

УДК 523.44

НАБЛЮДЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО АСТЕРОИДА 139622 (2001 QQ142)

© 2025 г. А. В. Девяткин*, Д. Л. Горшанов, В. Н. Львов,
С. Н. Петрова, А. А. Мартюшева, К. Н. Наумов

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН (ГАО РАН),

Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: a9kin@mail.ru

Поступила в редакцию 18.06.2024 г.

После доработки 18.09.2024 г.

Принята к публикации 23.11.2024 г.

В 2023–2024 гг. на телескопах ГАО РАН были проведены астрометрические и фотометрические наблюдения потенциально опасного астероида 139622 (2001 QQ142). Получены ряды астрометрических наблюдений положений астероида, которые имеют среднеквадратическую точность одного наблюдения для ЗА-320М $\sigma = \pm 0''.21$ и для МТМ-500М $\sigma = \pm 0''.07$. Исследованы эволюция его орбиты и обстоятельства сближений с Землей, сделана оценка влияния негравитационных эффектов на его движение. По фотометрическим наблюдениям астероида в интегральных полосах телескопов были построена кривая блеска и уточнен период его осевого вращения: $P = 17.0232 \pm 0.0040$ ч.

Ключевые слова: потенциально опасные астероиды, астрометрия, фотометрия

DOI: 10.31857/S0320930X25020058, EDN: KWVJOO

ВВЕДЕНИЕ

Астероид 139622 (2001 QQ142) был открыт в обсерватории Халеакала на Гавайских островах (США) 25.08.2001 г. в рамках проекта NEAT (Near-Earth Asteroid Tracking). Он относится к группе аполлонов и классифицирован как потенциально опасный астероид (PHA). Диаметр астероида 139622, по данным веб-сайта ESA (ESA web-page), оценивается от 0.5 до 1.2 км. По данным веб-сайта (JPL web-page) со ссылкой на работу по спектральной классификации астероидов (Binzel и др., 2004), астероид относится к спектральному классу Sq по классификации SMASS (кремниевый астероид), что подтверждено в работе (Binzel и др., 2019) и указано на веб-сайте (ALCDEF web-page). Абсолютная звездная величина его оценивается как $18.5''$.

В табл. 1 приведены элементы орбиты астероида, взятые из каталога MPCORB Международного центра малых планет (MPC). Астероид

имеет период обращения вокруг Солнца 1.7 года, приближаясь к Солнцу на расстояние до 0.98 а. е. и удаляясь от него на расстояние до 1.87 а. е.

Таблица 1. Элементы орбиты астероида 139622 из каталога MPCORB от 02.02.2024 г.

Эпоха	2460000.5
МА, град	201.88793
ω , град	337.91154
Ω , град	83.25044
i , град	9.31621
e	0.3111450
q , а. е.	0.98002030
a , а. е.	1.42268010
n , град/сут	0.58082220

Примечание: МА – средняя аномалия, ω – аргументperiцентра, Ω – долгота восходящего узла, i – наклонение орбиты, e – эксцентриситет, q – расстояние в перигелии, a – большая полуось, n – среднее движение.

6 декабря 2023 г. астероид 139622 испытал тесное сближение с Землей. Это позволило провести наблюдения на небольших телескопах для уточнения его орбитальных и вращательных свойств.

ОСОБЕННОСТИ ОРБИТАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДА 139622

С использованием пакета программ ЭПОС (Львов, Цекмайстер, 2012) были исследованы некоторые особенности орбитального движения астероида. Астероид 139622 за три столетия несколько раз сближался с Землей на расстояние менее 0.05 а. е. В табл. 2 приведены сведения о сближениях астероида с Землей. Тесное сближение астероида с Землей 06.12.2023 г. произошло на расстоянии около 5526000 км. Обстоятельства сближений приведены в табл. 2. С Венерой и Марсом таких сближений не было обнаружено.

На рис. 1 приведены графики изменения наклонения, эксцентриситета и большой полуоси орбиты на интервале времени 1900–2200 гг. Резкие изменения этих величин коррелируют с моментами тесных сближений астероида с Землей. Особенно это заметно для сближений в 1967 г. и в 2123 г. (отмечено на графиках). Однако абсолютные величины этих изменений пока весьма малы. В текущем тысячелетии астероид будет подходить к Земле ближе, чем Луна. В более отдаленном будущем при приближении к резонансу 7/4 с Землей по среднему движению изменения орбиты будут более существенны.

Таблица 2. Тесные сближения астероида с Землей в интервале времени 1900–2200 гг.

