ISSN 2658-5669 НАУЧНЫЕ ТРУДЫ института ран

В ЖУРНАЛЕ «НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН» ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЬИ ПО РАЗЛИЧНЫМ АСПЕКТАМ АСТРОНОМИИ, В ТОМ ЧИСЛЕ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ АСТРОФИЗИКЕ, ПЛАНЕТНОЙ АСТРОНОМИИ, ЗВЕЗДНОЙ АСТРОНОМИИ, ФИЗИКЕ СОЛНЦА, НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ АСТРОНОМИЧЕСКИМ МЕТОДАМ И ПРИБОРАМ, КОСМИЧЕСКИМ ИССЛЕ-ДОВАНИЯМ И ИССЛЕДОВАНИЯМ В ОБЛАСТИ космической геодезии.





INASAN SCIENCE REPORTS





МОСКВА 2022 УДК 52 ББК 22.6 H34

НЗ4 Научные труды Института астрономии РАН. Том 7(1). -

М.: Изд-во Янус-К, 2022, 104 с., илл.

ISSN 2658-5669 e-ISSN 2712-8318

Редколлегия

Сачков М.Е. (главный редактор), Вибе Д.З. (зам. главного редактора), Бисикало Д.В., Барабанов С.И., Кузнецов Э.Д., Малков О.Ю., Машонкина Л.И., Фатеева А.М., Шематович В.И., Шустов Б.М., приглашенный редактор Медведев Ю.Н.

Секретарь редколлегии Вибе Е.Д.

«Научные труды Института астрономии РАН» – рецензируемый журнал, публикующий статьи по различным аспектам астрономии, в том числе по теоретической и наблюдательной астрофизике, планетной астрономии, звездной астрономии, физике Солнца, небесной механике, астрономическим методам и приборам, космическим исследованиям и исследованиям в области космической геодезии.

> © ИНАСАН, 2022 © Коллектив авторов, 2022

INASAN Science Reports. Vol 7(1). M.: Janus-K, 2022, 104 pp.

ISSN 2658-5669 e-ISSN 2712-8318

Editorial Board

M.E. Sachkov (Editor-in-Chief), D.S. Wiebe (Deputy Editor-in-Chief), D.V. Bisikalo, S.I. Barabanov, E.D. Kuznetsov, O.Yu. Malkov, L.I. Mashonkina, A.M. Fateeva, V.I. Shematovich, B.M. Shustov, invited editor Yu.N. Medvedev.

Staff Editor E.D. Wiebe

INASAN Science Reports is a peer-reviewed journal that publishes papers in various fields of astronomy, including theoretical and observational astrophysics, planetary astronomy, galactic astronomy, solar physics, celestial mechanics, astronomical methods and tools, space research and studies related to space geodesy.

> © INASAN, 2022 © Author team, 2022

Сдано в набор 15.07.2022. Подписано в печать 22.07.2022 Формат 60х90/8. Бумага офсетная. Уч.-изд. п.л. 13,0. Физ. п.л. 13,0. Тираж 100. Заказ №3027

Издательство «Янус-К» 127411, Москва, Учинская ул., д. 1

Отпечатано в ООО «ИНФОРМ-СОФТ» 119034, Москва, Еропкинский пер., д. 16

Научные труды Института астрономии РАН. Том 7 (1)

Научное издание



О материалах номера

В последние годы все более возрастает актуальность проблемы космических угроз, прежде всего космического мусора (KM), астероидно-кометной опасности (AKO), проблемы темного и спокойного неба (проблемы помеховой обстановки), а также космической погоды. Эта актуальность подчеркивается большим вниманием, которое ведущие страны и крупные международные организации (прежде всего ООН) уделяют этой проблеме. Принятый в мире организационный подход — проведение долгосрочных национальных (государственных) программ с определенным уровнем международной кооперации. В России реализуется такая программа (АСПОС), но она ограничена по своим задачам, в список которых, например, не входит проблема АКО. Для изучения и разработки методов парирования космических угроз в России необходима консолидация имеющихся и развитие новых сил и средств.

Важное событие состоялось в январе 2022 г. Руководителем ГК «Роскосмос» Д.О. Рогозиным утверждена «Концепция создания системы информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве «Млечный путь» на период 2022–2025 годов и на перспективу до 2035 года» (далее Концепция). Содержание Концепции определяет системный подход к изучению и парированию космических угроз, при этом в последующем за принятием Концепции процессе реализации задач планируется широкое привлечение научно-технического сообщества России. Научнотехническое сообщество России откликнулось на это существенное предложение.

18–21 апреля 2022 г. в здании Института космических исследований РАН состоялась Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Околоземная астрономия-2022». Конференция была организована Институтом астрономии РАН и Институтом космических исследований РАН. Конференция состоялась в очно-заочном формате; в ней приняли участие 170 человек из 51 научной и ведомственной организации России, Таджикистана и Мексики.

Четыре секции конференции были посвящены следующим направлениям исследований:

- 1. Современное состояние фундаментальных и прикладных исследований объектов Солнечной системы, включая космический мусор, астероиды и кометы, сближающиеся с Землей, метеорные тела (метеороиды) в околоземном пространстве (ОКП) и т.д.
- Современные и перспективные методы и средства наблюдения объектов космического мусора и метеорных тел в ОКП, а также изучения астероидов и комет, сближающихся с Землей.
- Исследования, повышающие точность прогнозов общей обстановки в Солнечной системе и в ОКП. Методы повышения точности оценки рисков (вероятности угрозы столкновений с космическими объектами и их последствий) в контексте проблем КМ и АКО.
- Методы парирования угроз, связанных с КМ и АКО, и уменьшения потенциального ущерба. Общие проблемы экологии ОКП, включая вопросы внутрироссийской и международной кооперации, проблему темного неба и др.

Более полную информацию о конференции можно найти на сайте agora.guru.ru/oza2022.

В докладах, сделанных на конференции, было продемонстрировано, что изучение физических, динамических и других свойств малых небесных тел естественного и искусственного происхождения в околоземном пространстве имеет большое значение для развития как фундаментальных космических исследований, так и исследований прикладного характера.

В целом научно-практическая конференция «Околоземная астрономия-2022» показала, что отечественная наука заинтересована и готова к участию в разработке и реализации программы изучения и парирования космических угроз.

В этом и следующем выпусках «Научных трудов ИНАСАН» публикуются статьи, написанные по докладам, сделанным на конференции.

Myor

Сопредседатель Организационного комитета конференции член-корр. РАН Б.М.Шустов

Усредненная суммарная фазовая кривая блеска для АСЗ

Виноградова Т.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Под фазовой кривой блеска астероида понимается зависимость блеска астероида от фазового угла. Получение фазовой кривой для отдельного астероида является достаточно сложной задачей, поскольку требует точных фотометрических наблюдений на большом промежутке времени. С другой стороны, к настоящему времени для астероидов накоплено огромное количество фотометрических данных, таких как видимая звездная величина, определяемая при наблюдении астероида. Эти данные могут быть использованы для получения некоторой усредненной фазовой кривой. Астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), наилучшим образом подходят для этой цели, так как наблюдаются в большом интервале фазовых углов. В данной работе было исследовано более 800 нумерованных АСЗ, для каждого из которых были отобраны все наблюдения с определенной звездной величиной. В процессе численного интегрирования для каждого наблюдения были вычислены расстояния от астероида до Земли и до Солнца, а также фазовый угол. С использованием этих величин был определен вклад эффекта фазы в наблюденную видимую звездную величину, и произведено усреднение полученных данных по углу фазы. График усредненной фазовой кривой несколько отклоняется от графика, построенного по формуле Боуэлла, которая в настоящее время рекомендована для использования в фотометрии.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 05.06.2022 г.

Ключевые слова: астероиды, фотометрия, фазовая кривая

Averaged total phase light curve for NEAs

Vinogradova T.A.

Institute of Applied Astronomy of the RAS, St. Petersburg, Russia

Asteroid phase curve is a dependence of an asteroid apparent magnitude on a phase angle. It is a difficult task to construct the phase curve for some asteroid, because it requires accurate photometric observations over a long period of time. On the other hand, by now a huge amount of photometric data have been accumulated, such as the apparent magnitude, determined when observing the asteroid. These data can be used to obtain some averaged phase curve. Near-Earth asteroids (NEA) are best suited for this, as they are observed over a wide range of phase angles. In this work, more than 800 numbered NEAs were studied. All observations with a detected apparent magnitude were selected. Using numerical integration, distances from the asteroid to the Earth and to the Sun and the phase angle were calculated for each observation. Using these values, a contribution of the phase effect to the observed magnitude was determined. Then the obtained data were averaged over the phase angle, and a plot was built. The plot of the averaged phase curve deviates somewhat from a similar plot, built according to the Bowell formula, which is currently recommended for use in photometry.

Received 10.05.2022. Accepted 05.06.2022.

Keywords: asteroids, photometry, phase curve

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.001

1. Введение

Видимая звездная величина астероида V в визуальной полосе спектра фотометрической системы UBV может быть представлена в следующем виде:

$$V = H + 5 \lg rd + f(\alpha).$$

Здесь H — абсолютная звездная величина астероида, r — расстояние от астероида до Солнца, d — расстояние от астероида до Земли, f — фазовая функция, зависящая от угла фазы α .

Угол фазы определяется, как угол Земля-астероид-Солнце. Естественным образом блеск астероида ослабевает с ростом фазового угла, поскольку увеличивается часть поверхности астероида, не освещенная Солнцем. До 1980-х гг. предполагалось, что фазовая функция может быть представлена в виде линейной зависимости от угла фазы. Позднее выяснилось, что эта зависимость имеет более сложный вид. В 1989 г. в работе Боуэлла и др. [1] для вычисления фазовой функции $f_c(\alpha)$ (с — calculated) была предложена сложная полуэмпирическая формула

$$f_{\rm c}(\alpha) = -2.5 \lg \left[(1-G)F_1 + GF_2 \right]$$

Здесь $F_1 = \exp\left(-3.33[\operatorname{tg}(\alpha/2)]^{0.63}\right); F_2 = \exp\left(-1.87[\operatorname{tg}(\alpha/2)]^{1.22}\right).$

Эта формула позволяет описать изменение блеска астероида в диапазоне фазовых углов от 0° до 120°. Параметр G, так называемый параметр наклона, различается для разных астероидов. К сожалению, он определен лишь для незначительного количества астероидов. Найденные значения этого параметра варьируются в пределах от -0.12 до 0.60. Для прочих астероидов значение G принимается равным 0.15. Для



Рис. 1: Графики фазовой функции $f_{\rm c}(\alpha)$, построенные по формуле Боуэлла для значений параметра G = -0.12, 0.15, 0.60.

разных значений G фазовая функция будет выглядеть по-разному. На рис. 1 приведены графики фазовой функции, построенные для трех значений параметра G.

Под фазовой кривой блеска астероида понимается зависимость блеска астероида V от фазового угла. При этом блеск уже должен быть освобожден от эффектов вращения астероида вокруг своей оси и изменения расстояний астероида от Солнца и Земли. Таким образом, фазовая кривая описывается формулой $H + f(\alpha)$. Но фазовой кривой называют также и фазовую функцию $f(\alpha)$.

Получение фазовой кривой для отдельного астероида по наблюдениям является достаточно сложной задачей, поскольку требует точных фотометрических наблюдений на большом промежутке времени. С другой стороны, к настоящему времени для астероидов накоплено огромное количество фотометрических данных, таких как видимая звездная величина, определяемая при наблюдении астероида и публикуемая вместе с астрометрическими координатами в каталоге наблюдений астероидов международного Центра малых планет (ЦМП). Эти данные могут быть использованы для получения некоторой усредненной фазовой кривой.

Максимальный фазовый угол астероидов, движущихся на большом удалении от Земли, не может быть большим. Астероиды Главного пояса наблюдаются лишь при относительно небольших фазовых углах, приблизительно до 30°. Чем ближе астероид приближается к Земле, тем при больших фазовых углах возможно его наблюдение. Наиболее глубоко во внутреннюю область Солнечной системы заходят астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ). Поэтому эти астероиды наилучшим образом подходят для получения фазовой кривой на большом интервале фазовых углов.

2. Построение фазовой кривой для астероида (99942) Apophis

Количество наблюдений для некоторых AC3 приближается к 10 тыс., при этом большая часть этих наблюдений снабжена видимой звездной величиной. Одним из наиболее наблюдаемых AC3 является (99942) Apophis, в каталоге ЦМП на настоящий момент содержится 8228 наблюдений этого астероида, и в 7111 из них опубликована звездная величина.

Наблюдаемая звездная величина V включает в себя некоторую величину V_{α} , которая обусловлена эффектом фазы. Для ее выявления, из V необходимо вычесть абсолютную звездную величину H и влияние расстояний от астероида до Солнца и Земли:

$$V_{\alpha} = V - H - 5 \lg (rd).$$

Для определения расстояний от астероида до Земли и до Солнца было произведено численное интегрирование уравнений движения с учетом возмущений от всех планет. В процессе интегрирования для каждого наблюдения были вычислены расстояния r, d, фазовый угол α и величина эффекта фазы V_{α} . Разумеется, величина V_{α} включает в себя также множество других факторов, но влияние фазы преобладает.

На рис. 2 можно видеть, как распределены по углу фазы вычисленные значения V_{α} для наблюдений астероида (99942) Арорhis. Надо заметить, что (99942) Арорhis наблюдался только при больших углах фазы $\alpha > 20^{\circ}$. График хорошо показывает, что с увеличением угла фазы величина вычисляемых значения V_{α} в среднем растет, то есть блеск астероида ослабевает. Обращает на себя внимание большой разброс вычисленных значений. Если не принимать во внимание погрешности наблюдений, то в качестве основных факторов, влияющих на величину отклонения значений V_{α} от среднего, следует назвать неправильную



Рис. 2: Распределение по углу фазы величины эффекта фазы V_{α} в звездной величине для наблюдений астероида (99942) Арорhis. Сплошной линией показана усредненная кривая $f_{o}(\alpha)$, полученная с шагом 5°.



Рис. 3: График усредненной фазовой функции, построенный для астероида (99942) Apophis (сплошная линия). Ппунктирными линиями изображены фазовые кривые, вычисленные по формуле Боуэлла для значений G = -0.12, 0.15, 0.60.

форму и неоднородность поверхности астероида, и его вращение. Кроме того, в последние десятилетия при наблюдении астероидов стали использовать различные фильтры. В результате этого видимая звездная величина определяется в разных полосах спектра и может не совпадать со значением, полученным для визуальной части спектра.

При большом числе наблюдений на длительном интервале времени многие факторы, оказывающие влияние на блеск астероида, можно рассматривать как случайные. Их действие может быть сведено до минимума при усреднении по углу фазы. На рис. 2 сплошной линией показана усредненная кривая, полученная с шагом 5°. Эту усредненную фазовую кривую блеска, полученную по наблюдениям ЦМП, обозначим $f_o(\alpha)$ (о — observed).

Полученную усредненную фазовую кривую $f_o(\alpha)$ можно сравнить с фазовой функцией Боуэлла $f_c(\alpha)$. На рис. 3 кроме графика $f_o(\alpha)$ изображены три фазовых кривых, вычисленных по формуле Боуэлла со значениями параметра G = -0.12, 0.15, 0.60. Можно видеть, что, как и предполагалось, построенная кривая находится между ограничивающими кривыми, соответствующими параметрам G = -0.12, 0.60. Она располагается около кривой, вычисленной для G = 0.15, но пересекает ее. Это говорит о том, что форма усредненной кривой не соответствует функции Боуэлла, то есть нельзя подобрать для нее соответствующий параметр G.



Рис. 4: Сравнение фазовых кривых. Полученная из наблюдений усредненная $f_o(\alpha)$ изображена крупными точками. Вычисленная по формуле Боуэлла $f_c(\alpha)$ (для G = 0.15) представлена сплошной линией.



Рис. 5: Разность между фазовыми кривыми $f_{\rm o}(\alpha) - f_{\rm c}(\alpha)$. $f_{\rm o}(\alpha)$ — усредненная суммарная кривая, полученная из наблюдений большого числа AC3, $f_{\rm c}(\alpha)$ — вычисленная по формуле Боуэлла для G = 0.15.

3. Усредненная суммарная фазовая кривая

Ввиду недостаточного количества наблюдений, для отдельных астероидов невозможно построить достаточно гладкую фазовую кривую. Поэтому представляет интерес получить суммарную фазовую кривую, используя наблюдения большого количества AC3. Для этого были отобраны более 800 нумерованных AC3, способных приближаться к Земле на расстояния менее 0.2 а.е. Для каждого астероида были отобраны все наблюдения с наблюденной звездной величиной. При этом использовались все значения звездной величины независимо от того в какой полосе спектра производились наблюдения.

В результате численного интегрирования были получены более 300 тыс. значений V_{α} . Затем было произведено усреднение полученных значений по углу фазы с некоторым шагом. Для получения одного среднего значения на выбранном интервале, что соответствует одной точке на графике (рис. 4), использовалось несколько тысяч наблюдений. При таком усреднении должны были нивелироваться колебания блеска астероидов, вызванные их вращением и тем, что наблюдения производились в разных полосах спектра. В какой-то мере должны усредниться и наклоны фазовых кривых, но это более сложный вопрос.

На рис. 4 приведены графики усредненной фазовой кривой $f_o(\alpha)$, полученной из наблюдений, а также $f_c(\alpha)$, вычисленной по формуле при значении G = 0.15. Сравнение полученных кривых показывает некоторое расхождение. Можно заметить, что поведение суммарной $f_o(\alpha)$ вполне соответствует фазовой функции, построенной для астероида (99942) Apophis на рис. 3. Выбор другого значения G для вычисления $f_c(\alpha)$ не может полностью компенсировать наблюдаемое несоответствие. Более наглядно различие между построенными кривыми можно видеть на графике разностей $f_o(\alpha) - f_c(\alpha)$ на рис. 5. График показывает, что максимальное отклонение усредненной суммарной кривой составляет $0.2^{\rm m}$ в окрестности угла фазы 30° .

4. Заключение

В работе рассмотрена возможность построения усредненных фазовых кривых для астероидов с использованием наблюдений из каталога ЦМП. Предложенным методом построена фазовая кривая для единичного астероида (99942) Apophis и усредненная суммарная фазовая кривая, полученная по наблюдениям большого количества AC3.

В итоге, можно сказать, что обе построенные фазовые кривые отклоняются от фазовой кривой, вычисленной по формуле Боуэлла, и варьирование параметра наклона G не может привести к их совпадению. При использовании для G общепринятого среднего значения 0.15 максимальное отклонение усредненной суммарной кривой составляет $0.2^{\rm m}$ в окрестности угла фазы 30° , при этом разность $f_{\rm o}(\alpha) - f_{\rm c}(\alpha)$ отрицательна.

Определенно большой интерес могут представлять усредненные фазовые кривые, построенные для астероидов, принадлежащих к разным таксономическим классам. Эта работа будет продолжена.

Список литературы

E. Bowell, B. Hapke, D. Domingue, K. Lumme, J. Peltoniemi, and A. W. Harris, in R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, eds., Asteroids II, 524–556 (1989).

Организационно-правовые вопросы международного сотрудничества по проблеме космического мусора

Волынская О.А.

Факультет космических исследований МГУ, Москва, Россия

Засорение околоземного космического пространства — одна из главных угроз для мировой космонавтики. Глобальной проблеме космического мусора уделяется серьезное международное внимание. К настоящему времени был принят целый ряд международных технических рекомендаций и стандартов в данной области, которые, однако, необязательны к исполнению. Международное космическое право содержит нормы и принципы, прямо или косвенно затрагивающие деятельность по борьбе с космическим мусором. Между тем эти нормы носят общий характер и не учитывают множество специфических правовых аспектов рассматриваемой проблемы. В свете общего курса на обеспечение долгосрочной устойчивости космической деятельности возникает потребность в упорядоченном регулировании усилий участников такой деятельности по борьбе с засорением и засоренностью космоса.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 15.06.2022 г.

Ключевые слова: космический мусор, международное сотрудничество, космическое право

Organizational and legal issues of international cooperation on the problem of space debris

Volynskaya O.A.

Space Research Department, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Contamination of the near-Earth space is one of the main threats to space activities all over the world. The global problem of space debris receives serious international attention. To date, a number of international technical recommendations and standards in this area have been adopted, which, however, are not binding. International space law provides for norms and principles that are directly or indirectly relevant to activities against space debris. However, these norms are of a general nature and do not take into account many specific legal aspects of the problem. In the light of the general course towards the long-term sustainability of space activities, there is a need for an orderly regulation of multi-actor efforts to mitigate and remediate space debris.

Received 10.05.2022. Accepted 15.06.2022.

Keywords: space debris, international cooperation, space law

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.002

1. Введение

Антропогенное засорение околоземного космического пространства становится одной из главных угроз для мировой космонавтики. С увеличением числа и разнообразия объектов в космосе возрастают риски столкновений функционирующих и нефункциональных аппаратов и их частей. Создается угроза жизни космонавтов. Фрагменты космического мусора могут также причинить вред при возвращении в атмосферу Земли. Окружающая среда Земли и космоса становится все более уязвимой. С усугублением этой многоплановой и, безусловно, глобальной проблемы все более остро встает потребность в новых универсальных правилах космической деятельности для всех ее участников.

2. Международно-правовой режим деятельности по борьбе с космическим мусором

Практическая разработка специальных международных правил осуществления космической деятельности началась вслед за запуском первого искусственного спутника Земли. Фундамент этого нового режима — международного космического права (МКП) — заложили универсальные принципы и нормы общего международного права. Основными источниками МКП являются следующие пять международных соглашений, разработанных в рамках Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях (Комитет ООН по космосу):

- 1. Договор о принципах деятельности государств по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела, 1967 г. (Договор по космосу);
- 2. Соглашение о спасании космонавтов, возвращении космонавтов и возвращении объектов, запущенных в космическое пространство, 1968 г. (Соглашение о спасании);
- Конвенция о международной ответственности за ущерб, причиненный космическими объектами, 1972 г. (Конвенция об ответственности);
- 4. Конвенция о регистрации объектов, запускаемых в космическое пространство, 1975 г. (Конвенция о регистрации);

5. Соглашение о деятельности государств на Луне и других небесных телах 1979 г. (Соглашение о Луне) [1]. Отдельные нормы перечисленных документов, применимые в контексте проблемы космического мусора,

2.1. Определение космического мусора

будут рассмотрены далее.

В соглашениях ООН по космосу термин «космический мусор» не используется и отсутствует его юридическое определение. При этом одним из ключевых в МКП является термин «космический объект». Четкого определения космического объекта также нет, однако при подготовке проекта Договора по космосу данный термин использовался как родовое понятие в отношении любых созданных человеком объектов, предназначенных для запуска в космос [2]. Конвенция о регистрации (абз. «b» ст. I) и Конвенция об ответственности (абз. «d» ст. I) уточняют, что под «космическим объектом» следует понимать объект в целом, его составные части и средство его доставки. Следуя широко распространенному пониманию космического мусора как нефункциональных антропогенных объектов и их фрагментов [3], можно заключить, что к нему применим конвенционный термин «космический объект» и, следовательно, базовое международное регулирование в отношении космических объектов.

2.2. Космическая деятельность — достояние всего человечества

Космический мусор образуется в результате деятельности человека по исследованию и использованию космического пространства. Договор по космосу провозгласил главный принцип такой деятельности: она является достоянием всего человечества и должна осуществляться на благо и в интересах всех стран. Космос открыт для исследования и использования всеми государствами без дискриминации, на основе равенства, международного сотрудничества и в соответствии с международным правом (ст. I). Эти «свободы космоса», несмотря на общий характер приведенных формулировок, объединяет общая цель: любая космическая деятельность должна так или иначе приносить пользу всему человечеству.

Договор по космосу подтверждает, что важнейшие обязанности государств согласно Уставу ООН — поддерживать международный мир и безопасность, развивать международное сотрудничество и взаимопонимание [4] — действуют в отношении космической деятельности (ст. III). Применимость международного права имеет принципиальное значение в контексте проблемы космического мусора: поскольку МКП не регулирует такие важные вопросы, как, например, ответственность за экологический ущерб, применяться в этом случае должны нормы международного права окружающей среды.

2.3. Регистрация космических объектов

МКП предписывает государствам регистрировать запускаемые ими космические объекты в международном реестре ООН и национальных регистрах (ст. VIII Договора по космосу, ст. II–III Конвенции о регистрации). Минимально необходимые регистрационные данные по каждому космическому объекту включают в себя:

- 1. Название запускающего государства или запускающих государств;
- 2. Соответствующее обозначение космического объекта или его регистрационный номер;
- 3. Дату и территорию или место запуска;
- 4. Основные параметры орбиты, включая период обращения, наклонение, апогей и перигей;
- 5. Общее назначение космического объекта (п. 1 ст. IV Конвенции о регистрации).

Государства могут также передавать в реестр ООН дополнительную информацию о регистрируемом объекте, однако не обязаны это делать.

Если космический объект более не находится на орбите, указанной при регистрации, государство регистрации обязано сообщить об этом Генеральному секретарю ООН. Однако МКП не предусматривает какихлибо санкций за несоблюдение данной обязанности. Более того, нет правовых средств, которые гарантировали бы достоверность представляемых государствами регистрационных данных.

Действующий режим регистрации нельзя назвать оптимальным также в связи с тем, что отсутствует единообразное понимание того, какие объекты подлежат регистрации; как должны решаться вопросы перехода юрисдикции, контроля и ответственности при передаче прав на зарегистрированные космические объекты другому государству; каким образом обеспечить оперативное принятие решений (например, чтобы предотвратить опасное сближение или даже столкновение космических объектов); нужно ли специальное правовое регулирование использования малых космических аппаратов, особенно в составе больших спутниковых группировок, с непродолжительным сроком орбитального существования и т.д.

Несмотря на то, что космический мусор формально соответствует критериям космического объекта и может быть зарегистрирован в соответствии с правилами МКП, международная и национальная регистрация обычно осуществляется в отношении функциональных космических объектов, включая ракеты-носители и их отдельные ступени, после их запуска в космос. Отдельный международный механизм регистрации фрагментов космического мусора на сегодняшний день отсутствует. При этом регистрация таких фрагментов важна не только для целей учета, но в первую очередь для идентификации и возможности их отслеживания. Любой из миллионов фрагментов космического мусора, находящихся сегодня на околоземных орбитах, может причинить серьезный ущерб. Однако современные технические возможности позволяют следить лишь за небольшой их частью [5], поэтому довольно сложно (если вообще возможно) установить, какой фрагмент космического мусора причинил ущерб, частью какого именно космического объекта он являлся и с каким государством или государствами этот объект был юридически связан (то есть какое государство являлось запускающим в отношении этого объекта). Тем самым задача выявить потенциально ответственное государство, на которое может быть возложена обязанность компенсировать ущерб, причиненный конкретным космическим объектом или его фрагментом, на практике становится трудновышолнимой.

2.4. Юрисдикция и контроль, права собственности

Регистрация космического объекта влечет определенные юридические последствия. Во-первых, государство регистрации сохраняет юрисдикцию и контроль над зарегистрированным космическим объектом (и его экипажем) на любом этапе космического полета. Во-вторых, права собственности на космический объект и его составные части сохраняются за правообладателем (т.е. государством, юридическим или физическим лицом соответственно) независимо от того, находится ли объект в космосе или возвращается на Землю. И в-третьих, государство регистрации имеет право требовать от других государств вернуть ему данный объект, включая его части, обнаруженный на Земле за пределами территории этого государства (ст. VIII Договора по космосу, ст. 5 Соглашения о спасании). Перечисленные правила продолжают действовать в отношении космических объектов, которые утратили функциональность, то есть перешли в категорию космического мусора.

2.5. Ответственность

Договор по космосу возлагает на государства международную ответственность за национальную космическую деятельность и за ущерб, причиненный космическими объектами (ст. VI и VII).

Первая категория ответственности означает, что государства должны обеспечить соответствие нормам МКП любой космической деятельности под их юрисдикцией. Уникальная особенность МКП состоит в том, что ответственность в области космической деятельности всегда возлагается на государство, даже если виновная или пострадавшая сторона — частное лицо этого государства.

Ответственность за ущерб возлагается на запускающее государство в случае, когда запущенный космический объект причиняет ущерб на Земле, в воздушном пространстве или в космосе. В первых двух случаях ответственность наступает независимо от вины этого государства. Если же ущерб причинен космическому объекту другого запускающего государства либо лицам или имуществу на борту такого космического объекта в любом месте, помимо поверхности Земли, наступление ответственности зависит от наличия вины. На практике, однако, данная категория ответственности оказалась неэффективной, прежде всего в связи с отсутствием четких критериев установления вины. Ущерб в МКП определяется как «лишение жизни, телесное повреждение или иное повреждение здоровья; либо уничтожение или повреждение имущества государств, либо физических или юридических лиц или имущества международных межправительственных организаций» (абз. «а» ст. I Конвенции об ответственности). За рамками этого определения остается косвенный ущерб, например, упущенная выгода (доходы, которые могли быть получены, если бы имущество не было повреждено или уничтожено).

Система ответственности в МКП разрабатывалась задолго до того, как была признана серьезность проблемы космического мусора. В связи с этим остаются открытыми вопросы о том, может ли государство быть привлечено к ответственности за создание космического мусора, непринятие мер по уменьшению его образования или отказ удалять с околоземных орбит свои нефункциональные аппараты и их части; целесообразно ли возложить на частных лиц ответственность за космический мусор, созданный в ходе их космической деятельности; нужны ли более строгие нормы об ответственности в связи с использованием ядерных источников энергии и т.д.

Отдельную проблему с точки зрения ответственности представляет рост числа спутниковых группировок, состоящих из множества малых космических аппаратов с небольшим сроком службы и ограниченной маневренностью, использование которых к тому же затрудняет астрономические наблюдения и усугубляет проблему засорения околоземных орбит космическим мусором.

Также не решен вопрос об ответственности за ухудшение состояния окружающей среды космоса и Земли, который напрямую связан с антропогенным загрязнением околоземных орбит.

2.6. Защита окружающей среды Земли и космоса

Договор по космосу предписывает государствам учитывать интересы других участников космической деятельности. Государства обязаны, в частности, избегать вредного загрязнения космоса, включая небесные тела, а также «неблагоприятных изменений земной среды вследствие доставки внеземного вещества» (ст. IX). Если космическая деятельность или эксперимент, запланированные одним государством (или его гражданами) могут «создать потенциально вредные помехи» космической деятельности других участников, до начала таких операций должен быть задействован механизм международных консультаций (ст. IX).

Соглашение о Луне уточняет, что в ходе исследования и использования небесных тел государства «принимают меры для предотвращения нарушения сформировавшегося равновесия [их] среды вследствие внесения неблагоприятных изменений в эту среду, ее вредоносного загрязнения вследствие доставки посторонних для этой среды веществ или каким-либо иным путем» (п. 1 ст. 7).

При этом, как было отмечено выше, в МКП прямо не предусмотрена ответственность за причинение ущерба окружающей среде Земли и космоса. Однако эта ответственность может наступить, если вред экологии в ходе космической деятельности повлек ущерб людям или имуществу. Если пострадавшему государству удастся доказать такую причинно-следственную связь, оно может рассчитывать на возмещение ущерба на основании процедур Конвенции об ответственности.

Поскольку МКП основано на общем международном праве и является его частью, к космической деятельности могут при необходимости применяться нормы и принципы других отраслей международного права, включая международное право окружающей среды. Нарушение таких норм при исследовании и использовании космоса может повлечь ответственность и обязанность возместить причиненный ущерб в рамках экологического (а не космического) права [6, 7].

2.7. Разрешение споров

Традиционный для МКП подход — стремиться к урегулированию споров дипломатическим путем — оказался эффективен в межгосударственных отношениях, поскольку государства заинтересованы в первую очередь не в компенсации ущерба, а в продолжении мирной космической деятельности. На случай, если разногласия не могут быть сняты дипломатическими средствами, в МКП был разработан механизм межгосударственной ответственности. Конвенция об ответственности устанавливает, что «государство, которому причинен ущерб, либо физическим или юридическим лицам которого причинен ущерб, может предъявить запускающему государству претензию о компенсации за такой ущерб» (п. 1 ст. VIII). Как видно из этой нормы, конвенционный механизм привлечения к ответственности касается только государств: даже если ущерб причинен частному лицу, защитить его нарушенные права может только государство его юрисдикции.

Международный Суд может рассматривать «космические» споры, но только по инициативе и с участием государств, к частноправовым спорам данный механизм неприменим [8]. С увеличением масштабов частной космической деятельности возникает потребность в альтернативных средствах урегулирования споров, которые позволяли бы физическим и юридическим лицам напрямую отстаивать свои интересы. Конвенция об ответственности предусматривает, что государства и их лица могут обратиться за защитой своих прав в судебный орган или административный трибунал государства, чей космический объект причинил ущерб (п. 2 ст. XI). Однако этот путь может казаться слишком долгим, затратным и в итоге неэффективным.

Перспективным средством разрешения споров, связанных с коммерческой космической деятельностью, представляется третейское разбирательство (арбитраж). Правила такого разбирательства были сформулированы Постоянной палатой третейского суда (ППТС) в 2011 г. Разработанный ППТС Факультативный арбитражный регламент по урегулированию споров, касающихся деятельности в космическом пространстве [9], задумывался как оптимальное средство разрешения международных споров в связи с космической деятельностью, которые могут возникать между государствами, международными межправительственными и неправительственными организациями и частными лицами.

Международный коммерческий арбитраж позволил бы частным лицам отстаивать свои интересы наравне с государствами в рамках космической деятельности — в том числе при причинении ущерба космическим мусором. Однако окружающая среда Земли и космоса как нематериальные общие блага требуют отдельных механизмов международно-правовой защиты. В этом случае был бы полезен опыт Международного Суда по разрешению споров в области защиты окружающей среды [6].

2.8. Перспективы международно-правового решения проблемы космического мусора

Рассмотренные международные соглашения ООН по космосу заложили основные принципы и правила деятельности человека в космосе. С развитием отдельных направлений космической деятельности появляются новые проблемы, для решения которых требуется специальное регулирование.

Проблема космического мусора должна решаться одновременно по трем направлениям:

- 1. Предупреждение образования космического мусора (англ. space debris mitigation) принятие мер, ограничивающих создание космического мусора;
- Уменьшение засоренности космоса (англ. space debris remediation) принятие мер по снижению количества мусора, уже находящегося на околоземных орбитах. В числе таких мер рассматриваются обслуживание космических объектов на орбитах (англ. on-orbit servicing), а также активное удаление космического мусора (англ. active debris removal);
- 3. Управление космическим движением (англ. space traffic management) принятие мер по защите орбитальных систем от негативного воздействия космического мусора.

На каждом из этих направлений возникает множество технических, экономических, политических и правовых проблем. В числе последних — установление, защита и отчуждение (отказ или передача) прав на фрагменты космического мусора; ответственность за ущерб, который может наступить в процессе удаления космического мусора с орбит; страхование такой ответственности. В МКП нет обязанности удалять с орбит космический мусор, обмениваться данными наблюдений об объектах и событиях в околоземном космическом пространстве. Не предусмотрена также ответственность за передачу или опубликование в открытом доступе неточных или некорректных данных.

Оптимальным средством урегулирования отмеченных выше проблем был бы специальный международный договор универсального характера. Перспектива его разработки, однако, маловероятна: последний на сегодняшний день юридически обязательный универсальный международный договор по космосу — Соглашение о Луне — был принят еще в 1979 г., но до настоящего времени его участниками стали всего 18 государств [10]. Международные инициативы о конвенционном решении того или иного вопроса космической деятельности до сих пор не получили должной поддержки [11, 12]. В отсутствие специального международно-правового регулирования в области борьбы с космическим мусором целый ряд организаций и форумов многостороннего сотрудничества предпринимают усилия по регламентации данной сферы.

3. Международные инициативы по решению проблемы космического мусора

Варианты организационно-правовых решений проблемы космического мусора исследуются рядом международных организаций и форумов. До недавних пор основное внимание уделялось предупреждению образования космического мусора, однако темы уменьшения засоренности космоса и управления космическим движением постепенно выходят на первый план международных дискуссий.

3.1. Комитет ООН по космосу

Главная задача Комитета ООН по космосу — обеспечивать развитие международного сотрудничества и международно-правовых рамок космической деятельности. В рамках Комитета государства обсуждают в том числе научно-технические и юридические аспекты проблемы космического мусора.

В 2007 г. Комитет ООН по космосу принял Руководящие принципы по предупреждению образования космического мусора [3]. В данном рекомендательном документе предложено определение космического мусора, сформулированы ориентиры для государств и международных организаций, которых следует придерживаться при планировании полетов, проектировании, изготовлении и эксплуатации космических аппаратов и орбитальных ступеней ракет-носителей. При разработке Руководящих принципов Комитет ООН по космосу опирался на Свод руководящих принципов предупреждения образования космического мусора, разработанный Межагентским координационным комитетом по космическому мусору.

Отдельные аспекты проблемы космического мусора затрагиваются в резолюциях и иных рекомендательных документах Генеральной Ассамблеи ООН по смежным вопросам. Так, в Рекомендациях по совершенствованию практики регистрации космических объектов государствами и международными межправительственными организациями [13] государствам предлагается информировать Генерального секретаря ООН о любом изменении статуса операций (в частности, когда космический объект прекращает функционировать), примерной дате схода объекта с орбиты, перемещения его на орбиту увода или возвращения в атмосферу.

В резолюции 68/74 Генеральная Ассамблея ООН напомнила о том, что важно предупреждать образование космического мусора, чтобы обеспечивать устойчивое использование космического пространства и уменьшать потенциальный вред окружающей среде [14]. Государствам было рекомендовано, в частности, предусмотреть в своем законодательстве такие условия выдачи лицензий (разрешений) на космическую деятельность, чтобы они «содействовали удостоверению того, что космическая деятельность осуществляется безопасным образом и с ограничением рисков для людей, окружающей среды и имущества и что такая деятельность не создает помех для проведения другой деятельности в космосе» (п. 4).

Принятые Комитетом ООН по космосу в 2019 г. Руководящие принципы обеспечения долгосрочной устойчивости космической деятельности [15] также содержат ряд рекомендаций, применимых в отношении космического мусора: в первую очередь, Руководящий принцип А2 в части разработки, пересмотра или изменения национальных систем правового регулирования космической деятельности, а также Руководящий

принцип D2 об изучении и рассмотрении новых мер, позволяющих справиться с засоренностью космического пространства в долгосрочной перспективе.

Проблема космического мусора встает особенно остро в контексте использования космических объектов с ядерными источниками энергии. Согласно Принципам, касающимся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве, которые были одобрены Генеральной Ассамблеей ООН в 1992 г. [16], государства стремятся проектировать, запускать и использовать подобные объекты таким образом, чтобы снизить радиологическую опасность для людей, биосферы и космического пространства (абз. «а» п. 1 Принципа 3). Государствам также рекомендовано использовать ядерные реакторы на достаточно высоких орбитах, чтобы «свести к минимуму риск для нынешних и будущих космических полетов, а также вероятность столкновения с другими космическими объектами» (абз. «а» и «b» п. 2 Принципа 3). Государства — члены Комитета ООН по космосу и наблюдатели в нем регулярно информируют Комитет о проводимых ими исследованиях, касающихся безопасного использования космических объектов с ядерными источниками энергии на борту и проблем их столкновений с космическим мусором.

