

Околоземная астрономия – 2022

Научно-практическая конференция с международным участием
18 – 21 апреля 2022 г.

ТЕЗИСЫ

г. Москва
2022

ПРОГРАММНЫЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Зеленый Л.М. (ИКИ РАН) – сопредседатель
Ступак Г.Г. (ЦНИИмаш) – сопредседатель
Шустов Б.М. (ИНАСАН) – сопредседатель
Баканас Е.С. (АО «РКС») – ученый секретарь
Агапов В.М. (АО «АНЦ»)
Аксёнов О.Ю. (ПАО «МАК «Вымпел»)
Бескин Г.М. (САО РАН)
Бусарев В.В. (ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова)
Вениаминов С.С. (НИИЦ ЦНИИ ВКС МО РФ)
Галушина Т.Ю. (НИИ ПММ ТГУ)
Девяткин А.В. (ГАО РАН)
Кохирова Г.И. (ИА НАН Таджикистана)
Кузнецов Э.Д. (УрФУ)
Леончак Е.Б. (ЦНИИмаш)
Медведев Ю.Д. (ИПА РАН)
Назирова Р.Р. (ИКИ РАН)
Овчинников М.Ю. (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)
Попова О.П. (ИДГ РАН)
Ростопчина-Шаховская А.Н. (КрАО РАН)
Романов А.М. (Минобрнауки)
Савельев М.И. (ГОИЧС МЧС РФ)
Шематович В.И. (ИНАСАН)

ЛОКАЛЬНЫЙ ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Левкина П.А. (ИНАСАН)
Садовский А.М. (ИКИ РАН)
Антоненко Е.А. (ИКИ РАН)
Беляев А.А. (ИКИ РАН)
Болгова Г.Т. (ИНАСАН)
Жаркова Т.Д. (ИКИ РАН)
Зубко В.А. (ИКИ РАН)
Карташова А.П. (ИНАСАН)
Устинов А.Н. (ИКИ РАН)
Щербина М.П. (ИНАСАН)
Эйсмонт Н.А. (ИКИ РАН)

ОГЛАВЛЕНИЕ

СЕКЦИЯ 1.....	4
СЕКЦИЯ 2.....	30
СЕКЦИЯ 3.....	104
СЕКЦИЯ 4.....	139

СЕКЦИЯ 1

Современное состояние
фундаментальных и прикладных исследований
космических объектов

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И ТРАЕКТОРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОКОЛОЗЕМНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В САЯНСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИСЗФ СО РАН

Еселевич М.В., Коробцев И.В., Клунко Е.В., Мишина М.Н., Горяшин В.Е., Цуккер Т.Г.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

mesel@iszf.irk.ru

К настоящему времени (март 2022 г.) количество объектов регулярно отслеживаемых системами контроля космического пространства составляет около 29800 [1]. Каждый запуск КА сопровождается не только выводением 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 основным источником орбитального мусора и приводит к дальнейшему росту его количества. 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 миллионов объектов размером от 1 мм до 1 см. Серьезную угрозу для действующих КА 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.

Существенную роль в наблюдениях и контроле объектов на высоких околоземных орбитах играют оптические телескопы. Требования к проникающей способности оптических телескопов весьма высоки. Так, для решения задач контроля околоземного космического пространства в области геостационарных орбит необходима проникающая способность до 20-21-й звёздной величины, что примерно соответствует объекту размером 10 см с коэффициентом отражения 0.15. Контроль малоразмерной фракции космического мусора (с блеском слабее 15 звёздной величины), а также космических объектов с высоким значением отношения площади к массе является сложной задачей, как с точки зрения поддержания актуальных орбитальных параметров, так и определения физических характеристик таких объектов.

1.6-метровые телескопы АЗТ-33ИК и АЗТ-33ВМ [2,3] Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН (Рис. 1) выполняют регулярные траекторные наблюдения околоземных космических объектов с блеском до 20 звёздной величины.

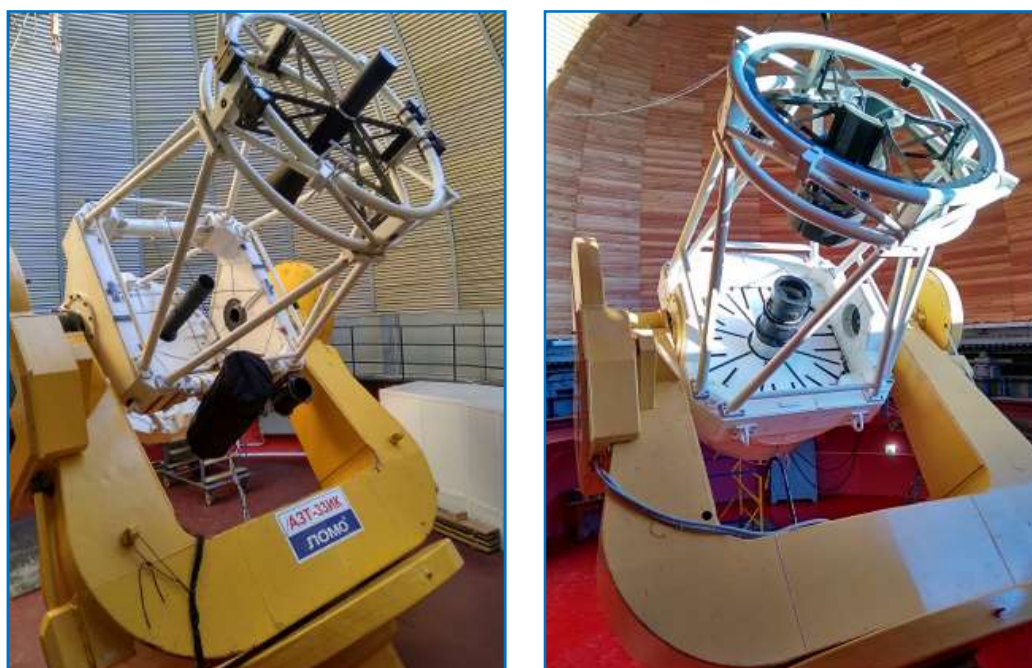


Рис. 1. Телескопы Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН, слева – телескоп АЗТ-33ИК, справа – телескоп АЗТ-33ВМ.

Совместно с определением траекторных параметров выполняются фотометрические измерения космических объектов. Оптические некоординатные наблюдения позволяют зафиксировать различные характеристики, такие как: среднее значение блеска, амплитуда изменений блеска, наличие или отсутствие периодичностей, значение периода, спектральный состав излучения и характер фазовой зависимости. Некоординатная информация, полученная оптическими телескопами, является практически единственным инструментом оценки оптических параметров высокоорбитальных космических объектов.

В докладе приводятся результаты позиционных и фотометрических измерений, связанные с контролем околоземного космического пространства. Показаны параметры некоторых фрагментов разрушения, возникших на высоких орбитах в результате взрывов разгонных блоков в 2018-2019 годах. Обсуждаются перспективы развития, как с точки зрения технического оснащения телескопов, так и методов наблюдения.

Литература

1. ESA's Space Debris Office at ESOC, Darmstadt. Space Debris by the numbers. 2022.
URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers
(дата обращения: 01.03.2022).
2. Денисенко С.А., Камус С.Ф., Пименов Ю.Д., Тергоев В.И., Папушев П.Г. Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // Оптический журнал. 2009. Т.79. № 9. С. 48–51.
3. Камус С.Ф., Тергоев В.И., Папушев П.Г., Дружинин С.А., Караваев Ю.С., Палачев Ю.М., Денисенко С.А., Липин Н.А.: Широкодиапазонный астрономический телескоп // Оптический журнал. 2002. Т. 69, № 9. С. 84-87.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МЕТЕОРОВ ПОТОКА ПЕРСЕИД

Ефремов В.В.^{1,2}, Попова О.П.², Глазачев Д.О.², Маргонис А.³, Оберст Ю.^{3,4},
Карташова А.П.⁵

¹Московский физико-технический институт, Москва, Россия

²Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

³Technische Universität Berlin, Institute of Geodesy and Geoinformation Science,
Berlin, Germany

⁴German Aerospace Center (DLR), Institute of Planetary Research, Berlin, Germany

⁵Институт астрономии РАН, Москва, Россия

efremov.vv@phystech.edu

Метеорные тела, наряду с астероидами и кометами, несут важную информацию о нашей Солнечной системе. Метеорные исследования позволяют изучать происхождение и эволюцию малых тел в околоземном пространстве и являются важнейшим средством изучения малых тел Солнечной системы в диапазоне размеров от нескольких метров до микрона. Для человеческой деятельности в космосе представляют опасность как крупные космические тела, так и небольшие – метеороиды (космические тела размером от нескольких миллиметров до 1 метра). Поэтому метеорные исследования актуальны не только для решения фундаментальной задачи изучения малых тел Солнечной системы, но и для оценки угрозы, как для космической деятельности, так и человеческой жизни.