Дата, Г-М-Д	Расстояние, а. е.	Относительная скорость,
		км/с
1967 12 15.07	0.0146	7.22
2023 12 06.87	0.0369	6.66
2045 12 17.82	0.0303	7.54
2062 12 05.37	0.0420	6.63
2123 12 13.31	0.0137	6.93
2182 12 09.42	0.0293	6.73

При движении астероида 139622 в области афелия существует ненулевая вероятность тесных его сближений с крупными астероидами внутренней части Главного пояса, количество которых варьируется от десятков до тысяч, в зависимости от размеров.

Вышеизложенные обстоятельства эволюции орбиты астероида 139622 могут в будущем привести к столкновению его с Землей.

НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ ОБРАБОТКА

Наблюдения астероида 139622 выполнялись в рамках “Пулковской программы изучения объектов, сближающихся с Землей” (Львов и др., 2002) и проводились на автоматизированных телескопах ГАО РАН: Зеркальном астрографе ЗА-320М (Девяткин и др., 2004), установленном на территории Пулковской

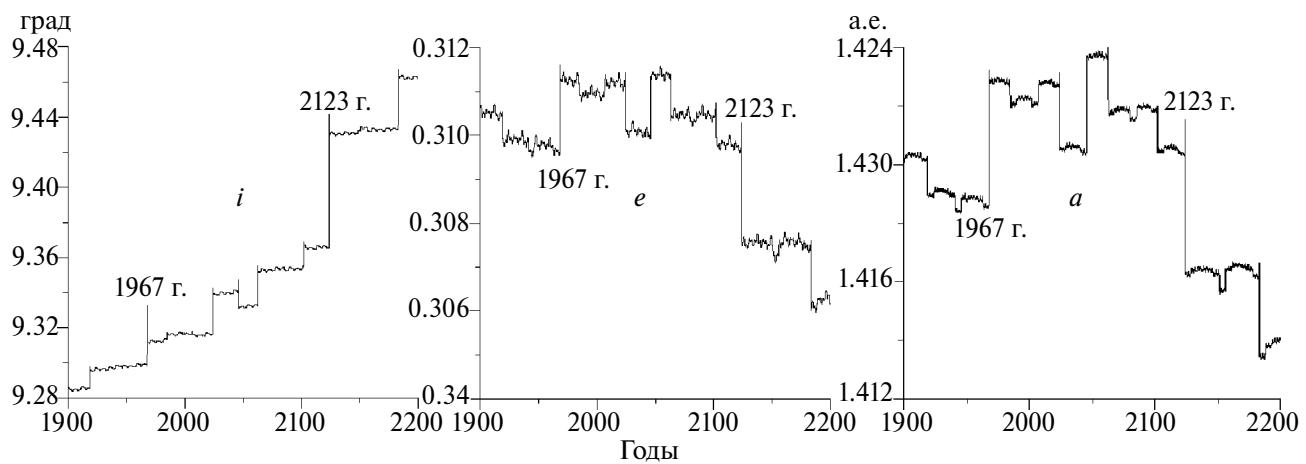


Рис. 1. Изменение наклона i , эксцентриситета e и большой полуоси a орбиты астероида 139622 на интервале времени 1900–2200 гг.

обсерватории (г. Санкт-Петербург), и Мениковом телескопе Д.Д. Максутова МТМ-500М (Кулиш и др., 2009), установленном на Горной астрономической станции ГАО РАН в пункте Шаджатмаз на Северном Кавказе. Места установки телескопов, характеристики телескопов и используемых на них светоприемников указаны в табл. 3.

Наблюдения астероида в двух пунктах были возможны только после сближения с Землей с середины декабря 2023 г. по начало февраля 2024 г. На телескопе ЗА-320М было получено 11 рядов наблюдений, а на телескопе МТМ-500М – 13 рядов. В табл. 4 представлены обстоятельства наблюдений. Для тех рядов, которые были использованы для построения кривой блеска астероида, в таблице приведены величины фазового угла (РА) и эклиптических координат его бисектора (PABL и PABB). Они, а также значения блеска m , вычислены на средние моменты рядов с помощью программного пакета ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012) на основе элементов орбиты из каталога Центра малых планет (MPC web-page).

Наблюдения выполнялись без светофильтров, в интегральных полосах чувствительности инструментов. Длительности экспозиций подбирались в зависимости от блеска и угловой скорости движения астероида.

Обработка астрометрических и фотометрических наблюдений астероида выполнялась

с помощью программного пакета АПЕКС-II (Девяткин и др., 2010). Этот пакет позволяет выполнять полную автоматическую обработку ПЗС-кадров, состоящую из следующих этапов:

- калибровка кадров – удаление холодных и горячих пикселов и столбцов (“косметика”), учет темнового сигнала и плоского поля, сглаживание фона;
- выделение на кадре изображений источников света и фильтрация ложных объектов (например, треков частиц);
- аппроксимация PSF изображений заданной функцией и определение центров изображений и потоков света;
- отождествление звезд на кадре по заданным звездным каталогам;
- астрометрическая редукция кадра одним из общепринятых методов;
- фотометрическая редукция с полиномиальной моделью заданного порядка;
- поиск на кадре изображений объектов Солнечной системы;
- вывод результатов обработки в различном виде, в том числе в формате, рекомендованном MPC.

