

УДК 523.44

АСТРОМЕТРИЧЕСКИЕ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО АСТЕРОИДА (138971) 2001 CB21

© 2025 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 02.05.2024 г.

После доработки 07.05.2024 г.

Принята к публикации 12.09.2024 г.

В 2022 г. на телескопе ГАО РАН были получены астрометрические и фотометрические ряды наблюдений потенциально опасного астероида (138971) 2001 CB21 во время его сближения с Землей. На основе полученных данных и данных с сайта MPC была улучшена орбита астероида, исследованы обстоятельства сближений с Землей и Венерой и сделана оценка влияния негравитационных эффектов на его движение. По фотометрическим наблюдениям астероида была построена кривая блеска и подтвержден период его осевого вращения: $P = 3.305 \pm 0.002$ ч.

Ключевые слова: потенциально опасный астероид, астрометрия, фотометрия

DOI: 10.31857/S0320930X25010038, EDN: LQFETP

ВВЕДЕНИЕ

Астероид (138971) 2001 CB21 был открыт 2 февраля 2001 г. Лабораторией поиска околоземных астероидов им. Линкольна (LINEAR) в Сокорро (шт. Нью-Мексико, США). Он принадлежит к группе Аполлона и классифицирован Центром малых планет (MPC) как потенциально опасный для Земли (минимальное расстояние между орбитами MOID = 0.02377 а. е.) (MPC web-page). Диаметр астероида составляет от 0.340 км (Usui и др., 2011) до 0.578 км (Mueller и др., 2011). Период осевого вращения был определен как 3.3020 ± 0.0008 ч. (Galád и др., 2005).

НАБЛЮДЕНИЯ

Астероид (138971) 2001 CB21 наблюдался на телескопе ЗА-320М (Девяткин и др., 2004) Пулковской обсерватории в течение пяти ночей с 26 февраля по 4 марта 2022 г. Обстоятельства наблюдений приведены в табл. 1. Значения среднего блеска, фазового угла и координаты его

бисектора вычислены с помощью программного пакета ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012) на основе элементов орбиты астероида, полученных на сайте Международного центра малых планет (MPC web-page 2).

Телескоп ЗА-320М расположен на территории Пулковской обсерватории (Санкт-Петербург). Он имеет оптическую схему Кассегрена с диаметром главного зеркала 320 мм, фокусным расстоянием 3200 мм и масштабом 64.5"/мм. Телескоп оборудован ПЗС-камерой ZWO ASI-1600 (mono), которая обеспечивает поле зрения $18'.8 \times 14'.2$. При наблюдениях используется биннирование 4×4 пикселя, что дает угловой размер пикселя $0''.97 \times 0''.97$. Наблюдения проводились без светофильтров – в интегральной полосе инструмента.

АСТРОМЕТРИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ОРБИТЫ АСТЕРОИДА

Всего для астрометрической и фотометрической обработки было использовано 1419 кадров, полученных с помощью телескопа ЗА-320М.

Таблица 1. Обстоятельства наблюдений астероида (138971) 2001 CB21

Дата (вечер)	Интервал (UTC)	Экспоз., с	Число кадров	m	РА, град	PABL, град	PABB, град
2022-02-26	21:40 – 01:42	30	150	14.3	61.9–62.7	181.2–181.7	24.8–25.1
2022-02-27	20:38 – 02:45	20–30	567	14.2	67.0–68.5	184.2–185.1	26.4–26.8
2022-02-28	22:35 – 03:01	20	258	14.2	74.2–75.6	188.5–189.3	28.4–28.7
2022-03-01	22:37 – 03:44	17–20	856	14.3	82.4–84.4	193.5–194.7	30.4–30.8
2022-03-04	03:17 – 03:27	20–40	19	15.7	116.6–116.7	216.7–216.8	34.7

Примечание: указаны: даты вечера, интервалы времени, длительности экспозиций, количества кадров, средние звездные величины (m), фазовые углы (РА), эклиптические долготы (PABL) и широты (PABB) бисектора фазового угла.

При обработке наблюдений использовались пакеты программ АПЕКС-II (Девяткин и др., 2010) и ЭПОС (Львов, Цекмейстер, 2012), разработанные в Пулковской обсерватории.

Астрометрическая редукция выполнена методом восьми постоянных. В качестве опорного использовался каталог Gaia DR2 (Gaia Archive web-page).