Проблема точного определения массы, плотности и свойств вещества метеороидов остается до конца нерешенной, несмотря на длительную историю изучения метеорных явлений.

В данной работе модель абляции применяется для оценки параметров метеороидов (массы, плотности и др.) по наблюдательным данным. Для определения параметров метеорных тел требуется определить такие начальные данные, которые позволят воссоздать наблюдения путем решения системы дифференциальных уравнений, описывающих высоту, скорость, массу и кривую блеска в зависимости от времени. Рассматриваемое уравнение баланса энергии выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{2}c_h\rho_a V^3 = 4\varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) - \frac{L}{\pi R^2} \frac{dM}{dt} + \frac{4}{3}R\rho c \frac{dT}{dt},$$

где M , V – масса и скорость входа метеороида; t – время; ρ_a – плотность атмосферы на высоте полета; g – ускорение свободного падения; L – теплота абляции; c_h – коэффициент теплопередачи; T – температура тела; p_v – давление насыщенного пара; ρ – плотность тела; R – радиус тела; ε – излучательная способность; c – теплоемкость. Предполагается, что набегающий поток расходуется на излучение, нагрев и испарение метеорного тела (Лебединец, 1980).

Применяемая система уравнений использует различные предположения: коэффициент теплопередачи постоянен по траектории и равен значению в свободно молекулярном режиме $ch=1$; эффективность высвета (τ) также постоянна и составляет от 1 до 5% (Subasinghe et al., 2017). Теплота абляции и атомная масса определяются веществом, которое выбирается при задании зависимости давления насыщенного пара. Предполагается, что метеороид имеет сферическую форму и может иметь разную структуру (быть сплошным или пористым). В случае пористого тела метеороид состоит из сферических частиц при квадратной или ромбической укладке. Для определения параметров метеороидов использовались только кривые блеска, кривые торможения детально не регистрировались, но контролировалось отсутствие значительного торможения (потеря не больше 10% от начальной скорости). Также следует отметить, что на данном этапе не учитывалась фрагментация, хотя ее роль может быть заметной (Armitage and Campbell-Brown, 2020).

Для первичной апробации модели были использованы оптические метеорные наблюдения, полученные на SPOSH камерах в 2016 г. (Margonis et al., 2019). Были

выбраны метеоры потока Персеид со звездной величиной слабее – 2m, поскольку представленная модель описывает процесс абляции мелких метеорных тел (Vida et al., 2018; Armitage and Campbell-Brown, 2020).

В результате были получены оценки масс, размера и плотности 11 метеоров потока Персеид. Более подробно модель и результаты ее применения описаны в работе (Efremov et al., 2021).

Полученные оценки масс метеороидов сравнивались с оценками, вычисленными по нескольким эмпирическим зависимостям (Jacchia et al., 1967; Verniani, 1965; Jenniskens, 2006; Vida et al., 2018). Полученные нами оценки массы наиболее близки к параметрам, вычисленным по оценке из работы Vida et al. (2018) (разница до 10 раз для эффективности высвета 5% и до 2 раз при 1%). При изменении эффективности высвета с 5 до 1% масса растёт в 5 раз, плотность падает в 2.1 раз, размер увеличивается в 2.2 раза. Средняя плотность по всем метеорам составляет 362 ± 237 кг/м³, для отдельных метеоров разброс средних плотностей составляет от 114 ± 99 до 640 ± 500 кг/м³. Наши оценки плотности метеороидов потока Персеиды оказываются ниже или сравнимы с оценками других авторов, полученными в результате анализа наблюдательных данных в рамках различных моделей, и попадают в диапазон известных плотностей комет.

Плотность вещества метеороида при применении пористой модели увеличивается в несколько раз по сравнению со сплошным телом.

На первом этапе разработки нашей модели фрагментация не учитывалась, хотя ее роль может быть заметной, так как она может влиять на кривую блеска и оценки параметров метеороидов. В будущем данный эффект будет исследован. Для грубой оценки влияния фрагментации на кривую блеска ранее был предложен F-параметр (Fleming et al. 1993), параметр симметрии кривой блеска, который определяется как отношение односторонней ширины кривой блеска на 1m ниже пика к общей ширине на этом уровне. Выбранная модель лучше описывает метеороиды, для которых F – параметр превышает значение $F > 0.4 - 0.5$. Для метеороидов с высоким значением F параметра влияние фрагментации минимально, оценка параметров метеороида слабо зависит от выбранной функции невязки.

Применение модели абляции к наблюдательным данным для 11 метеоров потока Персеид позволило оценить массы, размеры и плотности метеороидов. Оценки показали, что определение массы сильно зависит от используемого давления насыщенного пара и вида невязки и близки к наименьшим из эмпирических оценок по максимальной яркости. Выбор зависимости для давления насыщенного пара сильно влияет на форму кривой блеска, качество ее приближения и оценку плотности. Плотность метеороидов определяется с большой погрешностью.

Литература

1. Лебединец, В. Пыль в верхней атмосфере и в космосе. Метеоры. — Ленинград, Гидрометеиздат 1980, — 272 с.
2. Armitage T, Campbell-Brown M. Constraining the grain mass distribution of small meteoroids using high resolution data // Planetary and Space Science. — 2020. — Vol. 186. — P. 104915.
3. Costa Gustavo CC, Jacobson Nathan S, Fegley Jr Bruce. Vaporization and thermodynamics of forsterite-rich olivine and some implications for silicate atmospheres of hot rocky exoplanets // Icarus. — 2017. — Vol. 289. — P. 42–55.
4. Efremov V., Popova Glazachev D. Margonis A. Oberst J. Kartashova A., O. Small Meteor Ablation Model: Applying to Perseid Observations // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. — 2021. — Vol. 51, N. 3, pp. 186 – 206.
5. Fleming D.E.B., Hawkes R.L., Jones J. Light curves of faint television meteors // Meteoroids and their Parent Bodies / ed. by J. Stohl, I.P. Williams. — 1993. — Astronomical Institute SAS: Bratislava, pp. 261–264.

6. Jacchia Luigi, Verniani Franco, Briggs Robert E. An analysis of the atmospheric trajectories of 413 precisely reduced photographic meteors // Smithsonian Contributions to Astrophysics. — 1967. — Vol. 10. — P. 1–139.
7. Jenniskens Peter. Meteor showers and their parent comets. — Cambridge, Cambridge University Press, 2006. — P. 790.
8. Margonis, A., Christou, A., Oberst, J. Characterisation of the Perseid meteoroid stream through SPOSH observations between 2010-2016// Astronomy and Astrophysics. 2019. 626, A25.
9. Subasinghe Dilini, Campbell-Brown Margaret, Stokan Edward. Luminous efficiency estimates of meteors-I. Uncertainty analysis // Planetary and Space Science. — 2017. — Vol. 143. — P. 71–77.
10. Verniani Franco. On the luminous efficiency of meteors // Smithsonian Contributions to Astrophysics. — 1965. — Vol. 8, No 5. — P. 141–171.
11. Vida Denis, Brown Peter G, Campbell-Brown Margaret. Modelling the measurement accuracy of pre-atmosphere velocities of meteoroids // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — Vol. 479, No 4. — P. 4307–4319.

КОМЕТОЦЕНТРИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ ПЛАЗМЕННОГО ХВОСТА КОМЕТЫ C/2019 Y4 (ATLAS)

Ибрагимов А.А.