В настоящем случае изображения объектов на ПЗС-кадрах аппроксимировались двумерной гауссианой, в качестве опорного астрометрического и фотометрического каталога служил каталог Gaia DR3, астрометрическая редукция кадров проводилась методом восьми постоянных.

Таблица 3. Места установки телескопов и их характеристики

Характеристики	Телескоп	МТМ-500М	ЗА-320М
Параметры места установки			
Широта		43° 44' 30"	59° 46' 15"
Долгота		42° 39' 45"	30° 19' 40"
Высота, м		2100	80
Оптическая система		Максутова – Кассегрена	Кассегрена
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)
Поле зрения, угл. мин		30.9 × 30.9	18.8 × 14.2
Биннирование, пикс.		3 × 3	4 × 4
Угл. размер суперпикселя		1''.4 × 1''.4	0''.97 × 0''.97

Таблица 4. Обстоятельства наблюдений астероида 139622 на телескопах 3А-320М (3А) и МТМ-500М (МТМ)

Дата, г-м-д (вечер)	Интервал времени UTC	Телескоп	Число кадров	m	РА, град	PABL, град	PABB, град
2023-12-17	21:34 – 01:15	3А	139	14.5			
2023-12-19	20:15 – 20:19	МТМ	5	14.7			
	20:05 – 03:43	3А	203	14.7	62.6	120.0	12.2
2023-12-24	20:20 – 22:17	МТМ	76	15.0	57.4	120.7	16.8
2023-12-29	18:11 – 22:54	МТМ	228	15.3	52.9	121.8	19.6
2023-12-30	17:34	МТМ	1	15.4			
2023-12-31	17:59 – 23:02	МТМ	206	15.5	51.2	122.3	20.4
2024-01-01	17:16 – 21:05	МТМ	173	15.5	50.5	122.6	20.7
	21:58 – 03:14	3А	296	15.5	50.3	122.7	20.8
2024-01-02	21:47 – 23:28	3А	2	15.6			
2024-01-05	22:44 – 23:32	МТМ	37	15.7	47.2	123.8	21.9
2024-01-06	18:02 – 21:57	МТМ	201	15.8	46.6	124.1	22.1
	21:19 – 05:10	3А	466	15.8	46.4	124.2	22.1
2024-01-07	19:53 – 01:25	3А	259	15.8	45.7	124.4	22.3
2024-01-11	20:48 – 02:46	3А	35	16.0			
2024-01-12	23:29 – 05:05	3А	82	16.1			
2024-01-14	19:05 – 21:41	МТМ	132	16.2	41.0	126.6	23.2
2024-01-15	17:00 – 20:41	МТМ	98	16.2	40.5	126.9	23.3
2024-01-16	16:52 – 16:54	МТМ	2	16.3			
2024-01-19	21:56 – 04:49	3А	20	16.4			
2024-01-20	15:56 – 19:11	МТМ	52	16.4	37.6	128.5	23.5
	20:24 – 22:56	3А	43	16.4			
2024-01-30	15:50 – 23:00	МТМ	114	16.9	33.1	131.8	23.4
2024-02-02	18:37 – 19:59	3А	9	17.0			

Примечание: последние три столбца приводятся только для рядов наблюдений, использованных для построения кривой блеска астероида.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АСТРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

В результате астрометрической обработки наблюдений были получены 1554 топоцентрических астрометрических положения астероида на 3А-320М и 1325 положений на МТМ-500М. Результаты наблюдений астероида 139622 в формате MPC размещены на страницах веб-сайта Пулковской обсерватории GAORAN_1 web-page и GAORAN_2 web-page.

Основные результаты астрометрических наблюдений ранее были опубликованы в статье (Девяткин и др., 2024). Здесь мы приводим некоторые результаты по анализу астрометрических наблюдений. Для оценки точности наблюдений и возможной неточности теории движения астероида были вычислены значения О–С с помощью программы ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012) на основе орбиты MPC от 02.02.2023 г. (табл. 1).

Для оценки астрометрической точности наблюдений и фильтрации массовых наблюдений

была использована специальная программа, которая отслеживает ход изменений О–С со временем и позволяет аппроксимировать его полиномами первого или второго порядка, определять стандартное отклонение σ от полученной кривой и отсеивать грубые ошибки.

