 75°). Кривая блеска с периодом 4.7 ч имеет более часто встречающийся вид с двумя максимумами.

Для определения периода мы использовали девять фрагментов кривой блеска длительностью от 2.2 до 5.7 ч, построенных по нашим наблюдениям 14, 19, 22, 26, 27, 29, 30 марта и 3 апреля 2020 г. Общее число использованных ПЗС-кадров — 677, полный интервал времени составил 483 ч. Значения блеска астероида были исправлены за его расстояния от Земли и Солнца. По исправленным значениям была построена линейная фазовая зависимость блеска в интервале углов фазы от 28° до 75° . После ее учета фрагменты были приведены к одному уровню путем вычитания среднего по фрагменту значения блеска. Центрированный таким образом ряд значений блеска был подвергнут частотному анализу методом Скаргла (Scargle, 1982).

На рис. 3 представлена полученная таким путем периодограмма. У трех ее наиболее высоких пиков подписаны соответствующие им значения периода. Если предполагать, что кривая блеска астероида имеет два максимума и два минимума (что является наиболее распространенным случаем), то период осевого вращения может быть равен удвоенным значениям, указанным на рис. 3: 3.9630, 4.3193 или 4.7459 ч. Наибольший из этих периодов близок к найденному в работе (Warner, Stephens, 2020). Периоду около 7.1 ч не соответствует ни один из высоких пиков периодограммы.

На рис. 4 показана кривая блеска астероида, приведенная к периоду $P = 4.3193 \pm 0.0028$ ч,

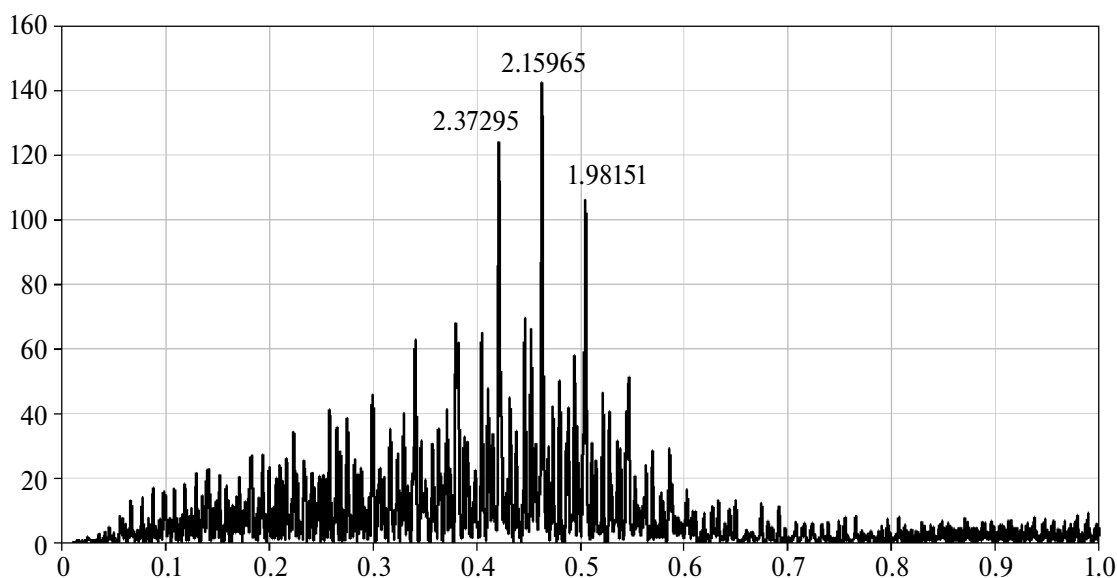


Рис. 3. Периодограмма кривой блеска астероида 65690 (1991 DG). По оси абсцисс отложена частота в единицах $1/\text{ч}$, по оси ординат — мощность в относительных единицах. У трех наиболее высоких пиков указаны соответствующие им значения периода в часах.