Институт астрофизики НАН Таджикистана

a.ibragimov73@mail.ru

В работе рассматриваются условия упрощения измерения и увеличения точности в методе перспективного проектирования Штумпфа на примере измерения кометоцентрических координат кометы C/2019Y4 (ATLAS).

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОБЛЕМЫ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Клюшников В.Ю.

АО «ЦНИИмаш», г. Королев, Московская обл., Россия

klyushnikovvy@tsniimash.ru

В настоящее время космическая деятельность имеет крайне важное значение для успешного развития земных технологий, научного познания, а также для повседневного быта человека. Однако околоземное космическое пространство (ОКП) представляет собой ограниченный природный ресурс, подверженный деградации вследствие загрязнения различного рода объектами искусственного происхождения. Так, по данным сети космического наблюдения США (United States Space Surveillance Network) и статистического моделирования ЕКАна околоземных орбитах в настоящее время находятся около 5400 объектов размером более 1м, 34 000 объектов более 1 см, в том числе порядка 2 000 активных спутников, 900 000 объектов размером от 1 мм до 1 см и более 130 000 000 объектов размерности менее 1 мм.

Продолжающееся образование космического мусора (КМ) способно привести к синдрому Кesslerа, когда плотность космических объектов (КО) на околоземных орбитах станет настолько высока, что столкновения между КО и КМ, а также взрывы КО по различным причинам создадут каскадный эффект, при котором каждое разрушение будет увеличивать количество фрагментов КМ в ОКП. В результате доступ в ОКП может прекратиться: любой запуск космического аппарата будет быстро заканчиваться столкновением с КМ и аварией.

В течение почти 60 лет исследований проблемы КМ были получены важные фундаментальные и прикладные результаты, позволяющие, на основе оптических и радиолокационных наблюдений, методов компьютерного моделирования, выявить закономерности эволюции орбитальной группировки КМ, физические механизмы и закономерности столкновений и взрывов на околоземных орбитах, составить подробные каталоги КМ. На этой основе национальными космическими агентствами и международным сообществом уже в конце XX столетия были разработаны и приняты нормативные документы по ограничению загрязнения ОКП.

Однако в XXI веке, с развитием новых направлений в космонавтике, в частности с запусками малых КА и развертыванием на околоземных орбитах многоспутниковых группировок, возникли новые вызовы в проблеме КМ. Для сохранения ОКП, как природного ресурса, возможно, придется ужесточать требования по ограничению и предотвращению загрязнения ОКП, более активно реализовывать меры по быстрому удалению из операционных областей ОКП не функционирующих КО и фрагментов КМ, в глобальном масштабе выстраивать систему безопасности в ОКП.

СОВРЕМЕННЫЙ УРОВЕНЬ ЗНАНИЙ ОБ ОБЪЕКТАХ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Кохирова Г.И., Бабаджанов П.Б.

Институт астрофизики НАН Таджикистана (ИА НАНТ),

г. Душанбе, Республика Таджикистан

kokhirova2004@mail.ru

Излагаются современные представления об объектах, сближающихся с Землей. В эту популяцию входят астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), включая потенциально опасные астероиды, кометы, метеороидные рои, крупные метеороиды. Установлено, что среди известных на текущий момент АСЗ почти 5% составляют угасшие ядра комет или их фрагменты. Внешне они не отличаются от истинных астероидов, однако значительно различаются от них по динамическим и физическим свойствам. Следовательно, для их различения необходимо изучать и динамические, и физические параметры объектов. Показано, что некоторые известные метеороидные рои наряду с бесчисленным множеством мелких метеороидов содержат и крупные «угасшие» фрагменты кометных ядер, выявленные среди астероидов, сближающихся с Землей. Метеороидный рой и такие тела, принадлежащие ему, образуют астероидно-метеороидный комплекс. Приводятся доказательства этого факта на примере трех околоземных астероидно-метеороидных комплексов, выявленных авторами в последние годы.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНОГО АСТЕРОИДА 2009 ХО ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ГИССАРСКОЙ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Кохирова Г.И., Буриев А.М., Сафаров С.Н., Сатторзода А.А.

Институт астрофизики НАН Таджикистана (ИА НАНТ),

г. Душанбе, Республика Таджикистан

Представлены результаты многоцветных фотометрических наблюдений потенциально опасного астероида (438908) 2009 ХО, проведенных на телескопе АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории в период его сближения с Землей в мае 2020 г. Получены видимый и абсолютный блеск астероида и показатели цвета. Изменений блеска не выявлено. Абсолютный блеск близок к эфемеридной величине. Оценка диаметра составила $\approx 0.22 \pm 2$ км.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МЕТЕОРОВ ПО ДАННЫМ ШИРОКОУГОЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Ляпсина Н.В., Карпов С.В., Бескин Г.М., Гутаев А.Г., Иванов Е.А.

САО РАН, Нижний Архыз, Россия

nadezhdavl@inbox.ru

С 2014 года с помощью широкоугольного многоканального телескопа высокого временного разрешения Мини-МегатОРТОРА (ММТ-9) проводится мониторинг северного неба [1, 2]. За это время каждая область площадью 900 квадратных градусов наблюдалась от нескольких десятков до тысячи раз. Были зарегистрированы с временным разрешением 0.1 секунды транзистентные события различной природы и длительности — начиная с элементов космического мусора, и кончая оптическими компаньонами гамма-всплесков. Каждую ночь наблюдаются до нескольких сотен метеорных треков с максимальным блеском вплоть до 9 звездной величины.

База данных для этих объектов содержит на начало марта 2022 года более 330 тысяч метеорных событий. На Рис. 1 приводятся результаты статистического анализа совокупности характеристик наблюдаемых метеоров, возможности ММТ-9 для наблюдения метеоров сопоставляются с возможностями других метеорных сетей.

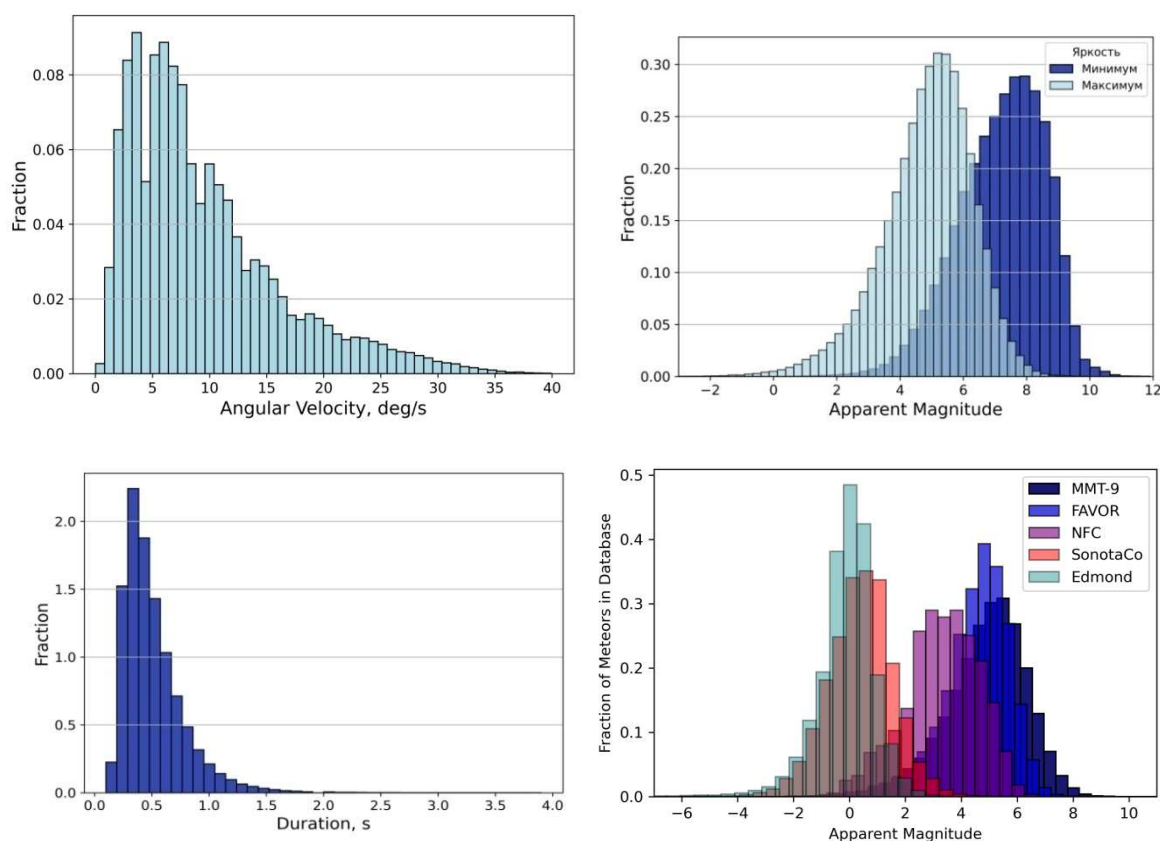


Рис. 1. Угловые скорости (вверху слева), звездные величины (вверху справа) и длительности (внизу слева) метеорных событий в базе данных ММТ-9. Максимальный блеск регистрируемых метеоров телескопами ММТ-9, FAVOR, и в метеорных сетях NFC, SonotaCo, Edmond (внизу справа).