Наличие выраженного тренда в О–С может указывать на возможные систематические ошибки наблюдений, а также на неточность орбиты, используемой в программе ЭПОС. Разброс точек относительно тренда характеризует случайную ошибку самих наблюдений. В нашем случае для фильтрации наблюдений использовался полином второго порядка и критерий 3σ . На рис. 2 представлены значения О–С астероида по прямому восхождению и склонению для ЗА-320М и МТМ-500М. Вычисленные таким образом среднеквадратические ошибки одного наблюдения оказались следующими:

МТМ – 500М $\sigma_\alpha = \pm 0''.06$, $\sigma_\delta = \pm 0''.08$,

ЗА – 320М $\sigma_\alpha = \pm 0''.18$, $\sigma_\delta = \pm 0''.25$.

Значения О–С по обеим координатам в среднем на двух телескопах близки к нулю, что позволяет сделать вывод о точности теории и точности наших наблюдений в систематическом отношении. Большой разброс результатов, полученных на ЗА-320М, не позволяет выделить отклонения наблюдений от теории. Но в результатах, полученных на МТМ-500М (целиком лежащих внутри полосы разброса данных ЗА-320М), видны тренды О–С со временем. Поскольку в данной работе орбита астероида не уточнялась, то нет возможности определить, насколько систематические ошибки относятся к особенностям наблюдений, а насколько – к неточности известной орбиты.

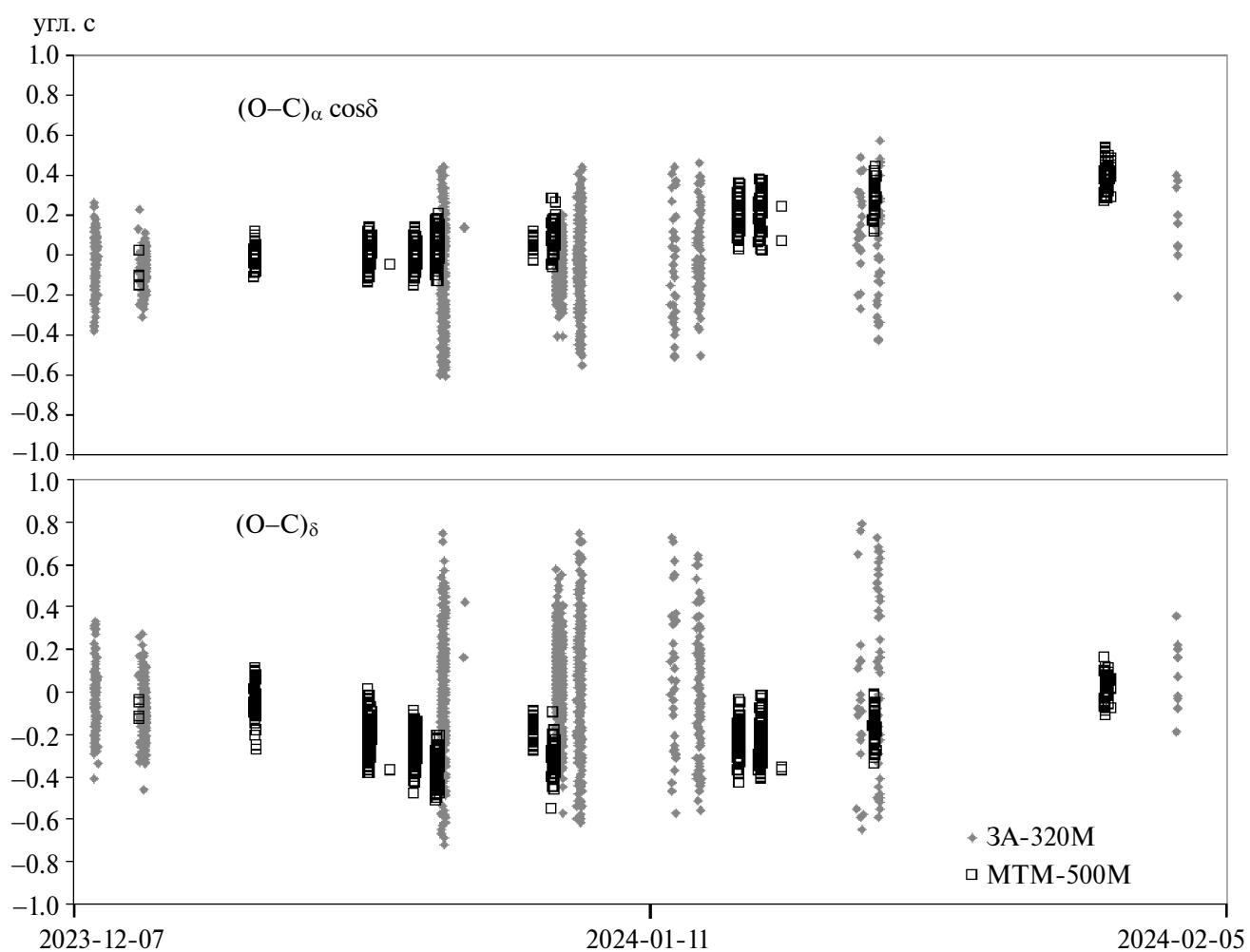


Рис. 2. Значения О–С по прямому восхождению и склонению для наблюдений астероида 139622 на телескопах Пулковской обсерватории.

ФОТОМЕТРИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ОСЕВОГО ВРАЩЕНИЯ

Значения блеска и моменты времени, полученные в результате фотометрической обработки с помощью программного пакета Апекс-II (Девяткин и др., 2010), были исправлены на изменение расстояний астероида от Земли и Солнца. Изменение угла фазы было учтено с использованием параметра наклона фазовой зависимости $G = 0.24$ (ALCDEF web-page).

Из всех рядов наблюдений были отсечены, которые имеют большой разброс значений блеска. В результате остались четыре ряда, полученных на телескопе ЗА-320М, и 10 рядов, полученных на МТМ-500М (см. табл. 4). Из них был образован объединенный ряд, который подвергли частотному анализу методом Скаргла (Scargle, 1982). В предположении, что кривая блеска астероида имеет два максимума, было получено значение периода его осевого вращения $P = 17.0232 \pm 0.0040$ ч при полной амплитуде изменения блеска $A = 0.46'' \pm 0.04''$. Эти величины вполне соответствуют значениям, определенным другими авторами (см. табл. 5). Наши наблюдения проводились на длительном интервале времени (около 43 суток), т.е. приблизительно 60 предполагаемых периодов вращения астероида. Поэтому полученное значение периода можно считать достаточно надежным.

На рис. 3 представлена объединенная кривая блеска астероида, приведенная к указанному периоду. Разброс значений блеска данной кривой вызван двумя причинами. Отчасти он объясняется погрешностями фотометрии: RMS для отрезков кривой блеска, полученных в разные ночи, меняется в пределах $0.01''$ – $0.06''$, в зависимости от блеска астероида, телескопа и качества неба. Вторая причина состоит в том,

что наблюдения выполнялись при больших и значительно изменяющихся значениях угла фазы (63° – 33°), в зависимости от которых изменялись амплитуда и форма кривой блеска. Эти изменения можно заметить, если сравнивать форму кривой на рис. 3 с кривыми, приведенными в иллюстрациях из источников, указанных в табл. 5; для сравнения они собраны на рис. 4. Например, кривая из работы (Franco и др., 2024), построенная по наблюдениям, выполненным раньше наших и при углах фазы 69° – 61° , имеет вторичный максимум более острой формы и с менее широким основанием, чем на нашем рис. 3. Три кривые, приведенные на веб-сайте (Pravets web-page), наблюдавшиеся в разное время, также заметно отличаются друг от друга по форме. При этом наша кривая блеска наиболее похожа на кривую, построенную по наблюдениям 9–10 января 2024 г. (правая верхняя панель рис. 4).

ОЦЕНКА НЕГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Для астероида 139622 была сделана оценка влияния светового давления и эффекта Ярковского. Последний представляет собой слабый асимметричный реактивный импульс за счет поглощения солнечной энергии поверхностью на дневной стороне астероида и теплового излучения части этой энергии на ночной стороне.

Начальные данные для расчетов представлены в табл. 1. Как было упомянуто ранее, астероид 139622 относится к спектральному классу Sq по классификации SMASS, поэтому его плотность была принята средней для объектов данного класса – $2710 \text{ кг}/\text{м}^3$ (Krasinsky и др., 2002). Также во Введении приводятся абсолютная звездная величина и оценки диаметра

Таблица 5. Параметры осевого вращения астероида 139622, определенные по кривой блеска разными авторами

P , ч	A , зв.вел.	Даты наблюдений, г м д	Ссылки
17.0208 ± 0.0003	0.29	2023-08-20 – 2023-10-11	Pravets web-page
17.0208	0.52	2024-01-09 – 2024-01-10	Pravets web-page
17.0208	0.34	2024-01-21 – 2024-01-30	Pravets web-page
16.99 ± 0.01	0.38 ± 0.08	2023-12-15 – 2023-12-21	Franco и др., 2024
17.0232 ± 0.0040	0.46 ± 0.04	2023-12-19 – 2024-01-30	Настоящая работа

Примечание: P – период в часах, A – полная амплитуда изменений блеска в зв. величинах.