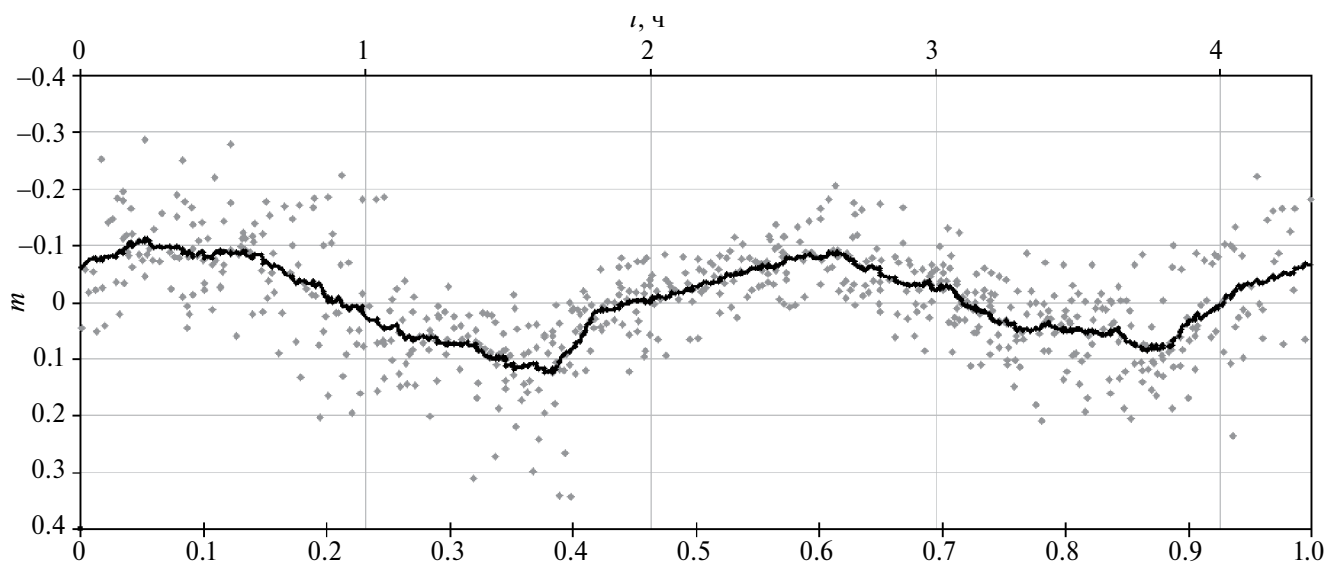


Рис. 4. Кривая блеска астероида 65690 (1991 DG), приведенная к найденному в настоящей работе периоду $P = 4.3193 \pm 0.0028$ ч. Серые точки — наблюдательные значения, черная кривая — скользящее среднее. По нижней оси абсцисс отложена фаза вращения, по верхней — время в часах, по оси ординат — относительный блеск.

соответствующему наивысшему пику периодограммы. Разброс точек объясняется отчасти погрешностью фотометрии, отчасти тем, что при наблюдениях в широком интервале углов фазы значительно меняются форма и амплитуда кривой блеска. Полная амплитуда колебаний средней кривой блеска составила около 0.2^m .

МОДЕЛИРОВАНИЕ
НЕГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Моделирование светового давления солнечной радиации проводилось при следующих начальных данных на эпоху 2459600.5 (2022-01-21):
 $e = 0.363003$ — эксцентриситет (JPL web-page),
 $a = 1.427702$ а. е. — большая полуось (JPL web-page),
 $H_V = 19.07$ — абсолютная звездная величина в видимом диапазоне (JPL web-page),
 $D = 0.527$ км — диаметр (SpaceReference web-page),
 $p_V = 0.15$ — геометрическое альbedo, полученное по формуле (Виноградова и др., 2003)

$$\lg D = 3.122 - 0.5 \lg p_V - 0.2 H_V, \tag{1}$$

$k = 1.07$ — оптический коэффициент, полученный по формуле (Поляхова, Шмыров, 1994)