Текущие элементы оскулирующей орбиты астероида основаны на множестве позиционных наблюдений за прошлый период времени. При получении достаточного объема новых наблюдений есть возможность уточнить эти элементы или, как принято говорить, улучшить орбиту.

Программа ORBIMPR, входящая в пакет ЭПОС, позволяет улучшать текущие элементы орбит небесных тел с использованием всего множества имеющихся наблюдений на основе двух модификаций дифференциального метода исправления орбит. Условные уравнения содержат поправки либо к элементам, либо к прямоугольным координатам, отнесенными к некоторому моменту времени, которые связаны с величинами (О–С) по прямому восхождению и склонению, вычисленными с использованием исходных элементов орбиты для каждого наблюдения. В первом случае коэффициентами при неизвестных с точностью до некоторых множителей являются частные производные от прямоугольных координат объекта по соответствующим элементам, вычисляемые аналитически на заданный момент времени. Во втором случае производные от прямоугольных координат и скоростей по времени оцениваются численно. Поскольку формулы метода верны с точностью до членов первого порядка, то естественным условием является малость упомянутых величин (О–С). Большие отклонения наблюдательных значений координат от улучшенной орбиты отсеивались по критерию 3 σ .

Для улучшения орбиты, помимо наших наблюдений, использовались результаты наблюдений, взятые из базы данных МРС. При улучшении орбиты в результате 21 итерации из 3446 наземных наблюдений астероида на интервале 2001.02.02 – 2022.03.04 было использовано 2715, из них почти две трети – наблюдения ГАО РАН. Начальная величина RMS = 1''.952, конечная величина RMS = 0''.198. Последняя величина представляет только тот конечный набор наблюдений, который был использован для улучшения. Результаты для эпохи 2459600.5 содержатся в табл. 2.

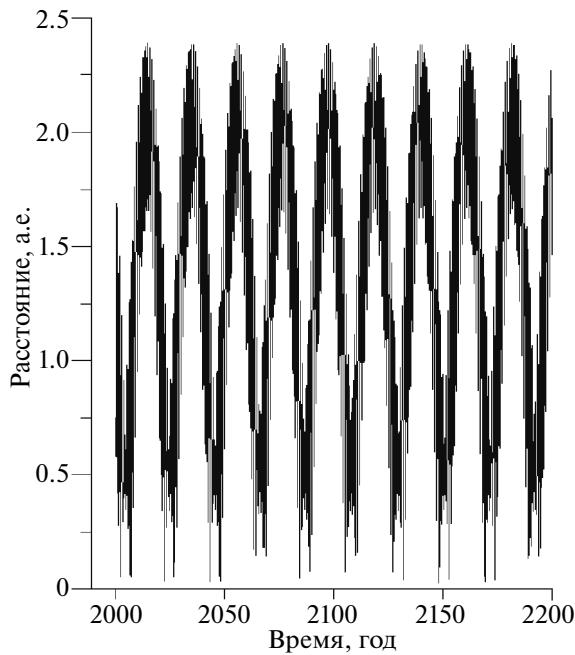
Хотя формальные ошибки гораздо меньше самих величин поправок, все же результат нельзя считать вполне удовлетворительным: слишком много наблюдений было отброшено при вычислениях. Следует заметить, что при сближениях с Землей на 5–7 млн км две орбиты (исходная и улучшенная) дают разницу в расстояниях от нескольких десятков до нескольких сотен километров. Однако ощутимый от этого эффект может проявиться только в более отдаленном будущем.

На текущий момент астероид является потенциально опасным объектом одновременно для Земли и для Венеры.

Расчет эволюции орбиты астероида 2001 CB21 выполнялся также при помощи программного пакета ЭПОС. На рис. 1 видна достаточно устойчивая картина изменения взаимных расстояний “астероид – Земля” на промежутке времени в два столетия. Видны периодические тесные сближения с Землей. Таких сближений (расстояния от 0.02 а. е. до 0.05 а. е.) насчитывается двенадцать. Если не считать дату 29 сентября 2026 г., когда взаимное расстояние будет чуть больше установленного предела (0.0541 а. е.), то очередное тесное сближение астероида с Землей ожидается 6 марта 2043 г. (0.0322 а. е.).