Упомянутые документы Комитета ООН по космосу, несмотря на их рекомендательный характер, соблюдаются целым рядом государств и международных организаций, которые на добровольной основе принимают соответствующие меры по предупреждению образования космического мусора. Усилиями Комитета ООН по космосу информация о таких мерах и механизмах является общедоступной и регулярно обновляется [17]. Генеральная Ассамблея ООН в своих ежегодных резолюциях о международном сотрудничестве в области исследования и использования космического в мирных целях подчеркивает важность совместной и индивидуальной работы государств над снижением техногенного засорения космоса.

3.2. Межагентский координационный комитет по космическому мусору

Межагентский координационный комитет по космическому мусору (МККМ) — это международный форум, объединяющий 12 национальных и 1 международное космическое агентство для научно-технической координации их деятельности применительно к проблеме космического мусора на околоземных орбитах. Члены МККМ обмениваются информацией о своем опыте исследования космического мусора, развивают сотрудничество в данной области и оценивают его успехи, определяют варианты уменьшения засорения космоса и принимают соответствующие технические рекомендации. В 2002 г. МККМ принял Руководящие принципы предупреждения образования космического мусора [18]. В документе обобщена лучшая национальная и международная практика и сформулированы технические рекомендации по снижению количества мусора, создаваемого в рамках обычных космических операций, минимизации рисков разрушений на орбитах, удаления отработавших космических объектов с орбит, а также предотвращению столкновений на орбитах.

Проблема защиты космической среды обсуждается МККМ начиная с 2020 г.: Комитет готовит «Доклад по космической среде», в котором будут представлены обзор мировой космической деятельности, оценка соблюдения Руководящих принципов МККМ, а также анализ эволюции состояния космической среды. По замыслу МККМ, результаты этого исследования позволят повысить осведомленность о проблеме космического мусора и помочь операторам в принятии обоснованных решений относительно подготовки их космических миссий [19].

Кроме того, МККМ ежегодно делает прогнозы относительно возвращения космических объектов в атмосферу Земли, отрабатывая таким образом методы прогнозирования и механизмы распространения подобной информации. МККМ признал, что развертывание на низких околоземных орбитах больших спутниковых группировок представляет риск для космической среды с точки зрения увеличения количества мусора, а также для космических аппаратов, уже функционирующих на орбитах. В 2017 г. МККМ представил рекомендации, которых следует придерживаться операторам при разработке и эксплуатации больших спутниковых группировок [20].

3.3. Международная организация по стандартизации

Усилиями Международной организации по стандартизации (ИСО) был разработан международный стандарт ИСО 24113:2019 «Системы космические. Требования по снижению космического мусора» [21]. Данный стандарт содержит основные требования по предупреждению образования космического мусора, применимые ко всем элементам беспилотных систем, запускаемых в околоземное пространство или проходящих через него (в том числе орбитальные ступени ракет-носителей, функционирующие космические аппараты и любые объекты, отделяемые в рамках обычных операций). Стандарт ИСО 24113:2019 призван сократить рост количества космического мусора, обеспечивая проектирование, эксплуатацию и утилизацию космических объектов таким образом, чтобы предотвратить образование ими мусора в течение всего срока пребывания таких объектов на орбите, а также снизить риск причинения ущерба при возвращении этих объектов в атмосферу Земли. Стандарт ИСО 24113:2019 возглавляет иерархию стандартов и технических отчетов ИСО, имеющих отношение к проблеме космического мусора [22]. Все стандарты ИСО рекомендательные, однако государства могут их внедрить в свое законодательство и таким образом сделать их обязательными для граждан и юридических лиц.

3.4. Международный союз электросвязи

Вопросами использования радиочастотного спектра и спутниковых орбит для служб радиосвязи занимается Международный союз электросвязи (МСЭ) — международная организация, объединяющая 193 государства и порядка 900 компаний. В основе деятельности МСЭ лежит следующий принцип: радиочастоты и связанные с ними орбиты, включая орбиту геостационарных спутников, являются ограниченными естественными ресурсами, которые должны использоваться рационально, эффективно и экономно, чтобы обеспечить справедливый доступ к ним для разных стран или объединений [23].

В 2010 г. МСЭ принял рекомендацию ITU-R S.1003 «Защита геостационарной спутниковой орбиты как окружающей среды» [24]. В этом документе подтверждается, что космический мусор представляет угрозу для нормальных операций на ГСО, которая представляет собой уникальный и ограниченный природный ресурс. Государствам — членам МСЭ рекомендуется принимать меры по уменьшению количества мусора на ГСО при выведении на нее спутников, удалять мусор с орбит, которые пересекают ГСО или находятся в непосредственной близости от нее, а также безопасным образом уводить отработавшие аппараты с ГСО на орбиту захоронения.

Усилиями МСЭ и Управления ООН по вопросам космического пространства был подготовлен документ «Руководство по регистрации космических объектов и распределению частот для малых и сверхмалых спутников». Задача Руководства — помочь разработчикам и операторам малых спутников с регистрацией таких космических объектов, получением доступа к радиочастотам, разрешений и лицензий на их запуски, а также предупреждением образования космического мусора [25].

3.5. Европейское космическое агентство

В 2004 г. по инициативе Европейского космического агентства (ЕКА) и космических агентств Великобритании, Германии, Италии и Франции был принят Европейский кодекс поведения в отношении предупреждения образования космического мусора [26]. Документ разрабатывался с тем, чтобы предупреждать возможные столкновения и разрушения аппаратов на орбитах, снижать количество мусора в наиболее востребованных районах орбит, а также ограничивать создание нового мусора в ходе космических операций. Силами ЕКА также осуществляется общеевропейская программа обеспечения осведомленности об обстановке в космосе [27].

3.6. Инициативы международных профессиональных объединений

Вопросы снижения техногенной засоренности космоса исследуются также рядом международных неправительственных организаций и профессиональных объединений. Международному сообществу предлагаются различные подходы к решению обозначенной проблемы без «привязки» к Комитету ООН по космосу и другим традиционным (т.е. межгосударственным) площадкам.

Так, в 2019 г. международное неправительственное объединение «Space Safety Coalition» представило документ «Лучшая практика в области обеспечения устойчивости космических операций» [28], главная задача которого — «восполнить пробелы в современном режиме управления космической деятельностью и способствовать лучшему проектированию космических аппаратов, их эксплуатации и утилизации с ориентиром на обеспечение долгосрочной устойчивости космических операций» (преамбула). Авторы документа постарались учесть ранее опубликованные рекомендации Комитета ООН по космосу, МККМ и стандарты ИСО, а также предложить свой подход к решению новых проблем, таких как использование больших спутниковых группировок и уменьшение засоренности космоса (п. 7–9 преамбулы).

Экспертная Гаагская группа по космическим ресурсам также обратила внимание на проблему космического мусора. В своем труде «Элементы для разработки международного регулирования деятельности в области космических ресурсов» [29] Гаагская группа отметила, что «государства и международные организации, ответственные за деятельность в области космических ресурсов, будут принимать соответствующие меры с целью предотвращения и уменьшения потенциального вреда людям, имуществу и окружающей среде (п. 10).

В 2021 г. Всемирный экономический форум объявил об инициативе «Оценка устойчивости космической деятельности», которая будет реализована вместе с ЕКА и рядом промышленных «космических» предприятий ЕС на базе Космического центра Федеральной политехнической школы Лозанны. По замыслу авторов,

высокая оценка предстоящих космических миссий с точки зрения устойчивости будет поощрять более ответственное поведение в космосе, включая вывод из эксплуатации спутников и удаление космического мусора с орбит.

В том же 2021 г. на Парижском форуме мира была анонсирована инициатива «Net Zero Space» [30]. Идея данной инициативы состоит в том, что участники космической деятельности, представляющие различные ее уровни и направления, совместными усилиями обеспечат устойчивое использование космоса к 2030 г. Достичь этой цели позволят конкретные меры по уменьшению загрязнения околоземных орбит, недопущению создания нового и удалению уже имеющегося опасного мусора.

4. Заключение

Проблема космического мусора сегодня стоит как никогда остро: если она не будет эффективно решена, засоренность околоземных орбит способна привести к невозможности космических запусков в обозримом будущем. При этом любые практические инструменты по борьбе с космическим мусором должны быть оформлены юридически. Спектр нерешенных правовых проблем, связанных с космическим мусором, включает в себя, среди прочего: установление правового статуса космического мусора; вопросы собственности на фрагменты космического мусора; ответственность за ущерб, который может быть причинен такими фрагментами на Земле, в воздушном пространстве и в космосе, включая страхование такой ответственности и механизмы компенсации ущерба; правовые последствия причинения экологического вреда в космосе и на Земле; международно-правовое регулирование использования больших спутниковых группировок, оказания услуг по обслуживанию космических аппаратов на орбитах и т.д. Рассмотренные выше своды руководящих принципов, стандартов и рекомендаций не решают эти проблемы, поскольку не имеют обязательной юридической силы. Иными словами, участники космической деятельности не обязаны соблюдать эти рекомендации.

В свою очередь, нормы международного космического права — прежде всего Договора ООН по космосу — являются обязательными и формируют базовый режим всей космической деятельности. Однако применимость этих универсальных норм к проблеме уменьшения техногенного засорения и засоренности космоса опосредована и не всегда однозначна. До тех пор, пока не будет выработан специальный международноправовой режим в данной области, имеющиеся международные рекомендации технического и организационного характера будут играть важную роль в обеспечении порядка, предсказуемости и единообразия практики участников космической деятельности. При этом имплементация международных рекомендаций в национальное законодательство позволит им стать обязательными — а их нарушение наказуемым — в рамках конкретного национального правопорядка.

Список литературы

- 1. United Nations Office for Outer Space Affairs. International Space Law: United Nations Instruments (2017).
- 2. S. Hobe, B. Schmidt-Tedd, and K.-U. Schrogl, Kyolnskij kommentarij k kosmicheskomu pravu: Dogovor po kosmosu (2017).
- 3. United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Space Debris Mitigation Guidelines (2007).
- 4. Charter of the United Nations, Art. 1, Art. 2 para. 4, Art. 51 (1945).
- 5. J.-C. Liou and B. Lal, 4, Technical presentation at the 59th Session of the Scientific and Technical Subcommittee, Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, United Nations (2022).
- P. Achilleas, S. Hobe, M. Alvarenga dos Santos, M. Cakir, et al., Fifty Years of Space Law / Cinquante ans de droit de le BTM espace (2020).
- 7. L. Viikari, The Environmental Element in Space Law: Assessing the Present and Charting the Future (2008).
- 8. V. S. Vereshchetin, The International Court of Justice as a Potential Forum for the Resolution of Space Law Disputes (2001).
- 9. Permanent Court of Arbitration. Optional Rules for Arbitration of Disputes Related to Outer Space Activities (2011).
- 10. United Nations Office for Outer Space Affairs. 10. Status of International Agreements relating to activities in outer space as at 1 January 2022 (2011).
- 11. K.-H. Boeckstiegel, German Journal of Space Law, 43, 395, 1994.
- 12. K.-U. Schrogl, C. Jorgenson, J. Robinson, and A. Soucek, Space Traffic Management Towards a roadmap for implementation (2018).
- 13. United Nations General Assembly. Resolution 62/101, Recommendations on enhancing the practice of States and international intergovernmental organizations in registering space objects (2007).
- 14. United Nations General Assembly. Resolution 68/74, Recommendations on national legislation relevant to the peaceful exploration and use of outer space (2013).
- United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Document A/74/20, Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, Annex II (2019).
- United Nations General Assembly. Resolution 47/68, Principles Relevant to the Use of Nuclear Power Sources in Outer Space (1992).
- 17. United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Document A/AC.105/C.2/2021/CRP.19, Compendium of space debris mitigation standards adopted by States and international organizations (2021).

- 18. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. IADC Space Debris Mitigation Guidelines, Rev 3 (2021).
- 19. H.-D. Kim, 6, Technical presentation at the 59th Session of the Scientific and Technical Subcommittee, Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, United Nations (2022).
- 20. Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. IADC-15-03, IADC Statement on Large Constellations of Satellites in Low Earth Orbit (2017).
- 21. International Organization for Standardization. ISO 24113:2019, Space systems Space debris mitigation requirements (2019).
- 22. International Organization for Standardization (ISO): standards and technical reports (2022).
- 23. Constitution of the International Telecommunication Union (1992).
- 24. International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R S.1003.2, Environmental protection of the geostationary-satellite orbit (2010).
- 25. International Telecommunication Union and United Nations Office for Outer Space Affairs. Guidance on space object registration and frequency management for small and very small satellites (2015).
- 26. Italian Space Agency (ASI) and British National Space Centre (BNSC) and French Space Agency (CNES), German Aerospace Agency (DLR) and European Space Agency (ESA). European Code of Conduct for Space Debris Mitigation (2004).
- 27. European Space Agency. ESA Space Debris Mitigation Policy for Agency Projects (2014).
- 28. Space Safety Coalition. Best Practices for the Sustainability of Space Operations (2019).
- 29. Hague International Space Resources Governance Working Group. Building Blocks for the Development of an International Framework on Space Resource Activities (2019).
- 30. 4th Paris Peace Forum. Net Zero Space (2021).

Особые астероиды в Солнечной системе

Девяткин А.В., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Горшанов Д.Л., Петрова С.Н., Мартюшева А.А.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Представлены результаты выявления астероидов, потенциально опасных для внутренних планет. Исследовано орбитальное движение астероида 2022 AE1, троянцев Земли (2010 ТК7, 2020 XL5) и «рукотворного» астероида 2020 SO.

Поступила в редакцию 05.05.2022 г. Принята в печать 25.05.2022 г.

Ключевые слова: объекты, сближающиеся с внутренними планетами, «троянцы» Земли, космические аппараты на гелиоцентрической орбите

Special asteroids in the Solar System

Devyatkin A.V., L'vov V.N., Tsekmeister S.D., Gorshanov D.L., Petrova S.N., Martyusheva A.A.

Central Astronomical Observatory at Pulkovo, RAS, St. Petersburg, Russia

The results of the detection of potentially hazardous asteroids for the inner planets are presented. The orbital motion of asteroid 2022 AE1, the Earth Trojans (2010 TK7, 2020 XL5), and the "man-made" asteroid 2020 SO has been studied.

Received 05.05.2022. Accepted 25.05.2022.

Keywords: objects approaching the inner planets, Earth Trojans, spacecraft in heliocentric orbit

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.003

1. Введение

В данной публикации рассмотрены некоторые типы особых астероидов, а конкретно:

- астероиды, потенциально опасные для внутренних планет Солнечной системы,
 - астероиды типа 2022 AE1,
 - астероиды-«троянцы» Земли: 2010 ТК7, 2020 XL5,
 - «рукотворный» астероид 2020 SO.

2. Астероиды, потенциально опасные для внутренних планет Солнечной системы

Значительные изменения орбит у объектов, сближающихся с планетами Солнечной системы, могут существенно повлиять на их дальнейшую историю. Если астероид является потенциально опасным одновременно для двух или нескольких планет, то вероятность отмеченных событий должна возрастать.

Используя текущий каталог элементов астероидов Центра малых планет [1] и численную эфемериду DE441, с помощью пакета программ ЭПОС [2] мы выявили следующие группы потенциально опасных астероидов для внутренних планет [3]:

- одновременно для двух планет,
- одновременно для трех планет,
- одновременно для четырех планет.

Первая группа распадается на шесть подгрупп: Меркурий-Венера, Меркурий-Земля, Меркурий-Марс, Венера-Земля, Венера-Марс, Земля-Марс. Соответствующие списки содержат сотни объектов.

Вторая группа содержит четыре подгруппы: Меркурий-Венера-Земля, Меркурий-Венера-Марс, Меркурий-Земля-Марс, Венера-Земля-Марс, Всего более 100 объектов.

Третья группа состоит из объектов, потенциально опасных для всех четырех внутренних планет Солнечной системы. Вот список 27 таких астероидов, мониторинг которых производится на постоянной основе: 2003 EP4, 2003 UV11, 2003 WW26, 2004 TG10, 2006 UF17, 2007 HW4, 2008 FP, 2008 VL14, 2009 HE21, 2009 WP6, 2010 JJ41, 2011 YX62, 2012 DX13, 2013 VO5, 2013 WM, 2014 UV115, 2014 YQ34, 2015 BL311, 2015 CG13, 2015 EO61, 2015 TX24, 2015 XG55, 2015 XJ55, 2017 DW108, 2017 FY64, 2017 TN2, 2019 AX2.

Естественно, что орбиты этих объектов имеют малый наклон и большой эксцентриситет, а их перигелии расположены внутри орбиты Меркурия. На рис. 1 показаны орбиты и положения пяти планет и указанных астероидов, видимые с северного полюса эклиптики, по состоянию на 19 ноября 2020 г. Дополнительно показаны линия апсид и линия узлов Юпитера.

Заметим, что лишь семь астероидов из списка, которые наблюдались на протяжении нескольких лет, имеют вполне надежную орбиту. Однако и для большинства других объектов количество наблюдений нельзя считать критически малым. Так или иначе, по состоянию данных на текущий момент можно утверждать следующее. На тысячелетнем промежутке времени 1500–2500 гг. все названные астероиды (за исключением



Рис. 1: Орбиты астероидов по состоянию на 19.11.2020.

трех случаев с Марсом) имели или будут иметь несколько десятков реальных сближений со всеми внутренними планетами на расстоянии менее 0.05 а.е. Однако существенного влияния на движение астероидов эти сближения не оказывают. Как всегда, гораздо больше влияние от Юпитера, особенно на те объекты, которые могут подходить к нему ближе. Для примера на рис. 2 показана эволюция орбит наиболее крупных астероидов 2004 TG10 и 2015 TX24 на тысячелетнем интервале. Здесь более всего заметно ретроградное вращение линии узлов.



Рис. 2: Эволюция орбит астероидов 2004 TG10 и 2015 TX24 на тысячелетнем интервале.

Группа найденных астероидов в свою очередь распадается на две подгруппы с разными величинами большой полуоси орбиты. Этот факт иллюстрирует гистограмма на рис. 3.



Рис. 3: Большая полуось орбит астероидов.

Кроме ретроградного вращения линии узлов и прямого вращения линии апсид даже на интервале в тысячу лет не всегда можно уверенно судить об изменении всех элементов орбит. Однако в большинстве случаев наблюдается тенденция к уменьшению большой полуоси и эксцентриситета орбит, т.е. все объекты, в особенности более далекие, постепенно продвигаются внутрь Солнечной системы. При этом взаимная компенсация влияния планет не позволяет астероидам войти в чистый резонанс ни с одной из них.

По мере открытия новых астероидов списки таких объектов постепенно растут, хотя некоторые из них на временных интервалах от нескольких десятков суток до нескольких десятков лет могут терять свой статус потенциально опасного объекта для какой-либо планеты. В особенности это касается тех, у которых величина наклона орбиты, изменяясь со временем в сторону увеличения, превысит некоторый предел. Но последующее ее уменьшение снова может вернуть астероид в интересующую нас группу.

Таким образом, можно утверждать, что в фазовом пространстве элементов орбит существуют такие области, в которые могут попадать и оставаться там длительное время астероиды, потенциально опасные одновременно для всех внутренних планет Солнечной системы. Поэтому необходимо изучать все объекты из упомянутых выше списков, а заодно и наблюдать все доступные астероиды для последующего улучшения их орбит.

3. Астероид 2022 АЕ1

Околоземный астероид 2022 AE1 диаметром 70 м был открыт 6 января 2022 г. астрономами из обсерватории Маунт-Леммон (США). 31 декабря 2021 г. он приблизился к Земле на расстояние около 9 млн. км. Первоначальные наблюдения этого астероида свидетельствовали о высоком риске соударения с Землей в июле 2023 г., вследствие чего ему был присвоен один из самых высоких рейтингов потенциальной опасности. Однако дальнейшие наблюдения показали, что астероид пройдет на безопасном расстоянии от нашей планеты.

Новые элементы орбиты, основанные на всех последних мировых наблюдениях, полученные с помощью пакета программ ЭПОС [2] позволяют скорректировать прогноз тесных сближений астероида с планетами. Табл. 1 содержит данные на ближайшее столетие.

В следующем столетии произойдут два более тесных сближения с Землей. С Венерой ожидаются не такие тесные, но более многочисленные и, что особенно важно, почти периодические сближения. Можно пред-

Дата	Расстояние, а.е.	Планета
2023.07.01	0.0595	Земля
2039.08.15	0.0245	Венера
2055.09.02	0.0645	Венера
2071.10.03	0.0432	Венера
2089.06.10	0.0527	Венера

Таблица 1: Тесные сближения астероида 2022 АЕ1 с планетами.



Рис. 4: Орбиты трех планет, астероида 2022 AE1 и потенциально опасных для него астероидов размером более 1 км на 21.01.2022.

положить, что, в конце концов, объект либо столкнется с одной из внутренних планет (вероятно, с Венерой), либо его движение приобретет более хаотический характер.

На рис. 4 показаны орбиты трех планет, нашего астероида и выявленных потенциально опасных для него астероидов (размером более 1 км), а также их положения на момент 21 января 2022 г.

Афелийное расстояние астероида 2022 AE1 составляет Q = 2.273 а.е. Следовательно, его орбита частично располагается в Главном поясе астероидов, где возможны встречи с десятками тысяч других объектов (более 630 тыс. с перигелийным расстоянием меньше 2.28 а.е.). Большинство из них имеют размер не более 6 км. Однако среди них есть такие крупные астероиды как Lamberta (147 км), Desiderata (109 км), Chaldaea (71 км), Dike (67 км) и другие. Но в текущем столетии ни среди крупных (например, Dike, сближение с нашим астероидом на расстоянии 0.029 а.е. 7 ноября 2063 г.), ни среди мелких объектов (например, Shiretoko, сближение с нашим астероидом на расстоянии 0.002 а.е. 1 декабря 2052 г.) пока не найдено таких, которые существенно повлияли бы на движение астероида 2022 AE1. Поэтому уверенно говорить об устойчивости его орбиты можно лишь после более подробного изучения его движения в указанной области Солнечной системы.

Также для данного астероида представляет интерес вычисление негравитационных эффектов в его орбитальном движении.

Световое давление солнечной радиации вычислялось с начальными данными [4, 5], альбедо 0.14 [6] и оптическим коэффициентом 1.06 [7] для трех различных значений средней плотности основных спектральных классов астероидов: углеродистых астероидов класса С (1380 кг/м³), кремниевых астероидов класса S (2710 кг/м³) и металлических астероидов класса М (5320 кг/м³) [8]; а также для их среднего арифметического значения (3137 кг/м³). Процесс вычислений подробно описан в работе [9]. Расчеты показали, что максимальные отклонения астероида 2022 АЕ1 под действием светового давления составят 0.22–0.83 км за 1 год, что соответствует тесному сближению в 2023 г., 93.94–362.13 км за 42 года (тесное сближение в 2064 г.) и 139.86–539.19 км за 67 лет (тесное сближение в 2089 г.) в зависимости от плотности астероида.

Эффект Ярковского вычислялся с начальными данными [5] и средним арифметическим значением плотности трех основных спектральных классов (3137 кг/м³). Такие характеристики, как коэффициент излучения, теплоемкость и теплопроводность были приняты средними, а в качестве периода вращения и угла наклона оси вращения астероида были приняты следующие значения 5, 10, 15 ч и 0°, 45°, 90°, 135°, 180° соответственно. Вычисления производились с помощью модели [10]. Расчеты показали, что скорость изменения большой полуоси орбиты астероида 2022 AE1 под действием эффекта Ярковского составит от $-4.1180 \cdot 10^{-6}$ до $4.1180 \cdot 10^{-6}$ а.е./млн. лет в зависимости от периода вращения и угла наклона оси вращения астероида.

Будущие тесные сближения астероида 2022 AE1 с Землей и, особенно, с Венерой, а также возможные сближения с астероидами Главного пояса требуют дальнейших высокоточных астрометрических наблюдений и уточнений его орбиты. Гравитационные и негравитационные эффекты могут существенно изменить орбиту астероида и в результате привести к столкновению с одной из внутренних планет.

4. «Троянцы» Земли: 2010 ТК7, 2020 XL5

Поиск скоплений материи вблизи точек Лагранжа L_4 и L_5 орбиты Земли (треугольных точек либрации, расположенных на орбите планеты в 60° впереди и позади нее) осуществлялся на базе двух телескопов (ЗА-320М и МТМ-500М) Пулковской обсерватории в 2000-х гг. Данные наблюдения велись в рамках проекта по созданию Орбитальной Звездной Стереоскопической Обсерватории (ОЗСО) [11]: проект предполагал помещение двух идентично оборудованных космических аппаратов вблизи точек L_4 и L_5 , но прежде было необходимо оценить заселенность данных областей астероидами. В ходе совершенных наблюдательных программ никаких объектов обнаружено не было.

1 октября 2010 г. командой NEOWISE (NASA, США) с помощью космического инфракрасного телескопа WISE был открыт первый астероид в точке $L_4 - 2010$ TK7 [12, 13], диаметр которого оценивается в ~ 0.3 км. Десятилетием позже в обсерватории Халикала (Гавайи, США) с помощью системы телескопов Pan-STARRS 1 также в точке L_4 был открыт второй астероид — (614689) 2020 XL5, диаметр которого оценивается в 1.18 ± 0.08 км [14, 15]. Малые тела, либрирующие вблизи точек L_4 и L_5 Юпитера, называются троянцами, поэтому открытые астероиды были причислены к группе троянцев Земли.

Компьютерные симуляции, выполненные при помощи пакета программ ЭПОС [2], созданного в Пулковской обсерватории, показали, что «троянцы Земли» нельзя в полной мере считать членами компактного сгущения материи вблизи точки L_4 , если таковое существует. Было выполнено интегрирование уравнений движения астероидов на длительных интервалах времени с использованием численной эфемериды DE441 [16]. Наблюдательные данные были взяты из базы данных Центра малых планет (MPC) [17, 18]. Несмотря на накопление ошибок при вычислениях, были выявлены некоторые особенности поведения данных объектов. Центры петель, описываемых обоими астероидами, отстоят достаточно далеко от точки L_4 , что не является типичным для астероидов троянской группы.

Моделирование позволяет предположить, что ранее астероид 2010 ТК7 «срывался» на подковообразную орбиту и, проходя через нестабильную точку Лагранжа L_3 , подходил к Земле с другой стороны, к точке L_5 . Двигаясь по циркулирующей орбите, он вошел в режим земного троянца в середине первого тысячелетия новой эры, до сих пор описывает широкие петли, и данный тип движения сохранится еще несколько тысячелетий. Однако, с большой вероятностью тип его орбиты потом изменится.

Астероид 2020 XL5 за предыдущее тысячелетие сменил орбиты трех типов: из подковообразной перешел на циркулирующую, а около 400 лет назад закрепился на вблизи точки L_4 . Моделирование показывает, что данный тип орбиты за последующую тысячу лет не изменится.

Для более точных симуляций требуется больше наблюдательных данных, поэтому астероиды 2010 ТК7 и 2020 XL5 планируется включить в будущие совместные наблюдательные программы Пулковской обсерватории.

5. «Рукотворный» астероид 2020 SO

Объект, получивший название 2020 SO, был открыт 17 сентября 2020 г. системой Pan-STARRS 1 (обсерватория Халикала, Гавайи, США) [19]. По мере накопления наблюдательных данных было выдвинуто предположение, что 2020 SO есть ни что иное, как ступень одной из старых ракет [20]. Дальнейшие фоометрические [21] и радарные исследования [22] позволили сотрудникам JPL NASA отождествить данный объект с частью разгонного блока «Центавр» аппарата Surveyor 2, запущенного 20 сентября 1966 г. Через 5 месяцев после открытия «рукотворный астероид» 2020 SO был удален из базы Центра Малых Планет (MPC) [23].

1 декабря 2020 г. объект имел тесное сближение с Землей на расстоянии около 50 тыс. км. В марте 2021 г. он вышел на новую орбиту вокруг Солнца. В 2036 г. ожидается его очередное тесное сближение с Землей. На рис. 5 представлена траектория объекта на четырехмесячном интервале времени между двумя его тесными сближениями с Землей.

В рамках изучения сближающихся с Землей астероидов на двух телескопах Пулковской обсерватории (ЗА-320М и МТМ-500М) были осуществлены наблюдения данного объекта. Всего было использовано 334 выбранных наблюдения из базы данных MPC (MPCORB) [1] и 212 наблюдений из полученных на телескопах Пулковской обсерватории. На их основе было выполнено уточнение орбиты, а также смоделирована ее эволюция.

Данный объект, побывав некоторое время квазиспутником Земли (объектом, находящимся в орбитальном резонансе 1:1 с планетой, но с нестабильной орбитой), опять будет двигаться по циркулирующей орбите,



Рис. 5: Траектория объекта с 1 ноября 2020 г. по 1 марта 2021 г.

близко подойдя к Земле уже в 2036 г. В дальнейшем, по состоянию текущей информации, циркулирующая орбита сохранится. На рис. 6 в рамках задачи двух неподвижных центров (Солнце-Земля) показана траектория движения объекта. Конечное положение соответствует моменту 1 января 2036 г.



Рис. 6: Траектория «астероида» 2020 SO после его ухода из околоземного пространства в марте 2021 г. и до его возвращения в 2036 г.

«Центавр» представляет собой интересный объект для исследований, в т.ч. для учета негравитационных эффектов в его орбитальном движении, поскольку данный объект имеет небольшие размеры и малый вес. Так было вычислено, что максимальное отклонение «Центавра» под действием светового давления к 2036 г. составит около 13.5 км, а изменение большой полуоси его орбиты вследствие эффекта Ярковского за один оборот вокруг Солнца составит от $-8.1 \cdot 10^{-13}$ до $1.6 \cdot 10^{-13}$ а.е. в зависимости от наклона его оси вращения. Данные расчеты подробно изложены в работе [24].

Случай с «рукотворным астероидом» 2020 SO, оказавшимся частью разгонного блока ракеты, показал, что некоторые рукотворные объекты могут возвращаться спустя несколько десятилетий странствий в космосе. В будущем с увеличением космического трафика подобных случаев, скорее всего, будет становиться

все больше и больше, что в свою очередь может вызвать проблемы на околоземной или околосолнечной орбитах.

6. Заключение

Выявлены группы потенциально опасных астероидов для внутренних планет Солнечной системы. Исследовано орбитальное движение астероида 2022 AE1. Устойчивость его орбиты зависит от сближений с Землей, Венерой, астероидами Главного пояса астероидов и негравитационных эффектов. Исследовано орбитальное движение троянцев Земли (2010 TK7, 2020 XL5). Орбитальные петли, описываемые обоими астероидами, не совсем типичны для большинства троянцев. Исследовано орбитальное движение «рукотворного» астероида 2020 SO с учетом негравитационных эффектов.

Список литературы

- 1. URL https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPCORB.html.
- 2. V. N. L'vov and S. D. Tsekmeister, Solar System Research, 46, 177, 2012.
- 3. A. V. Devyatkin, V. N. Lvov, and S. D. Tsekmeister, Solar System Research, 56, 62, 2022.
- 4. URL https://web.archive.org/web/20220121022739/https://neo.ssa.esa.int/search-for-asteroids?sum =1&des=2022AE1.
- 5. URL https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=2022%20AE1.
- T. A. Vinogradova, N. B. Zheleznov, V. B. Kuznetsov, Y. A. Chernetenko, and V. A. Shor, *Transactions of IAA RAS*, 9, 43, 2003.
- 7. E. N. Polyakhova and A. S. Shmyrov, Vestnik SPbSU, 2(8), 87, 1994.
- 8. G. A. Krasinsky, E. V. Pitjeva, M. V. Vasilyev, and E. I. Yagudina, Icarus, 158, 98, 2002.
- 9. A. A. Martyusheva, N. A. Petrov, and E. N. Polyakhova, Vestnik SPbSU, 2(60), 135, 2015.
- 10. A. I. Panasenko and Y. A. Chernetenko, Transactions of IAA RAS, 31, 59, 2014.
- 11. M. S. Chubei, Izvestia GAO, 219, 361, 2010.
- 12. URL https://minorplanetcenter.net/mpec/K10/K10T45.html.
- 13. URL https://www.nasa.gov/mission_pages/WISE/news/wise20110727.html.
- 14. URL https://minorplanetcenter.net/mpec/K20/K20XH1.html.
- 15. T. Santana-Ros, M. Micheli, L. Faggioli, R. Cennamo, et al., Nature Communications, 13, 2022.
- 16. R. S. Park, W. M. Folkner, J. G. Williams, and D. H. Boggs, Astron. J., 161, 2021.
- 17. URL https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=614689.
- 18. URL https://minorplanetcenter.net/db_search/show_object?object_id=2010+TK7.
- 19. URL https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K20/K20S78.html.
- 20. URL https://edition.cnn.com/2020/09/23/us/mini-moon-scn-trnd/index.html.
- 21. URL https://www.virtualtelescope.eu/2020/12/02/near-earth-object-2020-so-rotation-and-time-lapse-01-dec-2020/.
- 22. URL http://iaaras.ru/en/observations/echo/2020so/.
- 23. URL https://minorplanetcenter.net/mpec/K21/K21D62.html.
- 24. A. A. Martyusheva and A. V. Devyatkin, Journal of Physics: Conference Series, 2103, 2021.

Динамическая шкала АСЗ: зависимость от орбитальных параметров

Золотарёв Р.В., Шустов Б.М.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В нашей предыдущей работе (Золотарёв, Шустов 2021) были рассмотрены аспекты динамической эволюции населения астероидов, сближающихся с Землей (AC3): изменение со временем темпа убыли AC3 и итоговая эффективность различных каналов убыли AC3. Было показано, что численность населения AC3 убывает с медианным временем ~ 3 млн. лет, что уточняет оценки других авторов. На качественном уровне была также показана зависимость медианного времени от начальных значений параметров орбиты: большой полуоси и эксцентриситета. В данной работе эта зависимость от начального набора параметров орбит астероидов впервые исследована количественно. Как и в предыдущей работе интегрирование движения астероидов проводилось при помощи программного комплекса REBOUND. Интервал интегрирования 20 млн. лет. Также изучена зависимость темпа ухода AC3 от времени для различных каналов ухода.

Поступила в редакцию 09.05.2022 г. Принята в печать 30.05.2022 г.

Ключевые слова: астероиды сближающиеся с Землей, динамическая эволюция астероидов

Dynamic scale of NEAs: dependence on orbital parameters

Zolotarev R.V., Shustov B.M.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

In our previous paper (Zolotarev, Shustov 2021), aspects of the dynamic evolution of the population of near-Earth asteroids (NEAs) were considered. Those were the NEA depletion rate and the final efficiency of various channels of NEA escape. It was shown that the given population of the NEA decreases with a median time $t_{\text{NEA}} \sim 3$ million years, which refines the estimates of other authors. At the qualitative level, the dependence of t_{NEA} on the initial values of the orbit parameters: the semi-major axis and eccentricity was also shown. In this paper, this dependence on the initial parameters of asteroid orbits for the first time is studied quantitatively. As in the previous work, the integration of asteroid motion was carried out using the REBOUND software package. The integration interval is 20 million years. The change of the NEO escape routs in time for various channels of escape has also been studied.

Received 09.05.2022. Accepted 30.05.2022.

Keywords: Near-Earth asteroids, dynamic evolution of asteroids

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.004

1. Введение

Изучение населения AC3, т.е. астероидов, у которых перигелийное расстояние q удовлетворяет условию q < 1.3 а.е., является важным в связи с вопросами астероидно-кометной опасности, вопросами происхождения Солнечной системы, а также перспективами добычи астероидных ресурсов. Одной из особенностей



Рис. 1: Начальное распределение исследуемых астероидов размером более 1 км в плоскости элементов орбит a - e. Слева: модель 1, в которой рассматриваются только AC3 (q < 1.3 a.e.); справа: модель 2, в которой рассматриваются все астероиды с q < 1.72 а.е.



Рис. 2: Динамика изменения распределения астероидов ГПА по абсолютной астероидной звездной величине H (слева) и по размерам d (справа), включенных в базу Центра малых планет [3].



Рис. 3: Динамика изменения распределения астероидов ГПА с перигелийными расстояниями q < 1.72 а.е. по размерам (см. для сравнения рис. 2, нижнюю панель).

эволюции населения AC3 является тот факт, что численность AC3 на протяжении приблизительно 2–3 последних миллиардов лет оставалась неизменной, о чем свидетельствуют исследования истории кратерообразования на Луне [1], с другой стороны, динамическая шкала текущего населения AC3 существенно короче этого времени. Под динамической шкалой здесь понимается характерное время, за которое численность текущего населения заметно уменьшается. Как правило, для оценки шкалы берут т.н. медианное время t_{NEA} , т.е. интервал времени, за которое численность N популяции AC3 уменьшается вдвое по отношению к начальному значению N_0 . По результатам других авторов в оценках t_{NEA} есть существенный разброс (см., например, обзор в [2]). В то же время, важно знать это значение поточнее, так как это знание накладывает ограничения на механизмы пополнения AC3, на оценки численности AC3, на оценки времени жизни Главного пояса астероидов и т.д.

В работе [2] нами было показано, что время жизни текущего населения AC3 составляет около 3 млн. лет. Мы также заметили на качественном уровне, что значение t_{NEA} сильно зависит от значений большой полуоси a и эксцентриситета e AC3. В данной работе эта зависимость от начального набора параметров орбит астероидов исследована количественно. Такое исследование проводится впервые.

2. Постановка задачи и методика расчета

Основная идея расчетов состоит в том, чтобы проследить динамическую эволюцию фиксированной на данный момент популяции AC3 с «выключенными» источниками пополнения AC3. Для этого при помощи выборки AC3 из базы данных Центра малых планет [3] задается начальное распределение параметров орбит AC3. Для выборки были взяты AC3 с абсолютной звездной астероидной величиной $H < 17.7^{\text{m}}$, т.е.



Рис. 4: Изменение отношения $N(t)/N_0$ для ансамбля AC3 (модель 1) и для расширенного набора астероидов (модель 2). Красной штриховой линией показана аппроксимационная зависимость (2) для модели 1.

диаметром d > 1 км, поскольку она может считаться достаточно полной. Количество АСЗ в начальный момент времени $N_0 = N(t = 0) = 825$. Эта выборка представлена на рис. 1 (слева) в плоскости элементов орбит a - e. В дальнейшем мы рассматриваем эволюционное изменение этого распределения (Модель 1). Напомним, что по определению к АСЗ относятся астероиды с q < 1.3 а.е. На этом же рисунке показано начальное распределение на такой же диаграмме всех астероидов размером более 1 км, но с перигелийными расстояниями q < 1.72 а.е. Число таких астероидов согласно [3] составляет около 10 тыс. Эволюционное изменение этого распределения далее обозначено как Модель 2.