$$k = 1 + 4 p_V / 9. \tag{2}$$

Плотность астероида и спектральный класс неизвестны, поэтому вычисления выполнялись для трех значений средней плотности основных спектральных классов астероидов (Krasinsky и др., 2002): 1380 кг/м^3 (углеродистые астероиды С-класса), 2710 кг/м^3 (кремниевые астероиды S-класса), 5320 кг/м^3 (металлические астероиды М-класса); а также для их среднего арифметического значения 3137 кг/м^3 . Процесс вычисления описан в работе (Мартюшева и др., 2015). В табл. 6 представлены отклонения астероида вдоль гелиоцентрического радиус-вектора Δr , по долготе Δl , а также полное отклонение Δd вследствие светового давления за 27 лет, что соответствует 2049 г., когда произойдет наиболее тесное сближение с Землей в этом столетии.

Таблица 6. Отклонения астероида 1991 DG вследствие светового давления за 27 лет при различных значениях плотности ρ

$\rho, \text{ кг/м}^3$	$ \Delta r , \text{ км}$	$ \Delta l , \text{ км}$	$ \Delta d , \text{ км}$
1380	1021	3772	3786
2710	520	1921	1928
3137	449	1659	1666
5320	265	978	982

Моделирование эффекта Ярковского проводилось при следующих начальных данных на эпоху 2459600.5 (2022-01-21):

$e = 0.36300282$ – эксцентриситет (JPL web-page),

$p_v = 0.15$ – геометрическое альbedo, полученное по формуле (1)

$n = 0.57776029$ град/сут – среднее суточное движение (JPL web-page),

$M = 354.596498$ град – средняя аномалия (JPL web-page),

$P_{\text{rot}} = 7.1125$ ч – период вращения (JPL web-page),

Следующие величины были приняты средними:

$\rho = 3137$ кг/м³ – плотность,

$\varepsilon = 0.9$ – коэффициент эмиссии,

$C = 500$ Дж/кг/К – теплоемкость,

$K = 10^{-2}$ Вт/м/К – теплопроводность.

Угол наклона оси вращения γ неизвестен, поэтому вычисления выполнялись для следующих значений: 0°, 45°, 90°, 135°, 180°. Термодинамическая модель эффекта Ярковского была взята из работ (Vokrouhlický, 1999; Vokrouhlický и др., 2000). Для вычислений использовалась методика (Панасенко, Чернетенко, 2014). В табл. 7 представлены величины изменения большой полуоси орбиты астероида вследствие эффекта Ярковского в зависимости от угла наклона оси вращения астероида.

В зависимости от направления вращения астероида по отношению к направлению орбитального движения эффект Ярковского может вызывать как ускорение орбитального движения, т.е. уменьшение значения большой полуоси a , так и замедление, т.е. увеличение большой полуоси a .

Таблица 7. Величина эффекта Ярковского Δa за один оборот астероида 1991 DG вокруг Солнца в зависимости от угла наклона оси вращения астероида γ

Эффект Ярковского за один оборот вокруг Солнца	γ , град				
	0	45	90	135	180
$\Delta a \cdot 10^{-12}$, а. е.	0.6948	0.4850	0.0127	−0.4976	−0.6948

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На телескопах ГАО РАН ЗА-320М и МТМ-500М были проведены астрометрические и фотометрические наблюдения потенциально опасного астероида 65690 (1991 DG) во время его сближения с Землей в 2020 г. На основе полученных рядов и наблюдений с сайта MPC была уточнена орбита астероида и определены обстоятельства сближений астероида с Землей и Марсом. На основе модельных расчетов выполнена оценка влияния на его орбиту негравитационных эффектов. Вычисления показали, что максимальные отклонения астероида 1991 DG вследствие светового давления составят от 982 до 3786 км за 27 лет в зависимости от плотности астероида. Величина изменения большой полуоси орбиты астероида 1991 DG вследствие эффекта Ярковского составит от -0.6948×10^{-12} до 0.6948×10^{-12} а. е. за один оборот вокруг Солнца в зависимости от угла наклона оси вращения астероида. По фотометрическим наблюдениям астероида была построена кривая блеска и определен период его осевого вращения.