Таблица 2. Элементы начальной (MPC) и улучшенной орбит астероида (138971) 2001 CB21

Элементы орбиты	Начальная	Улучшенная	Поправки	Ошибки
M , град	258.08076	258.08074	-0.00002	0.000001
ω , град	271.81207	271.81200	-0.00007	0.000002
Ω , град	353.72071	353.72069	-0.00002	0.000002
i , град	7.89942	7.89939	-0.00003	0.000001
e	0.3333612	0.3333602	-0.0000010	<0.00000001
a , а. е.	1.03435070	1.03435074	0.00000004	<0.000000001

**Рис. 1.** Результат расчета изменения расстояний “астероид 2001 CB21 – Земля” со временем.

В сближениях с Венерой никакой периодичности не наблюдается. За тот же промежуток времени тесные сближения астероида с планетой отмечены всего два раза: в 2004 и 2176 гг.

ФОТОМЕТРИЯ АСТЕРОИДА И КРИВАЯ БЛЕСКА

Фотометрическая обработка наблюдений астероида 2001 CB21, полученных на телескопе ЗА-320М, выполнялась также с помощью программного пакета АПЕКС-II (Девяткин и др., 2010), разработанного в Пулковской обсерватории, с опорой на каталог Gaia DR2 (Gaia Archive web-page). Полученные в результате обработки значения блеска астероида были исправлены

за изменение расстояний астероида от Земли и Солнца, а также был учтен фазовый угол в предположении, что параметр наклона фазовой зависимости $G = 0.15$. Однако после этого сохранились разности между средними значениями блеска, полученными в разные даты. Это было исправлено с помощью удаления из данных квадратичного тренда. Отрезки кривой блеска астероида 2001 CB21 (138971), полученные по наблюдениям на телескопе ЗА-320М и подвергшиеся описанным редукциям, приведены на рис. 2.

Ранее период осевого вращения астероида 2001 CB21 (138971) оценивался как $P = 3.3020 \pm 0.0008$ ч при полной амплитуде колебаний блеска $\Delta m = 0.12'' \pm 0.02''$ (Galád и др., 2005). При сближении астероида с Землей в 2022 г. несколько обсерваторий выполняли наблюдения с целью построения его кривой блеска и определения вращательных характеристик. В табл. 3 приведены результаты трех таких опубликованных работ. Они в целом подтверждают значение периода, полученное в 2005 г.

Кривая блеска, построенная в настоящей работе, состоит из четырех отрезков длительностью от 4 до 5.1 ч (рис. 2). Ее крайние одинаковые максимумы (в предположении, что она имеет два максимума и два минимума) отстоят друг от друга примерно на 76 ч, т.е. приблизительно на 23 периода, что позволяет надежно определить его значение. Эта кривая блеска была нами проанализирована с помощью метода Скаргла (Scargle, 1982). Полученные значения периода и полной амплитуды колебаний блеска приведены в последней строке табл. 3. Они соответствуют результатам работ других авторов, перечисленным в табл. 3 (исключение составляет статья Colazo и др. (2022), в которой приведено значение периода, заметно отличающееся от значений из остальных работ, включая настоящую). На рис. 3 показана фазовая кривая блеска, приведенная к определенному нами периоду.