В январе 2022 года на одном из каналов ММТ-9 была установлена объективная призма со спектральным разрешением $150 \text{ \AA}$ в диапазоне длин волн $4000 - 7000 \text{ \AA}$. На Рис. 2 приведен пример изображения спектра метеора. По предварительным расчетам, полученное спектральное разрешение позволит определять наиболее яркие линии в спектрах метеоров (Fe I, Mg I, Na I) [3] и оценивать их химический состав и особенности свечения вдоль трека.

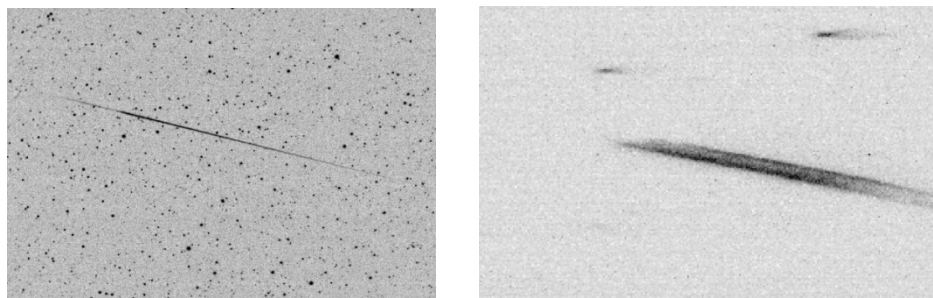


Рис. 2. Изображение метеорного трека, полученное в канале без фильтра (слева) и в канале, с установленной объективной призмой (справа).

В 2018 году был введен в тестовую эксплуатацию модернизированный широкоугольный телескоп FAVOR с полем зрения 400 квадратных градусов и временным разрешением 7.5 секунд [4]. Осенью 2018 года были проведены базисные наблюдения ММТ-9 совместно с FAVOR, в которых было зарегистрировано около 100 метеорных треков с блеском в максимуме до 7.5 звездной величины. Расстояние между инструментами составляет 3.8 км, пример метеорного события приведен на Рис. 3. Синхронные наблюдения позволили перейти в пространство орбит и исследовать динамические и кинетические параметры метеоров.

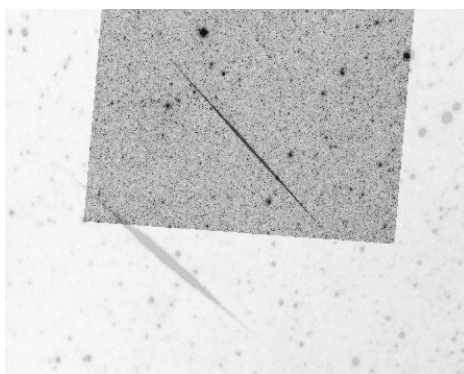


Рис. 3. Совмещенные изображения треков одного метеора, полученных на ММТ-9 (сверху) и FAVOR (снизу).

Работа выполнена в рамках государственного задания CAO РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Она поддержана Федеральной программой повышения конкурентоспособности Казанского (Приволжского) Федерального университета. Система ММТ-9 принадлежит Казанскому (Приволжскому) Федеральному университету и была создана в рамках совместного проекта CAO РАН, КФУ и ООО «Параллакс».

Литература

1. Beskin G.M., Karpov S.V., Biryukov A.V., Bondar S.F., Ivanov E.A., Katkova E.V., Orekhova N., Perkov A.V., Sasyuk V.V. Wide-field monitoring with Mini-MegaTORTORA multi-channel telescope with high temporal resolution. 2017, Astrophysical Bulletin, Volume 72, Issue 1, pp.81-92.
2. Karpov S.V., Beskin G.M., Biryukov A.V., Bondar S.F., Ivanov E.A., Katkova E.V., Orekhova N., Perkov A.V., Plohotnichenko V.L., Sasyuk V.V., Pandey J. Observations of transient events with Mini-MegaTORTORA wide-field monitoring system with sub-second temporal resolution // Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica (Serie de Conferencias), 2019, 51, pp. 30-38.
3. Borovička J., Koten P., Spurný P., Štork R., Vojacek V. Catalogue of representative meteor spectra // Astronomy and Astrophysics, 2015, Vol. 580 A67.
4. Karpov S.V., Orekhova N., Beskin G.M., Biryukov A.V., Bondar S.F., Ivanov E.A., Katkova E.V., Perkov A.V., Plohotnichenko V.L., Sasyuk V.V. // Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica (Serie de Conferencias), 2019, 51, pp. 127-130.

ОРГАНИЗАЦИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И ОБЪЕКТОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ, НА БАЗЕ РАДИОТЕЛЕСКОПОВ РСДБ-СЕТИ «КВАЗАР-КВО»

Маршалов Д.А., Бондаренко Ю.С., Медведев Ю.Д., Михайлов А.Г., Рахимов И.А.,
Дьяков А.А., Олифинов В.Г.

Институт прикладной астрономии Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
marshalov@iaaras.ru

Радиолокация является одним из наиболее точных методов получения информации о динамических и физических свойствах космического мусора и объектах, сближающихся с Землей (ОСЗ). Радиолокационные наблюдения позволяют определить размеры, форму, особенности вращения, исследовать свойства поверхности, уточнять параметры движения исследуемого объекта.

Проведение радиолокационных наблюдений предполагает наличие передающей антенной системы для облучения радиолокационной цели, приёмной антенной системы для регистрации отраженного сигнала и программного комплекса для планирования наблюдений и обработки данных. В качестве передающей антенны могут быть задействованы существующие системы дальней космической связи, такие как DSS-14 «Голдстоун» (США), П-2500 «Уссурийск», «Евпатория», ТНА-1500 «Медвежьи Озера» (Россия), DSA-3 «Маларгуэ» (ЕС, Аргентина) и другие передающие комплексы, совместимые по диапазону частот с приемными. Для приема отраженных сигналов используются радиотелескопы с диаметром главного зеркала 32 метра (РТ-32) и быстроповоротные радиотелескопы нового поколения диаметром 13.2 метра (РТ-13), входящие в состав радиоинтерферометрической (РСДБ) сети «Квазар-КВО» [1]. Радиотелескопы оснащены высокочувствительными охлаждаемыми до водородного уровня приемными системами сантиметрового диапазона длин волн [2, 3] и высокоскоростными системами преобразования [4, 5] и регистрации сигналов [6]. Планирование и обработка радиолокационных наблюдений выполняется в Институте прикладной астрономии РАН (ИПА РАН) на специализированном комплексе программных средств [7].

В докладе представлены особенности проведения радиолокационных наблюдений космического мусора и ОСЗ на базе радиотелескопов РСДБ-сети «Квазар-КВО» и даны предложения по организации регулярного радиолокационного мониторинга космического пространства в России.