Мы полагаем, что расширение списка рассматриваемых астероидов позволяет понять динамику изменения населения AC3 с учетом прихода астероидов в зону AC3 из не-AC3 зоны пространства элементов орбит (a - e). В работе [2] мы назвали это диффузией орбит.

Основной источник AC3 — это астероиды Главного пояса (ГПА) (см., например, [4, 5]). Понятно, что, как это следует из сведений, приведенных во Введении, если включить в рассмотрение весь этот ансамбль астероидов, то население AC3 будут постоянно пополняться из огромного резервуара ГПА и количество AC3 в каждый данный момент времени будет примерно одинаковым. К сожалению, включить в рассмотрение все астероиды ГПА размером более 1 км затруднительно не только из-за их большого числа, но и потому что выборка таких астероидов не будет достаточно полной. На рис. 2 показано распределение астероидов ГПА по абсолютной астероидной звездной величине H и по размерам в соответствии с результатами, опубликованными на сайте Центра малых планет [3] в последние годы. Размеры определялись по формуле [6]:

$$d(\mathrm{km}) = 10^{3.1236 - 0.5 \log_{10}(\mathrm{A}) - 0.2\mathrm{H}} \tag{1}$$

при значении альбедо, принятом A = 0.15.

Очевидно, что заметное из рис. 2 быстрое нарастание количества открытых астероидов происходит в основном за счет астероидов меньших размеров. Практически все более крупные астероиды уже открыты. Граница «полноты обнаружения», согласно рис. 2, соответствует примерно d = 1.5 км. Из общих соображений можно представить, что положение границы полноты зависит от условий обнаружения, и астероиды на более вытянутых орбитах обнаруживаются легче, поскольку они могут сближаться с Землей на более короткие расстояния, чем астероиды ГПА, находящиеся на почти круговых орбитах. На рис. 3 показано распределение астероидов по размерам для выборки астероидов с перигелийными расстояниями q < 1.72 а.е. Как видно из рис. 3, граница полноты обнаружения для таких астероидов находится примерно на d = 800 м.

Интегрирование движения астероидов в моделях 1 и 2 проводилось на 20 млн. лет при помощи программного комплекса REBOUND с использованием гибридной схемы MERCURIUS [7]. В модели учитывалось гравитационное поле планет и Солнца, в то время как астероиды считались как безмассовые частицы. В численной модели учитывалась возможность столкновения астероидов с Солнцем и планетами, при этом в качестве сечения брались геометрические размеры объектов, а размерами астероидов при этом пренебрегалось.



Рис. 5: Зависимости $t_{\text{NEA}}(a, e, i)$ в выделенных ячейках области орбитальных параметров населения АСЗ. В каждой ячейке цветом и текстом указано время t_{NEA} (в млн. лет) и количество астероидов N_0 в момент времени $t_0 = 0$. В зонах, окрашенных черным, t_{NEA} превышает 20 млн. лет.

Для выяснения характера зависимости $t_{\text{NEA}}(a, e, i)$ вся область орбитальных параметров населения AC3 была разбита на ячейки, граничными значениями для которых были:

a = 0.0, 1.50, 2.25, 3.0 a.e.,

e = 0.0, 0.2, 0.7, 1.0,

 $i = 0, 20, 180^{\circ}.$

Количество таких ячеек — 18, это довольно грубая сетка, но из-за относительно небольшого общего числа рассматриваемых астероидов, число ячеек увеличить не представляется разумным, т.к. и без того малое число AC3 в ячейке при этом стало бы слишком малым для проведения статистических оценок. Эволюция отношения N/N_0 , т.е. отношение текущего числа AC3 к начальному числу AC3 в данной ячейке, прослеживалась для каждой такой ячейки, и, соответственно, для каждой ячейки определялось значение $t_{\rm NEA}$.

Для лучшего понимания роли сближений астероидов с планетами, для всех астероидов подсчитывалось число сближений каждого астероида с планетами. Сближением считается вход астероида в зону, радиусом в три радиуса сферы Хилла $r_{\rm H} \simeq a_{\rm P} \sqrt[3]{\frac{m_{\rm P}}{m_{\rm P}+M_{\odot}}}$ для данной планеты. Также в модели 1 непрерывно отслеживалась статистика ухода AC3 по различным каналам (столкновения с Солнцем, столкновения с планетами, уход астероидов из Солнечной системы, выход астероидов из области определения AC3).



Рис. 6: Числа сближений с планетами для астероидов из разных ячеек на плоскости орбитальных параметров a - e, достигнутое на момент времени t = 12 млн. лет. На верхней панели показано общее число сближений астероидов с планетами в данной ячейке. На нижней панели — нормированное число сближений, в пересчете на астероид. Пунктирные линии соответствуют перигелийному расстоянию q = 0.387, 0.723, 1.0, 1.523 а.е., а также афелийному расстоянию Q = 0.387, 0.723, 1.0, 1.523, 5.203 а.е. Жирная белая линия показывает границу АСЗ q = 1.3 а.е.

3. Результаты

На рис. 4 проиллюстрированы результаты расчетов зависимости от времени отношения числа AC3 в момент времени t к начальному числу AC3 $N(t)/N_0$ для выборки AC3 (модель 1) и для расширенного набора астероидов (модель 2). Хорошо видно, что в модели 1 значение t_{NEA} составляет примерно 3.0 млн. лет. Зависимость N/N_0 хорошо аппроксимируется выражением

$$\frac{N(t)}{N_0} = e^{-0.5t^{0.33}},\tag{2}$$

где время t задано в млн. лет. На рис. 4 также показана зависимость $N(t)/N_0$ в модели 2. Эта кривая спадает со временем гораздо медленнее, что естественно объясняется тем, что есть значительный резервуар астероидов в зоне q < 1.72 а.е., из которого астероиды могут «диффундировать» в зону АСЗ. Если рассматривать



Рис. 7: Зависимость от времени количества N(t) AC3 относительно начального количества N_0 , уходящих из области определения AC3 по различным каналам. Фиолетовая линия — доля AC3, выброшенных на момент времени t из Солнечной системы, зеленая — доля AC3, столкнувшихся с планетами, оранжевая — доля AC3, столкнувшихся с Солнцем, красная — доля AC3, оставщихся в Солнечной системе, но вышедших из области определения AC3. Штриховая линия — та же зависимость, что показана на рис. 4 (модель 1).

весь возможный резервуар астероидов ГПА, то кривая будет плоской на уровне значений $\simeq 1$ (на рис. 4 условно показана серой штриховой кривой).

Зависимость $t_{\text{NEA}}(a, e, i)$ в области орбитальных параметров населения АСЗ проиллюстрированы на рис. 5. Из рис. 5 хорошо виден основной характер зависимости t_{NEA} от орбитальных параметров. Мы полагаем, что он прежде всего объясняется количеством сближений данного астероида с крупными возмущающими орбиту астероида телами (планетами) за время интегрирования: чем больше сближений, тем более вероятен уход астероида из области АСЗ. Поэтому представляется логичным рассматривать $t_{\text{NEA}}(a, e, i)$ и информацию о частоте сближений совместно.

На рис. 6 показано количество сближений для астероидов из разных ячеек на плоскости орбитальных параметров a - e, достигнутое на момент времени t = 12 млн. лет. Картина, естественно, качественно не меняется и при интегрировании на больший интервал времени. Поскольку число сближений может быть довольно большим, оказалось возможным разбить плоскость a - e на большее количество ячеек по сравнению с рис. 5. Это делает картину более детальной. На верхней панели рис. 6 показано общее число сближений с планетами астероидов находящихся в данной ячейке. На нижней панели это число нормировано на некоторое среднее число астероидов в данной ячейке, т.е. на этой панели показано как бы некоторое среднее число сближений (как общее так и относительное) для астероидов, для которых перигелийное расстояние q = 0.72 а.е. и q = 1.0 а.е., а также афелийное расстояние Q = 1.0, а.е. Это объясняется тем, что такие астероиды относительно чаще сближаются с Венерой и Землей соответственно. Повышенная частота сближений в правом верхнем углу диаграмм на рис. 6 объясняется тем, что астероиды на таких вытянутых орбитах с большими a относительно часто сближаются с Юпитером в афелийной области их орбит.

Рис. 5 иллюстрирует основной характер зависимости t_{NEA} от орбитальных параметров. Учет информации из рис. 6 позволяет сделать следующие выводы:

- Значения t_{NEA} существенно выше для AC3, орбиты которых изначально имели бо́льшие значения i. Качественно это можно объяснить тем, что астероиды на этих орбитах (при прочих одинаковых параметрах) имеют меньше тесных сближений с планетами.
- При бо́льших значениях а и е значения t_{NEA} существенно уменьшаются. Это как раз обусловлено тем, что на таких орбитах происходит больше сближений с самым мощным возмущающим телом — Юпитером.

Конечно, было бы неплохо получить более подробную карту $t_{\text{NEA}}(a, e, i)$, но для ее получения с достаточной степенью приближения необходимо рассчитать эволюцию гораздо большего количества частиц на гораздо более подробной сетке ячеек. Мы планируем выполнить эту работу. При этом ожидается, что сравнение с картой частоты сближений позволит провести более детальный анализ.

На основе полученных результатов расчетов мы также изучили зависимость темпа ухода AC3 от времени для различных каналов ухода. На рис. 7 показана зависимость от времени количества N(t) AC3 (относительно начального количества N_0), уходящих из области определения АСЗ по различным каналам. Со временем относительное распределение по различным каналам меняется, но количество безвозвратно ушедших астероидов (вследствие выброса из Солнечной системы, столкновения с планетами или Солнцем) монотонно растет. На момент t = 20 млн. лет доля не-АСЗ из Солнечной системы составляет 7%, столкнувшихся с планетами — 4%, столкнувшихся с Солнцем — 15%, выброшенных из Солнечной системы — 48%. Значительная доля столкновений приходится на столкновения с Солнцем, что отмечалось также в работе [8]. С течением времени доля оставшихся АСЗ будет уменьшаться и установятся окончательные соотношения. По предварительным оценкам приведенные выше доли увеличатся пропорционально, примерно в 1.2 раза.

4. Выводы

В работе количественно исследована зависимость темпа убыли AC3 в зависимости от положения астероидов в пространстве элементов орбит, получены оценки для характерного времени убыли. Рассмотрены основные каналы каналы убыли AC3. Полученные результаты могут использованы в дальнейшем при исследовании механизмов пополнения населения AC3.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №22-12-00115

Список литературы

- 1. G. Neukum and B. A. Ivanov, in *Lunar and Planetary Science Conference*, 1263, Lunar and Planetary Science Conference (2002).
- 2. R. V. Zolotarev and B. M. Shustov, Astronomy Reports, 65, 518, 2021.
- 3. IAU minor planet center, URL https://www.minorplanetcenter.net/data.
- 4. A. Morbidelli, J. Bottke, W. F., C. Froeschlé, and P. Michel, in Asteroids III, 409-422 (2002).
- M. Granvik, A. Morbidelli, D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, D. Nesvorný, and R. Jedicke, Astron. and Astrophys., 598, A52, 2017.
- 6. A. W. Harris and A. W. Harris, *Icarus*, **126**, 450, 1997.
- 7. H. Rein, D. M. Hernandez, D. Tamayo, G. Brown, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 485, 5490, 2019.
- 8. P. Farinella, C. Froeschlé, C. Froeschlé, R. Gonczi, G. Hahn, A. Morbidelli, and G. B. Valsecchi, Nature, 371, 314, 1994.

Кометоцентрические координаты оси хвоста кометы 67P/Churyumov-Gerasimenko

Ибрагимов А.А.

Институт астрофизики НАН Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

В данной работе рассматриваются ошибки измерения кометоцентрических координат. Приводится последовательность действий по определению кометоцентрических координат перспективным проектированием точек изображения кометы на плоскость орбиты на примере кометы 67Р. Показаны условия, которые повышают точность определения угла поворота и центра фотометрического ядра в методе Штумпфа. Рассмотрено влияние прецессии и собственного движения звезд на точность определяемых значений. Отношение кометоцентрических координат свидетельствует плазменной природе кометного хвоста.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 30.05.2022 г.

Ключевые слова: перспективное проектирование, кометоцентрические координаты, погрешность, фотометрическое ядро, хвост кометы.

Cometocentric coordinates of the tail axis of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko

Ibragimov A.A.

Institute of Astrophysics of National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Tajikistan

In this paper, we consider errors in the measurement of cometocentric coordinates. The sequence of actions for determining the cometocentric coordinates by perspective projection of the image points of the comet onto the orbital plane is given on the example of comet 67P. Conditions are shown that increase the accuracy of determining the angle of rotation and the center of the photometric kernel in the Stumpf method. The effect of precession and proper motion of stars on the accuracy of the determined values is below the data used. The value of the deviation of the comet's tail indicates its plasma nature.

Received 10.05.2022. Accepted 30.05.2022.

Keywords: perspective projection, cometocentric coordinates, exactness, photometric nuclear, comet's tail.

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.005

1. Введение

Кометоцентрические координаты (ξ ; η ; ζ) используются при изучении различных процессов, происходящих в кометах и сравнении теоретических расчетов с наблюдательными данными, так как вид кометы в картинной плоскости может очень отличаться от ее параметров в плоскости орбиты. Такими параметрами могут быть форма, структура и пространственная ориентация кометных хвостов.

Ось ξ направлена вдоль продолженного радиус-вектора кометы, ось η лежит в плоскости орбиты и направлена в сторону, противоположную движению кометы, и ось ζ ортогональна к плоскости орбиты (рис. 1). Обычно полагают, что хвост кометы лежит в плоскости орбиты, поэтому $\zeta = 0$. Об этом свидетельствуют многие работы. В частности, в [1] по многочисленным фотографиям исследованы оси плазменных хвостов комет Daniel 1907d, Morehouse 1908с и Brooks 1911с, которые действительно лежат в плоскости орбиты или очень близко расположены к ней. То же самое можно сказать и в случае пылевых хвостов [2].



Рис. 1: Схематическое изображение кометоцентрических координат.

В [3] проведен анализ некоторых работ с точки зрения объема математических действий (числа решаемых уравнений) (табл. 1).

Метод	Число операций
Бесселя-Бредихина [4]	50-90
Копфа [3]	23-50
Орлова А.Я. [3]	35 - 65
Орлова С.В. [5]	40-70
Моисеева [6]	20-70
Всехсвятского [7]	35 - 55
Штумпфа [8]	17-94

Таблица 1: Количество математических действий в методах перспективного проектирования.

В более поздних работах [9, 10] в качестве достоинства разработанных методов приводится отсутствие необходимости определения квадранта углов, которые основаны на преобразовании с помощью матриц картинной плоскости в плоскость орбиты. Количество математических действий несущественно, поскольку используется ЭВМ.

2. Погрешность перспективного проектирования точек картинной плоскости на плоскость орбиты

При таких обстоятельствах основным критерием для выбора того или иного метода будет его точность. В [9] точность проектирования определяется значением угла между лучом зрения и нормалью к плоскости орбиты. При увеличении этого угла точность снижается и при равенстве 90° становится неопределенной или очень ненадежной. Данная степень ошибки относится и к другим предлагаемым методам прямого и обратного перспективного проектирования, то есть, значением угла между картинной плоскостью неба и плоскостью орбиты кометы. В [3] приведены пределы 0° – 85° и 95° – 180°, при которых можно вести исследования по определению типа хвостов.

В [10] приведены результаты сопоставления вычисленных значений кометоцентрических координат комет 1910 I, 1901 I и 1858 VI Донати несколькими методами, и отмечена достаточная точность нового метода. В [8] предлагается метод и на его основе исследуется изображение кометы Морхауза (1908 III). Результат сравнивается с полученными ранее данными по методу Моисеева [6].

О.В. Добровольский [11], отмечая метод Штумпфа [8] как наиболее удобный, оценил относительную погрешность полученных кометоцентрических координат в плоскости кометной орбиты ξ и η по ошибкам определения кометоцентрических координат в картинной плоскости ξ_0 и η_0 и углов χ и ψ . Здесь χ — угол между ξ и ξ_0 , ψ — угол между η и η_0 (рис. 2).

Оценка показывает, что при увеличении χ и ψ относительные ошибки $\Delta \xi$ и $\Delta \eta$ достигают большей величины. Для общего случая, когда заданы точные элементы орбиты, $\Delta \chi$ и $\Delta \psi$ равны нулю, и, соответственно, относительные погрешности имеют тот же порядок, что и исходные. Значения кометоцентрических координат становятся неопределенными при $\chi = 0$ и $\psi = 0$ или $\chi = 180^{\circ}$ и $\psi = 180^{\circ}$, то есть, когда комета находится в соединении или противостоянии и направление движения близко к лучу зрения.



Рис. 2: Гелиоцентрическая сфера, проведенная через положение кометы.

При вычислении кометоцентрических координат по методу Штумпфа ошибки могут быть при измерении угла поворота проекции осей координат γ и при определении центра фотометрического ядра кометы, так как фотометрическое ядро — протяженный (неточечный) объект. Также стоит учесть вопрос о влиянии прецессии и собственного движения звезд на конечный результат. Для увеличения точности, кроме благоприятных условий наблюдения, возникает необходимость выражения измеряемых значений через исходные данные (элементы орбиты, экваториальные координаты и солнечно-земные данные).

3. Определение кометоцентрических координат точек изображения кометы

	Image: Image: Application of the second						
i al	A	В					
1	р-геоцентрическое расстояние	0,4790					
2	Ω-долгота восходящего узла	36,335303					
3	r-гелиоцентрическое расстояние	1,258					
4	гелиоцентрическая долгота Земли l	12,83725					
5	i-угол наклона орбиты к эклиптике	3,8716997					
6	f-фокусное расстояние объектива	13300					
7	R-гелиоцентрическое расстояние Земли	0,99991					
8	γ-угол поворота	3,380					
10	х-абсцисса точки хвоста	122,8					
11	у-ордината точки хвоста	83,6					
12	Х-абсцисса ядра кометы	122,8					
13	Y-ордината ядра кометы	83,6					
14	U=	111,6434712					
15	λ=	20,72715438					
16	χ=	42,37062562					
18	ψ=	85,63731605					
30	ζ=	0,00000E+00					
31	η=	0,00E+00					

Рис. 3: Исходные данные и результаты вычислений кометоцентрических координат.

С этой целью обрабатывается изображение кометы 67Р, полученное на телескопе Цейсс-1000 Международной астрономической обсерватории Санглок (MAOC) 5.8677 октября 2021 г. по всемирному времени. Предложенный метод перспективного проектирования изображения кометы на плоскость кометной орбиты Штумпфом [8] свободен от решения многих тригонометрических уравнений в отличие от предшествующих работ [4, 5, 7].

Необходимость приведения алгоритма связана с тем, что в первоисточниках разрабатываемых методов основной акцент направлен на доказательство (достоверность, схожесть, превосходство) метода, а при использовании остаются нераскрытыми некоторые моменты, возможно, даже очень простые и естественные для автора, но требующие немалого времени и усилий при освоении и применении метода.

Согласно перспективному проектированию кометоцентрических координат на плоскость изображения по методу Штумпфа [8] заданы:

- i, Ω элементы орбиты кометы;
- Δ, r геоцентрическое и гелиоцентрическое расстояния кометы;
- *l*, *R* гелиоцентрические долгота и расстояние Земли;
- $f \phi$ окусное расстояние телескопа;
- $\alpha_{\rm s}, \delta_{\rm s}, \alpha_{\rm c}, \delta_{\rm c}$ экваториальные координаты Солнца и кометы.

Элементы орбиты и эфемериды кометы приведены из [12] и [13], солнечно-земные данные — из [14]. Исходные данные (рис. 3) уточняются интерполированием на момент наблюдения.

Последовательность действий для определения кометоцентрических координат такова:

1) Определяем угол поворота γ (рис. 4);

1.а) наносим сетку координат на изображении кометы по опорным звездам (отождествленным на изображении с помощью звездного атласа) (рис. 5);

1.6) решая уравнение (1) большого круга [11], определяем склонение δ_{r-v} продолженного радиусвектора по прямому восхождению α опорных звезд (табл. 2) и проводим проекцию радиус-вектора на изображении кометы;

$$\operatorname{tg} \delta_{\mathrm{r-v}} = \frac{\operatorname{tg} \delta_{\mathrm{s}} \sin\left(a_{\mathrm{c}} - a\right) - \operatorname{tg} \delta_{\mathrm{c}} \sin\left(a_{\mathrm{s}} - a\right)}{\sin\left(a_{\mathrm{c}} - a_{\mathrm{s}}\right)}.$$
(1)



Рис. 4: Прямоугольная система координат и проекция продолженного радиус-вектора — x_0 на фотографии кометы.

Таблица 2: Исходные и вычисленные экваториальные координаты.

	Солнце	Комета	Продолженный радиус-вектор		
α	192.62071	80.19792	80.19089	80.14170	80.21291
δ	-5.41131	+22.59028	+22.58986	+22.58695	+22.59116

1.в) по уравнению (2) определяем угол поворота γ — угол между положительным направлением оси абсциссы изображения и проекцией радиус-вектора:

$$tg \gamma = \frac{|y_0 - y_c|}{|x_0 - x_c|},$$
(2)

где x_c , y_c , x, y — измеренные на пластине прямоугольные координаты, соответственно, ядра и точек проекции продолженного радиус-вектора. Прямоугольные координаты искомой точки измеряются с помощью программ MaxImDL, Astroart и, проще всего, в Paint.

При получении изображения кометы на телескопе с экваториальной монтировкой и малым углом обозрения (в нашем случае $10' \times 10'$), с учетом подобия прямоугольных и экваториальных координат (рис. 5), вместо формулы (2) проще использовать (3):

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{|\delta_{\mathrm{r-v}} - \delta_{\mathrm{c}}|}{|a - a_{\mathrm{c}}|}.$$
(3)

Полученное значение по формуле (3) $\gamma = 3^{\circ}.8$ и имеет максимальное отклонение от среднего значения $\pm 0^{\circ}.06$, тогда как по формуле (2) отклонение на порядок больше. При вычислении γ по формуле (3) погрешность определения угла поворота сводится к каталожным значениям экваториальных координат опорных звезд.

Из треугольника Земля-Солнце-комета (рис. 6) находим *χ*, *ψ* — проективные углы (рис. 3) на плоскость изображения по следующим формулам (4):

$$\begin{cases}
\cos u = \frac{\Delta^2 + R^2 + r^2}{2\Delta R} \\
\sin \lambda = \sin u \frac{\Delta}{r} \\
\chi = \lambda + u - 90^o \\
\sin \lambda \cos \psi = \sin(\Omega - l) \sin i.
\end{cases}$$
(4)



Рис. 5: Изображение кометы 67Р, обработанное в программах Astroart и Paint.

3) Решая систему уравнений (5) находим промежуточные величины:

/

$$A_{0} = x_{c} \cos \gamma + \gamma_{c} \sin \gamma$$

$$B_{0} = x_{c} \sin \gamma + \gamma_{c} \cos \gamma$$

$$A = \rho(\cos \gamma \mp \sin \gamma \sin \chi \operatorname{tg} \psi)$$

$$B = \rho(\sin \gamma \pm \cos \gamma \sin \chi \operatorname{tg} \psi)$$

$$C = \rho(\pm B_{0} \sin \chi \operatorname{tg} \psi - A_{0})$$

$$D = \pm \rho \sin \gamma \cos \chi / \cos \psi$$

$$F = \mp \rho \operatorname{Cos} \gamma \cos \chi / \cos \psi$$

$$F = \mp \rho B_{0} \cos \chi / \cos \psi$$

$$a = \pm B_{0} \sin \gamma \operatorname{tg} \psi - \cos \gamma \sin \chi$$

$$b = \mp B_{0} \cos \gamma \operatorname{tg} \psi - \sin \gamma \sin \chi$$

$$c = A_{0} \sin \chi \mp B_{0} \operatorname{tg} \psi + f \cos \chi.$$
(5)

В формулах системы (5) верхние знаки применяются при правом повороте (рис. 4).

4) Решая уравнения (6), находим кометоцентрические координаты ξ и η :

$$\xi = \frac{Ax + By + C}{ax + by + c}; \eta = \frac{Dx + Ey + F}{ax + by + c}.$$
(6)

Система уравнений [8] для общего случая имеет бесконечное множество решений. Приравнивание значений прямоугольных координат искомой точки координатам центра комы ($x = x_c$; $y = y_c$) является частным решением, при котором должны получиться нулевые значения для кометоцентрических координат (рис. 3). Это достигается путем перебора значений прямоугольных координат центральной области фотометрического ядра.



Рис. 6: Положение Солнца — S, кометы — C и Земли — E.
В [10] приводится метод расчета собственного движения звезд по Блажко [15]. Однако результат влияния учета прецессии и собственных движений звезд не показан. В [16] на основе наблюдения кометы C/2019 Y4 показано, что влияние данных процессов дает абсолютную ошибку $9.69 \cdot 10^{-7}$ рад/год. С учетом геоцентрического расстояния кометы 67Р получим влияние на стотысячную долю единицы определяемых значений, тогда как в литературе обычно приводятся результаты кометоцентрических координат до десятитысячной доли единицы.

Стоит отметить, что при проведении оси хвоста под углом к горизонтали, линия будет состоять из ломаных черточек. В этом случае необходимо брать координаты в точке соединения этих ломаных.

4. Выводы

При получении изображения комет телескопами с экваториальной монтировкой и малым углом поля зрения, точность определения кометоцентрических координат значительно возрастает и упрощается вычисление угла совмещения проекции продолженного радиус-вектора с прямоугольными координатами изображения кометы. Также отпадает необходимость нанесения сетки экваториальных координат на изображении.

Приравнивание прямоугольных координат центра фотометрического ядра с задаваемыми (искомыми) прямоугольными координатами, является частным решением для определения центра кометы.

Начало отсчета кометоцентрических координат несколько смещено к солнечной стороне относительно центра фотометрического ядра. Это можно связать с действием солнечного ветра и светового давления, в результате которого уплотняется атмосфера на периферии комы с солнечной стороны.

Учет прецессии и собственного движения звезд оказывает влияние на стотысячную долю единицы полученных значений кометоцентрических координат. Погрешность при учете влияния прецессии больше чем при учете собственных движений звезд.

Отношения кометоцентрических координат η/ξ оси хвоста кометы 67Р дают значения менее 0.25, что свидетельствует о плазменной природе типа хвоста.

5. Благодарность

Автор выражает благодарность и глубокую признательность члену-корреспонденту НАНТ, д.ф.-м.н. Кохировой Г.И. за ценные советы и замечания по данной работе, а также коллегам и рецензентам помогавшим оформить статью.

- 1. A. Mammano and K. Wurm, Icarus, 4, 1, 1965.
- 2. M. J. Belton, Astron. J., 70, 451, 1965.
- 3. A. A. Demenko, in About types of comet tails, 237 (1965).
- 4. F. A. Bredikhin, in *About comet tails*, 279 (1934).
- 5. S. V. Orlov, in *Comets*, 195 (1935).
- 6. N. D. Moiseev, Astron. J., 1, 79, 1924.
- 7. S. K. Vsekhsvyatskii, Astronomicheskii Zhurnal, 6, 285, 1929.
- 8. P. Stumpff, Astronomische Nachrichten, 283, 245, 1956.
- 9. V. P. Tarashuk, Astrometriia i Astrofizika, 11, 76, 1970.
- 10. V. P. Konopleva and V. K. Rozenbush, Astrometriia i Astrofizika, 22, 61, 1974.
- 11. O. V. Dobrovolsky, in Comets, 288 (1966).
- $12. \ \ in \ \ https://minorplanetcenter.net//iau/MPEph/MPEph.html.$
- 13. in https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html.
- 14. The Astronomical Almanac (2021).
- 15. C. N. Blazhko, in Kurs sfericheskoi astronomii, 217 (1948).
- 16. F. M. Shokiriyon and A. A. Ibragimov, Reports NAS Tajikistan, 64, 676, 2021.

Фотометрические и траекторные наблюдения околоземных космических объектов в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН

Коробцев И.В., Мишина М.Н., Еселевич М.В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

В работе приводятся результаты оптических наблюдений космического мусора, образовавшегося 28 февраля 2018 г. в области геостационарной орбиты при разрушении верхней ступени Titan 3C Transtage 17. Сбор траекторной и фотометрической информации выполнялся на телескопах Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН для уточнения параметров орбит фрагментов, определения характеристик их поверхностей, периодов собственного вращения. Представлены результаты анализа полученных измерений. Приведены оценки изменения площади отражающей поверхности разрушившегося объекта и размеров наиболее крупного фрагмента.

Поступила в редакцию 09.05.2022 г. Принята в печать 30.05.2022 г.

Ключевые слова: фотометрия, космический мусор, оптический телескоп

Photometrical and trajectory observations of near-Earth space objects at Sayan solar observatory of the ISTP SB RAS

Korobtsev I.V., Mishina M.N., Eselevich M.V.

Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk, Russia

The paper presents the results of optical observations of space debris formed by the breakup of the Titan 3C Transtage 17 upper stage on February 28, 2018 in the region of the geostationary orbit. The trajectory and photometrical information acquisition was performed on telescopes at the Sayan Solar Observatory of the ISTP SB RAS to improve the orbital parameters of the fragments, characteristics of their surfaces and proper rotation periods. The results of the analysis of the obtained measurements are presented. Estimates of the change in the surface reflecting area of the break-up object and the size of the largest fragment are given.

Received 09.05.2022. Accepted 30.05.2022.

Keywords: photometry, space debris, optical telescope

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.006

1. Введение

К настоящему времени (март 2022 г.) количество объектов, регулярно отслеживаемых системами контроля космического пространства, составляет около 29800. Всего по оценкам с использованием статистических моделей на околоземных орбитах находится около 36500 объектов размером более 10 см, 1 млн. объектов размером от 1 см до 10 см, 130 млн. объектов размером от 1 мм до 1 см [2].



Рис. 1: Конструкция разгонных блоков серии Titan 3C Transtage с описанием используемых материалов из работы [1].

Серьезную угрозу для действующих космических аппаратов (KA) и будущих космических миссий могут представлять фрагменты размером более 1 см, большинство из которых на данный момент не отслеживаются системами контроля даже на низких орбитах.

Каждый запуск КА сопровождается не только выведением полезной нагрузки, но и выбросом в околоземное космическое пространство нескольких объектов, таких как отработанные ступени ракет, пусковые адаптеры и обтекатели. Кроме того, фрагментация объектов из-за взрывов и столкновений на орбите является одним из основных источников орбитального мусора и приводит к дальнейшему росту его количества.

В последние годы происходит существенный рост количества каталогизированных космических объектов. Связано это с нарастающими возможностями систем контроля космического пространства и началом развертывания многоспутниковых группировок компаний SpaceX, OneWeb, Amazon и др. Стремительно растет доля объектов, для которых невозможно установить природу их происхождения, соотнести с конкретным запуском или событием разрушения [3].

Преобладающим источником информации о высокоорбитальных космических объектах (KO) являются оптические телескопы. Оптические измерения позволяют получать несколько видов важной информации о KO. В первую очередь, это астрометрические наблюдения, которые используются для определения параметров орбиты по положениям, вычисленным относительно звезд, второй вид информации — фотометрические измерения, анализ которых позволяет получить информацию о размере, форме, составе материала и параметрах собственного движения [4].

В 2018–2019 гг. в области высоких орбит выявлен ряд разрушений верхних ступеней ракетоносителей Atlas 5 Centaur и Titan 3C Transtage 17 [5, 6, 7]. В результате этих событий количество каталогизированных высокоорбитальных фрагментов космического мусора (KM) возросло более чем на 1200 объектов, часть из которых пересекает защищаемую зону геостационарной орбиты. При анализе данных событий обнаружены группы объектов с большим отношением площади к массе и видимым блеском в пределах 15–22 звездной величины [6]. При этом у значительной части обнаруженных объектов не определены характеристики формы, параметры вращения и размеры. Эти неизвестные параметры ограничивают точность прогнозов орбиты, поскольку существует связь между характеристиками объекта и влиянием на орбитальную динамику негравитационных возмущений, таких как давление солнечного излучения [8].

В работе приводятся результаты наблюдений космического мусора, образовавшегося в области геостационарной орбиты в результате разрушения верхней ступени Titan 3C Transtage 17 (международный номер 1969-013B, NORAD №3692), произошедшего 28 февраля 2018 г.

2. Наблюдения фрагментов разрушения верхней ступени Titan 3C Transtage 17

Космический объект №3692 является верхней ступенью ракеты-носителя Титан 3С, которая широко использовалась ВВС США для выведения полезных нагрузок на низкие и геостационарные орбиты на протяжении 25 лет. Известны несколько случаев разрушения верхней ступени Transtage [9]. В 2014 г. сообщалось [10] о возможном разрушении объекта №3962, но каталогизированные объекты отсутствовали, что косвенно указывало на событие газовыделения или столкновение с небольшим фрагментом космического мусора (КМ).

28.02.2018 г. в 21:01 GMT произошло разрушение объекта №3692 [11]. Это событие привело к возникновению нескольких десятков фрагментов, большая часть которых до сих пор находится в защищаемой зоне области геостационарной орбиты или пересекает ее. На рис. 1 из работы [1] показаны внешний вид разгонных блоков серии Titan 3C Transtage и описание материалов, используемых при их изготовлении. Корпус разгонного блока изготовлен в виде цилиндра с системой управления диаметром 3.05 м и высотой 4.57 м и двигательной установки с топливными баками в хвостовой части.



Рис. 2: Видимый блеск фрагментов разрушения Titan 3C Transtage 17 (объект №3692).



Рис. 3: Фазовая зависимость объекта №3692 до и после разрушения 28.02.2018.



Рис. 4: Сравнение фазовых зависимостей разрушенного объекта №3692 и целых объектов аналогичной конструкции.

В 2018–2022 гг. телескопы Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН участвовали в сборе траекторной и фотометрической информации для исследования характеристик отражающих поверхностей, параметров собственного вращения, размеров и формы объектов, связанных с разрушением объекта №3692. Координатная и фотометрическая информация была получена по 63 объектам разрушения. 21 объект каталогизирован с использованием измерительной информации телескопов АЗТ-14 и АЗТ-33ВМ Саянской солнечной обсерватории. На рис. 2 для фрагментов разрушения показано распределение медианных значений измеренного блеска, приведенных к нулевому фазовому углу и дальности 40000 км с использованием модели диффузно отражающей сферы.

В основном видимый блеск объектов находится в диапазоне 16–18.5 звездных величин, что означает небольшие линейные размеры фрагментов (25–50 см). Значительная часть объектов имеет отношение площади к массе больше 1.

3. Анализ фотометрических наблюдений фрагментов разрушения верхней ступени Titan 3C Transtage 17

Телескоп АЗТ-33ИК Саянской солнечной обсерватории использовался для измерения изменений блеска объектов со временем (кривых блеска) и зависимостей блеска объекта от фазового угла (угол в системе Солнце — космический объект — наблюдатель). Характер фазовой зависимости блеска определяется оптикогеометрическими характеристиками объекта. Сопоставление наблюдаемых фазовых зависимостей блеска с фазовыми функциями, рассчитанными для тел известной формы, позволяет определить характер отражения света (диффузный или зеркальный), примерную форму отражающей поверхности (шар, цилиндр, плоскость), вычислить эффективную площадь отражения и, зная коэффициент отражения, оценить размеры объекта. Кривые блеска содержат информацию о параметрах собственного вращения объектов и анализируются методами статистического анализа [12]. Видимая звездная величина объекта, освещенного Солнцем, вычисляется по формуле:

$$m = m_0 - 2.5 \cdot \lg(S\gamma F(\phi)/R^2),$$

где m_0 — звездная величина Солнца в соответствующем спектральном диапазоне; $F(\phi)$ — фазовая функция; R — топоцентрическое расстояние до объекта; γ — коэффициент отражения, S — площадь видимой поверхности KO, освещенной Солнцем.

На рис. 3 в фазовых зависимостях блеска объекта №3692, полученных до и после разрушения, отчетливо видны различия, обусловленные изменениями физических размеров родительского тела в результате взрыва.



Рис. 5: Кривые блеска объекта №3692 (слева) и наиболее крупного фрагмента разрушения №43282 (справа).



Рис. 6: Слева — средняя кривая блеска объекта №3692 за период вращения 1.8 с; справа — периодограмма, полученная методом Лафлера-Кинмана.

Для оценки изменения эффективной площади отражения в результате разрушения использовались данные наблюдений других верхних ступеней Titan 3C Transtage аналогичной конструкции, поскольку набор архивных данных по объекту №3692 до разрушения представлен лишь несколькими сериями в небольшом диапазоне фазовых углов. На рис. 4 показаны фазовые зависимости разрушившегося объекта и целых объектов аналогичной конструкции в широком диапазоне фазовых углов.

Исходя из этих данных, можно оценить, что эффективная площадь отражения объекта №3692 после разрушения 28.02.2018 уменьшилась на 43%.

На рис. 5 показаны кривые блеска объекта №3692 и наиболее яркого из наблюдавшихся фрагментов №43282 (международный номер 1969-013С). Кривые блеска и фазовые зависимости этих объектов имеют схожий вид. Оценочный диаметр крупного фрагмента №43282 составляет 1.5–2 м (в предположении диффузной сферы с коэффициентом отражения 0.15).

На рис. 6 показана средняя кривая блеска объекта №3692 и периодограмма, полученная методом Лафлера-Кинмана [12]. Период вращения объекта №3692 составил 1.8 с. Следует отметить, что при быстрых изменениях блеска требуются короткие экспозиции, чтобы выделить все детали кривой блеска за один оборот, при этом отношение сигнала к шуму в минимумах блеска должно оставаться на приемлемом уровне. В данном случае, при периоде вращения 1.8 с измерения проводились с экспозицией 0.2 с. Период вращения объекта №43282 — 3.02 с.

В основном фрагменты объекта №3692 показывают быстрые колебания блеска с амплитудой блеска до 3 звездных величин, что примерно соответствует изменению освещенной площади в 15 раз за период вращения. Периодичность во многих случаях установить не удается, даже с максимально возможным временным разрешением, что указывает на высокую угловую скорость вращения, полученную в результате разрушения. Такой характер изменения блеска в сочетании с большим отношением площади к массе для этих объектов подтверждает то, что наиболее вероятным источником их происхождения может быть теплоизоляционный материал и элементы общивки верхней ступени.

4. Заключение

Наличие в защищаемой области ГСО и ее окрестностях КМ с неточно определенными орбитальными и физическими характеристиками, а также некаталогизированных объектов представляет заметную опасность для действующих КА. Разрушение верхней ступени Titan 3C Transtage 17 в 2018 г. привело к возникновению нескольких десятков объектов КМ. Многие из этих объектов имеют малые размеры и большое значение отношения площади к массе, что значительно усложняет обнаружение и сопровождение таких объектов действующими системами контроля космического пространства. Оптическими телескопами Саянской солнечной обсерватории получена траекторная и фотометрическая информация для уточнения орбитальных параметров, исследования кривых блеска и фазовых зависимостей фрагментов разрушения. Получены оценки изменения площади отражающей поверхности разрушившегося разгонного блока. Определены периоды собственного вращения наиболее крупного фрагмента и родительского тела. Основная часть объектов, связанных с разрушением, имеет высокую угловую скорость вращения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» http://ckp-rf.ru/ckp/3056/.