Данная работа выполнена в рамках плановой НИР ГАО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградова Т.А., Железнов Н.В., Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А., Шор В.А. Каталог потенциально опасных астероидов и комет // Тр. ИПА РАН. 2003. Вып. 9. С. 43–46.
2. Девяткин А.В., Канаев И.И., Кулиш А.П., Рафальский В.Б., Шумахер А.В., Куприянов В.В., Бехтева А.С. Автоматизация астрономических наблюдений на ЗА-320. II // Изв. ГАО. 2004. № 217. С. 505–530.
3. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Куприянов В.В., Верещагина И.А. Программные пакеты “Апекс-I” и “Апекс-II” для обработки астрономических ПЗС-наблюдений // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. № 1. С. 74–87. (Devyatkin A.V., Gorshanov D.L., Kouprianov V.V., Vereshchagina I.A. APEX I and APEX II software packages for the reduction of astronomical CCD observations // Sol. Syst. Res. 2010. V. 44. № 1. P. 68–80.)
4. Кулиш А.П., Девяткин А.В., Рафальский В.Б., Ибрагимов Ф.М., Куприянов В.В., Верещагина И.А., Шумахер А.В. Автоматизация комплекса телескопа МТМ-500М // Изв. ГАО. 2009. № 219. Вып. 1. С. 192–218.

5. Львов В.Н., Цекмейстер С.Д. Использование программного пакета ЭПОС для исследования объектов Солнечной системы // Астрон. вестн. 2012. Т. 46. № 2. С. 190–192. (*L'vov V.N., Tsekmeister S.D.* The use of the EPOS software package for research of the Solar system objects // *Sol. Syst. Res.* 2012. V. 46. № 2. P. 177–179.)
 6. Мартюшева А.А., Петров Н.А., Поляхова Е.Н. Численное моделирование воздействия светового давления на движение астероидов, в том числе сближающихся с Землей // Вестн. С.-Пб ун-та. 2015. Сер. 1. Т. 2. Вып. 60 (№ 1). С. 135–147.
 7. Панасенко А.И., Чернетенко Ю.А. Моделирование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов // Тр. ИПА РАН. 2014. Т. 31. С. 59–65.
 8. Поляхова Е.Н., Шмыров А.С. Физическая модель сил давления световой радиации на плоскость и сферу // Вестн. С.-Пб ун-та. 1994. Сер. 1. Вып. 2 (№ 8). С. 87–104.
 9. *Krasinsky G.A., Pitjeva E.V., Vasilyev M.V., Yagudina E.I.* Hidden mass in the asteroid belt // *Icarus.* 2002. V. 158. P. 98–105.
 10. *Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. J.* 1982. V. 263. P. 835–853.
 11. *Vokrouhlický D.* A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments // *Astron. and Astrophys.* 1999. V. 344. P. 362–366.
 12. *Vokrouhlický D., Milani A., Chesley S.R.* Yarkovsky effect on small near-Earth asteroids: Mathematical formulation and examples // *Icarus.* 2000. V. 148 (1). P. 118–138.
 13. *Warner B.D., Stephens R.D.* Near-Earth asteroid lightcurve analysis at the Center for Solar System Studies: 2019 December – 2020 April // *Minor Planet. Bull.* 2020. V. 47. № 3. P. 200–213.
- Websites**
14. Gaia Archive web-page: <https://gea.esac.esa.int/archive/>
 15. JPL web-page: https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=1991%20DG
 16. JPL web-page 2: https://ssd.jpl.nasa.gov/planets/eph_export.html
 17. MPC web-page: https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=65690
 18. MPC web-page 2: <https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html>
 19. Pravets web-page: <https://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.txt>
 20. SpaceReference web-page: <https://www.spacereference.org/asteroid/65690-1991-dg>