Литература

1. N. Shuygina et al. Russian VLBI network «Quasar»: Current status and outlook // *Geodesy and Geodynamics*. V.10. Issue 2. 2019. P. 150-156.
2. А.В. Ипатов, Д.В. Иванов, В.В. Мардышкин. Основные характеристики приемной системы комплекса КВАЗАР // *Труды ИПА РАН*. 2005. В. 12. С. 135–151.
3. Chernov V. et al. The S/X/Ka Receiving System for Radio Telescope RT-13 of the «Quasar» VLBI Network // *Труды ИПА РАН*. 2017. В. 41. С. 79–84.
4. Маршалов Д.А., Носов Е.В., Федотов Л.В. Системы преобразования сигналов радиоинтерферометрического комплекса «КВАЗАР-КВО» // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*, 2014. № 4 (56), С.81-87.
5. Д. А. Маршалов, Е. В. Носов, Л. В. Федотов, Ю. С. Шейнман. Многофункциональная система преобразования сигналов для радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Светлое» // *Труды ИПА РАН*. 2021. В.56. С.39–47.
6. И.А. Безруков, А.И. Сальников, В.А. Яковлев, А.В. Вылегжанин. Система буферизации и передачи данных нового поколения // *Труды ИПА РАН*. 2015. В.32. С. 3–9.
7. Ю.С. Бондаренко, Д.А. Маршалов. Планирование и обработка радиолокационных наблюдений в Институте прикладной астрономии РАН // *Труды ИПА РАН*. 2018. В.47. С.3–7.

ПРИЧИНЫ ВЫСОКОЙ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ КОМЕТЫ 29P/ШВАССМАН-ВАХМАН

Медведев Ю.Д., Павлов С.Р.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

medvedev@iaaras.ru

Ядро кометы имеет значительные размеры 60.4 км в диаметре [1]. Орбита кометы – неустойчивая. Ретроспективная эволюция показывает, что были возможны тесные сближения с Юпитером. В результате сближений возможен переход на орбиты транснептуновых объектов (т.е. комета в прошлом была транснептуновым объектом). Однако имеется вероятность, что комета в прошлом какое-то время двигалась по орбитам с перигелийным расстоянием меньшим, чем 4 а.е. [2]. Комета периодически вспыхивает. Четкого периода нет, однако вспышки происходят примерно раз 50-65 дней. Яркая вспышка сопровождается, как правило, одной или несколькими более слабыми через 10-15 дней [3]. Предполагается, что поверхность ядра кометы поверхности покрыта толстым слоем пыли. Скорость пыли, вычисленная по наблюдениям телескопа Хаббл, на расстояниях менее 1200 км от ядра составила около 17 м/с [4].

Мы предполагаем, что вокруг ядра имеется облако осколков, среди которых имеются метровые и декаметровые. В результате взаимных столкновений осколков, а также из-за гравитационных возмущений со стороны Солнца и Юпитера, перицентры орбит некоторых из них становятся меньше радиуса ядра кометы. Это приводит к столкновениям осколков с поверхностью со скоростью, близкой к скорости убегания, равной 25 м/с.

Проведены модельные вычисления эволюции орбит облака осколков, находящихся внутри сферы Хилла кометы. Выявлены наиболее вероятные орбиты, на которых могут находиться данные осколки. Вычисленные периоды обращения осколков вокруг ядра близки к фиксируемому периоду вспышек. Рассчитаны объемы пыли, поднятой в результате столкновений осколков разных размеров с вычисленными углами падения, при этом варьировались размеры пылинок и толщина поверхностного слоя пыли.

Литература

1. Schambeau C. A., Fernández Y. R., Lisse C. M. et al. A new analysis of Spitzer observations of Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 // *Icarus*.— 2015. — V. 260. —P. 60-72.
2. Robertsa A. C., Munoz-Gutierrez M. A. Dynamics of Small Bodies in Orbits Between Jupiter and Saturn1 // *Icarus*.— 2021. — V.358. —ID 114201.
3. Miles R. Discrete sources of cryovolcanism on the nucleus of Comet 29P/Schwassmann–Wachmann and their origin // *Icarus*.— 2016. — V.272. —P. 387-413.
4. Miles R., Faillace G. A., Mottola S., et al. Anatomy of outbursts and quiescent activity of Comet 29P/Schwassmann-Wachmann // // *Icarus*.— 2016. — V.272. —P. 327-355.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРАТЕГИЙ ОБЗОРА НЕБА В ЦЕЛЯХ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ

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

ГАИШ МГУ, Москва, Россия

mike@sai.msu.ru

Малые тела солнечной системы, вызывающие проблемы астероидно-кометной опасности (АКО) можно условно разделить на «астероиды» и «кометы».

Столкновения с опасными «астероидами» произойдут много орбитальных оборотов Земли и опасного тела спустя от настоящего момента времени. Типичный пример такого объекта – астероид (99942) Апофис, который был открыт в 2004 году. Этот объект пройдет очень близко к Земле в 2029 г. – ближе геостационарной орбиты. В течение 10 лет после открытий считалось, при следующем после этого сближении с Землей в 2036 г. вероятность его столкновения с Землей очень высока. Более точные измерения его орбиты, полученные в 2013 г. и в последующие годы отвергли эту возможность, но Апофис будет продолжать сближаться с Землей и возможность столкновения с ним в более отдаленном будущем не исключена.

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%. А в перспективе хотелось бы знать также и все опасные объекты классов «тунгусского» и «челябинского» («чебаркульского») метеоритов.

Потенциально опасные «астероиды» должны регулярно наблюдаться таким образом, чтобы параметры их орбит были известны с точностью достаточной для определения столкновений с Землей в обозримом будущем. Такие события должны предсказываться, ожидаемые столкновения – подтверждаться, а для подтвержденных предсказанных событий должны разрабатываться и применяться планы по противодействию столкновениям. Если столкновение астероида с Землей ожидается через десятки или даже сотни лет, то к ним возможно применение малых по величине силового воздействия, но длительных по времени воздействий для отклонения их орбит от точки столкновения с Землей.

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. Для проведения таких обзоров могут быть задействованы различные астрономические средства, как наземного, так и космического базирования. Именно их рассмотрение и сравнение является целью нашей работы.

Наземные средства наблюдений могут действовать только в ночное время и в ясную погоду, что снижает их эффективность до уровня 1/2–1/3. Однако совокупность (сеть) наземных телескопов может за несколько суток провести обзор всего неба до 23^h–25^h и обнаружить любое 100-м опасное тело, по крайней мере за месяц до его столкновения с Землей. Исключения составляют только «кометы», летящие к Земле со стороны Солнца, наблюдения которых невозможны из-за большой засветки.

Наблюдения с околоземной орбиты могут вестись круглосуточно и не подвержены влиянию погодных условий. Один околоземный космический аппарат (КА) с телескопом с апертурой 1,5–2 м за несколько дней – неделю может провести такой же обзор неба, как и сеть наземных телескопов. Но «кометы», летящие со стороны Солнца, ему также

недоступны: летящие со стороны Солнца к Земле объекты практически не освещены, мы наблюдаем их в фазе «новолуния», а засветка Солнцем при малых угловых расстояниях между Солнцем и опасным объектом велика, что не позволяет такие объекты обнаруживать.

Этот недостаток может быть устранен наблюдениями с борта КА или группы КА, расположенных вблизи точки Лагранжа L1 системы Земля-Солнце. С борта таких КА можно обнаруживать опасные объекты, движущиеся вблизи точки Лагранжа L1 в сторону Земли. У таких объектов освещена Солнцем примерно половина их видимой поверхности, а фон неба – «нормальный». Из-за малых расстояний от такого КА до пролетающих объектов будут обнаруживаться даже опасные тела размерами в десятки и единицы метров (опасные тела в остальных частях неба обнаруживаются основным спутником-наблюдателем на околоземной орбите). Но обнаружение опасных тел из точки Лагранжа L1, расположенной всего в 1,5 млн километров от Земли, будет происходить за 10-20 часов до столкновения. Подобный проект – SODA – разрабатывается в ИНАСАН.

Еще один вариант – проведение обзора с КА обращающегося не вокруг Земли, а вокруг Солнца. Для длительного проведения наблюдений необходима орбита с параметрами близкими к орбите Земли.