- 1. H. Cowardin, P. Anz-Meador, and J. A. Reyes, in S. Ryan, ed., Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference, 36 (2017).
- ESA Space Debris Office, Space debris by the numbers, 2022, URL https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers, accessed: 2022-05-05.
- 3. ESA Space Debris Office, ESA's Annual Space Environment Report, 2021, URL https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics, accessed: 2021-07-09.
- 4. D. O. Fulcoly, K. I. Kalamaroff, and F. K. Chun, Journal of Spacecraft and Rockets, 49, 76, 2012.
- 5. V. Agapov and A. Lapshin, in T. Flohrer, R. Jehn, and F. Schmitz, eds., 1st NEO and Debris Detection Conference, 501 (2019).
- 6. T. Schildknecht, A. Vananti, E. Cordelli, and T. Flohrer, in S. Ryan, ed., Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 34 (2019).
- 7. I. E. Molotov, V. M. Agapov, A. I. Streltsov, L. V. Elenin, et al., Keldysh Institute preprints, 7, 1, 2020.
- 8. C. Früh, T. M. Kelecy, and M. K. Jah, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 117, 385, 2013.
- 9. NASA Orbital Debris Program Office, History of On-Orbit Satellite Fragmentations, 15th Edition, 2018, URL https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/library/20180008451.pdf, accessed: 2021-10-01.
- NASA Orbital Debris Program Office, Orbital Debris Quarterly News, 2014, URL https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv18i3.pdf, accessed: 2021-10-01.
- 11. NASA Orbital Debris Program Office, Orbital Debris Quarterly News, 2018, URL https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv22i2.pdf, accessed: 2021-10-01.
- 12. J. Lafler and T. D. Kinman, Astrophys. J. Supp., 11, 216, 1965.

Использование широко- и узкопольных телескопов в задачах астероидно-кометной опасности

Крючков С.В., Николенко И.В., Ибрагимов М.А., Крючков М.С., Аршинкин С.С.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В статье обсуждается комплексное использование широкопольных и узкопольных телескопов в поисковых и наблюдательных задачах, связанных с астероидно-кометной опасностью. Рассматривается возможность создания 2-уровневой системы обнаружения и исследования АСЗ. На инструментах 1-ого уровня происходит обнаружение объекта («барьерный уровень»). На инструменте(-ах) 2-ого уровня осуществляется исследование обнаруженного объекта («прецизионный уровень»). На 1-ом уровне для обнаружения АСЗ используются широкоугольные телескопы с малыми апертурами (характерные размеры апертур 0.2–0.5 м, характерные поля зрения 3–5 угловых градуса). Далее, координаты обнаруженных объектов передаются («подхватываются»/«follow-up») основным инструментом(-ами) 2-го уровня, на котором проводится дальнейшее исследование объекта (получение прецизионной координатной и некоординатной информации). Характерные показатели инструмента 2-го уровня — размер апертуры 1 м и более, поля зрения 0.1–1 угловых градуса. В статье также описана система управления 1-м телескопом, позволяющая автоматизировать описанный процесс наблюдений.

Поступила в редакцию 29.04.2022 г. Принята в печать 15.06.2022 г.

Ключевые слова: телескопы, астероиды, кометы, наблюдения

The use of wide and narrow-band telescopes in the tasks of asteroid-comet danger

Kryuchkov S.V., Nikolenko I.V., Ibragimov M.A., Kryuchkov M.S., Arshinkin S.S.

Institute of astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The article discusses the complex use of wide-field and narrow-field telescopes in search and observation tasks related to asteroid-comet danger. The possibility of creating a 2-level system of detection and investigation of ASZ is being considered. On the instruments of the 1st level, an object is detected ("barrier level"). On the instrument(s) of the 2nd level, the detected object is examined ("precision level"). At the 1st level, wide-angle telescopes with small apertures (characteristic aperture sizes are 0.2–0.5 meters, characteristic fields of view are 3–5 angular degrees) are used to detect ASPs. Further, the coordinates of the detected objects are transmitted ("picked up"/"follow-up") by the main tool(s) of the 2nd level, at which further investigation of the object is carried out (obtaining precision coordinate and non-coordinate information). Characteristic indicators of the 2nd level instrument are the aperture size of 1 meter or more, the field of view is 0.1–1 angular degrees. The article also describes the control system of the 1st telescope, which allows automating the described observation process.

Received 29.04.2022. Accepted 15.06.2022.

Keywords: telescopes, asteroids, comets, observations

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.007

1. Введение

В настоящее время в Солнечной системе обнаружено более 1 млн. астероидов. Среди них порядка 30 тыс. астероидов, сближающихся с Землей (AC3). Эти AC3 в случае столкновения могут представлять потенциальную угрозу для жизни на Земле. В настоящее время основные результаты по поисковым наблюдениям AC3 получают в Соединенных Штатах Америки, где в рамках государственной программы Spacewatch обнаружены более 90% известных AC3. В России также проводятся наблюдательные проекты по поиску и обнаружению AC3, но они по большей части носят инициативный и разрозненный характер. В большинстве отечественных проектов в наблюдениях используются короткофокусные телескопы с небольшой (до 1 м и меньше) апертурой.

2. Задача

Основная методика наблюдений AC3 — отсканировать максимальное количество площадок на небе. В таком режиме главной целью является обнаружение неучтенного (т.е. ранее неизвестного) объекта. Этот режим можно назвать «барьерным уровнем», и он осуществляется без определения каких-либо конкретных физических параметров AC3. Второй, «прецизионный уровень», нацелен на наблюдения конкретного объекта. На этом уровне имеется возможность получить эфемериду и фотометрию объекта. Для этих целей важно задействовать телескопы с большой апертурой и использовать имеющиеся технические возможности и соответствующее навесное оборудование.



Блок-схема системы управления телескопом

Рис. 1: Блок-схема управления телескопом.

3. Решение

В качестве примера инструментов «барьерного уровня» можно упомянуть телескопы, которые в разное время были приобретены, изготовлены по заказу Института астрономии РАН (ИНАСАН) [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Так, в период 2015–2018 гг. по заказу ИНАСАН был изготовлен широкоугольный обзорный телескоп ASA AZ1000WF¹ с апертурой 1 м, полем зрения 3 угловых градуса (130 мм) и согласованный с CCD-камерой формата 10×10 k [7, 8]. Поле зрения нового телескопа составляет 11.6 кв. градуса, телескоп согласован с КМОП-камерой размером 9×9 k. [7, 8]. В эксплуатации находятся роботизированные широкопольные телескопы с зеркалом диаметра 200 мм, полем зрения 5 угловых градусов, находящиеся в Звенигородской и Российско-Кубинской обсерваториях, со схожими характеристиками, наблюдения на которых осуществляется по удаленному доступу, т.к. имеют соответствующую периферию [9, 10].

В качестве одного из телескопов «прецизионного уровня» может быть использован 1-метровый телескоп Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН. Телескоп в работе с 1989 г., установлен на английской монтировке, оптическая схема Ричи-Кретьена, зеркало диаметром 1016 мм и фокусным расстоянием 13.3 м. Позиционирование телескопа осуществляется с помощью восьми двигателей (по 4 на каждую ось) с фиксированными скоростями. Для звездного ведения предусмотрен отдельный прецизионный двигатель. За время эксплуатации телескопа был проведен ряд модернизаций системы управления, которые улучшили его функциональные возможности [11, 12, 13]

В 2020–2022 гг. была создана новая система управления телескопом, позволяющая автоматизировать процесс наблюдений. Система представляет собой набор модулей управления отдельными устройствами.

¹https://www.astrosysteme.com/products/asa-az1000

Это двигатели и энкодеры телескопа, управление движением купола, в том числе синхронизация движения купола и телескопа, фокусер, открытие/закрытие крышки главного зеркала, модуль защиты телескопа от входа в опасные зоны. Модули созданы на основе контроллеров Laurent² и Arduino³ и объединены в локальную сеть Ethernet по протоколу TCP/IP. Общее управление осуществляется с центрального компьютера, который может быть включен как в локальную сеть, так и в сеть Internet. Такая распределенная структура позволяет повысить быстродействие и надежность всей системы управления телескопом.

В целях снижения износа, улучшения работоспособности механических узлов монтировки телескопа двигатели максимальной скорости подключены через частотные преобразователи для осуществления плавного пуска и торможения. В перспективе планируется установка частотных преобразователей на все двигатели телескопа, для сопровождения объектов с собственными скоростями, скорость которых отличается от скорости звездного ведения. Контроль погоды и предупреждение о погодных явлениях, могущих препятствовать наблюдениям (осадки, туман, сильный ветер), осуществляется через подключенный комплекс метеоприборов.

Для управления были разработаны драйверы для системы ASCOM⁴. Это позволяет управлять телескопом через любую программу, поддерживающую ASCOM (например, Maxim DL⁵). Кроме этого был разработан собственный пользовательский интерфейс.

4. Заключение

Описанная система управления работает уже более года и продолжает совершенствоваться. Она позволяет напрямую использовать информацию, полученную с широкопольных оптических инструментов «барьерного уровня» с меньшей апертурой, например, 0.3–0.5 м телескопы ИНАСАН, расположенные в Звенигородской и Терскольской обсерваториях, а также 20 см широкоугольный телескоп в Российско-Кубинской обсерватории [9, 10].

- 1. A. S. Shugarov, V. E. Shmagin, and M. A. Nalivkin, INASAN Science Reports, 5, 230, 2020.
- 2. A. S. Shugarov, INASAN Science Reports, 5, 236, 2020.
- A. Shugarov, in I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, eds., Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, 171–173 (2020).
- M. Ibrahimov, A. Shugarov, V. Shmagin, D. Bisikalo, B. Shustov, M. Nalivkin, S. Naroenkov, and I. Savanov, in I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, eds., *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*, 174–176 (2020).
- 5. D. I. Neyachenko, I. V. Nikolenko, I. I. Dmitrotsa, and A. D. Zenkovich, in Ukrainian Conference on Advanced Space Research, 3rd: (tez. report.) NCAU, NASU, 191 (2003), in Russian.
- 6. D. I. Neyachenko, I. V. Nikolenko, and S. V. Kryuchkov, in *Photometric and astrometric observations of bodies in near-Earth space on the ZEISS-1000 telescope and prospects for its use with the SBG camera.*, 157–160 (2003), in Russian.
- A. Shugarov, V. Shmagin, B. Shustov, M. Ibrahimov, M. Nalivkin, and O. P. Rodriguez, in I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, eds., *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*, 177–181 (2020).
- 8. A. S. Shugarov, INASAN Science Reports, 6, 55, 2021.
- M. Ibrahimov, D. Bisikalo, A. Fateeva, R. Mata, and O. Pons, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso, 51, 280, 2021.
- 10. D. V. Bisikalo, M. E. Sachkov, M. A. Ibrahimov, I. S. Savanov, et al., Astronomy Reports, 66, 38, 2022.
- 11. S. V. Kryuchkov, A. D. Zen'kovich, I. V. Nikolenko, and D. I. Neyachenko, Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory, **104**, 188, 2009, in Russian.
- M. A. Smirnov, S. I. Barabanov, S. V. Kryuchkov, A. D. Zen'kovich, D. I. Neyachenko, I. V. Nikolenko, and N. M. Gaftoniuk, in *Proceedings of the Conf. Near-Earth Astronomy XXI c.*, 275–282 (2001), in Russian.
- S. V. Kryuchkov and I. V. Nikolenko, in Proceedings of the Conf. Near-Earth Astronomy 2007, 277–281 (2008), in Russian.

²https://kernelchip.ru

³https://www.arduino.cc

 $^{^4 \}mathrm{https://ascom-standards.org}$

 $^{^{5}} https://diffractionlimited.com/product/maxim-dl$

Определение орбит ненумерованных малых планет

Кузнецов В.Б.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Настоящая работа посвящена результатам определения предварительных орбит ненумерованных малых планет и их последующего улучшения. Для определения предварительных орбит использовался метод, предложенный в работах автора для любого количества наблюдений больше или равного трем. Он основывается на поиске решений минимумов двумерной целевой функции и позволяет находить несколько орбит по данному набору наблюдений. Данный метод может быть успешно применен к наблюдениям на интервалах в несколько недель. Для определения предварительных орбит малых планет, предложенных планет на практике используются интервалы в несколько суток. Вопрос о применимости данного метода для них исследуется в данной статье. В силу того, что определялись первоначальные орбиты для малых планет, то критерием сравнения для них брались улучшенные по всем наблюдениям (при числе больше трех) элементы, в частности, эксцентриситет. Отношение числа гиперболических орбит к эллиптическим, с практической точки зрения, должно быть мало и позволяет оценить качество их определения. В качестве предельного случая определения орбит рассматриваются наборы изолированных треков, на интервалах в десяти и сотые доли суток.

Поступила в редакцию 06.05.2022 г. Принята в печать 25.05.2022 г.

Ключевые слова: предварительная орбита, ненумерованные малые планеты

Determination of orbits of unnumbered minor planets

Kuznetsov V.B.

Institute of Applied Astronomy of the RAS, St. Petersburg, Russia

The current work is devoted to the results of determination a preliminary orbits of unnumbered minor planets and its follow improvement. The author's method for three and more observations was used for preliminary orbits determination. It is based on searching of solutions of minimums of two-dimensional goal function. This is allowed to find a few orbits on present set of data. Such methodic is successful for time intervals in few weeks. In practice, the intervals of few days for preliminary orbits determination of minor planets are used. The question of application of our method for such minor planets is explored in current paper. Such as these are preliminary orbits for minor planets, then the criteria of comparison of improvement elements by all observations (more than three) especially eccentricity are used. The relation of hyperbolic orbits number to elliptical one is criteria of their quality. As limit case, the determination of orbits of isolated tracks on intervals at tenth and hundredth part of day are investigated.

Received 06.05.2022. Accepted 25.05.2022.

Keywords: preliminary orbit, unnumbered minor planets

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.008

1. Введение

В работах [1] и [2] был представлен метод определения предварительной орбиты для тел, движущихся вне плоскости эклиптики, без какой-либо априорной информации о ее параметрах. Может быть использовано любое количество наблюдений, большее или равное трем. Метод может быть успешно применен к интервалам наблюдений в несколько недель. Для меньших промежутков времени ситуация неоднозначная и результат трудно предугадать, а как раз они представляют наибольший практический интерес. Для выявления нижней границы интервала наблюдений имеет смысл проверить существующую методику на большом массиве наблюденных объектов. В качестве таких объектов были выбраны ненумерованные малые планеты.

2. Ненумерованные малые планеты

На 12 января 2022 г. по данным Minor Planet Center (MPC¹) имелось 713059 ненумерованных астероидов. При этом, для 68871 из них орбиты были неизвестны. Для 59859, наблюдавшихся с 1916 по 2022 гг., число имеющихся наблюдений было от 3 до 198. Наибольшее число астероидов имеют 7, 6 и 8 наблюдений (см. рис. 1).

Для них здесь было получено 19558 решений, причем для одной планеты — 4 решения, для 112 — 3 решения и для 2357 — 2 решения. Таким образом, предварительные орбиты были получены для 17088 астероидов или 28.55%. Точность представления среднего наблюдения для каждого из полученных решений определяется по средней дуговой невязке [3] по всем наблюдениям, которая изменяется для полученных решений в интервале от 1.1 10^{-7} до 1.1 10^6 угловых секунд. Со средней дуговой невязкой менее 1" имеется 3808 решений для 3373 планет (число наблюдений от 3 до 61). Из них, для одной планеты есть 4 решения, для 16 — 3 решения и для 392 — 2. При этом, 751 решение получено по 3 наблюдениям, 532 — по 4, 642 —

¹https://minorplanetcenter.net



Рис. 1: Распределение астероидов по числу наблюдений.



Рис. 2: Зависимость средней дуговой невязки орбит астероидов от интервала наблюдений.

по 6, 956 — по 7, 650 — по 8 (см. рис. 2). Интересно соотношение эллиптических и гиперболических орбит, которое составляет 1867 к 1941 (49% к 51%) — почти 1:1. Из практических соображений эллиптических решений должно быть гораздо больше, чем гиперболических. Зависимость полученного эксцентриситета от числа наблюдений — не наблюдается (см. рис. 3).

Из общего числа полученных 19558 решений, для 18054 число наблюдений > 3. Для этих орбит была проведена процедура улучшения с использованием МНК и учетом возмущений от больших планет, вычисленных по эфемериде DE440 [4]. В результате были улучшены 10253 решения для 10103 астероидов. Далее было отобрано 9445 решений со средним квадратическим отклонением (СКО) менее 1" (число наблюдений от 4 до 24) (см. рис. 4). Подавляющее число успешно улучшенных орбит получено для 6 ÷ 8 наблюдений, что соответствует двум наблюдательным сессиям. Из этих решений 7497 были эллиптическими и 1948 гиперболическими (79% к 21%) с соотношением друг к другу практически 4:1 см. рис. 5. Уменьшение доли гиперболических орбит в 2.5 раза свидетельствует о возможности и необходимости улучшения предварительных орбит по классической схеме, применяемой к нумерованным астероидам. Таким образом вместе с 751 решением по 3 наблюдениям мы получили более 10 тыс. орбит с СКО менее 1", т.е. для каждого 6-го астероида была найдена орбита, хорошо удовлетворяющая наблюдениям. Это говорит о применимости метода определения предварительных орбит для 17% тех случаев, когда другие способы не дают приемлимых результатов.



Рис. 3: Зависимость эксцентриситетов предварительных орбит астероидов от интервала наблюдений.



Рис. 4: Зависимость СКО орбит астероидов от интервала наблюдений.

3. Изолированные треки

Изолированные треки — это короткие серии наблюдений (от нескольких минут до нескольких часов), которые не идентифицированы ни с одним из известных объектов. Орбиты только по этим наблюдениям в MPC не определяются. На 12 января 2022 г. в базе MPC имелось 1844213 изолированных треков с 1950 по 2022 гг. Число наблюдений в треках от 1 до 242, но $\frac{2}{3}$ из них приходится на 4 и 3 (см. рис. 6), что хорошо согласуется с длиной обычного трека. Наличие объектов с большим числом наблюдений соответствует интервалам более чем одной ночи. Определение по этим данным орбит представляет, на наш взгляд, важную практическую задачу сопровождения вновь открытых объектов. Для наблюдения их в последующие ночи необходимо тем или иным образом определить их орбиту, чтобы вычислить поисковую эфемериду. Проверка метода на изолированных треках позволяет оценить нижнюю границу (в основном по интервалу наблюдений и орбитальной дуге) его возможностей.

При определении предварительных орбит для треков с тремя и более наблюдениями получено 182249 решений со средней дуговой невязкой менее 1" (число наблюдений от 3 до 99). Более половины решений — 104149 — было получено по трем наблюдениям и более трети — 71504 — по четырем. Наибольший диапазон в разбросе средней дуговой невязки достигается для решений по трем наблюдениям — 7 порядков, для 4 наблюдений он уменьшается до двух, а при большем числе становится еще меньше (см. рис. 7). Отношение эллиптических решений к гиперболическим примерно 1 к 2 (34.55% к 65.45%). Это заметно отличается



Рис. 5: Зависимость эксцентриситетов улучшенных орбит астероидов от интервала наблюдений.



Рис. 6: Распределение треков по числу наблюдений.

от того, что было получено для ненумерованных астероидов в худшую сторону. Интересно, что для решений по 7 и более наблюдениям гиперболические орбиты превалируют над эллиптическими еще больше (см. рис. 8).

Для всех полученных решений по 4 и более наблюдениям было проведено улучшение орбит аналогичное тому, что производилось для ненумерованных малых планет. В результате было отобрано 14879 решений со СКО менее 1" (число наблюдений от 4 до 86) (см. рис. 9). Из них двойных решений — 1409, тройных — 60 и по одному четверному и пятерному (для объекта JkN5004, наблюдавшегося в ноябре 2021 г. на протяжении 1.5 часов, по 6 наблюдениям было получено 5 гиперболических решений). Основная часть улучшенных орбит — 132028 — получена по 4 наблюдениям, для них СКО имеет разброс в 3 порядка. С увеличением числа наблюдений интервал СКО уменьшается и стремиться к 0.1". Интересно изменение отношения числа эллиптических орбит к гиперболическим как 1 к 3 (24.96% к 75.04%) (см. рис. 10). Это, а также то, что улучшенных решений со СКО в пределах 1" более чем на порядок меньше, чем соответствующих предварительных решений, демонстрирует неудачу в использовании процедуры улучшения орбиты по классическому сценарию. Вместе с предварительными орбитами, полученными по 3 наблюдениям, всего имеется 119028 приемлемых решений, что составляет 6.45% от общего числа треков. Это означает, что используемый метод плохо применим к изолированным трекам. Одна из причин этого заключается в том, что гипергеометрические ряды, используемые в нем, медленно сходятся для мало отличающихся радиус-векторов. Это, а также разности близких величин приводит к потере точности и неудачам в определении орбит. Очевидно,



Рис. 7: Зависимость средней дуговой невязки орбит треков от интервала наблюдений.



Рис. 8: Зависимость эксцентриситетов предварительных орбит треков от интервала наблюдений.

что здесь необходимо развивать новые дифференциальные или прямые методы определения орбит [5] для произвольного числа наблюдений.

4. Заключение

- Данная методика позволяет решать задачу определения предварительной орбиты для части астероидов (17%), наблюдавшихся на небольших интервалах времени, при отсутствии какой либо априорной информации об их орбитах.
- 2) При этом может быть использовано любое количество наблюдений больше или равное трем.
- 3) В ряде случаев возможно определение орбит по отдельным трекам (6%).
- 4) Существует проблема, связанная не только с определением предварительных орбит на малых интервалах и дугах, но и с задачей их последующего улучшения.
- 5) Альтернативой использованной здесь методики должны стать новые прямые (дифференциальные) методы определения орбит для различного числа наблюдений.

- 1. V. B. Kuznetsov, Solar System Research, 53, 462, 2020.
- 2. V. B. Kuznetsov, Solar System Research, 56, 206, 2022.
- 3. S. Herrick and J. D. Anderson, Journal of Applied Mechanics, 39, 1097, 1972.



Рис. 9: Зависимость СКО орбит треков от интервала наблюдений.



Рис. 10: Зависимость эксцентриситетов улучшенных орбит треков от интервала наблюдений.

- 4. R. S. Park, W. M. Folkner, J. G. Williams, and D. H. Boggs, Astron. J., 161, 105, 2021.
- 5. O. P. Bykov and K. V. Kholshevnikov, Pryamye metody opredelenya orbit nebesnyh tel (2013).

О негравитационном ускорении в движении астероидов, сближающихся с Землей

Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Для 675 из 2945 нумерованных АСЗ по их позиционным наблюдениям получены статистически значимые оценки параметра негравитационного ускорения (НУ) A_2 . Предполагалось, что зависимость НУ от гелиоцентрического расстояния r имеет вид $1/r^2$. Для 71% рассмотренных астероидов значения A_2 отрицательны. Примерно такое же соотношение получено в работе [1]. Возможно, это связано с преобладанием обратных вращений среди рассмотренных АСЗ и/или присутствием сезонной составляющей НУ. Данные об ориентации осей вращения 34 астероидов говорят о преобладании обратных вращений, хотя этого количества недостаточно для уверенного вывода. Значения $|A_2|$ сопоставлены со значениями диаметров для 221 астероида. Диапазон значений $|A_2|$ обнаруживает только некоторую корреляцию их со значениями диаметров. Причин этому может быть несколько: недостаточное количество астероидов, для которых получены значения A_2 и известны значения диаметров; отличие формы астероидов от сферической; зависимости A_2 от других физических характеристик астероида; присутствие в полученных значения A_2 других ускорений, кроме ускорения, вызываемого эффектом Ярковского. Два астероида, (209924) и (523599), имеют аномально большие значения $|A_2|$, что позволяет отнести их к потенциально активным астероидам.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 25.05.2022 г.

Ключевые слова: астероид, орбита, эффект Ярковского, активный астероид

On the nongravitational acceleration in the NEAs' motion

Kuznetsov V.B., Chernetenko Yu.A.

Institute of Applied Astronomy of the RAS, St. Petersburg, Russia

We obtained parameters of nongravitational acceleration for 2945 numbered NEAs, based on their positional observations. It was assumed that the dependence of nongravitational acceleration of the heliocentric distance r has the view $1/r^2$. 675 out of 2945 NEAs have $|A_2| > 3\sigma_{A_2}$. For 71% of them, the values of A_2 are negative. Approximately the same ratio is obtained in the paper [1]. Perhaps this is due to the possible excess of reverse rotations among the NEAs and/or the presence seasonal component of the nongravitational acceleration. Data on the orientation of the rotation axes of 34 asteroids indicate the excess of the reverse rotations, although this number is not enough for such a confident conclusion. The values of $|A_2|$ are compared with the diameters for 221 asteroids. Range of the $|A_2|$ values reveals only some correlation between them and the diameter values. There may be several reasons for this: insufficient number of asteroids for which A_2 values are obtained and diameter values are known; the difference between the shape of an asteroid and a spherical one; dependences of A_2 values on other physical characteristics of the asteroid; the presence of other accelerations in the obtained values of A_2 , except for the acceleration caused by the Yarkovsky effect. Two asteroids, (209924) and (523599), have anomalously large values of $|A_2|$, which allows us to classify them as potentially active asteroids.

Received 10.05.2022. Accepted 25.05.2022.

Keywords: asteroid, orbit, the Yarkovsky effect, active asteroid

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.009

1. Введение

Некоторое дополнительное ускорение в движении астероидов может вызываться эффектом Ярковского (ЭЯ) [2], сублимацией кометных льдов при их наличии в составе астероида, может быть результатом столкновения с другим телом или разрушения. К появлению дополнительного ускорения могут привести возмущения, возникающие при сближении астероида с крупным астероидом [3], а также систематические ошибки наблюдений.

Для полного учета действия ЭЯ необходимо знание физических и динамических параметров астероида [2]. Так как эти данные есть для небольшого числа астероидов, то прибегают к некоторому упрощению, предполагая, что зависимость ускорения, вызываемого ЭЯ, от гелиоцентрического расстояния r имеет вид $1/r^2$. При учете действия негравитационного ускорения (НУ) принято представлять его тремя составляющими: A_1, A_2, A_3 — радиальной, трансверсальной и нормальной. Различают сезонную и суточную составляющие ЭЯ. Величина суточного эффекта значительно больше, чем сезонного. Сезонный эффект приводит к отрицательному изменению большой полуоси. Для астероида диаметром ~ 1 км A_2 оценивается в интервале $(0.1 - 10) \ 10^{-14}$ а.е. сут.⁻² [2]. Влияние составляющей A_2 на значение большой полуоси имеет вековой характер и поэтому определяется увереннее по сравнению с A_1 и A_3 , влияние которых на изменение орбитальных параметров является периодическим в течение одного оборота. По этой причине для большинства астероидов, как и для комет, статистически уверенно можно определить только A_2 . Представляет интерес понимание того, что мы получаем из наблюдений, когда используем не физическую теорию ускорения, вызываемого ЭЯ, а предполагаем, что оно зависит от r как $1/r^2$, и определяем параметры A_1 , A_2 , A_3 , которые можно считать параметрами согласования. Возникает вопрос, насколько хорошо получаемые таким образом из наблюдений, также в процессе уточнения параметров орбиты, параметры НУ отражают зависимость от некоторых физических параметров астероидов (в идеальном случае представления астероида сферическим телом):

- 1) это зависимость от размера тела: НУ должно быть пропорционально $\sim 1/R$, где R радиус тела;
- 2) знак параметра A_2 определяется направлением вращения астероида: при прямом вращении $A_2 > 0$, при обратном $-A_2 < 0$;
- значение |A₂| минимально, а значение |A₃| максимально, если ось вращения астероида лежит в плоскости орбиты, и наоборот;
- если ускорение вызывается ЭЯ или кометной сублимацией, то угол теплового запаздывания не превышает десятков градусов и параметр A₁ > 0.

Целью настоящей работы являлось определение параметров НУ для всех нумерованных астероидов, сближающихся с Землей, рассмотрение их связи с некоторыми физическими параметрами астероидов, выявление возможных активных астероидов.

2. Вычисления

Принятая модель движения включала учет возмущений от больших планет по эфемериде DE440 [4], от Плутона, Цереры, Паллады и Весты; релятивистские члены от Солнца; динамическое сжатие Земли и Солнца. Раздельно учитывались возмущения от Земли и Луны. Учитывалось действие НУ при условии, что его зависимость от гелиоцентрического расстояния имеет вид $1/r^2$. Использовались позиционные наблюдения из каталога Международного центра малых планет¹. Позиционные наблюдения приведены на систему одного каталога, PPMXL, в соответствии с рекомендациями работы [5]. При уточнении орбитальных элементов и параметров НУ рассматриваемых астероидов была принята следующая схема назначения весов позиционным наблюдениям: наблюдениям 1901–1950 гг. назначался вес 1/9, наблюдениям 1951–1995 гг. — вес 1/4, наблюдениям с 1996 г. — вес 1.

Для 2945 нумерованных АСЗ (по состоянию на декабрь 2021 г.) выполнены следующие варианты уточнения параметров: 1) без НУ; 2) определение A_2 ; 3) определение A_2, A_3 ; 4) определение A_1, A_2, A_3 . По варианту 2 для 675 АСЗ ошибки параметра A_2 в три и более раз меньше самой величины $|A_2|$ и изменяются в пределах 0.01–95 (в 10^{-14} а.е. сут.⁻²). Для $\sim 3/4$ из 675 рассмотренных астероидов в результате учета НУ произошло уменьшение значений СКО на величину до -0.90450'', для $\sim 1/4$ — увеличение СКО (до +0.06566''). Рассмотрение случаев увеличения СКО по сравнению с вариантом без учета НУ показывает, что это связано с изменением числа наблюдений, включаемых в процедуру составления системы нормальных уравнений. Поэтому в качестве критерия при отборе надежных результатов определения параметра A_2 рассматривалась также величина ошибки определения A_2 : рассмотрены 534 АСЗ, для которых $\sigma_{A_2} < 5.0 \, 10^{-14}$ а.е. сут.⁻². Значения A_2 для 267 АСЗ с $\sigma_{A_2} < 1.0 \, 10^{-14}$ а.е. сут.⁻². Значения A_2 для 267 АСЗ приведены в табл. 1.

При рассмотрении результатов совместного определения A_2 , A_3 оказалось, что только для 118 AC3 эти параметры определяются статистически уверенно, при этом сама величина A_3 изменяется в значительных пределах. В табл. 2 приводятся эти результаты только для некоторых астероидов, включая (99942) Апофис. Несмотря на большие значения $|A_3|$ по сравнению с $|A_2|$, влияние этой составляющей на представление наблюдений невелико и для Апофиса составляет в O–C $\pm 0.03''$, а в значении минимального расстояния от Земли при сближении в 2029 г. – ~ 5 км.

Что касается результатов совместного определения A_1, A_2, A_3 , то статистически уверенных решений еще меньше, чем для решения относительно A_2, A_3 . Кроме того, для большинства из них параметр $A_1 < 0$. Это означает, что угол теплового запаздывания превышает 90°, что маловероятно с физической точки зрения.

3. Анализ результатов

Большинство полученных значений A_2 отрицательны. Так, из 675 астероидов отрицательные значения A_2 имеют 71% астероидов. Эта тенденция видна также и по результатам работы [1], в которой 75% астероидов имеют отрицательные значения A_2 . Распределения значений параметра A_2 показаны на рис. 1. Некоторый недостаток астероидов вблизи значения $A_2 = 0$ на рис. 1а) объясняется тем, что для малых значений $|A_2|$ $|A_2| > 3\sigma_{A_2}$, что привело к исключению их из рассмотрения. Для обоих распределений максимальное число астероидов имеет значение $A_2 = -3.5 \ 10^{-14}$ а.е. сут.⁻². Возможно, таким образом проявляется влияние сезонной составляющей ЭЯ.

 $^{^{1}}https://minorplanetcenter.net/db_search/$

Таблица 1: Значения A_2 для 267 AC3, 10^{-14} a.e. сут.⁻².

N	A_2	N	A_2	Ν	A_2	Ν	A_2	Ν	A_2
433	$-0.18 \pm .01$	10302	$4.73 \pm .3$	99799	$2.67 \pm .88$	172034	$-0.99 \pm .28$	363067	$-4.57 \pm .32$
887	0.43 .13	11054	-2.68 .10	99907	1.57 .11	175706	-4.08 .37	363116	-3.50 .91
1566	-0.43 .02	11066	-4.29 .69	99935	-2.55 .45	185851	-1.18 .37	363505	-0.77 .05
1627	-0.57 .06	11284	-1.26 .40	99942	-2.81 .04	188174	-2.84 .58	363599	-6.16 .40
1685	-0.33 .02	11500	-1.52 .20	101955	-2.52 $.34$	189040	-2.07 .47	364136	-2.15 .18
1862	-0.33 .06	11885	-3.67 .44	136582	-5.12 .87	192559	-3.31 .21	369986	2.08 .32
1864	-3.47 .38	12711	-2.96 .43	136793	-4.65 .56	192563	-1.16 .32	377097	-1.52 .28
1865	-1.00 .10	13553	2.59 .7	3 136818	2.87 .29	199145	4.05 .74	385186	2.23 .21
1866	-0.50 .12	13651	-5.01 .92	137084	-2.85 .43	203471	-3.10 $.34$	388189	-4.98 .89
2061	-13.69 .22	14402	-1.64 .30	137099	2.82 .93	208023	-2.97 .60	396593	2.26 .26
2062	-1.78 .08	15745	-3.22 .44	137805	-0.82 .25	216523	5.94 .56	397326	2.82 .65
2063	-2.39 .19	15817	-3.61 .9	137924	-0.86 .11	216985	9.59 .69	398188	-4.38 .89
2100	-0.56 .05	16834	-4.16 .63	138175	-12.22 .42	230111	-2.82 .35	401856	-3.33 .59
2101	-4.17 .44	17511	1.28 .2	3 138404	2.09 .21	234341	-3.55 .66	401885	-4.58 .19
2102	-0.43 .11	18106	-2.51 .75	138847	-4.89 .83	235756	-3.04 .83	405212	1.20 .32
2340	-3.05 .04	18736	-5.02 .39	138852	3.37 .28	237442	-3.65 .81	410777	9.64 .85
3102	-1.70 .30	21374	-1.60 .4	138893	2.72 .90	242191	1.79 $.35$	413260	-3.15 .41
3122	-2.16 .63	22753	-1.28 .33	138911	-2.35 .49	242450	4.14 .86	413577	-7.03 .79
3200	-0.64 .04	22771	-2.35 .4	138947	-4.46 .85	243025	-2.98 .97	416002	-6.91 .59
3361	1.87 .09	23187	-1.06 .2	138971	2.70 .71	250680	1.93 $.35$	416195	-3.60 .56
3671	-1.83 .45	24761	-2.04 .58	141018	-3.55 .62	252399	-2.91 .74	417217	3.66 .64
3691	-2.94 .52	29075	-0.66 .0'	152563	-2.83 .11	264357	-4.84 .37	417816	-5.06 .75
3752	-0.95 .26	31221	-6.59 .74	152671	-4.68 .96	265482	5.65 .77	422638	-4.45 .69
3753	-0.45 .13	35107	0.59 .1	3 152679	-6.55 .63	267759	-2.79 .26	437844	3.80 .18
3908	1.89 .18	37655	-1.28 .12	152754	-3.09 .26	267940	-5.52 .72	443837	-3.73 .22
4015	1.11 .26	40267	0.73 .2	152756	0.94 .23	276033	1.08 .29	446924	-2.79 .31
4034	-4.05 .28	53426	-3.49 .84	152931	-1.80 .44	283457	-6.16 .24	450894	3.26 .87
4179	-1.85 .31	55408	-2.59 .84	152941	-2.79 .84	283460	-1.76 .35	455176	-4.55 .52
4183	-1.78 .35	55532	1.56 .3	8 153201	-2.04 .19	297418	-2.24 .17	456537	-2.99 .85
4544	-2.85 .33	65674	-3.89 .93	153814	5.57 .76	303262	-2.27 .69	467336	2.25 .47
4581	-4.07 .33	65679	-2.36 .40	154244	-6.51 .88	306383	-3.62 .42	467351	3.90 .22
4660	1.66 .25	65909	-3.79 .53	154302	-3.44 .52	307918	-3.32 .70	468468	-7.02 .43
4688	-2.47 .39	66063	-2.04 .5	154590	-8.89 .92	310442	4.36 .25	469737	3.02 .52
4769	-1.19 .28	66391	-0.39 .09	154658	-4.59 .91	310842	-3.63 .21	474179	-3.41 .69
4947	-2.39 .37	66400	-2.62 .23	159402	-4.04 .19	311554	-1.02 .34	478784	-7.53 .95
4954	-3.07 .64	67399	-4.32 .82	162004	2.10 .14	313276	3.41 .57	480808	-4.59 .15
5011	-2.10 .45	68216	3.58 .7	2 162080	-2.70 .27	317643	-1.39 .32	480820	2.45 .33
5189	-1.26 .33	68347	3.28 .8	2 162082	-2.54 .48	318160	2.08 .67	480883	-6.60 .10
5626	-4.42 .67	68350	-1.49 .33	162117	-1.60 .13	326290	-2.79 .32	481442	-5.42 .60
5645	-1.16 .32	68950	-1.25 .30	162142	1.38 .45	326683	2.65 .52	483656	-13.77 .30
5660	-1.28 .30	85184	2.55 .7	162173	-3.13 .22	329437	3.97 .98	494710	-6.06 .36
5797	-1.33 .29	85236	-1.46 .38	162181	-1.37 .29	331471	-0.66 .21	497113	-4.93 .76
6037	-1.51 .31	85770	-5.06 .69	162361	3.80 .26	334412	-5.04 .66	503941	1.12 .19
6239	1.28 .21	85953	-1.27 .03	162463	-3.69 .72	337248	-3.63 .27	506590	8.39 .76
6456	-1.82 .48	85989	-1.13 .13	162694	-4.02 .93	337252	-7.96 .83	517681	-4.48 .43
6611	-1.62 .52	85990	-3.61 .40	162882	-2.81 .55	338292	-2.58 .61	523605	-5.24 .82
7025	-2.09 .57	86039	-1.69 .38	163000	-2.15 .55	344074	3.46 .75	523801	4.66 .80
7336	2.00 .37	86667	1.03 .1	163023	5.10 .51	345705	-1.52 .33	523934	-6.25 .86
7350	-1.95 .18	87024	2.01 .6	163081	1.34 .36	350462	-7.41 .44	524471	4.97 .49
7753	-0.82 .14	87309	-0.62 .19	163348	2.75 .49	350523	6.98 .61	524522	-5.58 .04
7822	-1.32 .18	88254	-1.81 .25	164121	-1.65 .40	354952	-4.98 .77	526742	3.54 .84
7889	-1.85 .43	88710	9.84 .4	164206	-1.43 .42	355770	1.52 .43		
8014	-1.83 .11	90075	-4.64 .93	169675	3.54 .94	360502	3.92 .73		
9162	0.88 .15	96590	-2.14 .32	171576	2.9885	363027	1.45 .34		

Ν

40

30

20

10

0

	Ν	A_2		A_3	
	433	-0.18 ± 0.0)1	366 ± 36	3
	1566	-0.42 ± 0.0)2	22 ± 5	
	1627	-0.57 ± 0.0)6	453 ± 52	2
	1685	-0.30 ± 0.0)2	241 ± 29	9
	1862	-0.62 ± 0.0)7 -	-171 ± 29	9
	2101	-3.92 ± 0.4	1	318 ± 49	9
	2100	-0.55 ± 0.0)5 -	-253 ± 6	5
	2340	-3.04 ± 0.0)4 -	-145 ± 10	6
	3103	-0.43 ± 0.1	2 -	$-301 \pm 4'$	7
	85275	6.42 ± 1.6	- 33	-684 ± 50	6
	99942	-2.99 ± 0.0)5	201 ± 34	1
	159402	-4.17 ± 0.1	7	1260 ± 28	3
	326290	-2.75 ± 0.3	32	207 ± 32	1
	332446	46.74 ± 2.7	2 -	-322 ± 2	1
			•		
		N			
		a) 125		-	
	Ππ	u) 125	1		
			1		
		100	-		
	ΠΙΙΙΙ		1		
		75	-		
			4		
]n 50	-	_11110	
				niiiiiii	
		25	-		1
	$\Pi_{n} \ \ \ \ \ \ \ $			niiiiiiii	Π
					U0000
-10	-5 0	5 10	-40	-20 0	20 40
A	$_{2}, 10^{-14}$ a.e. c	с ут . ⁻²		$A_2, 10^{-14}a.c$	е. сут. ⁻²
	-			*	

б)

Таблица 2: Значения параметров A_2 и A_3 в 10^{-14} a.e. сут.⁻²

Рис. 1: Распределения значений параметров A_2 для 267 (a) и 534 (б) AC3.