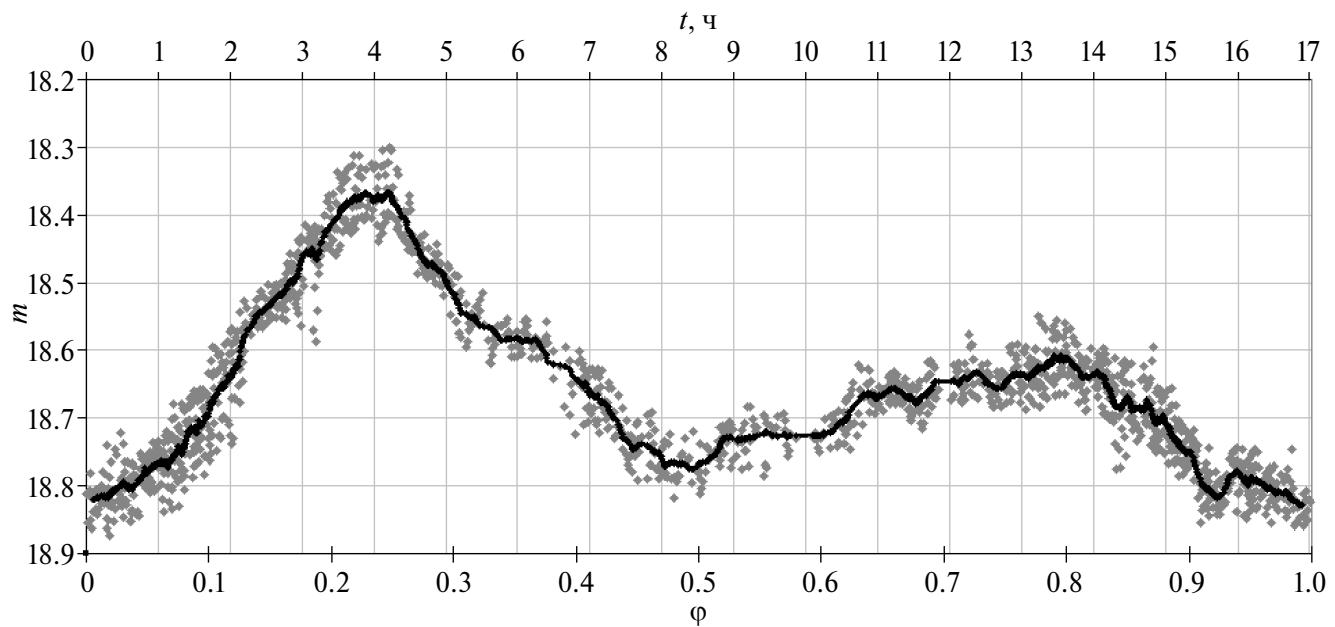


Рис. 3. Кривая блеска астероида 139622, приведенная (фазированная) к периоду 17.0232 ч. Темно-серые точки – наблюдавшиеся значения, черная кривая – скользящее среднее. По верхней оси абсцисс отложено время t в часах, по нижней – фаза вращения ϕ .