Один из вариантов – проведение наблюдений из треугольных точек Лагранжа L4 и L5. Эти точки устойчивы, КА может находиться в них неограниченное время без применения двигателей. Также КА могут вести полный обзор неба, но могут, также как в проекте SODA, наблюдать только объекты, приближающиеся к Земле со стороны Солнца. Однако делать это за 1-2-3-... месяца до столкновения. Для этого надо наблюдать определенные участки неба.

Одновременные наблюдения из точек L4 и L5 (или из одной из этих точек и с околоземного КА) позволяют получать «стереоскопическое» изображение Солнечной системы, т.е. сразу определять расстояния до наблюдаемых астероидов и комет.

Недостатком точек L4 и L5 является их большое удаление от Земли – 150 млн км.

Еще один вариант – наблюдения с КА на так называемой трейлинг-орбите. На такой орбите работали КА «Kepler», обзоревавший звезды, и пара КА для наблюдения Солнца «Stereo». КА на таких орбитах медленно удаляются от Земли (например, КА «Kepler» удалялся от Земли на 0,1 а.е. в год).

Каждая из обозначенных стратегий обнаружения опасных космических объектов имеет свои достоинства и недостатки.

МЕТЕОРНОЕ ВЕЩЕСТВО В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Рябова Г.О.

*НИИ Прикладной математики и механики Томского государственного университета,
Томск, Россия*

galina.ryabova@mail.tsu.ru

Пылевой комплекс Солнечной системы состоит из метеороидных потоков и спорадического метеороидного фона. Главными их источниками являются кометы и астероиды. Понимание распределения и динамики метеороидов и пыли важно для проектирования надлежащей защиты космических аппаратов (КА) и планирования космических миссий. В теоретическом плане изучение межпланетной пыли и метеороидов является частью глобальной задачи формирования Солнечной системы.

Измерение интенсивности и поляризации зодиакального света, анализ кратеров на Луне и микрократеров на образцах лунных пород, наблюдения пылевых следов комет и активных астероидов, регистрация пыли на датчиках КА и вспышек, вызываемых ударами метеороидов на Луне, позволяют сделать оценки плотности падающего потока метеороидов, их скоростей и распределения по массе. Планета Земля фактически является одним большим ударным датчиком. Метеороиды, врываясь в её атмосферу, испаряются и порождают метеоры — светящиеся ионизованные следы, которые можно наблюдать визуально и с помощью различных технических средств. Пыль, образовавшуюся при испарении метеороидов, собирают в верхней атмосфере, полярных льдах и снегах. Однако все методы наблюдения имеют селективность, а интерпретация результатов зависит от наших знаний физических процессов. Свести все полученные сведения в единую согласованную модель пока не удаётся.

Динамическое поведение метеороидов и пыли определяется гравитационными силами, радиационными (радиационное давление, эффект Пойнтинга–Робертсона, эффект Ярковского–Радзиевского) силами и силами Лоренца. Поскольку параметры метеороидов среды известны не так хорошо, как хотелось бы, чаще всего применяется статистический подход и искомый параметр получается в виде некоего распределения. В последние десятилетия усиленно изучается структура резонансов (орбитальных, вековых и других) в околоземном пространстве. Хотя анализ резонансов находится за рамками нашего обсуждения, следует отметить, что резонансы могут сильно влиять на пространственное распределение вещества.

В представляемом докладе будет дан обзор литературы опубликованной в последние 20 лет по метеорному веществу в околоземном пространстве в целом, и выборочно по перечисленным выше темам.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020-0049).

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ МОДЕЛЬНОГО ПОТОКА МЕТЕОРОИДОВ КВАДРАНТИДЫ

Самбаров Г.Е.¹, Карташова А.П.²

¹*Национальный исследовательский Томский государственный университет*

²*Институт астрономии Российской академии наук, Москва, РФ*

detovelli@vtomske.ru

Малоразмерные космические тела естественного происхождения (метеороиды) могут представлять реальную угрозу для работы космических аппаратов, а тела размером в несколько сантиметров – и жизнедеятельности человека. Например, теоретические оценки и натурные эксперименты показали, что метеороид массой 10^{-6} г пробивает насквозь алюминиевый лист толщиной 0.5 мм [Koschny et al., 2017; Drolshagen et al., 2020]. Более мелкие частицы обладают меньшей разрушительной силой и вызывают только эрозию поверхности космических аппаратов. Для прогнозирования уровня метеороидной опасности для космических миссий создаются модели метеорного вещества, которые постоянно обновляются с целью учета динамической нестабильности метеорных потоков. Все модели основаны на анализе наблюдательного материала разного типа, как систематических наблюдений метеорных потоков, так и исследований родительских тел.

Метеороидный поток может оказать опасное воздействие на космический корабль. Например, спутник связи ESA Olympus потерял управление в 1993 году, вероятно, из-за воздействия метеороидного телопотока Персеиды [Caswell, 1995]. В том же году, из-за потока Персеиды, НАСА было вынуждено повернуть в противоположную сторону направление космического телескопа Хаббла, чтобы избежать повреждения линзы. Поэтому исследование динамики эволюции метеорных частиц (потоков) необходимо и для прогнозирования уровня опасности, угрожающей космической деятельности.

Для моделирования метеорного потока Квадрантид был использован метод, который хорошо себя зарекомендовал и используется многими авторами [Whipple, 1951; Crifo & Rodionov, 1997; Asher & Emel'yanenko, 2002; Ryabova, 2015]. В настоящее время считается установленным фактом, что метеороидные потоки возникают, в основном, при распаде кометных ядер. Основная идея этого метода заключается в том, что генерируем выброс некоторого количества пробных частиц в некоторых точках на орбите родительского тела и следим за эволюцией каждой из них в эпоху по нашему выбору. Abedin et al. [2015] дают наименьшие относительные скорости в моделируемых частицах ядра потока Квадрантид из астероида (196256) 2003 EH1 в диапазоне от 200 м/с до 800 м/с, при этом большинство клонов имеют относительные скорости, превышающие 1 км/с, в качестве характеристической скорости частиц. Разумным компромиссом при моделировании выбросов будет значение скорости освобождения частиц в диапазоне 200-800 м/с. Опираясь на вышеупомянутые результаты, было выбрано несколько «эпох выброса». Моделируем выбросы метеороидов в перигелии родительской орбиты в моменты на интервале 1760-1791 гг. [Sambarov G.E. et al.]

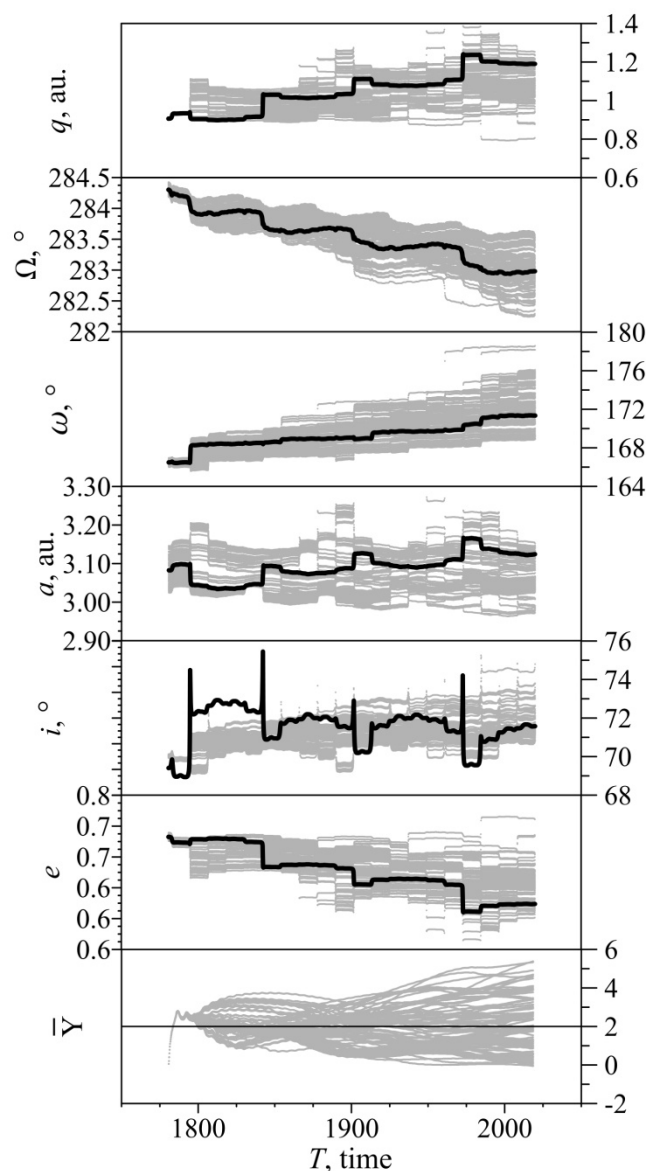


Рис. 1. Результаты исследования вероятностной орбитальной эволюции частиц модельного потока Квадрантиды (показаны серым цветом) астероида (196256) 2003 EH1 (показана черным цветом) на интервале времени 250 лет (слева выброс около 1780 г.)