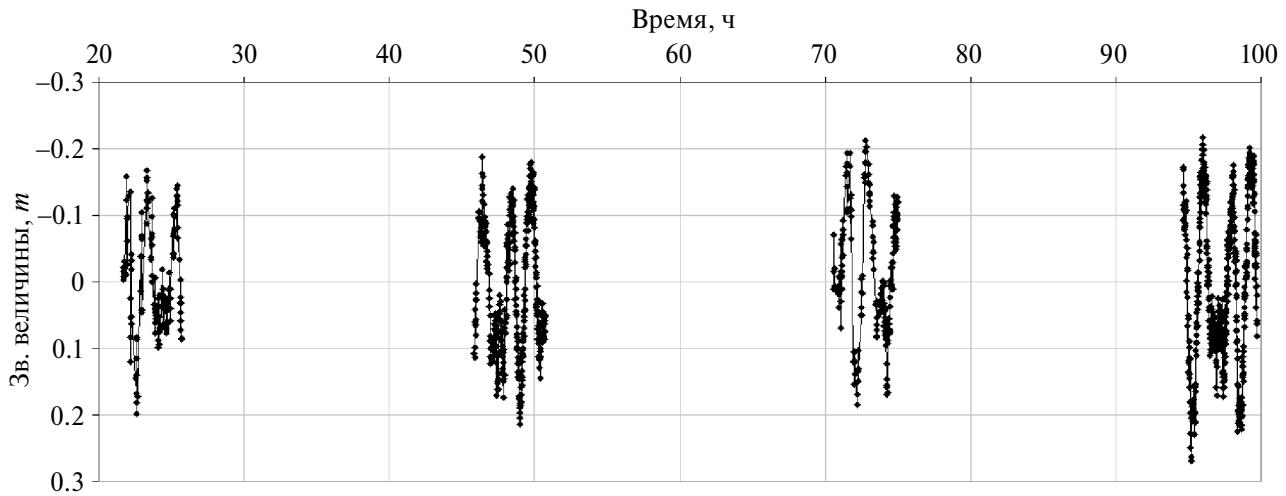


Рис. 2. Фрагменты относительной кривой блеска астероида 2001 CB21 (138971), полученные на телескопе ЗА-320М 26, 27, 28 февраля и 1 марта 2022 г. По оси абсцисс отложено время в часах, отсчитываемое от 0 часов UTC 26 февраля.

Таблица 3. Значения периода P вращения астероида 2001 CB21 (138971) и полной амплитуды Δm колебаний его блеска, полученные по наблюдениям различных обсерваторий при сближении астероида с Землей в 2022 г.

P , ч	Δm	Даты наблюдений	Ссылки
3.303 ± 0.001	0.24 ± 0.05	8–18 февраля	Fornas и др., 2022
3.160 ± 0.034	0.24 ± 0.05	18–25 февраля	Colazo и др., 2022
3.301 ± 0.002	0.36 ± 0.03	27–28 февраля	Warner, Stephens, 2022
3.305 ± 0.002	0.36 ± 0.05	26 февраля – 1 марта	Настоящая работа