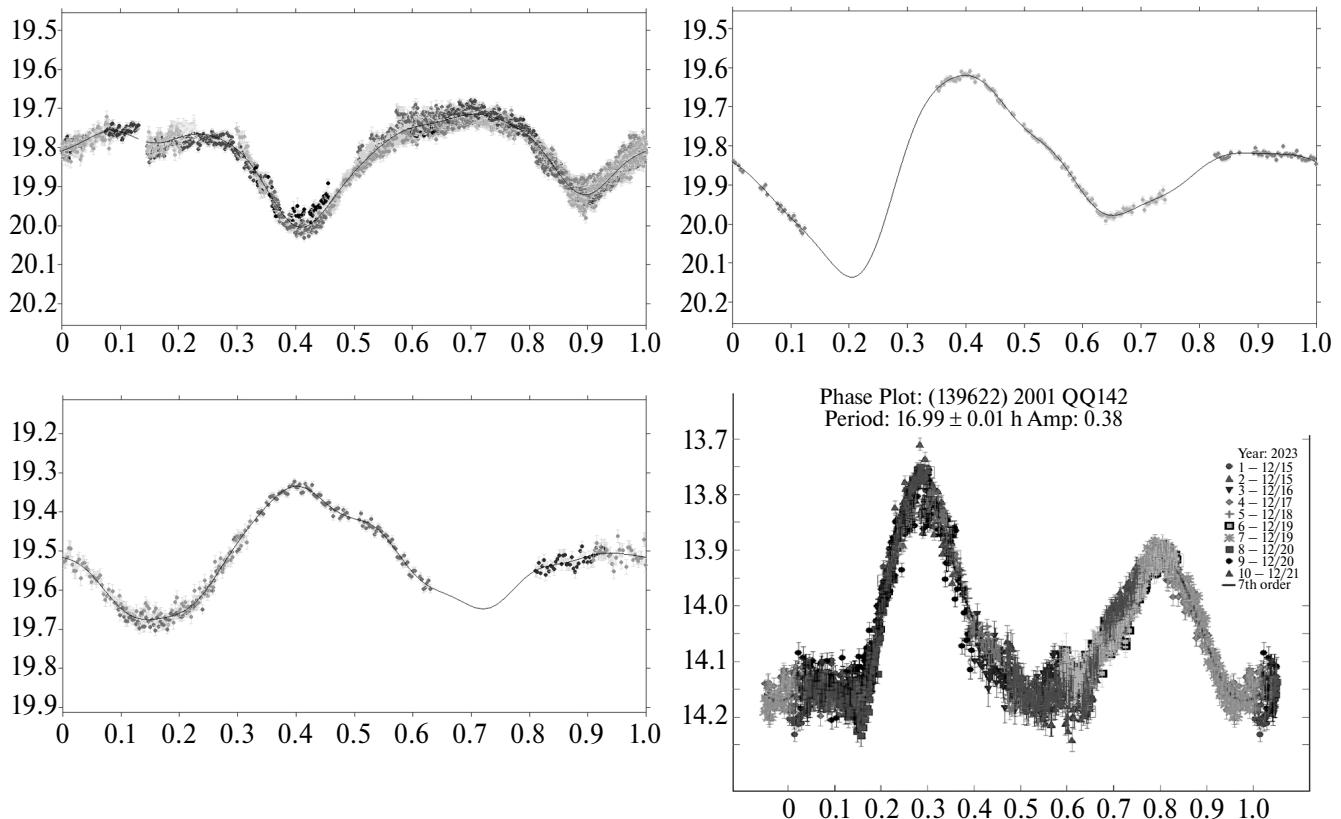


Рис. 4. Кривые блеска астероида 139622, построенные в работах, перечисленных в табл. 5. Верхние и нижняя левая панели – с сайта (Pravets web-page), нижняя правая – из статьи (Franco и др., 2024).

астероида. Вычисления были сделаны для двух значений диаметра: 0.5 и 0.7 км. Период осевого вращения был взят равным 17.0232 ч (табл. 5). Альбедо астероида δ вычислялся по формуле $\lg\delta = (3.122 - \lg D - 0.2H)/0.5$ (Виноградова и др., 2003), где D – диаметр астероида в км и H – абсолютная звездная величина, таким образом, $\delta = 0.28$ и 0.15 для $D = 0.5$ и 0.7 км соответственно.

Вычислялось максимальное смещение астероида, состоящее из смещения астероида вдоль гелиоцентрического радиус-вектора и смещения астероида по долготе, под действием светового давления (Мартюшева и др., 2015). За 22 года, т.е. до следующего тесного сближения астероида 139622 с Землей 17 декабря 2045 г., максимальное смещение может составить около 72 и 49 км при $D = 0.5$ и 0.7 км соответственно.

В зависимости от направления вращения астероида по отношению к направлению орбитального движения эффект Ярковского может вызывать как сокращение большой полуоси, так и ее увеличение. Угол наклона оси вращения астероида γ неизвестен, поэтому расчеты проводились для пяти стандартных значений углов (табл. 6). Термодинамическая модель эффекта Ярковского взята из работ (Vokrouhlický, 1999; Vokrouhlický и др., 2000), методика расчета взята из работы (Панасенко, Чернетенко, 2014). В табл. 6 представлена скорость изменения большой полуоси орбиты астероида 139622 в результате эффекта Ярковского в зависимости от угла наклона оси вращения и диаметра.

В работе (Greenberg и др., 2017) среди измерений эффекта Ярковского для 247 астероидов, сближающихся с Землей, приводится и скорость изменения большой полуоси орбиты астероида 139622, равная -31.92×10^{-4} (а. е.)/млн лет, что примерно на порядок отличается от представленных в табл. 6 результатов. Угол наклона

оси вращения γ , по-видимому, подразумевался авторами упомянутой статьи равным 180° . Авторы описывают скорость изменения большой полуоси орбиты астероида da/dt через параметр эффективности Ярковского, который требует оценки физических параметров и для некоторых астероидов, в числе которых и 139622, существенно превышает медианное значение. Негравитационные воздействия на эти объекты могут быть вызваны не только эффектом Ярковского. Кроме того, возможные ошибки в астрометрических данных могли повлиять на результаты, поэтому авторы добавили специальные “предупредительные” отметки для таких случаев. Также различие в результатах может отчасти быть связано с различиями в начальных данных и физических параметрах, задействованных в вычислениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На телескопах ГАО РАН в 2023–2024 гг. получены астрометрические и фотометрические ряды наблюдений потенциально опасного астероида 139622. Среднеквадратическая точность одного астрометрического наблюдения характеризуется следующими значениями: на ЗА-320М – $\sigma = \pm 0''.21$, на МТМ-500М – $\sigma = \pm 0''.07$.

Исследована эволюция орбиты астероида и обстоятельства сближений с Землей. Сделан вывод, что в более отдаленном будущем при приближении к резонансу 7/4 с Землей по среднему движению возможны сильные изменения орбиты астероида. Выполнена оценка влияния негравитационных эффектов на его движение.