В данной работе представлен возможный сценарий динамического развития потока Квадрантиды, образованного астероидом (196256) 2003 EH1. Анализ динамики метеороидных частиц выявил сложную динамическую структуру потока Квадрантиды. Анализируя численные модели метеороидного потока Квадрантиды для частиц с массой 0,00003–0,03 г, мы обнаружили признаки нескольких орбитальных резонансов: 1:9 с Венерой, 1:5 с Землей, 1:3, 3:8 с Марсом, 2:1, 7:3 и 9:4 с Юпитером и 5:1 с Сатурном. Параметр MEGNO увеличивается для нестабильных модельных частиц метеороидного потока. Высокие значения параметра MEGNO обусловлены частыми изменениями большой полуоси, вызванными многократными сближениями с Юпитером вблизи сферы Хилла, а так же нестабильными орбитальными резонансами. Для стабильных частиц наблюдается противоположная ситуация. Устойчивые выброшенные частицы могут быть захвачены в резонанс Лидова-Козаи, который защищает их от близких сближений с Юпитером.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020-0049).

Литература

1. Abedin, A., Spurný, P., Wiegert, P., Pokorný, P., Borovička, J., Brown, P. On the age and formation mechanism of the core of the Quadrantid meteoroid stream // *Icarus*. – 2015. – V.261, – P.100-117.
2. Asher D. J., Emel'yanenko V. V., The origin of the June Bootid outburst in 1998 and determination of cometary ejection velocities // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2002. – V.331. – P.126
3. Caswell R. D., McBride N., Taylor A., Olympus end of life anomaly-A Perseid meteoroid event? // *International Journal of Impact Engineering*. – 1995. – V.17, – P.139
4. Crifo J.F., Rodionov A.V., The Dependence of the Circumnuclear Coma Structure on the Properties of the Nucleus // *Icarus*. – 1997. – V.129. – P.72
5. Drolshagen E., Ott T., Koschny D., Drolshagen G., Schmidt A.K., Poppe B. Velocity distribution of larger meteoroids and small asteroids impacting Earth// *Planetary and Space Science*, 2020, V. 184, article id. 104869.
6. Koschny D., Drolshagen E., Drolshagen S., Kretschmer J., Ott T., Drolshagen G., Poppe B. Flux densities of meteoroids derived from optical double-station observations // *Planetary and Space Science*. – 2017. – V.143. – P.230-237.
7. Sambarov G.E., Galushina T.Yu, Syusina O.M. Analysis of the dynamical evolution of the Quadrantid meteoroid stream // *Planetary and Space Science*. – 2020. – V.185. – article id. 104885.
8. Ryabova G. O., A preliminary numerical model of the Geminid meteoroid stream // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. – 2015. – V.456. – P.78-84.
9. Whipple F.L., A Comet Model. II. Physical Relations for Comets and Meteors // *Astrophysical Journal*. – 1951. – V.113. – P.464-474.

АНАЛИЗ ИНДЕКСОВ МАССЫ МЕТЕОРНЫХ ПОТОКОВ

Соколова М.Г.

Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

smarina.63@mail.ru

Для оценки численности метеороидов в околоземном пространстве и притока метеорного вещества на Землю необходимо знать значение интегрального показателя – индекса массы S при переходе от одного интервала масс метеорных тел к другому. Закон распределения метеорных тел по массе описывают степенным законом, связывающим количество метеорных тел dN с величиной их массы dM :

$$dN = M^{-S} dM$$

или с учетом экспериментальной зависимости изменения числа метеоров dN от изменения звездной величины метеоров dm :

$$dN = r^m dm,$$

где r – показатель функции светимости [1].

В работе [2] со ссылкой на другие источники приводятся значения индексов массы S , полученные по наиболее статистически обеспеченным радарным наблюдениям метеоров. Значения S отличаются для спорадических метеоров и метеоров, образующих метеорные потоки. Для спорадических метеоров значение $S=2.0$, в то время как для различных метеорных потоков значения индексов массы оцениваются ниже и лежат в интервале 1.1-2.2 на разных участках орбиты Земли прохождения через метеорный поток. В работе [3] значение S , примерно равное 2, обосновано на примере численного моделирования образования метеорных потоков в результате распада комет с определенным набором входных параметров. Отклонение же значения индекса массы от 2, по мнению авторов работы [3], отражает влияние дальнейшей эволюции метеороидных потоков на их структуру.

В данной работе были исследованы интервалы вариаций индексов массы S для главных метеорных потоков Лириды, Персеиды, Тауриды, Урсиды (кометное происхождение), Квадрантиды и Геминиды (предположительно астероидное происхождение) в зависимости от их эволюции. Оценки возраста потоков выполнены на основе влияния на структуру потока негравитационного эффекта Пойнтинга-Робертсона [4]. Значения индексов массы S получены по визуальным и телевизионным наблюдениям метеоров. В качестве исходных наблюдательных данных использованы открытая база электронных данных визуальных наблюдений метеоров Международной метеорной организации (<http://www.imo.net/data/visual>) и телевизионные наблюдения метеоров, представленные в каталоге Global Meteor Network (далее GMN) [5] (https://globalmeteornetwork.org/data/trajectories_summary_data/).

Негравитационный эффект Пойнтинга-Робертсона представляет собой влияние поглощения и переизлучения солнечной радиации метеороидом на изменение элементов его орбиты, что приводит к уменьшению углового момента тела и его падению на Солнце за длительные интервалы времени [4]. Действие эффекта зависит от массы частицы и приводит к уменьшению больших полуосей и эксцентриситеты орбит метеороидов. Таким образом, со временем в метеорном потоке происходит разделение орбит метеороидов в зависимости от их массы. Скорость изменения элементов орбит за время T_a и T_e соответственно можно оценить по формулам [6]:

$$\Delta a/T_a = K(2+3e_0^2) / a_0(1-e_0^2)^{3/2} \quad (1)$$

$$\Delta e/T_e = 5Ke_0 / 2a_0^2(1-e_0^2)^{1/2} \quad (2)$$

где $K = 2.51 \cdot 10^{11} R^{-1} \rho^{-1}$, ρR – плотность и радиус метеороида; e_0, a_0 – параметры большой полуоси и эксцентриситета орбиты родительской кометы потока; $\Delta a/T_a$, $\Delta e/T_e$ – скорости изменения больших полуосей и эксцентриситетов метеороидов за временной интервал T_a , T_e соответственно.

Для оценки T_a и T_e параметры плотности ρ и массы M метеороида задавались, а значение его радиуса R вычислялось. Плотность метеороидов для всех изученных потоков согласно [7] была принята равной 1.8 г/см^3 (углистые объекты С-группы). Масса метеороидов соответствовала метеору $+3^m$ абсолютной звездной величины и определялась по данным телевизионного каталога орбит [5] индивидуально для каждого потока.

Значения Δa , Δe в (1), (2) определяются путем линейной аппроксимации графиков зависимостей больших полуосей и эксцентриситетов орбит метеоров от их звездной величины, полученных по телевизионным наблюдениям [5]. Для исследуемых метеорных потоков имеет место корреляция размера $a(m)$ и формы $e(m)$ орбит в зависимости от звездной величины метеоров, причем более надежно линейно аппроксимируется зависимость $e(m)$ в виду меньшего разброса ошибок эксцентриситетов орбит.