Далее полученные значения $|A_2|$ сопоставлены со значениями диаметров астероидов (рис. 2). Значения диаметров были взяты в базе данных JPL² и, в случае их отсутствия в этой базе, в базе Johnston, Wm. R. Asteroid diameters and albedos from Spitzer Space Telescope observations³. Для массива из 267 астероидов данные о диаметрах имеются для 221 астероида, для массива из 534 астероидов — для 410 астероидов. Видно (рис. 26), что для околокилометровых астероидов значения $|A_2|$ находятся в ожидаемом интервале (0.1 – 10) 10⁻¹⁴ а.е. сут.⁻², хотя предсказанный максимум значений не достигается. При уменьшении значений диаметров (рис. 26) заметно увеличивается только нижняя граница значений $|A_2|$, а максимум значений меньше ожидаемого. Возможно, это несоответствие связано с тем, что форма астероидов далека от идеальной сферической, особенно для небольших АСЗ. Кроме того, количество астероидов, для которых получены значения A_2 и известны значения диаметров, недостаточно для надежных выводов.

Знак параметра A_2 в идеальном случае определяется направлением вращения астероида. Для небольшого количества рассмотренных здесь AC3, для 34, оказалось возможным найти в имеющихся базах данных параметры, характеризующие ориентацию оси вращения астероида [6], и сопоставить широту *b* северного полюса оси вращения астероида в орбитальной системе координат с соответствующим значением параметра A_2 (рис. 3). Видно, что большинство рассмотренных астероидов имеет обратное вращение. Возможно, наблюдаемый для всех рассмотренных AC3 избыток отрицательных значений A_2 объясним именно преобладанием обратных вращений.

 $^{^{2} \}rm https://ssd.jpl.nasa.gov/$

³https://www.johnstonsarchive.net/astro/spitzerasteroids.html. 2 January 2022



Рис. 2: Сопоставление значений А₂ и диаметров для 221 АСЗ.



Рис. 3: Сопоставление значений A_2 со значениями широты северного полюса осей вращения b для 34 астероидов.

Полученные значения A_2 были сопоставлены с соответствующими значениями геометрического альбедо, приводимыми на сайте JPL⁴, однако статистически значимая зависимость не была обнаружена.

В табл. 3 приводятся, для сравнения, значения A_2 для нескольких AC3, полученные в настоящей работе, в работе [1] и приводимые на сайте JPL по состоянию на 15.04.2022. Видно, что значения A_2 находятся в хорошем согласии.

В табл. 4 приводится информация о тех астероидах, которые показались нам интересными. Во 2-м столбце приводятся значения критерия Тиссерана (КТ) относительно Юпитера. В 3-м и 4-м столбцах приводятся значения СКО, полученные без учета НУ и с его учетом. Сравнение их значений показывает, что учет НУ может значительно улучшить представление наблюдений. Астероиды (209924) и (523599) имеют значения A_2 , существенно отличающиеся от значений для основной массы астероидов, что может предполагать наличие некоторого дополнительного ускорения. Астероид (523599), имеющий значение критерия Тиссерана, характерное для комет, был включен в список потенциально активных астероидов, наблюдаемых в течение 4-х лет [7] с целью обнаружения проявлений активности. На этом интервале такие проявления обнаружены не были.

4. Выводы

Для 675 из 2945 нумерованных AC3 получены статистически значимые оценки параметра A_2 .

Для 71% рассмотренных астероидов значения A₂ отрицательны. Примерно такое же соотношение получено в работе [1]. Возможно, это связано с преобладанием обратных вращений и/или влиянием сезонной составляющей НУ. Данные об ориентации осей вращения 34 астероидов говорят о преобладании обратных вращений, хотя этого количества недостаточно для такого уверенного вывода.

Значения $|A_2|$ сопоставлены со значениями диаметров для 221 астероида. Диапазон значений $|A_2|$ обнаруживает только некоторую корреляцию их со значениями диаметров. Причин этому может быть несколько: недостаточное количество астероидов, для которых получены значения A_2 и известны значения диаметров;

 $^{^{4}}$ https://ssd.jpl.nasa.gov/

		$A_2, 10^{-14}$ a.e. сут. ⁻²	
Ν	(Del Vigna et al., 2018)	сайт JPL	Эта работа
		(https://ssd.jpl.nasa.gov/)	
2340	-2.99 ± 0.12	-3.07 ± 0.13	-3.05 ± 0.04
138175	-10.65 ± 1.19	$-\ 8.99 \pm 0.66$	-12.22 ± 0.42
162783	-12.73 ± 4.21	$-$ 8.78 \pm 2.46	-11.94 ± 2.10
256004	-17.42 ± 5.31	-17.58 ± 3.21	-19.23 ± 2.52
468468	$- 6.58 \pm 0.81$	$-\ 6.67\pm0.85$	-7.02 ± 0.44
477719	-23.73 ± 7.45	-17.58 ± 3.22	-21.91 ± 3.58
480883	$-\ 6.99 \pm 0.06$	$-\ 6.95\pm0.09$	$-\ 6.61\pm0.11$
483656	-14.02 ± 0.56	-13.98 ± 0.60	-13.77 ± 0.31
499998	-23.45 ± 3.72	-21.91 ± 3.01	-22.25 ± 2.30

Таблица 3: Сравнение с результатами других авторов

Таблица 4: Интересные астероиды. Значения A_2 в 10^{-14} а.е. сут⁻².

Ν	KT	СКО (")		A_2	JPL	
		без НУ	с НУ	Эта работа	CKO (")	A_2
209924	3.583	0.327	0.294	-121.1 ± 5.3	0.387	_
480883	8.293	0.911	0.315	-6.61 ± 0.11	0.366	$-\ 6.95 \pm 0.09$
483656	7.478	1.220	0.446	-13.77 ± 0.31	0.450	-13.98 ± 0.60
523599	2.957	1.182	0.273	207.3 ± 2.3	0.831	—
524522	7.862	1.188	0.284	-5.58 ± 0.05	0.283	-5.82 ± 0.11

отличие формы астероидов от сферической; возможные зависимости A_2 от других физических характеристик астероида; присутствие в полученных значениях A_2 других ускорений, кроме ускорения, вызываемого ЭЯ.

Два астероида, (209924) и (523599), имеют аномально большие значения $|A_2|$, что позволяет отнести их к потенциально активным астероидам.

- 1. A. Del Vigna, L. Faggioli, A. Milani, F. Spoto, D. Farnocchia, and B. Carry, Astron. and Astrophys., 617, A61, 2018.
- 2. D. Vokrouhlický, A. Milani, and S. R. Chesley, *Icarus*, 148, 118, 2000.
- O. M. Kochetova, Y. A. Chernetenko, and V. A. Shor, Izvestiya Glavnoy Astronomicheskoy Observatorii v Pulkove, 259–264, 2013.
- 4. R. S. Park, W. M. Folkner, J. G. Williams, and D. H. Boggs, Astron. J., 161, 105, 2021.
- 5. D. Farnocchia, S. R. Chesley, A. B. Chamberlin, and D. J. Tholen, *Icarus*, 245, 94, 2015.
- 6. Y. A. Chernetenko, Ephemerides of minor planets for 2021. (2020).
- M. Mommert, D. E. Trilling, J. L. Hora, C. Lejoly, A. Gustafsson, M. Knight, N. Moskovitz, and H. A. Smith, The Planetary Science Journal, 1, 10, 2020.

Динамическая эволюция объектов с большой парусностью в области средних и высоких орбит

Кузнецов Э.Д.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Представлен обзор работ по исследованию влияния светового давления на динамическую эволюцию объектов, движущихся по средним, геостационарным и высоким орбитам, на основе результатов численного моделирования. Основное внимание уделено орбитальной эволюции объектов с большим отношением миделева сечения к массе — парусностью. Рассмотрено совместное влияние на динамическую эволюцию светового давления, эффекта Пойнтинга-Робертсона, резонансов и их взаимодействие. Приведены новые результаты по исследованию флипов орбит (перехода от прямого движения к ретроградному и обратно) объектов, обладающих большой парусностью.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 25.05.2022 г.

Ключевые слова: световое давление, эффект Пойнтинга-Робертсона, парусность, средние орбиты, геостационарная орбита, высокие орбиты

Dynamic evolution of objects with high area-to-mass ratio in the region of medium, geostationary and high Earth orbits

Kuznetsov E.D.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

A review of works on the study of the influence of light pressure on the dynamic evolution of objects moving in medium, geostationary and high Earth orbits is presented, based on the results of numerical simulation. The main attention is paid to the orbital evolution of objects with a high area-to-mass ratio. The joint influence on the dynamic evolution of light pressure, the Poynting-Robertson effect, resonances and their interaction is considered. Novel results are presented on the study of orbital flips (transition from direct to retrograde motion and vice versa) of objects with high area-to-mass ratio.

Received 10.05.2022. Accepted 25.05.2022.

Keywords: light pressure, Poynting-Robertson effect, area-to-mass ratio, medium Earth orbit, geostationary Earth orbit, high Earth orbit

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.010

1. Введение

Для космических объектов, движущихся за пределами атмосферы Земли, прямое световое давление является основным негравитационным возмущающим фактором. В настоящей работе мы будем рассматривать влияние только прямого излучения от Солнца, оставив за рамками влияние отраженной от Земли радиации, инфракрасного излучения Земли и других видов возмущений, связанных с давлением электромагнитного излучения, за исключением эффекта Пойнтинга-Робертсона. Это связано с тем, что основное внимание будет уделено исследованию динамической эволюции объектов с большим отношением миделева сечения A к массе m (парусностью) $\gamma = A/m$ на длительных интервалах времени. Как правило, объекты, обладающие большой парусностью ($\gamma \ge 1 \text{ м}^2/\text{кг}$), относятся к космическому мусору, для которого важно знать особенности долгопериодической орбитальной эволюции.

В разделе 2 будет дан обзор исследований динамической эволюции объектов с большой парусностью под влиянием светового давления. Основное внимание будет уделено результатам, полученным на основе численного моделирования. В разделе 3 будут приведены новые результаты исследования флипов орбит (перехода от прямого движения к ретроградному и обратно) объектов, обладающих большой парусностью.

2. Динамическая эволюция объектов с большой парусностью под влиянием светового давления

Возмущающая сила светового давления, обусловленного прямым солнечным излучением, существенно зависит от габаритно-массовых характеристик космических объектов и отражающих свойств их поверхности. В случае сферически-симметричного объекта парусность γ является постоянной величиной и выражение для возмущающего ускорения с учетом эффекта Пойнтинга-Робертсона имеет вид [1]:

$$\mathbf{F} = F \frac{\boldsymbol{\rho}}{\rho} + F \left(\frac{\dot{\boldsymbol{\rho}}\boldsymbol{\rho}}{c\rho} \frac{\boldsymbol{\rho}}{\rho} + \frac{\dot{\boldsymbol{\rho}}}{c}\right), \qquad F = k\gamma P \Psi \left(\frac{a_{\oplus}}{\rho}\right)^2.$$
(1)

Здесь ρ и $\dot{\rho}$ — гелиоцентрические радиус-вектор и вектор скорости объекта, c — скорость света, k — коэффициент отражения поверхности (1 — полное поглощение или зеркальное отражение, 1.44 — полное диффузное



Рис. 1: Максимальные значения наклонов орбит i_{max} в зависимости от большой полуоси орбиты a для $e_0 = 0.1$ при $i_0 = 70^{\circ}$.

рассеивание), $P=4.56\cdot 10^{-6}~{\rm H/m^2}-$ давление света, $\Psi-$ функция тени, $a_\oplus-$ большая полуось орбиты Земли.

Изучение орбитальной эволюции спутников, имеющих высокую парусность, в конце 1950-х — начале 1960-х гг. было инициировано запусками первых спутников-баллонов (Эхо-1, Эхо-2, Пагеос и др.). Возрождение интереса к этой задаче в 1990-х гг. связано с исследованием динамики пыли в окрестности сжатой планеты. Обнаруженные эффекты совместного влияния сжатия планеты и светового давления можно найти и в движении спутников-баллонов, обладающих высокой парусностью [2].

Практический интерес к проблеме изучения динамической эволюции объектов с большой парусностью усилился после того, как в начале 2000-х гг. в области геостационарной орбиты было открыто более ста объектов с парусностью от 1 до 50 м²/кг [3, 4]. Парусность этих объектов, относимых к фрагментам космического мусора, в $10^2 - 10^4$ раз превышает значения, характерные для искусственных спутников Земли. При столь больших значениях парусности возмущения, обусловленные световым давлением, становятся вторым по величине, после гравитационного поля Земли, фактором, влияющим на движение тел в околоземном пространстве.

Открытие объектов с большой парусностью стимулировало исследование влияния светового давления на орбитальную эволюцию геосинхронных объектов (см., например, обзор в [5]). Световое давление оказывает существенное влияние на орбитальную эволюцию объектов при значениях парусности $\gamma \ge 1 \text{ m}^2/\text{кr}$. Увеличение парусности ведет к возрастанию амплитуд колебаний эксцентриситета и наклона орбиты и к сокращению периодов этих колебаний. Максимальные значения наклонов увеличиваются от 15° (при $\gamma = 1 \text{ m}^2/\text{кr}$) до 46° (при $\gamma = 30 \text{ m}^2/\text{кr}$) при сокращении периода колебаний с 53 до 5 лет [6]. При $\gamma = 16 \text{ m}^2/\text{кr}$ в зависимости от начальных условий эксцентриситет орбиты может достигать значений $e \ge 0.83$, обеспечивающих вход геостационарного объекта в плотные слои атмосферы Земли [6].

В работах [7, 8] показано существование стационарной точки (e_0, π_0) на фазовой плоскости «эксцентриситет e — долгота перицентра π », соответствующей следующим начальным условиям:

$$e_0 = \frac{3}{2} k \gamma P \frac{\cos^2\left(\varepsilon/2\right)}{a n n_{\odot}} \approx \frac{0.01}{l} k \gamma, \qquad \pi_0 = \lambda_{\odot}.$$
 (2)

Здесь ε — наклон эклиптики к экватору, a — большая полуось орбиты спутника, n и n_{\odot} — средние движения спутника и Солнца, l — количество оборотов спутника вокруг Земли в течение звездных суток, λ_{\odot} — эклиптическая долгота Солнца.

Исследование стохастических свойств движения геосинхронных объектов показало, что с ростом парусности увеличиваются размеры зон стохастичности [9, 10, 11, 12]. В работе [12] обнаружены вторичные резонансы, обусловленные соизмеримостью частот резонансной переменной либрационного резонанса и эклиптической долготы Солнца. Математическое описание явления дано в работе [13].



Рис. 2: Максимальные значения наклонов орбит i_{max} в зависимости от большой полуоси орбиты a для $e_0 = 0.2$ при $i_0 = 75^{\circ}$.

Качественные характеристики орбитальной эволюции объектов с большой парусностью на геосинхронных, геопереходных [14] и GPS-орбитах [15] близки. Отмечается сложная зависимость результатов от начальных данных и значений парусности.

При исследовании движения объектов, обладающих большой парусностью, актуальным становится учет вековых возмущений. В работах [16, 17] выполнен анализ вековых возмущений, обусловленных влиянием светового давления. Получены оценки вековых возмущений большой полуоси орбиты за счет влияния эффекта Пойнтинга-Робертсона, давления излучения Земли, давления переизлученного поверхностью спутника солнечного и земного излучения [16]. Показано, что вековые возмущения, обусловленные эффектом Пойнтинга-Робертсона, более, чем на порядок, превосходят возмущения от остальных рассмотренных факторов.

В работе [18] с помощью численного интегрирования исследованы возмущения, обусловленные световым давлением с учетом эффекта Пойнтинга-Робертсона, в движении околоземного космического мусора. Получены оценки времени жизни частиц космического мусора и геостационарных объектов в зависимости от их парусности.

Исследование орбитальной эволюции супергеосинхронных объектов, обладающих большой парусностью, показало, что такие объекты будут возвращаться в область движения геосинхронных спутников [5].

В работе [19] исследованы условия, приводящие к флипам орбит (переходам наклона орбиты через 90°), обусловленным световым давлением, для спутников глобальных навигационных систем, а также спутников на круговых орбитах с большими полуосями от 25500 до 42000 км при наклонах орбит от 50° до 75° . Флипы орбит приводят к тому, что движение объектов меняется с прямого на ретроградное и обратно. В случае ретроградных орбит скорости движения фрагментов космического мусора относительно спутников будут выше, что делает их более опасными.

В работе [19] сделан вывод, что к флипам орбит приводят возмущения именно от светового давления, а не от эффекта Лидова-Козаи. Эффект Лидова-Козаи подавляется возмущениями, обусловленными световым давлением, действующим на объекты с большим отношением площади миделева сечения к массе, под влиянием вторичного апсидально-нодального векового резонанса.

В следующем разделе приведены новые результаты исследования флипов орбит, вызываемых световым давлением для объектов на средних и высоких орбитах с малыми и умеренными значениями эксцентриситетов.

3. Флипы орбит под влиянием светового давления

Исследование динамической эволюции объектов с большой парусностью выполнялось с использованием «Численной модели движения искусственных спутников» [20]. Модель возмущающих сил включала основные возмущающие факторы: гравитационное поле Земли (модель EGM96, гармоники до 27-го порядка и степени включительно), притяжение Луны и Солнца, приливы в теле Земли, прямое давление солнеч-



Рис. 3: Максимальные значения наклонов орбит i_{max} в зависимости от большой полуоси орбиты a для $e_0 = 0.3$ при $i_0 = 75^{\circ}$.

ной радиации (коэффициент отражения поверхности спутника k = 1.44) с учетом тени Земли, эффекта Пойнтинга-Робертсона и сопротивление атмосферы. Уравнения движения интегрируются методом Эверхарта 19-го порядка.

Исследовалась область околоземного пространства от орбит спутников глобальных навигационных систем (ГЛОНАСС, GPS, BeiDou, Galileo) до внешней границы геостационарной орбиты (ГСО). Начальные значения большой полуоси орбиты a_0 варьировались от 25500 км (вблизи орбит ГЛОНАСС) до 42200 км (внешняя граница ГСО) с шагом 100 км. Начальные значения наклона i_0 изменялись от 35° до 75° с шагом 5°. Начальные значения эксцентриситета e_0 выбирались равными 0.1, 0.2, 0.3 и 0.4. Начальное значение долготы восходящего узла $\Omega_0 = 180^\circ$ соответствует условиям максимальной вариации наклона орбиты [19]. Начальное значение аргумента перицентра $g_0 = 270^\circ$. Начальная эпоха $T_0 = 00^h 00^m 00^s$ 21.03.1958. Рассматривались значения парусности $\gamma \geq 7 \text{ м}^2/\text{кr.}$ Интервал интегрирования составлял 24 года.

Для начального значения эксцентриситета $e_0 = 0.1$ флипы орбит зафиксированы при начальных наклонах $i_0 = 55^\circ$, 60° и 70° . Для начального значения наклона $i_0 = 65^\circ$ флипы не обнаружены. Минимальные значения парусности γ , при которых фиксируются флипы, составляют: $\gamma = 11 \text{ м}^2/\text{кг}$ при $i_0 = 55^\circ$, $\gamma = 10 \text{ M}^2/\text{кг}$ при $i_0 = 60^\circ$, $\gamma = 7 \text{ M}^2/\text{кг}$ при $i_0 = 70^\circ$. На рис. 1 показана зависимость максимальных значений наклонов орбит i_{max} от большой полуоси орбиты *a* при начальном значении наклона $i_0 = 70^\circ$. Максимальное значение наклона орбиты i_{max} достигает 170° при $\gamma = 22 \text{ M}^2/\text{кг}$ и $a_0 = 29100 \text{ км}$. Минимальное значение начальной большой полуоси, при котором фиксируются флипы, уменьшается с увеличением парусности.

Для начального эксцентриситета $e_0 = 0.2$ при начальных наклонах $i_0 \leq 70^{\circ}$ флипы не обнаружены. Флипы зарегистрированы для начального наклона $i_0 = 75^{\circ}$. Минимальные значения парусности, при которых были обнаружены флипы, составили $\gamma = 7 - 9 \text{ м}^2/\text{кг}$ в зависимости от начального значения большой полуоси орбиты. На рис. 2 показана зависимость максимальных значений наклонов орбит i_{max} от большой полуоси орбиты a при начальном значении наклона $i_0 = 75^{\circ}$. Максимальное значение наклона орбиты i_{max} достигает 152° при $\gamma = 17 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $a_0 = 32700 \text{ км}$.

Для начального эксцентриситета $e_0 = 0.3$ при начальных наклонах $i_0 \le 70^{\circ}$ флипы не были обнаружены. Флипы были зарегистрированы при $i_0 = 75^{\circ}$. Минимальные значения парусности, при которых реализовались флипы, составили $\gamma = 7 - 9 \text{ m}^2/\text{kr}$ в зависимости от начального значения большой полуоси орбиты. На рис. 3 показана зависимость максимальных значений наклонов орбит i_{max} от большой полуоси орбиты a при начальном значении наклона $i_0 = 75^{\circ}$. Максимальное значение наклона орбиты i_{max} достигает 127° при $\gamma = 17 \text{ m}^2/\text{kr}$, $a_0 = 27300$ км и $\gamma = 18 \text{ m}^2/\text{kr}$, $a_0 = 26500$ км.

Для начального эксцентриситета $e_0 = 0.4$ при начальных наклонах $i_0 \leq 70^{\circ}$ флипы не обнаружены. Флипы регистрировались при $i_0 = 75^{\circ}$. Минимальные значения парусности, при которых возможны флипы, составили $\gamma = 7 - 10 \text{ m}^2/\text{kr}$ в зависимости от начального значения большой полуоси орбиты. На рис. 4 показана зависимость максимальных значений наклонов орбит i_{max} от большой полуоси орбиты a при начальном



Рис. 4: Максимальные значения наклонов орбит i_{max} в зависимости от большой полуоси орбиты a для $e_0 = 0.3$ при $i_0 = 75^{\circ}$.

значении наклона $i_0 = 75^{\circ}$. Максимальное значение наклона орбиты i_{max} достигает 119° при $\gamma = 10 \text{ м}^2/\text{кг}$ и $a_0 = 39400 \text{ км}$.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы о реализуемости флипов эллиптических орбит с умеренными значениями эксцентриситетов. Минимальное значение парусности γ , приводящее к флипу, уменьшается с увеличением начального наклона i_0 . Минимальный начальный наклон i_0 , при котором возможны флипы, растет с увеличением начального значения эксцентриситета e_0 . Максимальный наклон i_{max} растет с увеличением начальных значений наклона i_0 и большой полуоси a_0 . Не обнаружены флипы при начальных условиях $i_0 = 65^\circ$, $e_0 = 0.1$ и $i_0 \leq 70^\circ$, $e_0 = 0.2$, 0.3, 0.4. С ростом эксцентриситета орбиты диапазон начальных значений наклонов орбит, приводящих к флипам, сокращается.

4. Заключение

Динамическая эволюция фрагментов космического мусора, обладающих как правило, более высокой, чем спутники, парусностью, в значительной степени определяется влиянием светового давления. Обзор результатов, полученных на основе результатов численного моделирования орбитальной эволюции объектов с больпой парусностью, показывает, что характер движения объектов становится более сложным, появляются качественные изменения в эволюции элементов орбит: стационарные точки на фазовой плоскости, вторичные резонансы, флипы.

Для надежного прогнозирования орбитальной эволюции фрагментов космического мусора требуется, как минимум, точно определять по результатам наблюдений среднее значение произведения коэффициента отражения и парусности $k\gamma$. Следующим шагом должно быть решение задачи об определении формы и положения оси вращения фрагмента космического мусора, которую можно решить на основе фотометрических наблюдений. Широкополосная многоцветная фотометрия может быть использована для оценки вариаций коэффициента отражения поверхности объекта. Для получения адекватной картины эволюции космического мусора необходим синтез высокоточных методов прогнозирования движения космического мусора и данных о динамике объекта, геометрических и отражательных свойствах его поверхности.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0030.

- 1. O. Ragos and F. A. Zafiropoulos, Astron. and Astrophys., 300, 568, 1995.
- 2. L. L. Sokolov and E. D. Kuznetsov, Cosmic Research, 44, 540, 2006.
- V. Agapov, V. Biryukov, R. Kiladze, I. Molotov, V. Rumyantsev, A. Sochilina, and V. Titenko, in D. Danesy, ed., 4th European Conference on Space Debris, 587, 153 (2005).
- 4. T. Schildknecht, R. Musci, and T. Flohrer, Advances in Space Research, 41, 1039, 2008.
- 5. E. D. Kuznetsov, Solar System Research, 45, 433, 2011.

- 6. L. Anselmo and C. Pardini, in D. Danesy, ed., 4th European Conference on Space Debris, 587, 279 (2005).
- 7. C. C. Chao, in Proc. 2006 AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf. Keystone, Colorado, AIAA-2006-6514, 8
- (2006).
 8. S. Valk, A. Lemaître, and L. Anselmo, Advances in Space Research, 41, 1077, 2008.
- 9. I. Wytrzyszczak, S. Breiter, and W. Borczyk, Advances in Space Research, 40, 134, 2007.
- 10. E. D. Kuznetsov and G. T. Kaiser, Cosmic Research, 45, 359, 2007.
- 11. E. D. Kuznetsov and A. O. Kudryavtsev, Cosmic Research, 46, 425, 2008.
- 12. S. Valk, N. Delsate, A. Lemaître, and T. Carletti, Advances in Space Research, 43, 1509, 2009.
- 13. A. Lemaître, N. Delsate, and S. Valk, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 104, 383, 2009.
- 14. R. Musci, T. Schildknecht, T. Flohrer, and G. Beutler, Advances in Space Research, 41, 1071, 2008.
- 15. L. Anselmo and C. Pardini, Advances in Space Research, 43, 1491, 2009.
- M. A. Smirnov and A. M. Mikisha, in Problema zagryazneniya kosmosa (kosmicheskiy musor). M.: Kosmosinform, 1993, 126–142 (1993).
- 17. M. A. Smirnov and A. M. Mikisha, in Stolknoveniya v okolozemnom prostranstve (kosmicheskiy musor). M.: Kosmosinform, 1995, 252–271 (1995).
- O. N. Tuyeva and V. A. Avdyushev, in Nefed'yev YU. A., Rykhlova L. V., Smirnov M. A., and Bakanas Ye. S., eds., Okolozemnaya astronomiya-2005: Sb. trudov konf. Kazan': Kazanskiy gosudarstvennyy universitet im. V. I. Ul'yanova-Lenina, 261–267 (2006).
- 19. S. O. Belkin and E. D. Kuznetsov, Acta Astronautica, 178, 360, 2021.
- 20. T. V. Bordovitsyna, I. V. Tomilova, and I. N. Chuvashov, Solar System Research, 46, 329, 2012.

62

Определение динамических и физических характеристик астероидов, сближающихся с Землей, по результатам наблюдений

Кузнецов Э.Д.¹, Вибе Ю.З.¹, Гламазда Д.В.¹, Кайзер Г.Т.¹, Крушинский В.В.¹, Крючков С.В.², Нароенков С.А.², Перминов А.С.¹

¹ Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия ² Институт астрономии РАН Москод Россия

 2 Институт астрономии РАН, Москва, Россия

На телескопах СБГ Коуровской астрономической обсерватории УрФУ и Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНА-САН выполнены позиционные и многоцветные фотометрические наблюдения астероидов, сближающихся с Землей. По результатам позиционных наблюдений на телескопе СБГ для астероидов (52768) 1998 OR2, (65690) 1991 DG, (159857) 2004 LJ1, (326732) 2003 HB6, (332446) 2008 AF4, (388945) 2008 TZ3, 2015 NU13 получены улучшенные элементы орбит и оценки ускорения A_2 , обусловленного влиянием эффекта Ярковского. По фотометрическим наблюдениям на телескопе СБГ оценены периоды осевого вращения астероидов (137170) 1999 HF1, (159857) 2004 LJ1, (326732) 2003 HB6. По результатам фотометрических наблюдений в фильтрах B, V, R, I на телескопе Цейсс-1000 получены показатели цвета для астероидов (137170) 1999 HF1, (138127) 2000 EE14, (153591) 2001 SN263, (159857) 2004 LJ1, (326732) 2003 HB6, 2010 TV149. Для трех астероидов по данным о показателях цвета оценен таксономический тип: астероид (153591) 2001 SN263 отнесен к типу C, (159857) 2004 LJ1 – к типу S, (326732) 2003 HB6 – к типу D.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 25.05.2022 г.

Ключевые слова: астероиды, сближающиеся с Землей, эффект Ярковского, период осевого вращения, показатели цвета, таксономический тип

Determination of the dynamic and physical parameters of near-Earth asteroids from observations

Kuznetsov E.D.¹, Wiebe Yu.S.¹, Glamazda D.V.¹, Kaiser G.T.¹, Krushinsky V.V.¹, Kryuchkov S.V.², Naroenkov S.A.², Perminov A.S.¹

¹ Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

²Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We performed astrometric and multicolor photometric observations of near-Earth asteroids at the SBG telescope of the Kourovka Astronomical Observatory of the Ural Federal University and the Zeiss-1000 telescope of the Simeiz Observatory of INASAN. We improved orbital elements and estimated the A_2 acceleration due to the Yarkovsky effect for asteroids (52768) 1998 OR2, (65690) 1991 DG, (159857) 2004 LJ1, (326732) 2003 HB6, (332446) 2008 AF4, (388945) 2008 TZ3, 2015 NU13 from astrometric observations with the SBG telescope. Furthermore, we estimated the axial rotation periods of the asteroids (137170) 1999 HF1, (159857) 2004 LJ1, (326732) 2003 HB6 from photometric observations with the SBG telescope. We obtained color indices for the asteroids (137170) 1999 HF1, (138127) 2000 EE14, (153591) 2001 SN263, (159857) 2004 LJ1, (326732) 2003 HB6 from photometric observations with the SBG telescope. We obtained color indices for the asteroids (137170) 1999 HF1, (138127) 2000 EE14, (153591) 2001 SN263, (159857) 2004 LJ1, (326732) 2003 HB6 from photometric observations with the SBG telescope. We obtained the taxonomic classes for three asteroids, according to the color indices: the asteroid (153591) 2001 SN263 has class C, (159857) 2004 LJ1 has class S, and (326732) 2003 HB6 has class D.

Received 10.05.2022. Accepted 25.05.2022.

Keywords: near-Earth asteroids, Yarkovsky effect, rotation period, color indices, taxonomic classes

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.011

1. Введение

В Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета (АО УрФУ) и Симеизской обсерватории ИНАСАН выполняется совместный проект АСЗ-КС по определению динамических и физических параметров астероидов, сближающихся с Землей, по результатам позиционных и фотометрических наблюдений. Решаются следующие задачи:

- определение улучшенных элементов орбит;
- оценка негравитационного ускорения A_2 , обусловленного влиянием эффекта Ярковского;
- определение периода осевого вращения;
- оценка показателей цвета;
- установление таксономического типа астероидов.

Наблюдения AC3 проводятся на телескопах СБГ AO УрФУ и Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН (табл. 1). На телескопе СБГ позиционные наблюдения выполняются в фильтре R, фотометрические — в фильтрах V и R. На телескопе Цейсс-1000 проводятся фотометрические наблюдения в фильтрах B, V, R, I.

Параметр	СБГ	Цейсс-1000
Оптическая система	Шмидта	Ричи-Кретьена
Диаметр зеркала, м	0.4	1
Фокусное расстояние, м	0.8	13
		5.7 (с редуктором фокуса)
Светоприемник	Apogee Alta U32	FLI PL 16803
Размер пикселя, мкм	6.8 imes 6.8	9 imes 9
Масштаб изображения, "/пиксель	1.8	0.143
		0.326 (с редуктором фокуса)
Поле зрения	$65' \times 44'$	$10' \times 10'$
		$22' \times 22'$ (с редуктором фокуса)

Таблица 1: Основные параметры телескопов СБГ и Цейсс-1000 и их светоприемной аппаратуры.

Таблица 2: Количественные сведения о наблюдениях, выполненных в 2021-2022 гг.

Телескоп	Позиционные наблюдения			Фотометрические наблюдения			
	Количество			Количество			Фильтры
	AC3	ночей	кадров	AC3	ночей	кадров	
СБГ	6	17	533	6	39	2625	V, R
Цейсс-1000			—	6	17	1370	B,V,R,I

Количественные сведения о наблюдениях, выполненных в 2021–2022 гг. приведены в табл. 2. Статья посвящена описанию результатов, полученных на основе этих наблюдений. В разделе 2 приведены результаты позиционных наблюдений. В разделе 3 получены периоды осевого вращения астероидов. Показателям цвета посвящен раздел 4. Таксономические типы астероидов обсуждаются в разделе 5.

2. Определение улучшенных элементов орбит и негравитационного ускорения A₂

В табл. 3 приведен список астероидов, наблюдения которых выполнялись на телескопе СБГ. Наблюдения потенциально опасного астероида (99942) Арорһіз проводились в рамках международной кампании, организованной IAWN¹. Астрометрическая обработка выполнялась с помощью программы IzmCCD² [1] для всех кадров, полученных по программам позиционных и фотометрических наблюдений. Результаты астрометрической обработки приведены в табл. 3, где $N_{\rm ph}({\rm R},{\rm V})$ — количество кадров, полученных при фотометрических наблюдениях в фильтрах R и V; $N_a({\rm R})$ — количество кадров, полученных при позиционных наблюдениях в фильтре R; $N_d({\rm R},{\rm V})$ — количество кадров, полученных при позиционных наблюдениях в фильтре R; $N_d({\rm R},{\rm V})$ — количество положений астероидов, определенных в результате астрометрической обработки; σ_{α} и σ_{δ} — среднеквадратичные опшбки координат астероида по прямому восхождению и склонению. Как видно из табл. 3, среднеквадратичные опшбки экваториальных координат астероидов σ_{α} и σ_{δ} не превышают 0.3".

¹ International Asteroid Warning Network,	https://iawn.net/obscamp/Apophis/
2 http://izmccd.puldb.ru/	

Таблица 3: Результаты астрометрической обработки наблюдений астероидов.

На	Астрометрическая обработка					
AC3	Интервал наблюдений, сут.	Количество ночей	$\begin{array}{c} N_{\rm ph}({\rm R,V}) + \\ + N_a(R) \end{array}$	$N_d(\mathbf{R}, \mathbf{V})$	$\sigma_{lpha},$ "	$\sigma_{\delta},$ "
(99942) Apophis	62	14	503	387	0.27	0.25
$(153591) \ 2001 \ SN263$	4	2	295	239	0.15	0.20
$(159857) \ 2004 \ LJ1$	36	13	1052	1016	0.22	0.20
$(326732) \ 2003 \ HB6$	6	5	588	583	0.10	0.11
$(332446) \ 2008 \ AF4$	30	5	472	243	0.19	0.15
2015 NU13	1	1	60	60	0.17	0.15

AC3	Эпоха	JD_1	JD_2	N	N_{168}	$A_2,$	$\sigma_{A_2},$
	элементов					10^{-14} a.e./cyt. ²	10^{-14} a.e./cyr. ²
(52768) 1998 OR2	2458944.5	2454834.5	2459107.5	5238	38	-2.71	0.69
(65690) 1991 DG	2458298.5	2452898.5	2459169.5	1096	7	4.22	0.99
$(159857) \ 2004 \ LJ1$	2459405.5	2457035.5	2459487.5	1236	34	-4.84	3.58
$(326732) \ 2003 \ HB6$	2459444.5	2452724.5	2459545.5	3245	23	-2.67	0.69
$(332446) \ 2008 \ AF4$	2458645.5	2454475.5	2459279.5	995	22	-2.13	0.36
$(388945) \ 2008 \ TZ3$	2458241.5	2457461.5	2459143.5	1182	22	3.01	1.47
2015 NU13	2459225.5	2457215.5	2459291.5	316	5	12.7	5.0

Таблица 4: Оценки ускорения A_2 .

Таблица 5: Периоды осевого вращения астероидов.

AC3	P, часы	P_0 , часы	Источник
(159857) 2004 LJ1 (326732) 2003 HB6	$\begin{array}{c} 2.7265 \pm 0.0059 \\ 3.457 \pm 0.035 \end{array}$	$\begin{array}{c} 2.72627 \pm 0.00007 \\ 3.4630 \pm 0.0002 \end{array}$	[8] [8]

По результатам позиционных наблюдений с помощью программного комплекса «ИДА» [2] было выполнено улучшение орбит астероидов, которые наблюдались на телескопе СБГ в 2020–2021 гг. Для 7 астероидов были получены оценки ускорения A_2 (табл. 4), характеризующего влияние эффекта Ярковского. В табл. 4 использованы следующие обозначения: JD_1 и JD_2 — юлианские даты начального и конечного моментов наблюдений из базы данных Центра малых планет³, использованных для улучшения орбиты; N — число наблюдений на интервале интегрирования из базы данных MPC; N_{168} — количество наблюдений, выполненных в Коуровской астрономической обсерватории УрФУ; σ_{A_2} — среднеквадратичная ошибка определения ускорения A_2 . Оценки ускорения A_2 получены с точностью от 1 до 3 стандартных отклонений, что позволит использовать их при моделировании динамической эволюции астероидов.