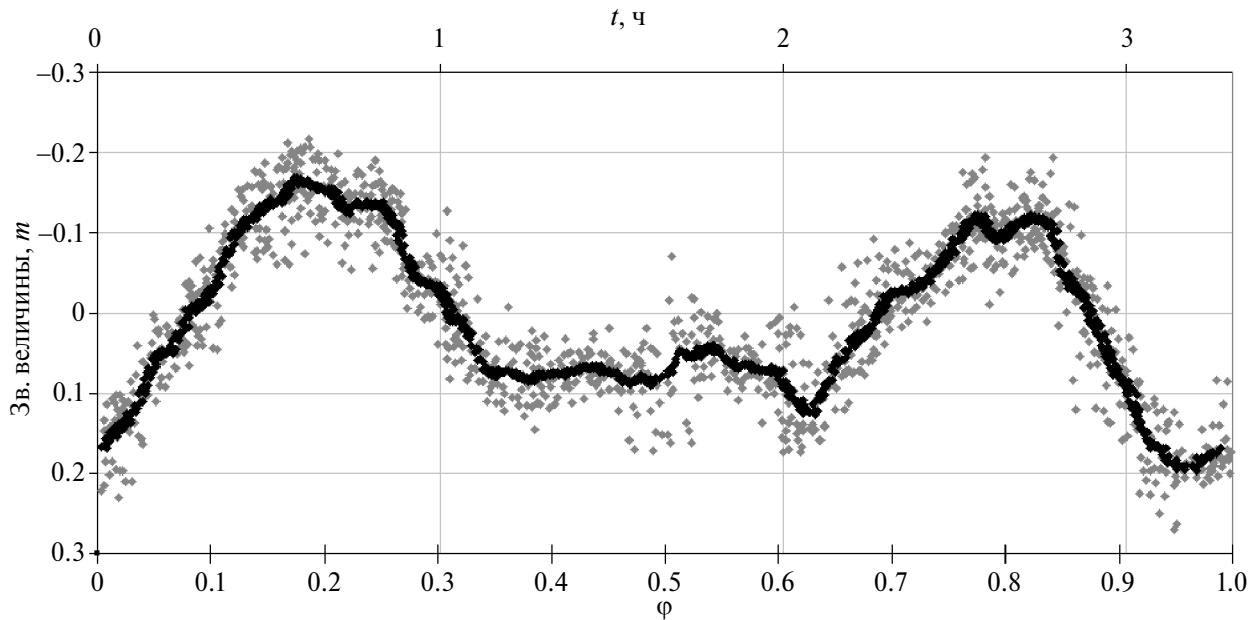


Рис. 3. Фазированная кривая блеска астероида (138971) 2001 CB21, приведенная к периоду $P = 3.305$ ч, определенному в настоящей работе. По верхней оси абсцисс отложено время t в часах, по нижней – фаза вращения ϕ астероида (нуль-пункт соответствует моменту 2022.03.02 02:40:48 UTC), по оси ординат – относительный блеск m . Серыми точками показаны наблюденные значения блеска, черная кривая – скользящее среднее.

В работе (Warner, Stephens, 2022) отмечается невозможность точного совмещения различных участков на фазовой кривой блеска астероида 2001 CB21 при нескольких перепробованных значениях периода. На основании этого делается предположение о его вращении не вокруг главной оси инерции (“кувыркании”), но оговаривается, что такая особенность кривой может возникать и из-за эффектов затенения при столь значительной величине фазового угла ($>65^\circ$).

Как можно заметить из рис. 2, амплитуда колебаний блеска, определенного по нашим наблюдениям, увеличивается от 26 февраля к 1 марта 2022 г., т.е. с увеличением угла фазы от 62° до 84° . Столбец Δt в табл. 3 также показывает рост амплитуды со временем, т.е. с углом фазы. Однако явных указаний на возможный режим вращения с кувырканием в нашей кривой блеска не наблюдается.

ОЦЕНКА НЕГРАВИТАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ

Для астероида 2001 CB21 путем моделирования были сделаны оценки возможных значений негравитационных эффектов, таких как световое давление и эффект Ярковского. Световое давление – это давление падающего солнечного света на поверхность тела, тогда как эффект Ярковского представляет собой негравитационное ускорение или замедление движения тела, вызванное анизотропным переизлучением солнечного излучения его поверхностью.

Расчеты проводились на эпоху 2459600.5 (2022.01.21). Начальные данные приведены в табл. 2. Диаметр астероида D был принят за среднее между значениями диаметров, указанными во “Введении”. Среднее суточное движение составляет $0.93782550^\circ/\text{сут}$, а абсолютная звездная величина $H = 18.52$ (MPC web-page). Геометрическое альbedo астероида δ было получено по формуле

$\lg D = 3.122 - 0.5\lg\delta - 0.2H$ (Виноградова и др., 2003) и равняется 0.33. Как уже упоминалось, период осевого вращения был определен в данной работе как 3.305 ч.

Поскольку плотность или спектральный класс астероида неизвестны, вычисление светового давления проводилось с тремя значениями средней плотности основных спектральных классов астероидов (Krasinsky и др., 2002): $1380 \text{ кг}/\text{м}^3$ – углеродистые, $2710 \text{ кг}/\text{м}^3$ – кремниевые, $5320 \text{ кг}/\text{м}^3$ – металлические астероиды. Эффект Ярковского рассчитывался при средней плотности для основных спектральных классов, равной $3137 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Методика вычисления светового давления описана в (Мартишева и др., 2015). Вычислялось полное смещение астероида $\Delta d = (\Delta r^2 + \Delta l^2)^{1/2}$, где Δr – смещение астероида вдоль гелиоцентрического радиус-вектора, а Δl – смещение астероида по долготе. В табл. 4 приведены величины полного смещения астероида Δd под действием светового давления за 21 год, что соответствует следующему тесному сближению в 2043 г.

Таблица 4. Полное смещение Δd астероида 2001 CB21 (138971) под действием светового давления за 21 год при различных значениях плотности ρ

$\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$	1380	2710	5320
$ \Delta d , \text{ км}$	141	72	37

Помимо указанных начальных данных, для расчета эффекта Ярковского также были приняты средними следующие значения: коэффициент эмиссии – 0.9, теплопроводность – $10^{-2} \text{ Вт м}^{-1} \text{ К}^{-1}$, теплоемкость – $500 \text{ Дж кг}^{-1} \text{ К}^{-1}$. Угол наклона оси вращения γ остается неизвестным, поэтому расчеты проводились для пяти значений: $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$.