По фотометрическим наблюдениям астероида была построена кривая блеска и уточнен период его осевого вращения: $P = 17.0232 \pm 0.0040$ ч.

Данная работа выполнена в рамках плановой НИР ГАО РАН.

Таблица 6. Скорость изменения большой полуоси орбиты астероида da/dt в результате эффекта Ярковского в зависимости от угла наклона оси вращения γ и диаметра D

D	γ	0, град	45, град	90, град	135, град	180, град
0.5 км		4.21×10^{-4} (а. е.)/млн лет	2.97×10^{-4} (а. е.)/млн лет	-1.13×10^{-6} (а. е.)/млн лет	-2.99×10^{-4} (а. е.)/млн лет	-4.21×10^{-4} (а. е.)/млн лет
0.7 км		3.26×10^{-4} (а. е.)/млн лет	2.30×10^{-4} , (а. е.)/млн лет	-1.19×10^{-6} , (а. е.)/млн лет	-2.31×10^{-4} , (а. е.)/млн лет	-3.26×10^{-4} , (а. е.)/млн лет

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградова Т.А., Железнов Н.Б., Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А., Шор В.А. Каталог потенциально опасных астероидов и комет // Тр. ИПА РАН. 2003. Вып. 9. С. 43.
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-И” и “Апекс-ИІ” 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. <https://doi.org/10.1134/S0038094610010090>)
4. Девяткин А.В., Горшанов Д.Л., Наумов К.Н., Петрова С.Н., Мартишева А.А., Куприянов В.В., Алиев А.Х., Русов С.А. Наблюдения потенциально опасного астероида 2001 QQ142 (139622) на Зеркальном астрографе ЗА-320М и Менисковом телескопе Д.Д. Максутова МТМ-500М Пулковской обсерватории // Изв. ГАО. 2024. № 232. С. 29–33.
5. 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.
6. Львов В.Н., Девяткин А.В., Смехачева Р.И., Цекмайстер С.Д., Горшанов Д.Л., Корнилов Э.В., Куприянов В.В., Рафальский В.Б., Сидоров М.Ю. Пулковская программа изучения объектов, сближающихся с Землей // Изв. ГАО. 2002. № 216. С. 218–222.
7. Львов В.Н., Цекмайстер 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. <https://doi.org/10.1134/S0038094612020074>)
8. Мартишева А.А., Петров Н.А., Поляхова Е.Н. Численное моделирование воздействия светового давления на движение астероидов, в том числе сближающихся с Землей // Вестн. СпбГУ. Сер. 1. 2015. Т. 2 (60). Вып. 1. С. 135–147.
9. Панасенко А.И., Чернетенко Ю.А. Моделирование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов // Тр. ИПА РАН. 2014. Т. 31. С. 59–65.
10. Binzel R.P., Rivkin A.S., Stuart J.S., Harris A.W., Bus S.J., Burbine T.H. Observed spectral properties of near-Earth objects: Results for population distribution, source regions, and space weathering processes // Icarus. 2004. V. 170. Iss. 2. P. 259–294. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.04.004>
11. Binzel R.P., DeMeo F.E., Turtelboom E.V., Bus S.J., Tokunaga A., Burbine T.H., Lantz C., Polishook D., Carry B., Morbidelli A., and 13 co-authors. Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) // Icarus. 2019. V. 324. P. 41–76. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.12.035>
12. Franco L., Marchini A., Iozzi M., Baj G., Tinelli L., Scarfi G., Carbognani A., Galli G., Aceti P., Banfi M., and 4 co-authors. Collaborative asteroid photometry from UAI: 2023 October–December // Minor Planet Bull. 2024. V. 51. № 2. P. 148–150.
13. Greenberg A.H., Margot J.-L., Verma A.K., Taylor P.A., Hodge S.E. Yarkovsky drift detections for 247 near-Earth asteroids // eprint arXiv:1708.05513, August 2017, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.05513>
14. 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. <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6837>
15. 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. <https://doi.org/10.1086/160554>
16. Vokrouhlický D. A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments // Astron. and Astrophys. 1999. V. 344. P. 362–366.
17. 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. <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6469>
18. ALCDEF web-page: https://alcdef.org/php/alcdef_GenerateALCDEFPage.php
19. ESA web-page: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/12/Asteroid_safe_close_approach_139622_2001_QQ142_December_2023
20. GAORAN_1 web-page: http://www.gaoran.ru/personal/neo/data/MTM-500_2023.txt
21. GAORAN_2 web-page: http://www.gaoran.ru/personal/neo/data/3A-320_2023.txt
22. MPC web-page: <https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html>
23. JPL web-page: https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=2001%20QQ142
24. Pravec P. web-page: <https://www.asu.cas.cz/~ppravec/newres.txt>