3. Определение периодов осевого вращения

Первоначальная обработка фотометрических наблюдений выполнялась с помощью программы AM:PM [3]. При построении фазовых кривых блеска для учета зависимости блеска астероида от фазового угла определялись параметры двух- или трехпараметрических моделей с использованием онлайн-калькулятора Online calculator for H, G1, G2 photometric system⁴ [4, 5, 6]. Построение фазовых кривых блеска выполнялось в онлайн-системе Period search service⁵ методом Лафлера-Кинмана [7].

На рис. 1 показана фазовая кривая блеска астероида (159857) 2004 LJ1, построенная по результатам фотометрических наблюдений в фильтрах V и R. Красная кривая на рис. 1 соответствует скользящему среднему. Оценки периодов P осевого вращения астероидов (159857) 2004 LJ1 и (326732) 2003 HB6 приведены в табл. 5. Результаты в пределах ошибок определения согласуются с данными о периодах P_0 вращения астероидов, содержащимися в базе данных фотометрических кривых блеска астероидов Центра малых планет⁶.

4. Определение показателей цвета

В табл. 6 приведены оценки показателей цвета астероидов по результатам наблюдений на телескопах СБГ и Цейсс-1000. По наблюдениям на телескопе СБГ определялся только один показатель цвета — V–R. Полужирным шрифтом выделены названия астероидов, для которых показатели цвета определены впервые. В том случае, если имеются оценки показателей цвета полученные другими авторами, они также приводятся в табл. 6. В большинстве случаев определенные показатели цвета в пределах ошибок совпадают со значениями из базы ALCDEF. Рассмотрим отдельные случаи.

Показатель цвета V–R = $0.36^{\rm m}$ для астероида (137170) 1999 HF1, определенный по наблюдениям на телескопе Цейсс-1000, ближе к результату V–R = $0.37^{\rm m}$, приведенному в [10] (табл. 6). В то же время, наблюдения на телескопе СБГ дают оценку V–R = $0.41^{\rm m}$, которая ближе к значению V–R = $0.42^{\rm m}$ [9] (табл. 6). Это может

³MPC, https://minorplanetcenter.net/db search

⁴http://h152.it.helsinki.fi/HG1G2/

⁵http://scan.sai.msu.ru/lk/

⁶ALCDEF, https://alcdef.org/



Рис. 1: Фазовая кривая блеска астероида (159857) 2004 LJ1. Красная кривая — скользящее среднее.

быть связано с возможной двойственностью астероида (137170) 1999 HF1 [15], когда двойная система наблюдается в различных конфигурациях. Однако последние результаты не подтверждают наличие спутника у (137170) 1999 HF1 [16]. Необходимы дальнейшие наблюдения с целью оценки показателя цвета V–R.

Похожая ситуация с оценками показателя цвета V–R для астероида (326732) 2003 HB6 (табл. 6). Показатель цвета V–R= 0.33^m, полученный по наблюдениям на телескопе Цейсс-1000, близок к оценке V–R= 0.388^m [12]. Значение V–R= 0.43^m, полученное на телескопе СБГ, согласуется с V–R= 0.429^m [13]. Различие оценок V–R возможно связано с тем, что астероид (326732) 2003 HB6 может быть двойным [8]. Продолжение наблюдений сможет разрешить эту неопределенность.

Для астероида (159857) 2004 LJ1 показатели цвета V–R, полученные на телескопах Цейсс-1000 и СБГ, близки между собой: V–R= 0.46^m и 0.44^m (табл. 6), но отличаются от результата V–R= 0.58^m [11]. Возможно, что это различие связано с тем, что астероид (159857) 2004 LJ1 может быть двойным [8]. Требуются дальнейшие фотометрические наблюдения астероида.

Для тройной системы (153591) 2001 SN263 [17, 18] показатели цвета V–R, полученные на телескопах Цейсс-1000 и СБГ (табл. 6), различаются более, чем на величину стандартного отклонения. Отметим, что оценки показателей цвета астероида (153591) 2001 SN263 получены впервые. Необходимы дальнейшие наблюдения для уточнения значений показателей цвета.

Анализ полученных показателей цвета V–R демонстрирует, что для двойных и кратных систем оценки показателей цвета могут зависеть от геометрических условий, определяющих видимость компонентов двойных и кратных систем. Еще одной причиной различий оценок может служить неоднородность поверхности исследуемых астероидов. Изучаемые AC3 представляют интерес для последующих фотометрических наблюдений.

Мы подробно проанализировали результаты определения показателя цвета V–R, поскольку они были получены по результатам наблюдений на обоих телескопах. Показатели цвета в других фильтрах по наблюдениям на Цейсс-1000 позволили выполнить оценки таксономических типов AC3.

5. Оценка таксономических типов

Для оценки таксономических типов астероидов по многоцветным фотометрическим наблюдениям мы использовали несколько вариантов классификации.

1. Классификация Толена на основе показателей цвета B–V, V–R и V–I [19] (рис. 2).

B–V	B–R	V–R	V–I	R–I	Источник		
(137170) 1999 HF1							
$0.69^{\mathrm{m}}\pm0.02^{\mathrm{m}}$	$1.05^{\mathrm{m}}\pm0.02^{\mathrm{m}}$	$0.36^{\mathrm{m}}\pm0.02^{\mathrm{m}}$			Цейсс-1000		
		$0.41^{\mathrm{m}}\pm0.02^{\mathrm{m}}$			СБГ		
$0.69^{\rm m} \pm 0.03^{\rm m}$		$0.42^{\mathrm{m}}\pm0.03^{\mathrm{m}}$			[9]		
$0.65^{\mathrm{m}}\pm0.08^{\mathrm{m}}$		$0.37^{\rm m}\pm0.07^{\rm m}$			[10]		
		$(138127) \ 20$	00 EE14				
$0.61^{\mathrm{m}}\pm0.07^{\mathrm{m}}$	$1.12^{\rm m}\pm0.07^{\rm m}$	$0.48^{\mathrm{m}}\pm0.07^{\mathrm{m}}$			Цейсс-1000		
		(153591) 200	1 SN263				
$0.779^{\rm m}\pm 0.010^{\rm m}$	$1.054^{\rm m}\pm 0.010^{\rm m}$	$0.276^{\rm m} \pm 0.008^{\rm m}$	$0.527^{\rm m}\pm 0.009^{\rm m}$	$0.251^{\rm m}\pm 0.009^{\rm m}$	Цейсс-1000		
		$0.39^{\mathrm{m}}\pm0.08^{\mathrm{m}}$			СБГ		
		(159857) 20	04 LJ1				
$0.76^{\mathrm{m}}\pm0.11^{\mathrm{m}}$	$1.25^{\mathrm{m}}\pm0.10^{\mathrm{m}}$	$0.46^{m} \pm 0.10^{m}$	$0.82^{\mathrm{m}}\pm0.08^{\mathrm{m}}$	$0.33^{\mathrm{m}}\pm0.04^{\mathrm{m}}$	Цейсс-1000		
		$0.44^{\mathrm{m}}\pm0.08^{\mathrm{m}}$			СБГ		
$0.78^{\mathrm{m}}\pm0.05^{\mathrm{m}}$		$0.58^{\mathrm{m}}\pm0.05^{\mathrm{m}}$	$0.90^{\mathrm{m}}\pm0.05^{\mathrm{m}}$		[11]		
		(326732) 20	03 HB6				
$0.75^{\mathrm{m}}\pm0.05^{\mathrm{m}}$	$0.98^{\mathrm{m}}\pm0.05^{\mathrm{m}}$	$0.33^{\rm m}\pm0.08^{\rm m}$	$0.89^{\mathrm{m}}\pm0.04^{\mathrm{m}}$	$0.66^{\mathrm{m}}\pm0.04^{\mathrm{m}}$	Цейсс-1000		
		$0.43^{\mathrm{m}}\pm0.04^{\mathrm{m}}$			СБГ		
$0.676^{\rm m}\pm 0.124^{\rm m}$		$0.388^{m}\pm 0.048^{m}$	$0.786^{\rm m}\pm 0.054^{\rm m}$		[12]		
		$0.429^{\rm m}\pm 0.010^{\rm m}$			[13]		
		(332446) 20	08 AF4				
		$0.44^{\rm m} \pm 0.08^{\rm m}$			СБГ		
		$0.43^{\mathrm{m}}\pm0.02^{\mathrm{m}}$			[14]		
		2010 TV	/149				
$1.07^{\rm m}\pm0.08^{\rm m}$	$1.42^{\rm m}\pm0.09^{\rm m}$	$0.35^{\mathrm{m}}\pm0.09^{\mathrm{m}}$			Цейсс-1000		
		2015 NU	U13				
		$0.40^{\rm m}\pm0.10^{\rm m}$			СБГ		
		$0.388^{\rm m} \pm 0.010^{\rm m}$			ALCDEF		

Таблица 6:	Показатели	цвета	астероидов
------------	------------	-------	------------

- 2. Классификация Бас-ДеМео на основе показателей цвета В–R и V–I [11] (рис. 3а). В используемом варианте классификации типичные спектральные кривые, соответствующие таксономическим классам, проинтегрированы по диапазонам пропускания светофильтров В, V, R и I.
- 3. Классификация на основе средних показателей цвета B–R и V–I, полученных по результатам фотометрических наблюдений астероидов известных типов [11] (рис. 36).

Для установления типа AC3 использовались показатели цвета из табл. 6.

- Для астероида (159857) 2004 LJ1 классификация Толена (рис. 2) указывает на возможные типы C, S или X. Классификация по средним показателям цвета [11] (рис. 36) указывает на возможные типы D, S или X. По классификации Бас-ДеМео (рис. 3а) астероид (159857) 2004 LJ1 можно отнести к типу S, что согласуется с результатом [11].
- Для астероида (326732) 2003 НВ6 по классификация Толена (рис. 2) с учетом того, что показатель цвета В–V может достигать 0.43^m (табл. 6), возможны типы D или T. Классификация Бас-ДеМео и классификация по средним показателям цвета [11] (рис. 3) указывают на близость астероида (326732) 2003 НВ6 к типу D, что согласуется с результатом [20].

Для астероида (153591) 2001 SN263 классификации Толена (рис. 2) и Бас-ДеМео (рис. 3а) не позволяют оценить таксономический класс. Классификация по средним показателям цвета [11] (рис. 3б) указывает на близость к типу С, что согласуется с результатами [21] и [22].

6. Заключение

Полученные результаты показывают, что наблюдения на телескопах СБГ Коуровской астрономической обсерватории УрФУ и Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН дополняют друг друга и позволяют определять как динамические, так и физические характеристики АСЗ. Телескоп СБГ ориентирован на позиционные наблюдения АСЗ, а также на фотометрические с целью определения периодов вращения АСЗ



Рис. 2: Показатели цвета основных типов астероидов по классификации Толена [19].



Рис. 3: Показатели цвета основных типов астероидов: а) классификация Бас-ДеМео [11], б) классификация на основе средних показателей цвета [11].

и показателя цвета V–R. Многоцветная фотометрия на телескопе Цейсс-1000 позволяет получать надежные оценки нескольких показателей цвета, на основе которых можно определять таксономический класс AC3.

Получение улучшенных элементов орбит и надежных оценок ускорения A_2 , обусловленного влиянием эффекта Ярковского, дает возможность проведения детальных исследований орбитальной эволюции AC3. Определение знака ускорения A_2 позволяет установить направление осевого вращения AC3, что при известном периоде осевого вращения дает возможность анализа геометрических условий сближения астероида с Землей.

Различия в оценках показателей цвета, в частности V–R, получаемых на разных телескопах, а также разными авторами, указывают на актуальность проведения многоцветной фотометрии AC3. Для сопоставления получаемых показателей цвета необходимо выполнить анализ геометрических условий сближения: изменение фазового угла, диапазон средних значений широты центральной точки «диска» AC3, расположение спутников в двойных и кратных системах и т.д. Решение этой проблемы позволит получать более надежные оценки таксономических типов AC3.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, темы: FEUZ-2020-0030 (проведение наблюдений на телескопе СБГ и их обработка), FEUZ-2020-0038 (проведение наблюдений на телескопе Цейсс-1000 и их обработка). При выполнении наблюдений использовались телескопы: СБГ, входящий в УНУ «Коуровская астрономическая обсерватория», и Цейсс-1000, входящий в состав научного оборудования ЦКП «Терскольская обсерватория» ИНАСАН.

- 1. I. S. Izmailov, M. L. Khovricheva, M. Y. Khovrichev, O. V. Kiyaeva, et al., Astron. Lett., 36, 349, 2010.
- 2. T. Y. Galushina, L. E. Bykova, O. N. Letner, and A. P. Baturin, Astronomy and Computing, 29, 100301, 2019.
- 3. V. V. Krushinsky, in Fizika Kosmosa : trudy 47-y Mezhdunarodnoy studencheskoy nauchnoy konferentsii (Yekaterinburg, 29 yanv. 2 fevr. 2018 g.), 205 (2018).
- 4. K. Muinonen, I. N. Belskaya, A. Cellino, M. Delbò, A.-C. Levasseur-Regourd, A. Penttilä, and E. F. Tedesco, *Icarus*, **209**, 542, 2010.
- D. A. Oszkiewicz, K. Muinonen, E. Bowell, D. Trilling, A. Penttilä, T. Pieniluoma, L. H. Wasserman, and M. T. Enga, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 112, 1919, 2011.
- 6. A. Penttilä, V. G. Shevchenko, O. Wilkman, and K. Muinonen, Plan. and Space Sci., 123, 117, 2016.
- 7. J. Lafler and T. D. Kinman, Astrophys. J. Supp., 11, 216, 1965.
- 8. B. D. Warner and R. D. Stephens, Minor Planet Bulletin, 49, 22, 2022.
- 9. D. Polishook and N. Brosch, Icarus, 194, 111, 2008.
- 10. S. Ieva, E. Dotto, E. Mazzotta Epifani, D. Perna, et al., Astron. and Astrophys., 644, A23, 2020.
- 11. S. Ieva, E. Dotto, E. Mazzotta Epifani, D. Perna, et al., Astron. and Astrophys., 615, A127, 2018.
- 12. C.-H. Lin, W.-H. Ip, Z.-Y. Lin, Y.-C. Cheng, H.-W. Lin, and C.-K. Chang, Plan. and Space Sci., 152, 116, 2018.
- 13. P. Pravec, K. Hornoch, H. Kucakova, P. Kusnirak, et al., Central Bureau Electronic Telegrams, 1, 2021.
- 14. T. Hromakina, M. Birlan, M. A. Barucci, M. Fulchignoni, et al., Astron. and Astrophys., 656, A89, 2021.
- P. Pravec, L. Šarounová, M. D. Hicks, D. L. Rabinowitz, M. Wolf, P. Scheirich, and Y. N. Krugly, *Icarus*, 158, 276, 2002.
- 16. B. D. Warner, Minor Planet Bulletin, 43, 311, 2016.
- 17. M. C. Nolan, E. S. Howell, L. A. M. Benner, S. J. Ostro, et al., Central Bureau Electronic Telegrams, 1254, 1, 2008.
- 18. T. M. Becker, E. S. Howell, M. C. Nolan, C. Magri, et al., *Icarus*, 248, 499, 2015.
- 19. C. L. Dandy, A. Fitzsimmons, and S. J. Collander-Brown, Icarus, 163, 363, 2003.
- 20. R. P. Binzel, F. E. DeMeo, E. V. Turtelboom, S. J. Bus, et al., *Icarus*, **324**, 41, 2019.
- M. Pajuelo, M. Birlan, B. Carry, F. E. DeMeo, R. P. Binzel, and J. Berthier, Monthly Not. Roy. Astron. Soc., 477, 5590, 2018.
- S. Hasegawa, D. Kuroda, K. Kitazato, T. Kasuga, et al., Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 114, 2018.

Результаты исследований космического мусора с использованием задела проекта ИСОН

Молотов И.Е.¹, Чжу Т.², Еленин Л.В.¹, Юй Ш.², Стрельцов А.И.¹, Чжан Ч.², Захваткин М.В.¹, Степаньянц В.А.¹, Шильдкнехт Т.³, Грациани Ф.⁴, Магомед Н.⁵, Абдельазиз А.М.⁶, Тилиб С.К.⁶, Шила И.⁷, Левшунов А.С.⁸, Выхристенко А.М.⁹, Русаков О.П.¹⁰, Сибиченкова М.А.¹

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

7 Университет Коменского в Братиславе, Братислава, Словакия

⁹ Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь, Приднестровье

¹⁰ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Инициативный проект ИСОН стартовал в 2004 г. при поддержке грантов. В широкой международной кооперации был отработан полный цикл исследований т.н. космического мусора — постановка задач, широкоугольные оптические телескопы, программное обеспечение, места для обсерваторий, модель популяции. ИСОН стал инкубатором инновационных решений, которые были внедрены при создании обсерваторий Роскосмоса и организаций промышленности. Глобальная межведомственная сеть включала 100 телескопов, что позволило получить научные и прикладные результаты мирового уровня. В последние годы ИСОН в составе 44 телескопов снова стал независимым международным проектом, выполняющим научные и прикладные работы за счет грантов.

Поступила в редакцию 06.05.2022 г. Принята в печать 01.06.2022 г.

Ключевые слова: космический мусор, оптический телескоп, астрометрические измерения, база данных

Results of space debris research using the groundwork of the ISON project

Molotov I.E.¹, Zhu T.², Elenin L.V.¹, Yu Sh.² Streltsov A.I.¹, Zhang Ch.², Zakhvatkin M.V.¹, Stepanyants V.A.¹, Schildknecht T.³, Graziani F⁴, Mahomed N.⁵, Abdelaziz A.M.⁶, Tealib S.K.⁶, Silha J.⁷, Levshunov A.S.⁸, Vykhristenko A.M.⁹, Rusakov O.P.¹⁰, Sibichenkova M.A.¹

¹Keldysh Institute of Applied Mathematics of the RAS, Moscow, Russia

²Purple Mountain Observatory, CAS, Nanjing, China

³Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland

⁴Group of Astrodynamics for the Use of Space Systems, Rome, Italy

⁵Astronomical Observation Centre, Stellenbosch, South Africa

⁶National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Cairo, Egypt

⁷Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University in Bratislava, Bratislava, Slovakia

 $^{8}Lesosibirsk\ Pedagogical\ Institute,\ Lesosibirsk,\ Russia$

⁹ Taras Shevchenko Transnistria State University, Tiraspol, Transnistria

¹⁰Central Astronomical Observatory at Pulkovo, RAS, St. Petersburg, Russia

The initiative ISON project started in 2004 with the support of grants. In a broad international cooperation, a full cycle of research on so-called space debris was worked out — setting tasks, wide-angle optical telescopes, software, places for observatories, a population model. And ISON became an incubator of innovative solutions that were implemented when creating observatories of Roscosmos and industrial organizations. The global interdepartmental network included 100 telescopes, which made it possible to obtain world-class scientific and applied results. In recent years, ISON, consisting of 44 telescopes, has again become an independent international project that performs scientific and applied work at the expense of grants.

Received 06.05.2022. Accepted 01.06.2022.

Keywords: space debris, optical telescope, astrometric measurements, database

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.012

1. Введение

Освоение и исследования околоземного космического пространства (ОКП) привело к появлению проблем, связанных с техногенной засоренностью т.н. «космическим мусором» (КМ). Задачи изучения, моделирования и предотвращения техногенных угроз осуществлению космической деятельности являются сейчас как

² Обсерватория Пурпурной горы Китайской академии наук, Нанкин, Китай

³Институт астрономии Университета Берна, Берн, Швейцария

 $^{^4 \}Gamma pynna aстродинамики по использованию космических систем, Рим, Италия$

⁵Центр астрономических наблюдений, Стелленбос, ЮАР

⁶Национальный исследовательский институт астрономии и геофизики, Kaup, Erunem

⁸Лесосибирский педагогический институт, Лесосибирск, Россия

N⁰	Название	Оптическая схема/разработка	Апертура/фокус, мм	Поле, град	ПЗС-чип, мм
1	VT-78a	Шенкер-Теребиж/Борисов	192/296	7×7	36
2	$2 \mathrm{xVT}$ -78a	Шенкер-Теребиж/Борисов	192/296	$7{ imes}9$	36×24
3	$4 \mathrm{xVT}$ -78a	Шенкер-Теребиж/Борисов	192/296	9×14	36×24
4	$6 \mathrm{xTGS}$ -200	Гамильтон-Юдин/Юдин-Санкович	200/307	4.5×42	36×24
5	SRT-220	Слефогт-Рихтер-Теребиж/Борисов	220/507	4×4	36
6	ORI-22	Гамильтон-Теребиж/Борисов	220/510	4×4	36
7	ORI-25	Гамильтон-Теребиж/Борисов	250/625	3.35	36
8	Сантел-400А	Гамильтон-Юдин/Санкович	400/1200	1.75	36
9	ORI-40	Гамильтон-Теребиж/Борисов	400/920	2.25	36
10	Сантел-400з	Зоннефельд-Юдин/Санкович	400/500	5.5×4	50×36
11	ORI-50	Гамильтон-Теребиж/Борисов	500/1160	2.5	50
12	Сантел-650А	Гамильтон-Юдин/Санкович	650/1300	2.2	50

Таблица 1: Параметры телескопов и комплексов, разработанных в проекте ИСОН.

никогда актуальными. Для их решения нужен научный инструмент в форме географически разнесенной сети оптических телескопов, перекрывающий все долготы земного шара. Попыткой создать подобный инструмент стал инициативный проект ИСОН, реализуемый за счет грантов и хоздоговоров.

2. Задел проекта НСОИ

Инициативный проект ИСОН [1] был начат в 2004 г. на средства российских и зарубежных грантов. Во время его реализации были возобновлены наблюдения в 10-ти обсерваториях бывшего СССР — Тариха (Боливия), Уссурийск, Благовещенск, Хуралтогот (Монголия), Китаб (Узбектистан), Гиссар и Санглок (Таджикистан), Абастумани (Грузия), Ужгород и Маяки (Украина), исследованы новые места для обсерваторий и организовано 8 новых пунктов наблюдений — на Камчатке, Дальнем Востоке, в Лесосибирске, Барнауле и Мульте (Алтай), Тирасполе, Косале и Нуэво-Леоне (Мексика), вовлечены 4 зарубежные обсерватории — Циммервальд (Швейцария), Барселона (Испания), Кастельгранде (Италия), Урумчи (Китай). Для оснащения сети было разработано несколько серий специализированных обзорных телескопов апертурой от 12.5 см до 65 см с большими полями зрения [1], см. табл. 1, типовой набор программного обеспечения для управления оборудованием [2, 3] и обработки ПЗС-кадров, разработана система точной привязки времени измерений, отлажены новые наблюдательные методики для обзоров геостационарной орбиты (ГСО) и обнаружения малоразмерных фрагментов космического мусора. Сотрудники всех обсерваторий прошли переобучение, в штат ряда обсерваторий были привлечены любители астрономии, что позволило в 2007 г. впервые в отечественной практике перекрыть наблюдениями всю ГСО. Проект ИСОН стал инкубатором инновационных решений в области мониторинга высоких околоземных орбит, которые были внедрены при создании обсерваторий Роскосмоса [1] и телескопов организаций промышленности.

Для Роскосмоса в рамках ОКР АСПОС ОКП [4] были созданы экспериментальные образцы — 50-см телескоп ОЭС-50 и 65-см телескоп (Сантел-650А) ОЭС-65, — установленные в обсерваториях Кисловодска и Уссурийска. Также на основе задела НСОИ были разработаны обсерватории ЭОП-1 и ЭОП-2, в которых использованы телескопы 2xVT-78a, 4xVT-78a, ORI-25, ORI-40, Сантел-650А (см. табл. 1), служба времени, программное обеспечение для управления телескопами и обработки ПЗС-кадров, предложены места размещения — Научный (два ЭОП-1), Кисловодск (ЭОП-1 и ЭОП-2), Бюракан (ЭОП-1), Благовещенск (ЭОП-2), предложено место для размещения комплекса ОЭК ОКМ в обсерватории Пико дос Диоас (Бразилия).

АО «АНЦ» было оказано содействие в создании пунктов наблюдений на Камчатке, Дальнем Востоке, в Лесосибирске, Китабе, Ла Серена (Чили), произведено 6 телескопов (ORI-22, ORI-25, ORI-40), передано программное обеспечение, служба времени, привлечены наблюдатели. Для ПАО «МАК «Вымпел» было произведено 5 телескопов (VT-53, ORI-25, ORI-50), предложены места их размещения (Уссурийск, Благовещенск, Тирасполь, Краснодар, Ла Серена) [5].

На пике развития глобальная межведомственная сеть обсерваторий включала в себя до 100 телескопов в 33 обсерваториях 17 стран мира (Австралия, Армения, Боливия, Бразилия, Грузия, Испания, Италия, Китай, Мексика, Монголия, Приднестровье, Россия, США, Узбекистан, Украина, Швейцария, Чили). Многократное возрастание потока измерений привело к падению интереса к данным ИСОН и фактическому прекращению финансирования. Наблюдения средств Роскосмоса и кооперации ПАО «МАК «Вымпел» стали планироваться и финансироваться независимо. Попытка сохранить проект ИСОН в новых условиях была предпринята компанией ООО МИП «ИСОН Баллистика-Сервис».


Рис. 1: Географическое расположение обсерваторий, вовлеченных в проект ИСОН.

3. Текущий состав ИСОН

В 2015 г. для эксплуатации обсерваторий сети была создана специализированная компания — МИП «ИСОН Баллистика-Сервис», на баланс которой поставлено 32 телескопа. С 2019 г. координация, финансирование и развитие проекта ИСОН осуществляется через нее. Было подписано 10 договоров о научно-техническом сотрудничестве с зарубежными обсерваториями и университетами, получено несколько грантов на исследования космического мусора и заказов на наблюдения спутников. В МИП «ИСОН Баллистика-Сервис» создан новый центр планирования наблюдений, проводятся работы по созданию базы данных измерений и орбит. Осуществляется ограниченный обмен измерительными данными ИСОН с двумя зарубежными организациями. В 2021 г. к сети добавились 3 новые обсерватории — Модра в Словакии (20 см телескоп Целестрон), Бонниваль в ЮАР (22 см телескоп СРТ-220, перемещенный из Пулковской обсерватории) и Корла в Китае (36 см телескоп китайской разработки). Несколько ранее начались совместные работы с обсерваторией Коттамия в Египте (28 см телескоп Целестрон) [6]. Проводятся ремонтно-восстановительные работы в обсерваториях сети (сокращение финансирования привело к прекращению наблюдений 50% обсерваторий ИСОН), а также повышение степени автоматизации телескопов (устанавливаются фокусировочные устройства собственной разработки).

Обновленную сеть ИСОН составляют 32 телескопа МИП в 19 наблюдательных пунктах и 12 инструментов 10 обсерваторий-партнеров, заключивших договора о научно-техническом сотрудничестве с МИП «ИСОН Баллистика-Сервис». Кроме того, наблюдательные программы ИСОН реализуются еще на 10 более крупных телескопах, на которых наблюдательное время получается по научным заявкам. Географическое расположение и названия 30 обсерваторий, участвующих в сети ИСОН, показано на рис. 1.

В рамках ИСОН воссоздана обзорно-поисковая сеть, реализующая с использованием телескопов VT-78a (в Уссурийске, Хуралтоготе, Мульте и Тирасполе), ORI-22 (в Китабе, Абастумани, Андрушевке и Кастельгранде), ORI-25 (в Урумчи, Чугуеве, Тирасполе, Косале и Нуэво-Леоне) принцип т.н. «сплошных» обзоров в широкой полосе 18 градусов [1]. С ее помощью решается задача обнаружения и сопровождения всех ГСОобъектов с блеском ярче 15.5^m с целью самостоятельного ведения каталога, обеспечивая полное перекрытие ГСО.

4. Результаты наблюдений космического мусора

Поскольку в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН ежесуточно рассчитываются прогнозы опасных сближений для ЦУП ЦНИИМаш, то в базу данных ИПМ попадают помимо измерений ИСОН и данные обсерваторий Роскосмоса. На рис. 2 показано изменение количества космических объектов (КО) в базе данных ИПМ по годам по типам орбит.



Рис. 2: Изменение количества КО в базе данных ИПМ по годам (2016–2021) по типам орбит — ГСО, высокоэллиптических (ВЭО) и средневысоких (СВО).



Рис. 3: Распределение КО на ГСО, ВЭО и СВО по величине блеска.

На конец 2021 г. база данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН содержала орбитальную информацию по 7829 КО (2537 ГСО, 4753 ВЭО и 539 СВО). Распределение этих КО по величине блеска представлено на рис. 3.

С использованием телескопов апертурой 40–80 см были отработаны методы обнаружения и сопровождения слабых ГСО-объектов. Эти работы позволили впервые в России открыть малоразмерные фрагменты космического мусора на высоких орбитах и подтвердить наличие облаков фрагментов на ГСО и ВЭО, порожденных разрушениями спутников и ступеней ракет. Впервые в мире было отработано сопровождение объектов с большим отношением площади к массе на длительных интервалах времени, что позволило ре-



Рис. 4: Распределение КО на ГСО, ВЭО и СВО по величине отношения площади к массе.

Таблица 2: Сравнение производительности обзорных оптических комплексов.

Название	Апертура, см	ПЗС-чип, мм	Поле зрения, град	Измерения	Проводки	KO
ЭОС-15	4×19.2	36×24	9×14	66000	7500	1200
Сова-25	2×25	50×50	$7{\times}14$	34000	5000	980
VT-78a	19.2	36×36	7×7	14500	2250	488
Сантел-400з	40	$50{\times}36$	4×5.5	5765	934	409

конструировать их орбиты, проанализировать баллистическую эволюцию и определить источники образования. По оценкам [7], объекты с отношением площади к массе больше $1 \text{ м}^2/\text{кг}$ составляют не менее половины популяции фрагментов космического мусора на высоких орбитах. В базе данных сопровождается 1377 подобных КО (516 ГСО, 770 ВЭО и 91 СВО), что составляет 17.6% известной популяции. Распределение этих КО по величине отношения площади к массе представлено на рис. 4.

Из рис. 2 видно, что состояние каталога начало ухудшаться, начиная с января 2020 г. Одной из причин этого является деградация сети ИСОН. Вместе с тем, качество каталога ярких ГСО-объектов, на которые приходится подавляющее большинство опасных сближений, продолжает оставаться хорошим — см. рис. 5. Кривыми разного цвета обозначены — общее количество ярких (до 15.5^m) КО (зеленый цвет), количество измеренных за текущую ночь КО (синий цвет) и число КО с точными орбитами (красный цвет). В качестве критерия точности орбиты выбрана ошибка 0.1 минуты по времени вдоль орбиты КО. Видно, что регулярно получаются измерения по 90% ярких каталогизированных КО, Поэтому орбиты большинства КО имеют хорошую точность и разница между общим количеством КО и КО с точными орбитами (между зеленой и красной кривыми) — минимальная. Точные орбиты имеют 98% популяции. В связи с этим каталог в части ярких ГСО-объектов может использоваться для достоверных прогнозов опасных сближений.

Данные с 80-см телескопа K-800 на пике Терскол используются для верификации модели ненаблюдаемой фракции KM, развиваемой в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [8].

5. Направления развития ИСОН

В настоящее время вклад ИСОН уменьшился до 5% от общего объема измерений, получаемых ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Поэтому для возобновления интереса к сети со стороны отечественных заказчиков необходимо существенно увеличить производительность сети. Первоначально такие ожидания были связаны с вводом в строй нового 40-см телескопа САНТЕЛ-4003 в Мульте с полем зрения 4×5.5 градусов. С его помощью предполагалось производить полные глубокие обзоры ГСО с детектированием фрагментов до 17^m. Но пока не удалось достигнуть равномерного качества изображения по всему полю зрения, поэтому его производительность даже меньше, чем у одиночного телескопа VT-78a (см. табл. 2).

Как видно из табл. 2, наибольшая производительность у 4-трубного комплекса ЭОС-15 ЭОП-2 и у 2-трубного комплекса Сова-25 ОЭК ОКМ, см. на рис. 6 их сравнение по количеству и блеску измерений.



Рис. 5: Состояние каталога ярких ГСО-объектов.



Рис. 6: Распределение КО по блеску в измерениях, получаемых за ночь средствами ЭОС-15 (комплекс ЭОП-2 в Благовещенске) и Сова-25 (комплекс ОЭК ОКМ в Бразилии) Роскосмоса.

Принято решение разработать аналоги обоих типов комплексов. Будут применены 20-см и 28-см телескопы китайского производства. Четырехтрубная система должна иметь поле зрения 7 × 10.5 градусов, а двухтрубная — 6 × 12 градусов.

6. Заключение

В 2004–2011 гг. в рамках проекта ПулКОН/НСОИ АФН/ИСОН была создана глобальная кооперация обсерваторий, впервые в стране перекрывшая наблюдениями всю ГСО. Проект ИСОН стал инкубатором инновационных решений в области монтиторинга высоких околоземных орбит, которые были внедрены при создании обсерваторий Роскосмоса и организаций промышленности. С 2019 г. началось ухудшение параметров сети ИСОН, что потребовало поиска новых организационных решений. ИСОН начала финансироваться за счет грантов и зарубежных договоров через ООО МИП «ИСОН Баллистика-Сервис», что позволило возобновить развитие сети. Пробные наблюдения были проведены в 4-х новых обсерваториях в ЮАР, Китае, Египте и Словакии.

С января 2020 г. началось ухудшение параметров каталога — в особенности снизилось количество ВЭОобъектов. На конец 2021 г. в базе данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН поддерживались орбиты 7829 КО (2537 ГСО, 4753 ВЭО и 539 СВО), в том числе 1377 с большим отношением площади к массе. При этом 98% орбит ярких ГСО-объектов сохраняют высокую точность.

Параметры каталога планируется улучшить путем развития сети ИСОН, предполагается разработать и изготовить 3 высокопроизводительные системы — один 4-трубный комплекс с полем зрения 7×10.5 градусов и два 2-трубных комплекса с полем зрения 6×12 градусов.

Список литературы

- 1. I. E. Molotov, V. A. Voropayev, A. N. Yudin, D. E. Ivanov, E. A. Aistov, and G. K. Borovin, *Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea economic cooperation*, **4** (2), 110, 2017.
- V. Kouprianov and I. Molotov, in T. Flohrer and F. Schmitz, eds., Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 7, 475 (2017).
- 3. L. Elenin and I. Molotov, Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya, 6, 83, 2020.
- 4. V. D. Shilin, A. P. Lukyanov, I. E. Molotov, V. M. Agapov, and A. E. Kolessa, *Ecological bulletin of scientific centers* of the Black Sea economic cooperation, 4 (2), 171, 2013.
- 5. A. P. Lukyanov, V. N. Lagutkin, M. A. V., A. E. Kolessa, et al., *Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea* economic cooperation, 4 (3), 101, 2013.
- 6. A. M. Abdelaziz, S. K. Tealib, and I. Molotov, Astrophysics and Space Science, 366, 81, 2021.
- 7. V. M. Agapov, I. E. Molotov, G. K. Borovin, and A. I. Strel'tsov, *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii*, **2** (98), 1, 2020.
- 8. G. K. Borovin, M. V. Zakhvatkin, V. A. Stepan'yants, and I. V. Usovik, Preprinty IPM im. M.V. Keldysh, 75, 2021.

Сравнительный анализ стратегий обзора неба в целях противодействия астероидно-кометной опасности

Прохоров М.Е., Захаров А.И., Тучин М.С., Кузнецова И.В.

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

Малые тела солнечной системы, вызывающие проблемы астероидно-кометной опасности (AKO), можно условно разделить на «астероиды» и «кометы». Сегодня мы можем предсказать орбиты потенциально опасных астероидов с необходимой точностью, за исключением недавно открытых, на 100–200 лет вперед. Для предсказания столкновения с «астероидами» необходимо составить как можно более полный их список и регулярно улучшать параметры их орбитального движения. Сегодня мы уже знаем практически 90% опасных астероидов размером 1 км и более, но список 100-м опасных астероидов полон по разным оценкам не более, чем на 10%. Ситуация с «кометами» иная. Под такими объектами подразумеваются ранее неизвестные кометы и астероиды, которые должны столкнуться с Землей при первом пролете через внутренние области Солнечной системы после их открытия. Стратегия обнаружения «опасных комет» коренным образом отличается от обнаружения и наблюдения опасных «астероидов». Для «опасных комет» должен вестись постоянный обзор всего неба с целью как можно более раннего их обнаружения.

Поступила в редакцию 11.05.2022 г. Принята в печать 05.06.2022 г.

Ключевые слова: астероидно-кометная опасность, обзор неба, предупреждение

Comparative Analysis of Sky Survey Strategies to Counter Asteroid-Comet Hazard

Prokhorov M.E., Zakharov A.I., Tuchin M.S., Kuznetsova I.V.

Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia

Small bodies of the Solar System that cause problems of asteroid-comet hazard can be divided into "asteroids" and "comets". Today we can predict the orbits of potentially hazardous asteroids with the required accuracy, with the exception of recently discovered ones, 100–200 years ahead. To predict collisions with "asteroids" it is necessary to compile as complete a list as possible and regularly improve the parameters of their orbital motion. Today, we already know almost 90% of dangerous asteroids 1 km in size or more, but the list of 100 m dangerous asteroids is complete, according to various estimates, by no more than 10%. The situation with "comets" is different. Such objects are previously unknown comets and asteroids, which should collide with the Earth during the first passage through the inner solar system after their discovery. Discovery strategy "dangerous comets" is fundamentally different from detection and observation of dangerous "asteroids". For "dangerous comets" a continuous survey of the entire sky should be carried out in order to detect them as early as possible.

Received 11.05.2022. Accepted 05.06.2022.

Keywords: asteroid-comet hazard, sky survey, disclosure

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.013

1. Введение

Опасные для Земли космические объекты можно разделить на две группы, обнаружение и наблюдения которых надо вести разными методами. К первой группе относятся так называемые *потенциально опасные* объекты — астероиды, удовлетворяющие следующим условиям: 1) их перигелийное расстояние $q \equiv a(1 - e) < 1.3$ а.е.; 2) орбита астероида приближается к орбите Земли на расстояние $d_{\min} < 0.05$ а.е.; 3) эти астероиды имеют достаточно крупные размеры D > 100 м (в США обычно используют граничное значение D > 140 м) [1].

Основная особенность опасных объектов этой группы состоит в том, что столкновение Земли с ними произойдет через 30–50–100 или более лет, за которые каждый опасный объект совершит несколько оборотов вокруг Солнца и, возможно, несколько раз сблизится с Землей. Примером такого объекта может служить астероид (99942) Апофис — самый опасный астероид начала XXI века. Вскоре после открытия в 2004 г. было обнаружено, что он может столкнуться с Землей в 2036 г. (т.е. через 32 года после обнаружения астероида). Последующее уточнение орбиты астероида показало, что в 2036 г. столкновения не будет, но оно возможно позднее, т.к. Апофис сближается с Землей каждые 8–9 лет [2].