Термодинамическая модель эффекта Ярковского была взята из (Vokrouhlický, 1999; Vokrouhlický и др., 2000). Методика расчета взята из (Панасенко, Чернетенко, 2014). В табл. 5 представлены величины изменения большой полуоси орбиты астероида Δa вследствие эффекта Ярковского в зависимости от угла наклона оси вращения γ .

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, так и замедление, т.е. увеличение большой полуоси.

Таблица 5. Величина эффекта Ярковского Δa за один оборот астероида 2001 CB21 (138971) вокруг Солнца в зависимости от угла наклона оси вращения астероида γ

$\gamma, \text{ град}$	0	45	90	135	180
Δa (10^{-12} а. е.)	0.9044	0.6328	-0.0135	-0.6463	-0.9044

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ГАО РАН на телескопе ЗА-320М в 2022 г. были проведены наблюдения потенциально

опасного астероида (138971) 2001 CB21 во время его сближения с Землей. Были получены астрометрические и фотометрические ряды наблюдений астероида, предпринята попытка улучшения его орбиты. Отмечены обстоятельства сближений астероида с Землей и Венерой на интервале времени в 200 лет. Ближайшее тесное сближение астероида с Землей ожидается 6 марта 2043 г. Оценено влияние негравитационных эффектов на его орбиту. По фотометрическим наблюдениям в интегральной полосе была построена кривая блеска астероида и подтвержден период его осевого вращения (3.305 ± 0.002 ч).

Работа выполнена в рамках плановой темы ГАО РАН.

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. 219 с.
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-І” и “Апекс-ІІ” 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. Лъевов 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.) <https://doi.org/10.1134/S0038094612020074>
5. Мартюшева А.А., Петров Н.А., Поляхова Е.Н. Численное моделирование воздействия светового давления на движение астероидов, в том числе сближающихся с Землей // Вестн. СПбГУ. 2015. Сер. 1. Т. 2 (60). Вып. 1. С. 135–147.
6. Панасенко А.И., Чернетенко Ю.А. Моделирование влияния эффекта Ярковского на движение астероидов // Тр. ИПА РАН. 2014. Т. 31. С. 59–65.
7. Colazo M., Scotta D., Monteleone B., Morales M., Ciancia G., García A., Melia R., Suárez N., Wilberger A., Fornari C., and 4 co-authors. Asteroid photometry and lightcurve analysis for six asteroids // Minor Planet Bull. 2022. V. 49. P. 304–306.
8. Fornas G., Fornas A., Mas V. Nine Main belt asteroids, one near-Earth, and two potentially hazardous asteroid lightcurves // Minor Planet Bull. 2022. V. 49. P. 196–199.
9. Galád A., Pravec P., Kušnirák P., Gajdoš Š., Kornoš L., Világí J. Joint lightcurve observations of 10 Near-Earth asteroids from Modra and Ondřejov // Earth, Moon, and Planets. 2005. V. 97. P. 147–163. <https://doi.org/10.1007/s11038-006-9066-x>
10. 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>
11. Mueller M., Delbo M., Hora J.L., Trilling D.E., Bhattacharya B., Bottke W.F., Chesley S., Emery J.P., Fazio G., Harris A.W., and 7 co-authors. Explore NEOs. III. Physical characterization of 65 potential spacecraft target asteroids // Astron. J. 2011. V. 141. № 4. 9 pp. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/141/4/109>
12. 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.
13. Usui F., Kuroda D., Müller T.G., Hasegawa S., Ishiguro M., Ootsubo T., Ishihara D., Kataza H., Taita S., Oyabu S., Ueno M., Matsuhara H., Onaka T. Asteroid catalog using AKARI: AKARI/IRC mid-infrared asteroid survey // Publ. Astron. Soc. Japan. 2011. V. 63. P. 1117–1138. <https://doi.org/10.1093/pasj/63.5.1117>
14. Vokhrouhlický D. A complete linear model for the Yarkovsky thermal force on spherical asteroid fragments // Astron. and Astrophys. 1999. V. 344. P. 362–366.
15. Vokhrouhlický 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>
16. Warner B.D., Stephens R.D. Near-Earth asteroids lightcurve analysis at the center for Solar System studies: 2022 February–March // Minor Planet Bull. 2022. V. 49. P. 176–179.
17. Gaia Archive web-page: <https://gea.esac.esa.int/archive/MPC>
18. web-page: https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=138971
19. MPC web-page 2: <https://minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html>