Ко второй группе относятся «опасные кометы», которые сталкиваются с Землей при первом после их открытия пролете мимо Солнца. Столкновение может произойти как при движении кометы к Солнцу, так и при удалении от него после прохождения перигелия. Условное название этой группы указывает, что принадлежащие к ней объекты скорее всего будут двигаться по вытянутым «кометоподобным» орбитам с большими эксцентриситетами, хотя и присутствие астероидов в этой группе не исключено.

Особенностью «опасных комет» является то, что после их обнаружения до момента столкновения с Землей остается всего несколько лет или даже месяцев.



Рис. 1: Рост числа известных потенциально опасных объектов со временем [10].

Длительный период времени до столкновения с потенциально опасными объектами позволяет применять к ним слабые, но длительные методы противодействия. Для «опасных комет» эти методы не эффективны, к ним надо применять сильные методы воздействия — кинетические или взрывные — причем чем раньше, тем лучше [3]. Также различаются методы обнаружения и контроля опасных космических объектов, принадлежащих к этим двум группам.

2. Обнаружение и контроль потенциально опасных объектов

Работа с потенциально опасными объектами распадается на два этапа. На первом шаге эти объекты надо обнаружить и каталогизировать (занести в список или в базу данных). На втором шаге — уточнять их орбиты и предсказывать возможные столкновения с Землей. Сегодня точности определения орбит хватает на проведение подобных предсказаний на 100–300 лет вперед.

При обнаружении возможного столкновения к соответствующему астероиду должны быть применены меры для отклонения его от Земли. Какие именно меры — зависит срока до столкновения и от возможных технологий воздействия, которые сегодня быстро прогрессируют [3].

Механизмы появления потенциально опасных объектов известны [4]. Примерно 95% потенциально опасных объектов происходят из главного пояса астероидов. Они концентрируются к плоскости эклиптики, и, в принципе, можно разработать высокоэффективную стратегию обзора неба, которая позволила бы обнаруживать наибольшее количество опасных астероидов в единицу времени для их каталогизации.

Однако сегодня эта задача не актуальна. В настоящее время выполняется рад проектов, проводящих массовые обзоры неба: Lincoln Near-Earth Asteroid Research (LINEAR) [5], Catalina Sky Survey [6], Pan-STARRS [7], Zwicky Transient Facility [8] и ряд других. Ожидается, что в 2023 г. заработает самый большой обзорный телескоп LSST [9]. Все эти программы, некоторые больше, другие меньше, открывают потенциально опасные астероиды.

На рис. 1 показан рост числа известных потенциально опасных объектов по годам в зависимости от их размера по данным сайта CNEOS [10]. Из этого рисунка видно, что сегодня рост числа потенциально опасных объектов размером более 1 км вышел на насыщение. Вероятно, мы уже знаем около 90% таких объектов. Новые километровые объекты сегодня открывают примерно раз в три месяца. У объектов крупнее 140 м насыщения не наблюдается. Их открывают ежедневно, вероятно, мы знаем не более 10–15% таких объектов. Аналогичная картина наблюдается и для более мелких объектов.

Можно ожидать, что при продолжении проводимых сегодня массовых обзоров неба через 20–30 лет мы будем знать практически все потенциально опасные объекты размерами больше 100 или 140 м. Далее останется только обновлять этот список и следить за движениями включенных в него потенциально опасных объектов. Оптимальное решение этой задачи — интересная проблема, выходящая за рамки настоящей работы.



Рис. 2: Критические поверхности для t = 20 сут. (пунктирный черный контур) и 10 сут. (сплошной черный контур). Голубая пунктирная дуга — часть орбиты Земли. Крестами отмечены положение Солнца и точка столкновения. Синие кружки — положения Земли за 20 и 10 сут. до столкновения.

3. Обнаружение «опасных комет»

3.1. Геометрия

Второй класс опасных объектов требует совершенно другого подхода. Каталогизация «опасных комет» не имеет особого смысла, поскольку мы наблюдаем их только во время пролета вблизи Солнца, что не позволяет с достаточной точностью определять параметры их орбит. Помимо этого, если «опасная комета» обладает кометной активностью, т.е. теряет вещество в результате прогрева излучением Солнца, то орбита объекта может непредсказуемо измениться под действием этих негравитационных сил.

Таким образом, обнаружение «опасных комет» сводится к проведению постоянного обзора неба с целью обнаружения этого класса объектов. При этом к обзору предъявляются следующие требования.

- Обзор должен охватывать все небо, поскольку орбиты долгопериодических комет с периодами обращения P > 1000 лет изотропно распределены по небесной сфере и не показывают концентрации к плоскости эклиптики, в отличие от комет с более короткими периодами [1].
- 2. Обзор должен обнаруживать кометы на достаточно большом удалении от Земли, чтобы за оставшееся до столкновения время можно было принять меры противодействия [3]. Естественно, при проведении такого обзора «опасные кометы» с ядрами разного размера будут регистрироваться на разных расстояниях.
- 3. Обзор должен быть достаточно быстрым. Время проведения одного полного цикла обзора небесной сферы должно быть, по крайней мере, в несколько раз меньше времени, остающегося у обнаруженной «опасной кометы» до столкновения с Землей.

Выполнение первого условия при использовании для обнаружения «опасных комет» наземных средств требует проведения наблюдений из нескольких обсерваторий, расположенных по разные стороны экватора. В то же время для обзора небесной сферы из космоса достаточно одного космического аппарата.

Обращаем внимание, что при соблюдении перечисленных требований обзор не обязан быть равномерным, т.е. к различным участкам неба могут применяться разные времена экспозиции.

При обнаружении «опасных комет» следует ориентироваться на максимально возможную скорость их движения относительно Солнца. Если «опасная комета» принадлежит Солнечной системе, то ее орбита может быть эллиптической или параболической. При этом максимальная скорость движения на том же расстоянии от Солнца достигается в последнем предельном случае.

Параболическая скорость может быть существенно превышена, если «опасная комета» движется по гиперболической траектории с высоким эксцентриситетом. Такая ситуация возможна только для межзвездных



Рис. 3: Критические поверхности для t = 30 сут. (сплошная красная линия), 20 сут. (пунктирный черный контур) и 10 сут. (сплошной черный контур). Голубая пунктирная дуга — часть орбиты Земли. Крестами отмечены положение Солнца и точка столкновения. Синий кружок — положение Земли за 30 сут. до столкновения.

объектов. За все время астрономических наблюдений таких объектов было зарегистрировано два: межзвездный астероид 1I/Oumuamua, открытый в 2017 г. [11] и межзвездная комета 2I/Borisov, открытая в 2019 г. [12]. Статистика межзвездных комет и астероидов на сегодняшний день явно недостаточна, но их гораздо меньше, чем комет, принадлежащих Солнечной системе, которых на сегодня известно более 4000 [13].

Далее мы будем рассматривать только «опасные кометы», принадлежащие Солнечной системе, которые не могут двигаться относительно Солнца быстрее, чем с параболической скоростью. Рассмотрим следующий вопрос: из какой области пространства могут прилетать «опасные кометы», если столкновение с Землей произойдет спустя время t от настоящего момента?

Для этого введем инерциальную систему координат, в центре которой расположено Солнце, а оси координат x и y лежат в плоскости эклиптики. За единицу измерения выберем астрономическую единицу. В этой системе орбита Земли будет представлять собой единичную окружность с центром в начале координат. Пусть столкновения «опасных комет» с Землей происходят в момент времени t в точке C (collision) с координатами x = 0, y = 1.

Земля движется по орбите с круговой скоростью $v_{\oplus} \simeq 30$ км/с. Самые быстрые «опасные кометы» движутся по параболическим траекториям, их скорость вблизи орбиты Земли равна $v_2 = \sqrt{2}v_{\oplus} \simeq 42$ км/с. Построив семейство параболических траекторий, проходящих через точку столкновения C и продлив их назад по времени к моменту времени t = 0 мы получаем поверхность, на которой должны были находиться «опасные кометы», движущиеся с параболическими скоростями. Более медленные «опасные кометы», движущиеся по эллиптическим орбитам, будут находиться внутри этой поверхности.

На рис. 2 показаны эти поверхности для двух интервалов времени до столкновения t = 10 сут. и t = 20 сут. За t = 10 сут. кометы с параболической скоростью проходят примерно 0.25 а.е. На таких расстояниях от Земли параболическая скорость кометы меняется незначительно, поэтому движение комет в этом интервале времени почти прямолинейное, а поверхность, на которой располагаются параболические кометы за 10 сут. до столкновения, близка к сфере. Земля в момент t = 0 находится внутри этой сферы на расстоянии 0.17 а.е. от точки столкновения.

При t = 20 сут. ситуация выглядит аналогично, но изменения параболической скорости становятся более заметными, в результате чего поверхность, на которой находятся кометы в момент времени t = 0, вытягивается в сторону Солнца.



Рис. 4: Критические поверхности для t = 1 мес. (сплошная красная линия), 2 мес. (красный пунктир), 3 мес. (средний черный сплошной контур), 6 мес. (пунктирный черный контур) и 9 мес. (внешний контур). Голубое одиночное кольцо — орбита Земли.

Ситуация коренным образом меняется для t = 30 сут., как показано на рис. 3. Это связано с тем, что указанное время превышает характерное время t_p , за которое объект, движущийся радиально с параболической скоростью, проходит расстояние от орбиты Земли до центра Солнца в прямом или обратном направлении

$$t_{\rm p} = \int_{0}^{a_{\oplus}} \frac{dr}{\sqrt{2GM/r}} = \frac{2a_{\oplus}^{3/2}}{3\sqrt{2GM}} \approx 27.5 \text{ сут.},$$

где $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ c}^{-2}$ — ньютоновская гравитационная постоянная, $M_{\odot} = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ — масса Солнца, $a_{\oplus} = 1$ а.е. — полуось Земной орбиты.

Для $t > t_p$ «опасные кометы» разделяются на две группы, те, у которых столкновение с Землей происходит при движении к Солнцу, до пролета кометой перигелия, и при удалении от Солнца, уже после перигелия. Граница критической области расщепляется на «грушеобразную» внешнюю поверхность и на близкую к сфере внутреннюю. На внешней поверхности располагается первая группа комет, на внутренней — вторая. Две поверхности касаются друг друга в точке, противоположной точке столкновения.

На рис. 4 и 5 показаны критические поверхности для нескольких бо́льших значений t: на рис. 4 — в несколько месяцев, на рис. 5 — в несколько лет (1 мес. = 30 сут.). По мере роста t размеры обеих полостей критической поверхности возрастают, но на рис. 4 внешняя поверхность остается «грушеобразной», а при еще бо́льших временах, на рис. 5 — округляются.

Обращаем внимание, что траектории движения комет в поле тяготения Солнца, а, следовательно, геометрия построенных критических поверхностей, не зависят от размеров и масс комет (пока они много меньше M_{\odot}).

На всех приведенных рисунках (рис. 2-5) критические поверхности показывают положение «опасных комет», движущихся с параболической скоростью, за время t до столкновения с Землей. Вложенные двойные поверхности, показанные на рис. 3-5, соответствуют двум группам «опасных комет», см. выше. Более медленные кометы, движущиеся по эллиптическим орбитам, находятся внутри этих поверхностей.

3.2. Фотометрия

Для оценки возможности обнаружения «опасной кометы» в ходе обзора неба необходимо знать ее видимую звездную величину и фон неба в полосе чувствительности приемника излучения, который будет использоваться в обзоре неба. Одним из возможных вариантов является обнаружение солнечного света, отраженного поверхностью опасного объекта. В этом случае обзор следует вести в видимом диапазоне, в котором излучение Солнца максимально.



Рис. 5: Критические поверхности для t = 1 год (внутренняя), 3 года (средняя) и 5 лет (внешяя). Маленькое одиночное внутренне кольцо — орбита Земли.

Выбрав любую точку положения опасного объекта на критической поверхности или внутри нее, мы легко вычисляем геометрические параметры, необходимые для расчета его видимой звездной величины: расстояния от «опасной кометы» до Земли r и до Солнца R, а также фазовый угол освещения объекта Солнцем ψ , т.е. угол Солнце-объект-Земля.

Видимая звездная величина m малых тел Солнечной системы (в том числе «опасных комет») определяется следующими соотношениями

$$\mathbf{m} = H + 5 \lg \left(\frac{r}{1 \text{ a.e.}} \cdot \frac{R}{1 \text{ a.e.}} \right) - 2.5 \lg q(\psi) \,,$$

где H — абсолютная звездная величина объекта, а $q(\psi)$ — фазовый интеграл — функция, описывающая зависимость видимого блеска малых тел Солнечной системы от фазового угла ψ . Функция $q(\psi)$ имеет следующий вид [14]

$$q(\psi) = (1 - G)\Phi_1(\psi) + G\Phi_2(\psi),$$

$$\Phi_i(\psi) = \exp\left(-A_i\left(\tan\frac{\psi}{2}\right)_i^B\right), \quad i = 1..2,$$

$$A_1 = 3.33, B_1 = 0.63, \quad A_2 = 1.87, B_2 = 1.22.$$

Здесь G — параметр наклона, индивидуальный для каждого объекта. Для астероидов он лежит в интервале -0.12 < G < 0.60, типичное значение G = 0.15.

Абсолютная звездная величина малого тела Солнечной системы *H* зависит от его размеров и геометрического альбедо *A*. Для сферического тела диаметром *D* это соотношение имеет следующий вид [15]

$$H = -5 \lg \frac{AD}{1329 \,\mathrm{km}}$$

Возможность обнаружения «опасной кометы» зависит от ее видимой звездной величины и уровня фона неба в месте наблюдения объекта. Основным источником фонового свечения за пределами атмосферы Земли является зодиакальный свет — солнечное излучение, рассеянное частицами межпланетной космической пыли. Его спектр близок к спектру излучения Солнца и к спектрам излучения, рассеянного поверхностью астероидов и ядер комет. Межпланетная пыль концентрируется к плоскости эклиптики, поэтому зодиакальный свет ослабевает с увеличением эклиптической широты и резко возрастает при приближении к Солнцу. В настоящее время созданы достаточно подробные карты поверхностной яркости зодиакального света [16, 17, 18].



Рис. 6: Сечение плоскостью эклиптики поверхности расположения «опасных комет», двигающихся по параболическим орбитам, за 30 дней до столкновения с Землей. Показаны видимые звездные величины «опасных комет» при диаметре D = 100 м и геометрическом альбедо A = 0.20.

Типичные величины поверхностной яркости зодиакального света составляют $23.6^{\rm m}/{\rm as}^2$ вблизи полюсов эклиптики (это меньше, чем галактический межзвездный фон), $23.3^{\rm m}/{\rm as}^2$ в средних эклиптических широтах, $23.0^{\rm m}/{\rm as}^2$ в плоскости эклиптики в антисолнечном направлении и возрастает до $21.5^{\rm m}/{\rm as}^2$ в диапазоне углов $30^{\circ}-45^{\circ}$ от Солнца. На меньших угловых расстояниях, менее примерно 30° от Солнца, поверхностная яркость зодиакального света настолько велика, что препятствует наблюдению опасных объектов. Будем далее называть этот конус с полураствором 30° , вершина которого расположена в центре Земли, а ось направлена на Солнце, конусом невидимости.

На рис. 6 показано распределение видимых звездных величин по критической поверхности для t = 30 сут., для астероидов диаметром D = 100 м с геометрическим альбедо A = 0.2. Распределение симметрично относительно плоскости эклиптики, минимальная и максимальная видимые звездные величины достигаются в этой плоскости. На рисунке показано распределение видимых звездных величин 100-м «опасных комет» вдоль сечения критической поверхности. Конус невидимости исключен. Видимая звездная величина на внешней критической поверхности меняется от $20.5^{\rm m}$, в направлении противоположном движению Земли по орбите, до $24.5^{\rm m}$, в направлении орбитального движения Земли. Такой большой разброс видимых звездных величин объясняется двумя причинам. Первая из них — разные расстояния от Земли до различных точек критической поверхности. Расстояние до точки, где наблюдается максимальный блеск примерно в 6 раз меньше, чем до точки минимального блеска. Вторая причина — изменение фазовых углов. На доступной наблюдениям части небесной сферы (вне конуса невидимости) фазовый угол меняется в интервале $0^{\circ} \leq \psi \leq 120^{\circ}$. Еще больший диапазон значений фазового угла ψ достигается на внутренней критической поверхности от $\psi = 0^{\circ}$ в точках, расположенных за Солнцем, до $\psi = 180^{\circ}$ в точке на пересечении с линией Земля-Солнце, но вся внутренняя критическая поверхность лежит внутри конуса невидимости.

Для однополостных критических поверхностей, которые появляются при $t < t_{\rm p} \approx 27.5$ сут., показанных на рис. 2, точки с фазовыми углами близкими как к 0°, так и к 180° присутствуют в обязательном порядке, поскольку Земля находится внутри критической поверхности, а Солнце — снаружи, и линия, соединяющая Землю и Солнце, пересекает критическую поверхность в двух точках. Однако точки с самыми большими значениями ψ будут попадать внутрь конуса невидимости, а максимальные значения ψ будут наблюдаться у объектов на границах конуса невидимости.

При $t \ll t_{\rm p}$ максимальное и минимальное расстояния от Земли до критической поверхности относятся как

$$\frac{r_{\max}}{r_{\min}} = \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{2}-1} \approx 5.8$$

При увеличении t с сохранением условия $t < t_p$ это отношение возрастает, но не очень сильно.

Таким образом, при $t < t_{\rm p}$ на критической поверхности будет наблюдаться большой перепад видимых звездных величин «опасных комет».

Для $t > t_{\rm p}$ по мере увеличения t сохраняется ситуация, описанная выше для t = 30 сут. Перепад видимых звездных величин для одинаковых по размерам «опасных комет» в разных точках неба будет оставаться большим.

Однако, как видно из рис. 4, уже при t = 2 мес.= 60 сут. размеры внутренней критической поверхности начинают превосходить орбиту Земли. Солнце и Земля оказываются внутри обеих критических поверхностей, и ситуация качественно меняется. Достижение значений фазового угла близких к 180° становится принципиально невозможным. При дальнейшем росте t возможные значения ψ будут быстро убывать — ситуация аналогичная наблюдению внешних планет с Земли. Отношение $r_{\rm max}/r_{\rm min}$ также убывает по мере «округления» критических поверхностей (см. рис. 4). Таким образом, при $t \gtrsim 2$ мес. различие наблюдаемых звездных величин «опасных комет» будет убывать по мере увеличения t.

При больших значениях t, например $t \gtrsim 1$ года (см. рис. 5), достигается следующая предельная ситуация: размеры критических поверхностей существенно превышают орбиту Земли, их форма близка к сферической, Солнце и Земля располагаются примерно в центре этих поверхностей. Следствием этого будет примерное равенство звездных величин «опасных комет» во всех направлениях.

Если видимый блеск «опасных комет» сильно зависит от направления на небе, то обзор небесной сферы имеет смысл вести с разными длительностями экспозиций для разных частей небесной сферы. В противном случае длительность проведения одного цикла обзора неба неприемлемо увеличится. При малом разбросе звездных величин всю доступную небесную сферу можно наблюдать в одном режиме (с одинаковой длительностью экспозиции).

3.3. «Опасные кометы» летящие от Солнца

При некоторых значениях t существуют «опасные кометы», которые пересекают критическую поверхность внутри конуса невидимости и все или почти все время до столкновения движутся внутри него. Такие объекты невозможно обнаружить с помощью наблюдений с Земли или с обращающихся вокруг Земли космических аппаратов.

Проблема требует решения, и несколько возможных решений были предложены.

В работах [19, 20] предложен проект космической миссии SODA, в котором один или два космических аппарата, обращающиеся по квазипериодическим орбитам вокруг точки Лагранжа L1 системы Солнце-Земля, регистрируют пролетающие внутри конуса невидимости объекты. Миссия позволяет регистрировать объекты размерами в несколько метров. Недостатком этого проекта является малое время от обнаружения опасных объектов до столкновения с Землей — не более суток

В проекте «Небосвод» [21] «опасные кометы», попадающие внутрь конуса невидимости наблюдаются с космического аппарата, движущегося по орбите Земли, но опережающего Землю или отстающего от нее по орбите на несколько десятков миллионов километров (так называемая «Earth-trailing orbit»).

Для рассмотренных выше ситуаций с $t \gtrsim 6$ мес. эта ситуация разрешается автоматически. Опасные объекты, движущиеся внутри конуса невидимости непосредственно перед столкновением, пересекают критическую поверхность вне конуса и будут обнаруживаться вскоре после пересечения этой поверхности. А опасные объекты, входящие внутрь критической поверхности внутри конуса невидимости, покидают его задолго до столкновения с Землей, и также будут обнаружены.

4. Заключение

Из всего вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

- 1. Каталогизация потенциально опасных объектов уже сегодня идет успешно и будет завершена через 20–30 лет. Проводить какую-либо оптимизацию этого процесса не требуется.
- Требуется разработка алгоритма построения оптимальной программы наблюдения для поддержания каталога потенциально опасных объектов в актуальном состоянии и повышения точности долговременного прогноза орбитального движения входящих в него объектов.
- Для обнаружения «опасных комет» требуется непрерывное проведение быстрого обзора всего неба. Глубина обзора должна обеспечивать обнаружение опасных объектов за заданное время t до их столкновения с Землей.
- Если t < t_{crit} (критическое время t_{crit} ≃ несколько месяцев), то видимые звездные величины будут существенно различаться в разных направлениях. Следовательно, выгодно вести обзор неба с различной длительностью экспозиций в разных частях небесной сферы.
- 5. Если $t > t_{crit}$, то можно вести обзор небесной сферы в одном режиме.
- 6. Значение $t_{\rm crit}$ требует уточнения.

 При t < 6 мес. существует и требует решения проблема обнаружения «комет, летящих от Солнца». При t > 6 мес. эта проблема решается автоматически.

Настоящая публикация частично подготовлена на основе научных исследований, выполненных в рамках государственного задания по теме «Разработка новых методов автономной навигации космических аппаратов в космическом пространстве» № 121102600068-5 при финансовой поддержке Минобрнауки России.

Список литературы

- 1. B. M. Shustov and L. V. Rykhlova, Asteroids and Comets Hazard. Yesterday, Today, Tomorrow (2010).
- 2. P. V. Skripnichenko and T. Y. Galushina, Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Fizika, 56, 229, 2013.
- 3. V. A. Akimov, D. O. Glazachev, V. V. Emelýanenko, A. P. Kramintsev, et al., Asteroids and Comets Hazard. Strategy of Counteraction (2015).
- 4. W. F. Bottke, A. Morbidelli, R. Jedicke, J.-M. Petit, H. F. Levison, P. Michel, and T. S. Metcalfe, *Icarus*, **156**, 399, 2002.
- 5. G. H. Stokes, H. E. M. Viggh, F. L. Shelly, M. S. Blythe, and J. S. Stuart, Results from the Lincoln Near Earth Asteroid Research (LINEAR) Project, 1998.
- S. Larson, J. Brownlee, C. Hergenrother, and T. Spahr, in Bulletin of the American Astronomical Society, 30, 1037 (1998).
- N. Kaiser, H. Aussel, B. E. Burke, H. Boesgaard, et al., in J. A. Tyson and S. Wolff, eds., Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries, 4836, 154 (2002).
- 8. E. C. Bellm, S. R. Kulkarni, M. J. Graham, R. Dekany, et al., Proc. Astron. Soc. Pacif., 131, 018002, 2019.
- 9. A. W. Harris and E. L. G. Bowell, in American Astronomical Society Meeting Abstracts, **201**, 45.18 (2002).
- N. Jet Propulsion Laboratory, Center for near-earth object studies, https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/totals.html, 2022, [Online; accessed 12-April-2022].
- 11. Oumuamua ISSI Team, M. T. Bannister, A. Bhandare, P. A. Dybczyński, et al., Nature Astronomy, 3, 594, 2019.
- 12. P. Guzik, M. Drahus, K. Rusek, W. Waniak, G. Cannizzaro, and I. Pastor-Marazuela, Nature Astronomy, 4, 53, 2020.
- International Astronomical Union, Minor planet center, http://minorplanetcenter.net/, 2022, [Online; accessed 09-May-2022].
- E. Bowell, B. Hapke, D. Domingue, K. Lumme, J. Peltoniemi, and A. W. Harris, in R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, eds., Asteroids II, 524–556 (1989).
- 15. S. R. Chesley, P. W. Chodas, A. Milani, G. B. Valsecchi, and D. K. Yeomans, *Icarus*, 159, 423, 2002.
- 16. W. Hofmann, D. Lemke, and C. Thum, Astron. and Astrophys., 57, 111, 1977.
- 17. A. C. Levasseur-Regourd and R. Dumont, Astron. and Astrophys., 84, 277, 1980.
- 18. C. Leinert, S. Bowyer, L. K. Haikala, M. S. Hanner, et al., Astron. and Astrophys. Supp., 127, 1, 1998.
- 19. A. S. Shugarov, B. M. Shustov, S. A. Naroenkov, and M. A. Zvereva, Cosmic Research, 56, 283, 2018.
- 20. A. Shugarov, B. Shustov, and S. Naroenkov, Open Astronomy, 27, 132, 2018.
- Y. P. Kuleshov, V. L. Egorov, V. P. Misnik, Y. P. Yakovenko, et al., Ecological Bulletin of Scientific Centers of the Black Sea Economic Cooperation, 2, 89, 2013.

Космическая система обнаружения декаметровых астероидов, летящих со стороны Солнца (проект СОДА)

Шугаров А.С., Шустов Б.М.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Описана современная модификация проекта СОДА (Система Обнаружения Дневных Астероидов), предназначенного для массового обнаружения декаметровых (> 5 – 10 м) астероидов, приближающихся к Земле со стороны Солнца. В оптимальном варианте система состоит из двух космических аппаратов (КА) с тремя телескопами малой апертуры (25–30 см), размещенных вблизи точки Лагранжа L1 системы Солнце-Земля. Используется барьерный метод обнаружения. В числе новых элементов, повышающих эффективность проекта, — использование КМОП приемников с мелким пикселем, новая оптическая схема, привлечение дополнительных наземных средств (радаров). Проведено краткое сравнение двух альтернативных вариантов размещения КА — в окрестоности точки L1 и на расстоянии 10 млн. км на гелиоцентрической орбите позади или впереди по движению Земли.

Поступила в редакцию 12.05.2022 г. Принята в печать 15.06.2022 г.

Ключевые слова: объекты сближающиеся с Землей, астероидно-кометная опасность, широкоугольный космический телескоп

System of Observation of Day-time Asteroids (SODA)

Shugarov A.S., Shustov B.M.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

An updated version of the SODA project (System of Observation of Daytime Asteroids), designed for mass detection of decameter $(>5-10~{\rm m})$ asteroids approaching the Earth from the Sun is described. In the optimal variant, the system consists of two spacecraft (SC) with three small aperture telescopes (25–30 cm) located near the Lagrange point L1 of the Sun-Earth system. A barrier detection method is used. Among the new elements that increase the efficiency of the project are CMOS detectors with a small pixel, a new optical scheme and the involvement of additional ground-based instruments (radars). A brief comparison of two alternative options of SC placement is carried out — a conventional one in the vicinity of the L1 point and at a distance of 10 million kilometers in a heliocentric orbit behind or ahead of the motion of the Earth.

Received 12.05.2022. Accepted 15.06.2022.

Keywords: Near Earth Objects, asteroid hazard problem, wide field space telescope

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.014

1. Введение

Относительно мелкие астероиды размером от 10 м, хотя и не несут катастрофической угрозы в случае их столкновения с Землей, но тем не менее являются наиболее реальным источником подобной опасности в ближайшие десятилетия.

На рис. 1 показаны места зафиксированных столкновений мелких астероидов с Землей за последние несколько десятилетий [1]. Самое значительное из них — столкновение с 18-метровым Челябинским телом в феврале 2013 г. Самые мелкие кружки на рисунке соответствуют входам в атмосферу тел размером ~ 1 м. Как видно из рис. 1, относительно мелкие тела сталкиваются с Землей ежегодно. Примерно половина из них (на рис. 1 это не отмечено, но отмечено на других подобных диаграммах) приходится на тела, приходящие со стороны дневного неба, т.е. со стороны Солнца.

Современная (с учетом опыта Челябинского события) трактовка противодействия угрозе AKO (астероидно-кометной опасности) должна включать задачу обнаружения тел размером от 5–10 м, приходящих как с ночного, так и с дневного неба [2, 3, 4, 5].

Конечно, интерес вызывают не только столкновения, но и сближения с Землей астероидов любых размеров. СМИ наполнены сообщениями об очередном приближении к Земле опасного (с точки зрения СМИ) астероида. Такие явления действительно представляют интерес как в научном, так и в практическом планах.

В научном отношении информация о потоках тел различного размера через окрестности Земли важна для исследований динамической эволюции населения малых тел Солнечной системы. На рис. 1 приведена информация только о столкновениях, т.е о потоке через сечение земного шара. Простое шкалирование на бо́льший объем не вполне правомерно, т.к. полнота представленных данных не гарантирована и, главное, тела, сталкивающиеся с Землей, движутся по орбитам, испытывающим заметную гравитационную фокусировку. Для тел, проходящих на бо́льшем расстоянии от Земли, этот эффект может проявляться в иной степени. Для изучения статистики тел, проходящих через окрестность Земли, кроме наблюдений нужно применять модели. В [7] было проведено исследование популяции относительно мелких астероидов на предмет



Рис. 1: Карта крупных болидных явлений за последние десятилетия по данным NASA [1]. Желтыми кружками показаны места входа тел размером около 5 м, голубыми кружками — более мелкие тела, практически не представляющие опасность. Красным кружком отмечено Челябинское событие 15 февраля 2013 г.



Рис. 2: Распределение АСЗ по Н согласно [6].

их возможного сближения с Землей на расстояние менее 1 млн. км. Рассматривались астероиды, сближающиеся с Землей (AC3), с абсолютной астероидной звездной величиной $28 \le H \le 25$, т.е. тела размером 10–40 м. Согласно более современной модели [6] общее число AC3 с $28 \le H$ измеряется десятками миллионов (см. рис. 2).

Представляется интересным проинтегрировать движение этих тел на достаточно большом временном интервале и оценить их установившийся поток через окрестность Земли. К сожалению, число объектов слишком велико для наших вычислительных возможностей. Мы повторили исследование, проведенное в [7], на новой модели. Был проведен расчет динамической эволюции населения AC3 с $25 \le H \le 23$ и получена оценка темпа входа в околоземное пространство AC3 различных размеров, а для более мелких тел выполнено шкалирование на основе модели, представленной на рис. 2. Было взято среднее между зеленой и синей линиями (наиболее свежие публикации в приведенном на рисунке списке). Результаты проиллюстрированы

на рис. 3. На этом рисунке показано количество входов AC3 с абсолютной астероидной звездной величиной больше заданного значения H (диаметром < D) в околоземную сферу радиусом d за год.

Можно оценить как количество пролетов в данной зоне (радиусом 1 млн. км, а также радиусом, равным расстоянию до Луны), так и количество столкновений с Землей за год (нижняя кривая). По сравнению с [7] годовое количество входов АСЗ размером более 10 м в зону радиусом 1 млн. км. оказалось почти в три раза выше. Это связано с использованием уточненной модели [6] и вообще характеризует точность современных оценок.



Рис. 3: Количество входов АСЗ диаметром D в сферу радиусом d за год.

Для системного обнаружения в ближней зоне декаметровых тел, приходящих с ночного неба, могут быть использованы наземные широкоугольные телескопы умеренных апертур, аналогичные применяемым в Системе контроля космического пространства (СККП) или АСПОС (Автоматизированной системе прогноза опасных ситуаций). В то же время задача массового обнаружения дневных астероидов не может быть решена никакими наземными средствами и требует размещения телескопов в космосе на достаточном удалении от Земли.

В Институте астрономии РАН в инициативном порядке продолжаются работы по проекту СОДА (Система обнаружения дневных астероидов). Общая идея проекта такова — один или два КА будут размещены в окрестности точки L1 в системе Солнце-Земля на расстоянии около 1.5 млн. км от Земли [8]. Для массового обнаружения тел, летящих со стороны Солнца, будет использоваться метод обнаружения на оптическом барьере вокруг Земли (рис. 4), после чего наиболее опасные тела будут наблюдаться индивидуально вплоть до подлета к Земле. Для столкновительных тел время упреждения составит около 10 часов, точность предсказания области входа в атмосферу — до нескольких десятков км.

2. Проект СОДА

Окрестность точки L1 — это уникальное место, которое позволяет реализовать следующие преимущества:

- наблюдения дневных астероидов будут проводиться «в хвост», т.е. с оптимальным фазовым углом;
- относительно небольшое (менее 1 млн. км) расстояние от телескопа до области обнаружения существенно снижает требования к апертуре телескопа;
- здесь реализуется достаточно стабильная гало-орбита, требующая малого количества рабочего тела для удержания КА;



Рис. 4: Принципиальная схема работы космической системы СОДА.



Рис. 5: Концептуальный вид КА СОДА с 3-мя телескопами на платформе «Навигатор».

- есть возможность размещения двух аппаратов на достаточном удалении друг от друга для реализации наблюдений в режиме триангуляции;
- можно легко реализовать барьерный метод обнаружения, который снижает требования к производительности телескопа.

Совокупность приведенных выше особенностей делает точку L1 удачным местом для размещения системы обнаружения дневных астероидов, позволяя использовать достаточно компактные и недорогие телескопы апертурой 20–30 см с детекторами формата 4k или 6k. Основным отрицательным моментом является относительно небольшое расстояние от L1 до Земли и, следовательно, ограниченное время упреждения, которое составляет около 10 часов.

В результате проработки аванпроекта СОДА удалось разработать экономичный вариант реализации такой системы. Проект СОДА состоит из одного или (лучше) двух КА (рис. 5). Телескоп, находящийся в окрестности точки L1, будет способен обнаружить практически все тела размером более 10 м, летящие к Земле от Солнца. Показано [8], что задача может быть решена даже с помощью одного относительно небольшого телескопа оптического диапазона апертурой около 25–30 см. Вариант с двумя одинаковыми KA, разнесенными по гало орбите, оптимален, т.к. он повышает надежность и точность определения орбиты ОНТ.

Основные преимущества проекта СОДА:

- решается важная задача, нерешаемая никакими наземными средствами. Есть и научное, и прикладное значение;
- в случае реализации проекта СОДА Россия получит эксклюзивный (в настоящее время нет действующих аналогов) доступ к информации об опасных телах, летящих к Земле со стороны Солнца, причем, как видно из рис. 3, количество пролетов таких тел размером более 10 м составляет до 2000 в год в зоне радиусом ~ 1 млн. км. Иными словами, Россия получит эксклюзивный доступ к очень существенной доле (до 50%) информации об опасных астероидах, которые столкнутся с Землей или пролетят в непосредственной близости от Земли в ближайшие десятилетия;
- КА СОДА может быть создан с использованием только российских технологий, за исключением детектора, который можно купить, например, в Китае, и, возможно, некоторых электрорадиоизделий;
- экономичность полезная нагрузка (КНА) оценивается в 150–200 кг;
- при нормальной организации работ и ритмичном финансировании, требуется не более 5 лет для создания КА, проведения всех испытаний, запуска и начала летной эксплуатации.

Среди возможных сложностей проекта СОДА можно отметить необходимость создания хотя бы одной приемной наземной станции в западном полушарии для обеспечения непрерывной передачи информации. Подобная станция может быть установлена, например, на Кубе.

Критическая технология проекта СОДА — космический широкоугольный телескоп апертурой 30 см, способный каждые несколько минут осматривать конусный барьер вокруг Земли с проницанием до 17^m и обеспечивать точность угловых измерений лучше 0.5" в режиме сопровождения объекта. В [9, 10] представлена оптическая схема телескопа с полем зрения 3.75° и предапертурным поворотным зеркалом, обеспечивающим область наведения 50×120°. Время перенаведения составит не более 3 с, время однократного обзора оптического барьера вокруг Земли тремя телескопами составит 3.5 минуты.

В качестве детектора предлагается использовать современные КМОП с мелким пикселем (3–5 мкм), характеристики которых в последние несколько лет заметно улучшились [11, 12]. КМОП с мелким пикселем позволяет проектировать более компактные системы с большей информационной емкостью. Для проекта СОДА применение КМОП с мелким пикселем позволит улучшить точность определения координат без увеличения массы полезной нагрузки.

Телескопы системы СОДА оптимальны для обнаружения тел при прохождении через оптический барьер, т.е. на большом расстоянии от Земли. По мере подлета тела к Земле, т.е. с увеличением расстояния до тела, астрометрическая точность наблюдений с КА СОДА из L1 ухудшается, но появляется возможность подхвата тела наземными радарами. Это обеспечит:

- радикальное улучшение точности определения места входа в атмосферу и, соответственно, падения астероида;
- расширение проекта СОДА в сторону более мелких тел (2–5 м), хотя и с меньшей полнотой обнаружения.

Проект СОДА будет способен обнаруживать достаточное количество мелких тел размером 2–5 м в момент пересечения ими оптического барьера, однако чувствительности телескопа может не хватить для их сопровождения вплоть до подлета к Земле из-за увеличивающегося расстояния до телескопа. Передача таких мелких тел на сопровождение наземному радару обеспечит траекторные измерения вплоть до сближения с Землей.

Мелкие тела (2–5 м) несут существенно меньшую угрозу, чем декаметровые тела, однако ввиду их многочисленности, являются важными объектами для калибровки системы СОДА и обеспечения еженедельного вклада в мониторинг ОКП в области 1 млн. км.

3. О времени упреждения

Понятие астероидной опасности зачастую ассоциируется с очень крупными катастрофами, массовой эвакуацией населения, попытками отклонить или разрушить астероид ракетами и т.п. Частично этому способствует современный кинематограф, идею некоторых кинолент можно сформулировать так: «нет глобальной катастрофы — нет кассовых сборов».

Подобное восприятие вносит искажения в оценку реальных угроз в ближайшие десятилетия и разумных мерах по противодействию.

Для большинства мелких тел (5–20 м), которые могут столкнуться с Землей в ближайшие десятилетия, эвакуация не нужна и даже может быть вредна. В каких-то случаях поспешная эвакуация может привести к большим потерям, чем при отсутствии эвакуации, но с применением мер гражданской обороны.

Проект СОДА обеспечивает время упреждения около 10 ч. Этого достаточно для:

- приведения всех служб системы гражданской обороны в состояние полной готовности;
- переведения критических объектов инфраструктуры в более безопасный режим;
- досрочного завершения и отмены массовых мероприятий, особенно на объектах с большой площадью крыш (стадионы и т.п.), которые наиболее подвержены разрушениям от ударной волны;
- оповещения населения о необходимости соблюдения определенных мер гражданской обороны, если такое оповещение будет признано целесообразным.

Приведенный список мероприятий не требует разработки новых, зачастую опасных технологий, таких как ракеты с ядерными зарядами и т.п., а также их натурных испытаний с целью подтверждения эффективности.

Необходимые протоколы взаимодействия между различными ведомствами в рамках астероидно-кометной опасности могут быть утверждены в короткие сроки. Отработка протоколов взаимодействия может быть осуществлена в рамках текущих учений по гражданской обороне.

Такой подход является экономичным и реалистичным способом уменьшить последствия от астероиднокометной опасности на ближайшие десятилетия.

Проект СОДА обеспечит полноту информирования о столкновениях с дневными астероидами, представляющих реальную угрозу в ближайшие десятилетия, а скоординированная работа всех ведомств обеспечит существенное снижение тяжести последствий от столкновения астероида с Землей.

4. Сравнение наблюдений из L1 и с орбиты Земли на большом удалении от Земли

Наиболее обсуждаемый способ увеличения времени упреждения до нескольких дней для системы обнаружения дневных астероидов — это проект размещения телескопа на большом расстоянии от Земли, например, на орбите Земли с опережением/отставанием от Земли.

На рис. 6 (справа) показан вариант размещения 1 м телескопа на расстоянии около 10 млн. км от Земли, приведены зоны видимости для тел различного диаметра [13].



Рис. 6: Зона видимости астероидов проекта СОДА (слева) и 1 м телескопа на орбите Земли на большом расстоянии от Земли [13] (справа).

Видно, что 1 м телескоп с проницанием 24^m в предложенной конфигурации не способен обнаруживать 10 м тела из-за неоптимального фазового угла и из-за большого расстояния между телескопом и зоной обнаружения. Такая концепция построения системы обнаружения дневных астероидов в действительности эффективна лишь для обнаружения достаточно крупных тел размером 30–50 м. Частота падения таких относительно крупных тел оценивается как одно событие раз в 100–500 лет. Попытки оптимизировать данную схему для обнаружения 10 м тел практически бесперспективны.

Можно попытаться немного увеличить чувствительность телескопа путем увеличения апертуры, но даже 1 м широкоугольный телескоп с крупноформатным мозаичным фотоприемником представляется чрезвычайно дорогим и сложным в реализации. Другой путь — разместить телескоп ближе к Земле, но это автоматически будет означать уменьшение времени упреждения, что обесценивает основное преимущество перед размещением аппарата в точке Лагранжа L1. Также надо отметить, что при любых раскладах подобная концепция не позволяет детектировать мелкие тела размером 2–5 м, которые наиболее многочисленны и все-таки несут определенную минимальную опасность в случае столкновения с Землей.

В сводной табл. 1 приведены основные параметры стратегий наблюдения дневных астероидов — из точки L1 на примере проекта СОДА и с помощью 1 м телескопа, расположенного на гелиоцентрической орбите на большом удалении от Земли.

Таблица 1: С	равнение СС	ДА и	наблюдений	с гелиоцент	рической (орбиты
1		<i>r</i> 1				

Параметр	L1 (СОДА) Н	а гелиоцентрической орбите
Расстояние от телескопа до области обнаружения, млн. км	0.25 - 1.5	10.8–14
Расстояние от области обнаружения до Земли, млн. км	1 - 1.5	$< \! 10$
Апертура телескопа, см	30	100
Экспозиция, с	4	180
Предельная величина, зв. вел	17	24
Полнота обнаружения 5 м тел	частично	нет
Полнота обнаружения 10 м тел	почти полная	нет
Полнота обнаружения 50 м тел	Полная	Полная
Время упреждения, сутки	0.5	5

Резюмируя, можно сделать вывод, что размещение телескопа 1 м класса на гелиоцентрической орбите с опережением/отставанием от Земли примерно на 10 млн. км. эффективно только для задачи обнаружения 50 м тел, которые сталкиваются с Землей 1 раз в несколько столетий. Такой временной интервал заведомо выходит за горизонты планирования текущих и даже перспективных космических программ.

Создание подобной системы будет иметь более научно-познавательно-исследовательский, чем прикладной смысл.

Точка L1 очень удобна для массового обнаружения летящих от Солнца тел размером от 5–10 м, система будет относительно дешевой и может быть реализована на основе доступных технологий, но время упреждения составит не более 10 ч.

5. Заключение

Проект СОДА предназначен для массового обнаружения опасных тел, приближающихся к Земле с дневного неба, используя эффективный барьерный метод.

Проект не имеет действующих аналогов, данная задача может быть решена только с помощью космического аппарата.

Время упреждения 10 ч и точность определения координат места падения в случае столкновительной орбиты (10–100 км) достаточны для действий по уменьшению ущерба (МЧС РФ, ведомства других стран).

Проект СОДА обеспечит для РФ эксклюзивный доступ (в настоящее время нет действующих аналогов) к очень существенной доле (до 50%) информации об опасных астероидах, которые столкнутся с Землей или пролетят в непосредственной близости от Земли в ближайшие десятилетия.

По оценкам, за 5 лет СОДА обнаружит ~ 10000 сближающихся с Землей тел размером > 10 м. За срок активного существования КА (до 10 лет) будет обнаружено по крайней мере несколько столкновительных тел.

СОДА — это реалистичный и «недорогой» способ расширения системы мониторинга ОКП в сторону дневной полусферы с радиусом до 1 млн. км.

Фундаментальное значение проекта СОДА — изучение популяции малых тел.

Проект СОДА прошел предварительную экспертизу в ЦНИИМаш и Совете РАН по космосу с положительными заключениями.

На КА СОДА в точке L1 возможно размещение дополнительной научной аппаратуры для изучения космической погоды.

Астероидно-кометная опасность и изучение космической погоды включены в список основных целей системы «Млечный путь».

Авторы выражают благодарность Р.В. Золотареву за проведенные расчеты динамики АСЗ.

Список литературы

- 1. NASA JPL CNEOS, Fireball and bolide data, URL https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/.
- 2. B. M. Shustov, S. A. Naroenkov, V. V. Emel'yanenko, and A. S. Shugarov, Solar System Research, 47, 288, 2013.
- 3. B. M. Shustov, A. S. Shugarov, S. A. Naroenkov, and M. E. Prokhorov, Astronomy Reports, 59, 983, 2015.

- 4. A. Shugarov, V. Shmagin, X. Boqian, A. Buslaeva, and B. Shustov, in 7th IAA Planetary Defense Conference, 100 (2021).
- 5. A. Shugarov, B. Shustov, and D. Dunham, in 7th IAA Planetary Defense Conference, 19 (2021).
- 6. M. Granvik, A. Morbidelli, R. Jedicke, B. Bolin, et al., *Icarus*, **312**, 181, 2018.
- 7. B. M. Shustov, S. A. Naroenkov, and E. V. Efremova, Solar System Research, 51, 38, 2017.
- 8. A. Shugarov, B. Shustov, and S. Naroenkov, Open Astronomy, 27, 132, 2018.
- 9. A. I. Buslaeva, V. E. Shmagin, and A. S. Shugarov, INASAN Science Reports, 6, 74, 2021.
- 10. A. S. Shugarov, V. E. Shmagin, A. I. Buslaeva, and B. M. Shustov, INASAN Science Reports, 6, 60, 2021.
- A. Shugarov, in I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, eds., Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, 171–173 (2020).
- 12. A. S. Shugarov, INASAN Science Reports, 5, 236, 2020.
- 13. X. Wang, J. Zheng, M. Li, H. Zhao, and Y. Wang, Icarus, 377, 114906, 2022.

Результаты UBVRI-фотометрии в КГО МГУ и сравнительный анализ физических и динамических параметров астероидов с вероятными признаками сублимационной активности

Щербина М.П.^{1,2}, Бусарев В.В.^{2,1}, Бурлак М.А.², Иконникова Н.П.²

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

² Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

С декабря 2021 по март 2022 г. на полуавтоматическом телескопе RC-600 КГО ГАИШ (Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ) были проведены UBVRI-наблюдения 56 астероидов (45 астеоридов Главного Пояса и 11 астероидов, сближающихся с Землей, троянских астероидов и марс-кроссеров) преимущественно примитивных типов, движущихся вблизи перигелия. Целью наблюдательной программы был охват максимального числа астероидов для уточнения их спектрального класса, а также выявления признаков вероятной сублимационной активности. Приблизительно пятая часть астероидов не имела определенного спектрального класса, который удалось оценить благодаря нашим спектральным наблюдениям. Некоторые астероиды, а именно 145 Адеона, 779 Нина, 521 Бриксия и 322 Фео, имели явные признаки сублимационной активности. Для всех включенных в данную наблюдательную программу астероидов проведен сравнительный анализ физических и динамических параметров, таких как диаметр, период вращения вокруг собственной оси, большая полуось орбиты, эксцентриситет и наклонение орбиты.

Поступила в редакцию 11.05.2022 г. Принята в печать 31.05.2022 г.

Ключевые слова: астероиды Главного пояса, фотометрия, сублимационная активность, спектральный тип

The results of UBVRI-photometry at KGO SAI MSU and comparative analysis of physical and dynamic parameters of asteroids with probable signs of sublimation activity

Shcherbina M.P.^{1,2}, Busarev V.V.^{2,1}, Burlak M.A.², Ikonnikova N.P.²

¹Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

²Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia

From December 2021 to March 2022, observations of 56 asteroids (45 Main Belt asteroids and 11 near-Earth asteroids, Trojan asteroids and Mars crossers) of mainly primitive types moving near perihelion were carried out on the semi-automatic RC-600 telescope of the CMO SAI MSU (Caucasian Mountain Observatory of the SAI MSU). The purpose of the observation program was to cover the maximum number of asteroids to clarify their spectral class, as well as to identify signs of probable sublimation activity. About a fifth of the asteroids did not have a certain spectral class, which was estimated thanks to our spectral observations. Some asteroids, namely 145 Adeona, 779 Nina, 521 Brixia and 322 Phaeo, had obvious signs of sublimation activity, and asteroids 751 Faina, 762 Pulkova and 778 Theobalda can be assumed to have activity. For all asteroids of the Main Belt included in this observation program, a comparative analysis of physical and dynamic parameters, such as diameter, rotation period around its own axis, the major semi-axis of the orbit, eccentricity and inclination of the orbit, was carried out.

Received 11.05.2022. Accepted 31.05.2022.

Keywords: Main Belt asteroids, photometry, sublimation activity, spectral type

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.1.015

1. Введение

В течение двух последних десятилетий растет количество наблюдательных фактов, свидетельствующих о возникновении у астероидов примитивных типов не только временной экзосферы, но и более интенсивной кометной активности под влиянием различных факторов [1]. Для возникновения регулярной сублимационнопылевой активности у астероидов необходимо выполнение следующих основных условий: повышенное содержание замерзших летучих соединений, сохранившихся в недрах до настоящего времени (вероятное у астероидов примитивных типов), а также значительный эксцентриситет орбиты [2, 3]. О появлении эффекта активности можно судить по изменению формы спектров отражения астероидов, нехарактерному для примитивных типов астероидов, который невозможно объяснить различиями в составе вещества этих тел, наблюдаемых при их вращении.

Нами ранее были опубликованы результаты обнаружения астероидов с сублимационной активностью [2, 4, 5, 3], а также описание некоторых эффектов, которые могут влиять на активность. Согласно данным работам было обнаружено 16 астероидов, имеющих признаки сублимационной активности, для трех из которых удалось подтвердить это явление.

С декабря 2021 по март 2022 г. в Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова (на высоте 2112 м над уровнем моря) была выполнена программа наблюдений астероидов Главного пояса и астероидов, сближающихся с Землей. Наблюдения проводились с помощью телескопа RC-600 (0.6 м), работающего в полуавтоматическом режиме и оснащенного фотоприемником Andor [6]. Целью этой наблюдательной программы являлась не только классическая задача определения и уточнения спектральных классов астероидов, но и поиск новых кандидатов в астероиды с сублимационной активностью. Из 56 объектов 45 — астероиды Главного пояса, преимущественно примитивных спектральных классов (обладающих низкотемпературной минералогией поверхностного вещества), находящиеся в момент наблюдений на перигелийных расстояниях. Для каждого астероида было снято минимум по три серии в фильтрах U, B, V, R и I. Стабильность атмосферы отслеживалась как на этапе наблюдений (наблюдения в хорошую фотометрическую погоду и при малых воздушных массах объектов), так и на этапе обработки наблюдений (на одном снимке с астероидом выбиралась контрольная звезда, отсутствие колебаний спектра данной звезды является признаком стабильности атмосферы).

Фотометрические данные обрабатывались с помощью стандартных процедур программного пакета MaxIM DL, а затем, используя в качестве стандартных звезд звезды-аналоги Солнца, мы рассчитывали значение отражательной способности астероида в каждом фильтре. Отражательная способность астероидов, состоящая из 4–5 значений на эффективных длинах волн соответствующих фильтров, соединена отрезками и нормирована на значение в полосе V. Итоги наблюдений представлены в следующих разделах.

2. Оценка принадлежности астероидов к спектральным классам на основании UBVRI-фотометрических наблюдений

Во время UBVRI-фотометрических наблюдений в КГО МГУ с декабря 2021 по март 2022 г. были получены данные для 13 астероидов, для которых ранее не был определен их спектральный тип. Оценка спектрального класса каждого такого астероида проводилась методом сравнения его аппроксимированного по UBVRI-данным спектра отражения со средними спектрами отражения астероидов разных таксономических классов. Для получения среднего спектра отражения использовалась информация о спектральных классах из статей [7] и [8] и спектры отражения из базы SMASS II [9]. Для выборки астероидов каждого класса на длине волны, равной эффективной длине волны фильтра, определялось минимальное, максимальное и среднее значения. В каждой выборке было от 4 до более 120 представителей каждого класса.

Приведем подробно результаты определения спектрального класса для астероидов 573 Реха и 916 Америка. Для остальных 11 объектов итог представим кратко в виде таблицы.

2.1. 573 Pexa

Астероид 573 Реха является астероидом Главного пояса. Его период вращения составляет 7.16633 часов, а альбедо определено равным 0.1 [10, 11].

Для расчета спектра отражения в качестве стандартной непеременной звезды использовался аналог Солнца Wolf 1059. В качестве контрольной звезды для проверки стабильности атмосферы была взята непеременная звезда ТҮС 2926-1681-1.



573 Pexa, 15/12/2021

Рис. 1: Нормированный (на 0.55 мкм) спектр отражения астероида 573 Реха, полученный по результатам UBVRI-фотометрических наблюдений 15/12/2021, в сравнении со средним спектром отражения астероидов-представителей S-класса.

Полученный спектр отражения имеет выраженный положительный градиент, характерный для высокотемпературной минералогии. Сравнение с «шаблонами» спектров отражения разных классов показало наилучшее сходство со спектрами астероидов-представителей S-класса. Спектр отражения астероида 573 и его сравнение со средним спектром отражения S-класса, показаны на рис. 1. Как видно, есть некоторое расхождение в фильтрах R и I, которое, однако, не выходит за рамки допустимого для представителей S-класса.

2.2. 916 Америка

Астероид Главного пояса 916 Америка имеет низкое альбедо, равное 0.053, а также период вращения 37.294 ч [10, 11].

В качестве звезды-аналога Солнца также была выбрана звезда Wolf 1059, а для проверки стабильности атмосферы — контрольная непеременная звезда ТҮС 2957-674-1.

Спектр отражения астероида 916 Америка представлен на рис. 2. Как показано, он имеет наибольшую близость со спектрами отражения низкотемпературных классов, а именно С и G-классов. Расхождение в фильтре I не выходит за рамки допустимого для представителей этих классов.



Рис. 2: Нормированный (на 0.55 мкм) спектр отражения астероида 916 Америка, полученный по результатам UBVRI-фотометрических наблюдений 16/12/2021, в сравнении со средним спектром отражения астероидов-представителей С- и G-классов.

2.3. Общий результат оценки спектрального класса астероидов

Для остальных астероидов, для которых ранее не был определен спектральный класс, а именно для 291 Алиса, 424 Грация, 467 Лаура, 859 Бузареа, 915 Козетта, 1 115 Сабауда, 1 398 Доннера, 1 448 Линдбладия, 1 450 Раймонда, 3 912 Лидаксум и 25 916, было проведено аналогичное сравнение со средними спектрами астероидов разных спектральных классов, а также в качестве косвенных признаков использовалась дополнительная информация (период вращения и альбедо). Для астероида 467 Лаура не удалось однозначно определить класс, для двух (291, 1450) из перечисленных есть предварительная оценка класса, для еще пяти (424, 859, 916, 1115, 1398) удалось установить преобладающий тип минералогии (соответствие с несколькими схожими классами) [12, 13], а для оставшихся (573, 915, 1448, 3812, 25916) получилось установить хорошее соответствие с представителями одного какого-либо класса. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1: Результаты определения таксономического класса астероидов по итогам UBVRI-фотометрии (КГО МГУ, 12/2021–03/2022).

Астероид	Оценка спектрального класса	Астероид	Оценка спектрального класса
291 Алиса	E (?)	1 115 Сабауда	CFP
424 Грация	CD	1 398 Доннера	AS
467 Лаура	Требуется уточнение	1 448 Линдбладия	С
573 Pexa	S	1 450 Раймонда	M (?)
859 Бузареа	СР	3 812 Лидаксум	D
915 Козетта	В	25 916	S
916 Америка	CG		

Для 11 AC3, марс-кроссеров и троянских астероидов нами сделана только оценка спектрального типа, но последующий анализ их физических и динамических параметров не проводился.

3. Астероиды с сублимационной активностью

3.1. Повторные наблюдения эффекта сублимационной активности у 145 Адеоны и 779 Нины

В настоящее время известно, что существуют так называемые активные астероиды, представляющие собой небесные тела, движущиеся по орбитам, характерным для астероидов, но, в то же время, демонстрирующие временную активность, подобную активности кометы [14]. Основным механизмом по числу обнаружений является сублимационная активность астероида [1].

В наших предшествующих работах были установлены и получены наблюдательные подтверждения повторной сублимационной активности астероидов 779 Нина и 145 Адеона [2, 4]. Астероиды наблюдались вблизи перигелия, на их спектрах отражения имелись нехарактерные для их спектральных типов пики вблизи $\sim 0.4 - 0.5$ мкм, а также изменения наклона спектра отражения. Результаты численного моделирования, проведенного с целью определения природы возникновения указанных максимумов, показывают хорошее соответствие их положения в спектре с максимумами рассеяния света на ледяных, силикатных и смешанных частицах [5].

Во время наблюдений в КГО МГУ были получены новые UBVRI-фотометрические данные для этих астероидов. Астероид 145 Адеона наблюдался 10 декабря 2021 г., спектр отражения представлен на рис. 3 вместе со спектром отражения из базы SMASS II [9], полученным на далеком от перигелия расстояния. Заметим, что пик отражательной способности находится на тех же длинах волн, что и при наблюдении данного эффекта ранее. Для исключения возможности влияния нестабильности земной атмосферы производился дополнительный контроль отсутствия колебаний спектра непеременной звезды, выбранной в качестве контрольной, во время трех серий измерений в каждом фильтре.



Рис. 3: Нормированный (на 0.55 мкм) спектр отражения астероида 145 Адеона, полученный по результатам UBVRI-фотометрических наблюдений 10/12/2021, в сравнении со спектром отражения из базы SMASS II [9].

Астероид 779 Нина классифицирован как астероид класса X, что означает смешанный состав поверхностного вещества [12, 13]. Также были получены 3 наблюдательные серии в фильтрах U, B, V, R и I. Спектр отражения данного астероида проявляет нехарактерное отличие наклона континуума спектра, хорошо видимое при сравнении со спектром отражения этого астероида из базы SMASS II [9], как показано на рис. 4. Подобное поведение было обнаружено во время наблюдений в 2016 г. при очередном прохождении астероидом перигелия [4].

Таким образом, нами было получено третье наблюдательное подтверждение сублимационной активности астероидов 145 Адеона и 779 Нина вблизи перигелия, что указывает на периодическую сублимационнопылевую активность.

3.2. Новые кандидаты в астероиды с сублимационной активностью

Важнейшей целью проведения наблюдений в обсерватории КГО МГУ в течение периода декабрь 2021 – март 2022 являлся поиск новых кандидатов в астероиды с сублимационной активностью. Для этого были



Рис. 4: Нормированный (на 0.55 мкм) спектр отражения астероида 779 Нина, полученный по результатам UBVRI-фотометрических наблюдений 11/12/2021, в сравнении со спектром отражения из базы SMASS II [9].

отобраны объекты для наблюдений преимущественно примитивных типов, находящиеся в момент проведения наблюдений вблизи перигелия.

Астероид 521 Бриксия принадлежит к примитивному таксономическому типу С и имеет низкое альбедо, равное 0.0703 [10, 11]. В рамках рассматриваемой наблюдательной программы астероид наблюдался дважды: 11/12/2021 и 16/12/2021. Аппроксимированные спектры отражения, полученные нами в декабре, а также спектр отражения данного астероида из базы SMASS II [9], представлены на рис. 5. Если смотреть относительно близости нахождения астероида около своего перигелия, то во время первых наблюдений (11/12/2021) астероид находился на меньшем гелиоцентрическом расстоянии по сравнению со вторыми наблюдениями (16/12/2021). Спектр отражения, полученный во время первых наблюдений, имеет нехарактерный для С-класса пик на длинах волн ~ 0.4 - 0.5 мкм, подобный тому, что наблюдалось для астероида 145 Адеона (рис. 3). Отсутствие изменений в спектрах контрольных звезд указывают на стабильность земной атмосферы во время наблюдений 521 Бриксии.



Рис. 5: Нормированные (на 0.55 мкм) спектры отражения астероида 521 Бриксия, полученные по результатам UBVRI-фотометрических наблюдений 11/12/2021 и 16/12/2021, в сравнении со спектром отражения из базы SMASS II [9].

Астероид 322 Фео имеет установленный класс X, означающий смешанный состав поверхностного вещества, а также альбедо 0.089 [10, 11]. Наблюдательные данные были получены 11/12/2021, спектр отражения, рассчитанный по этим данным, показывает нехарактерный для спектрального класса резкий рост отражательной способности и отрицательный градиент спектра (рис. 6). Особенно это заметно по сравнению со спектром отражения астероида из базы SMASS II [9]. Обратим внимание, что имело место такое же изменение спектра отражения, которое было у астероида 779 Нина (см. рис. 4). На стабильность земной атмосферы во время наблюдений 322 Фео указывает отсутствие изменений в спектрах контрольных звезд.



Рис. 6: Нормированный (на 0.55 мкм) спектр отражения астероида 322 Фео, полученный по результатам UBVRI-фотометрических наблюдений 11/12/2021, в сравнении со спектром отражения из базы SMASS II [9].

Кроме вышеперечисленных астероидов 322 и 521 стоит отметить еще несколько объектов, имеющих, вероятно, слабые признаки проявления сублимационной активности. Подобные колебания спектров отражения были обнаружены нами ранее у других 8 астероидов Главного пояса [3]. Для объяснения появления отклонения в длинноволновой части спектров отражения было предложено наличие пылевой экзосферы, частицы которой имеют комбинированный состав (силикаты-органика), что хорошо согласуется с численным моделированием [5].

Астероиды 751 Фаина, 762 Пулкова и 778 Теобальда принадлежат классам с низкотемпературной минералогией (С, F и F соответственно). Для каждого из них удалось получить наблюдательные данные в течение двух разных ночей. Как и при наблюдениях ранее рассмотренных астероидов, подтверждена стабильность фотометрических условий наблюдений этих астероидов по контрольным непеременным звездам. Спектры отражения данных астероидов вместе со спектрами отражения из баз SMASS II [9] и NASA IRTF [15] представлены на рис. 7, А), Б) и В) соответственно.

Надо отметить необходимость дополнительных исследований последних астероидов и получения новых наблюдательных данных для подтверждения или опровержения наличия у них сублимационной активности.

4. Сравнение динамических и физических параметров астероидов с сублимационной активностью

Как указывалось выше, в серии работ [2, 4, 5, 3] были представлены результаты обнаружения астероидов, которые при прохождении перигелия проявляют признаки сублимационной активности. В данной работе впервые представлены кандидаты в такие астероиды 521 Бриксия и 322 Фео, а также астероиды, вероятно, слабо проявляющие признаки сублимационной активности. Все обнаруженные нами объекты с указанием публикаций, в которых можно найти подробное описание спектров отражения астероидов, указаны в табл. 2. Отдельно выделены номера астероидов, для которых были зарегистрированы два и более наблюдательных проявлений данного эффекта.

Таблица 2: Список астероидов, проявляющих сублимационную активность, согласно нашим работам. Выделены номера астероидов, для которых получены два и более наблюдательных подтверждения наличия данного эффекта.

Астероиды, имеющие признаки сублимационной	Статья с подробным описанием
активности	
145, 704, 779, 1474	[2]
145,704,779	[4]
24, 449	[5]
19, 52, 177, 203, 250, 266, 379, 383	[3]
145, 779 , 521, 322, 751, 762, 778	Наблюдения в КГО МГУ,
	декабрь 2021–март 2022,
	описанные в данной статье



Рис. 7: Нормированные (на 0.55 мкм) спектры отражения, полученные по результатам UBVRIфотометрических наблюдений для A) астероида 751 Фаина (15/02/2022 и 08/12/2021); Б) астерода 762 Пулкова (25/02/2022 и 13/12/2021); В) астероида 778 Теобальда (15/02/2022 и 07/12/2021).

Для сравнения физических и динамических параметров астероидов с признаками сублимационной активности и астероидов, не проявляющих данного эффекта, были собраны из баз данных [10, 11] следующие данные: спектральный класс, геометрическое альбедо, диаметр, период вращения, значение большой полуоси, эксцентриситет и наклонение орбиты. В качестве астероидов с признаками сублимационной активности отобраны астероиды, для которых было получено повторное подтверждение сублимационной активности, а именно 145 Адеона, 704 Интерамния и 779 Нина, а также астероиды, проявившие такие признаки во время наблюдений в КГО МГУ (521 Бриксия, 322 Фео, 751 Фаина, 762 Пулкова и 778 Теобальда). Динамические и физические параметры этих астероидов приведены в табл. 3.

Распределения по параметрам представлены в виде гистограмм на рис. 8, 9 и 10, на которых отмечено положение параметров астероидов с признаками сублимационной активности. Обсудим полученные результаты.

В качестве объектов наблюдений отбирались преимущественно астероиды примитивных классов (С-тип), что показано на гистограмме на рис. 8. Как следует из сравнения со спектрами отражения образцов-аналогов Таблица 3: Физические и динамические параметры астероидов, имеющих признаки сублимационной активности, отобранные для сравнительного анализа по итогам наблюдений в КГО МГУ (декабрь 2021–март 2022), данные получены из баз [10] и [11].

Астероид	Спектральный	Геометрическое	Диаметр,	Период	<i>a</i> , a.e.	e	$i,^{\circ}$
	класс (по клас-	альбедо	KM	вращения,			
	сификации			Ч			
	Толена)						
145 Адеона	С	0.061	127.783	15.071	2.671	0.146	12.620
704 Интерамния	F	0.078	306.313	8.727	3.056	0.156	17.310
779 Нина	Х	0.157	80.572	11.186	2.664	0.227	14.578
521 Бриксия	С	0.073	107.227	28.479	2.743	0.278	10.583
$322 \Phi eo$	Х	0.089	69.855	17.585	2.782	0.245	8.046
751 Фаина	С	0.027	113.699	23.678	2.551	0.151	15.596
762 Пулкова	F	0.040	147.343	5.839	3.154	0.107	13.100
778 Теобальда	F	0.079	55.317	11.659	3.179	0.256	13.713



Рис. 8: Распределение астероидов с признаками сублимационной активности (указаны номера астероидов) по спектральному типу в сравнении с астероидами, подобного эффекта не проявляющими. Все астероиды, вошедшие в выборку, являлись объектами UBVRI-фотометрических наблюдений в КГО МГУ (декабрь 2021–март 2022), кроме 704 Интерамнии.

(метеоритов и др.), минералогия поверхностного вещества астероидов С-типов — низкотемпературная, которая не менялась под влиянием высоких температур. Объекты данного типа имеют крайне малое альбедо (0.04–0.09), плоские нейтральные спектры отражения. Предполагаемая минералогия — филлосиликаты, углерод, органика. Наиболее подходящие метеоритные аналоги — углистые хондриты, чей химический состав близок к составу протопланетной туманности Солнечной системы [13]. Именно такие астероиды могут содержать значительное количество водяного льда, что является необходимым условием для сублимационной активности. Астероиды, имеющие признаки сублимационной активности, также принадлежат в основном к С-типу.

Низкое альбедо, которым обладает подавляющее большинство отобранных астероидов (рис. 9, A) хорошо согласуется с низкотемпературным классом. Астероиды, альбедо которых больше 0.1, принадлежат к X-типу, со смешанным составом поверхностного вещества, что не противоречит возможности наличия летучих.

Как показывает распределение по диаметрам (рис. 9, Б), большинство астероидов, проявляющих признаки сублимационной активности, — крупные тела, более 80 км в диаметре. Такие тела являются наиболее сохранившимися в плане содержания в недрах водяного льда.

Распределение по периоду вращения вокруг собственной оси (рис. 9, В) показывает в основном периоды 8–12 часов, что согласуется с распространенными характеристиками астероидов С-типа.

Распределение по значению большой полуоси *a*, с одной стороны, показывает некоторый разброс параметра, а с другой — есть приоритетный диапазон 2.7–3.1 а.е. Предположительно, именно за этой зоной были сформированы астероиды примитивных типов [16].



□ Углистые (С-тип) □ Силикатные (S-тип) □ Х-класс □ Е- и М-классы

Рис. 9: Распределение астероидов с признаками сублимационной активности (указаны номера астероидов): A) по значению геометрического альбедо; Б) по диаметру (км) и В) по периоду вращения вокруг собственной оси (ч) в сравнении с астероидами, подобного эффекта не проявляющими. Все астероиды, вошедшие в выборку, являлись объектами UBVRI-фотометрических наблюдений в КГО МГУ (декабрь 2021–март 2022), кроме 704 Интерамнии.

Обратим внимание на значительный разброс значений в распределении по эксцентриситету и наклонению *i*.

5. Заключение

В работе рассмотрены результаты наблюдательной UBVRI-фотометрической программы, проведенной в обсерватории КГО МГУ с декабря 2021 по март 2022. Перечислим кратко представленные в соответствующих разделах выводы:

- для 12 астероидов удалось определить спектральные классы, ранее не установленные для данных тел. Оценки спектральных классов представлены в табл.
 Отметим, что по UBVRI-фотометрическим данным удалось оценить по спектральному классу тип минералогии поверхностного вещества.
- 2) для астероидов 145 Адеона и 779 Нина получено новое наблюдательное подтверждение имеющейся сублимационной активности. Данный эффект проявился так же, как и было замечено ранее: в необыч-



Рис. 10: Распределение астероидов с признаками сублимационной активности (указаны номера астероидов): A) по значению большой полуоси *a*, a.e.; Б) по эксцентриситету и В) по наклонению орбиты *i*,[°] в сравнении с астероидами, подобного эффекта не проявляющими. Все астероиды, вошедшие в выборку, являлись объектами UBVRI-фотометрических наблюдений в КГО МГУ (декабрь 2021–март 2022), кроме 704 Интерамнии.

ном изменении формы спектров отражения (возникновение максимума вблизи $\sim 0.4-0.5$ мкм) и/или изменение наклона спектра отражения.

- 3) обнаружены новые кандидаты в астероиды с сублимационной активностью, чьи спектры отражения имеют нехарактерные для их спектральных классов изменения, описанные в пункте 2. Астероиды 521 Брексия и 322 Фео проявляют значительные искажения спектров отражения, а астероиды 751 Фаина, 762 Пулкова и 778 Теобальда обладают слабыми признаками активности и требуют дополнительного исследования.
- 4) для обнаруженных в данной наблюдательной программе астероидов с признаками сублимационной активности и без таковых проведен сравнительный анализ физических и динамических параметров.

Выделим средние значения параметров астроидов с признаками сублимационной активности:

- С-тип, низкотемпературная минералогия;
- Низкое альбедо, что соответствует С-типу;

- Период вращения, согласующийся со средним значением астероидов С-типа;
- Диаметр 80–120 км и более, то есть крупные тела (что подразумевает лучшую сохранность вещества астероидов);
- Разброс по значениям большой полуоси *a*, эксцентриситета и наклонения орбиты *i*, что может косвенно указывать на выброс данных тел из зоны формирования Юпитера.

Щербина М.П. и Бусарев В.В. выражают благодарность за финансовую поддержку работы Российским Научным Фондом (грант РНФ 22-12-00115).

Список литературы

- C. O. Chandler, A. M. Curtis, M. Mommert, S. S. Sheppard, and C. A. Trujillo, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130, 114502, 2018.
- 2. V. V. Busarev, A. B. Makalkin, F. Vilas, S. I. Barabanov, and M. P. Scherbina, *Icarus*, **304**, 83, 2018.
- 3. V. Busarev, A. Savelova, M. Shcherbina, and S. Barabanov, Solar System Research, 56, 84, 2022.
- 4. V. Busarev, M. Shcherbina, S. Barabanov, T. Irsmambetova, et al., Solar System Research, 53, 261, 2019.
- 5. V. V. Busarev, E. V. Petrova, T. R. Irsmambetova, M. P. Shcherbina, and S. I. Barabanov, *Icarus*, 369, 114634, 2021.
- L. Berdnikov, A. Belinskii, N. Shatskii, M. Burlak, N. Ikonnikova, E. Mishin, D. Cheryasov, and S. Zhuiko, Astronomy Reports, 64, 310, 2020.
- 7. D. J. Tholen, Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry, Ph.D. thesis, The University of Arizona, 1984.
- 8. S. J. Bus and R. P. Binzel, *Icarus*, **158**, 146, 2002.
- 9. Smass: Small main-belt asteroid spectroscopic survey, http://smass.mit.edu/smass.html, accessed: 2022-03-30.
- 10. The international astronomical union minor planet center (iau mpc), http://www.minorplanetcenter.net/, accessed: 2022-03-30.
- 11. Jpl small-body database, http://ssd.jpl.nasa.gov/ssdb.cgi, accessed: 2022-03-30.
- 12. M. J. Gaffey, J. F. Bell, and D. P. Cruikshank, Journal of Environmental Sciences (China) English Ed, 98–127, 1989.
- 13. M. J. Gaffey, AIP Conference Proceedings, 1386, 129, 2011.
- 14. D. Jewitt, Astron. J., 143, 66, 2012.
- 15. Small bodies node ferret, http://sbntools.psi.edu/ferret/, accessed: 2022-03-30.
- 16. V. Busarev, arXiv preprint arXiv:1211.3042, 2012.

Содержание

Виноградова Т.А. Усредненная фазовая кривая блеска для АСЗ	2
Волынская О.А. Организационно-правовые вопросы международного сотрудничества по проблеме	
космического мусора	7
Девяткин А.В., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д., Горшанов Д.Л., Петрова С.Н., Мартюшева А.А.	
Особые астероиды в Солнечной системе	16
Золотарёв Р.В., Шустов Б.М. Динамическая шкала АСЗ: зависимость от орбитальных параметров	23
Ибрагимов А.А. Кометоцентрические координаты оси хвоста кометы 67Р/ Churyumov-Gerasimenko	30
Коробцев И.В., Мишина М.Н., Еселевич М.В. Фотометрические и траекторные наблюдения около-	
земных космических объектов в Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН	36
Крючков С.В., Николенко И.В., Ибрагимов М.А., Крючков М.С., Аршинкин С.С. Использование	
широко- и узкопольных телескопов в задачах астероидно-кометной опасности	41
Кузнецов В.Б. Определение орбит ненумерованных малых планет	44
Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А. О негравитационном ускорении в движении астероидов, сближа-	
ющихся с Землей	50
Кузнецов Э.Д. Динамическая эволюция объектов с большой парусностью в области средних и вы-	
соких орбит	56
Кузнецов Э.Д., Вибе Ю.З., Гламазда Д.В., Кайзер Г.Т., Крушинский В.В., Крючков С.В., Нароен-	
ков С.А., Перминов А.С. Определение динамических и физических характеристик астероидов,	
сближающихся с Землей, по результатам наблюдений	62
Молотов И.Е., Чжу Т., Еленин Л.В., Юй Ш. и др. Результаты исследований космического мусора	
с использованием задела проекта ИСОН	69
Прохоров М.Е., Захаров А.И., Тучин М.С., Кузнецова И.В. Сравнительный анализ стратегий об-	
зора неба в целях противодействия астероидно-кометной опасности	76
Шугаров А.С., Шустов Б.М. Космическая система обнаружения декаметровых астероидов, летя-	
щих со стороны Солнца (проект СОДА)	85
Щербина М.П., Бусарев В.В., Бурлак М.А., Иконникова Н.П. Результаты UBVRI-фотометрии в	
КГО МГУ и сравнительный анализ физических и динамических параметров астероидов с ве-	
роятными признаками сублимационной активности	93

Contents

Vinogradova T.A. Averaged total phase light curve for NEAs	2
Volynskaya O.A. Organizational and legal issues of international cooperation on the problem of space	
debris	7
Devyatkin A.V., L'vov V.N., Tsekmeister S.D., Gorshanov D.L., Petrova S.N., Martyusheva A.A. Special	
asteroids in the Solar System	16
Zolotarev R.V., Shustov B.M. Dynamic scale of NEAs: dependence on orbital parameters	23
Ibragimov A.A. Cometocentric coordinates of the tail axis of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko	30
Korobtsev I.V., Mishina M.N., Eselevich M.V. Photometrical and trajectory observations of near-Earth	
space objects at the Sayan solar observatory of the ISTP SB RAS	36
Kryuchkov S.V., Nikolenko I.V., Ibragimov M.A., Kryuchkov M.S., Arshinkin S.S. The use of wide and	
narrow-band telescopes in the tasks of asteroid-comet danger	41
Kuznetsov V.B. The determination of unnumbered planets	44
Kuznetsov V.B., Chernetenko Yu.A. On the nongravitational acceleration in the NEAs' motion	50
Kuznetsov E.D. Dynamic evolution of objects with high area-to-mass ratio in the region of medium,	
geostationary and high Earth orbits	56
Kuznetsov E.D., Wiebe Yu.S., Glamazda D.V., Kaiser G.T., Krushinsky V.V., Kryuchkov S.V., Naroenkov	
S.A., Perminov A.S. Determination of the dynamic and physical parameters of near-Earth asteroids	
from observations	62
Molotov I.E., Zhu T., Elenin L.V., Yu Sh. et al Results of space debris research using the groundwork	
of the ISON project	69
Prokhorov M.E., Zakharov A.I., Tuchin M.S., Kuznetsova I.V. Comparative Analysis of Sky Survey	
Strategies to Counter Asteroid-Comet Hazard	76
Shugarov A.S., Shustov B.M. System of Observation of Day-time Asteroids (SODA project)	85
Shcherbina M.P., Busarev V.V., Burlak M.A., Ikonnikova N.P. The results of UBVRI-photometry at	
CMO SAI MSU and comparative analysis of physical and dynamic parameters of asteroids with	
probable signs of sublimation activity	93