Для метеорных потоков Персеиды, Лириды, Геминиды, Тауриды, Урсиды разделение метеороидов по массам также подтверждается профилями индекса массы S и активности потока ZHR (зенитное часовое число) от даты наблюдения, полученными по визуальным наблюдениям [8]. Так как в отличие от инструментальных методов наблюдений способ оценки звездных величин метеоров по визуальным наблюдениям является достаточно субъективным и имеют значительные ошибки, значения параметра S для потоков были получены также по телевизионным наблюдениям [5].

Вычисленные значения S по траектории движения Земли в поперечном сечении каждого потока позволили определить интервалы вариаций индекса массы в каждом потоке и соотнести их с оценками возраст метеорных потоков. Можно сделать вывод, что потоки, имеющие максимальные оценки возраста T_e (2), характеризуются минимальными значениями индексов массы в момент наблюдения максимальной активности потока, близкой по долготе Солнца к долготе узла родительского тела.

Литература

1. Левин Б.Ю. Физическая теория метеоров и метеорное вещество в солнечной системе // М. 1956. 293 с.
2. Шустов Б.М. О спектрах масс астероидов, метеороидов и космического мусора // Научные труды Института астрономии РАН. 2019. Вып.4. С. 356-364.
3. Шустов Б.М., Золотарев Р.В. Об индексах массы метеорных тел. I. Модель образования метеороидных потоков // Астрономический журнал. 2022. Т. 99. № 2. С. 165-176.
4. Robertson H.P. Dynamical effects of radiation in the solar system // MNAS. 1937. V. 97, 423.
5. Vida D., Šegon D., Merlak A. The overview of the Global Meteor Network project and preliminary results of the 2018 Geminids // Meteor News. 2019. V. 4. № 1. P. 22–24.
6. Ловелл Б. Метеорная астрономия. М.: Физматгиз, 1958. 488 с. (Lovell A.C.B. Meteor astronomy. Oxford: Clarendon press, 1954. 463 p.).
7. Standish E.M. JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405. Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum IOM 312.F-98-048. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1998. 18 p.
8. Соколова М.Г., Сергиенко М.В. Сравнение структур метеорных потоков кометного и предположительно астероидного происхождения // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 6. С. 401–411.

О СИСТЕМЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ «МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ»

Ступак Г.Г.

АО «ЦНИИМаш», г. Королев, Россия

StupakGG@tsniimash.ru

Возрастающая роль космоса в социально-экономическом развитии государства, значительные объёмы финансовых вложений в космическую деятельность требуют адекватной оценки рисков, создания и постоянного развития системы безопасности космической деятельности, главной задачей которой является поддержание риска космической деятельности на приемлемом уровне, что требует эффективного информационно-аналитического обеспечения.

Созданная и эффективно функционирующая с 1 января 2016 года российская автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП) позволила в рамках решаемых задач сформировать единое информационное поле, охватывающее средства мониторинга ОКП и центры обработки и анализа информации мониторинга, эксплуатируемые различными гражданскими организациями.

В 2017-2021 годах на постоянном сопровождении АСПОС ОКП находились: международная космическая станция (МКС), 92 российских космических аппаратов (КА), 0 иностранных КА. Только в 2021 году АСПОС ОКП было выявлено около 4000 опасных сближений с защищаемыми КА и 218 опасных сближения с МКС, которая выполнила два маневра уклонения от возможных столкновений. По своим возможностям АСПОС ОКП обеспечивает мониторинг космических объектов размером более 40 см на орбитах выше 3000 км. АСПОС ОКП не сможет в полной мере соответствовать динамично изменяющимся условиям и требованиям. В настоящее время АСПОС ОКП каталогизировано 26015 техногенных объектов размером более 10 см, что составляет лишь 4% от их общего числа.

АСПОС ОКП присущи существенные ограничения, к числу которых следует отнести следующие: ограниченность территориально-пространственного размещения технических средств; отсутствие наземных радиолокационных станций и космического сегмента мониторинга ОКП; отсутствие технических и программных средств обнаружения малых небесных тел; недостаточный объём информации о состоянии естественной среды в ОКП; отсутствие данных о радиопомеховой обстановке в ОКП; информационная зависимость от зарубежных интернет сервисов.

Для парирования существующих ограничений АСПОС ОКП, разработана и утверждена Концепция создания системы информационно-аналитического обеспечения безопасности космической деятельности в околоземном космическом пространстве на период 2020-2025 годы и на перспективу до 2035 года «Млечный путь» (далее Система «Млечный путь»).

В соответствии с Концепцией Система «Млечный путь» должна осуществлять информационно-аналитическое обеспечение безопасности космической деятельности в условиях угроз, обусловленных следующими факторами состояния и изменения обстановки в ОКП: значительным и непрерывно возрастающим количеством космических объектов техногенного происхождения; агрессивностью среды функционирования орбитальных космических средств; усложнение электромагнитной (помеховой) обстановки; наличие астероидно-кометной опасности.

Концепция содержит систему взглядов на формирование Системы «Млечный путь» и определяет цели, задачи, принципы и направления ее развития на период до 2035 года. Важным обстоятельством стабильного и устойчивого развития космической отрасли РФ является обладание современными технологиями и средствами мониторинга ОКП.

Космический трафик в ОКП непрерывно растет. Мировые космические державы проводят стратегию увеличения количества своих КА. Реализуются планы развертывания многоспутниковых космических систем. Только компания SpaceX планирует группировку из 12000 коммуникационных спутников.

На сегодняшний день на околоземных орбитах функционируют более 2900 космических аппаратов с перспективой за ближайшие 7–10 лет увеличения их количества до 20 000. Только в 2021 году было запущено 1811 КА. Количество опасных сближений с защищаемыми КА растет. Так в течение 2021 года зарегистрировано 10207 опасных сближений, при этом из них 47% были с КА StarLink. В связи с этим возрастает актуальность защиты функционирующих КА не только от космического мусора, но и от столкновения друг с другом. Рост интенсивности космической деятельности, развитие рынка малых космических аппаратов увеличивает засоренность ОКП. В околоземном космическом пространстве находится порядка 10000 тонн техногенных объектов. По оценкам специалистов количество объектов размером более 1 см порядка 600000 единиц, а количество малых небесных тел, представляющих опасность для Земли, порядка 16000.

Прогноз обстановки в ОКП, понимание подходов к технической реализации перспективной гражданской Системы «Млечный путь» нашли свое отражение в Концепции. Система должна обеспечивать отечественных и зарубежных потребителей полной, достоверной, точной и своевременной информацией о текущей и прогнозируемой обстановке в ОКП, предупреждениями об опасных (кризисных) ситуациях в ОКП и рекомендациями по парированию угроз (снижению рисков).

Значительный научно-технический и технологический задел, накопленный при создании и эксплуатации АСПОС ОКП, является основой создания Системы «Млечный путь». Планируется значительное расширение номенклатуры и состава средств мониторинга наземного и космического базирования, развитие функциональных возможностей, улучшение показателей эффективности решения задач мониторинга ОКП.

Базовыми требованиями к Системе «Млечный путь» являются глобальность и непрерывность мониторинга объектов, процессов, явлений в ОКП, а также достоверность, полнота, точность и оперативность результатов.

Опыт эксплуатации АСПОС ОКП, а также анализ стоящих перед Системой «Млечный путь» задач, позволяют определить ее состав. К числу основных элементов Системы «Млечный путь» следует отнести: центр управления; информационно-аналитический центр; комплекс технических средств мониторинга ОКП; специальные сервисы доведения информации до потребителей.

Функционально Система «Млечный путь» может быть представлена в составе четырех подсистем мониторинга околоземного космического пространства: подсистема мониторинга техногенных космических объектов; подсистема мониторинга состояния космической погоды; подсистема мониторинга космических радиолиний; подсистема мониторинга малых небесных тел.

При этом информационно-аналитический центр Системы является территориально-распределенным, каждая из четырех составных частей которого должна размещаться в организации, обладающей соответствующей подсистеме мониторинга компетенциями и квалифицированным персоналом.

Ключевыми элементами Системы «Млечный путь» являются разнородные оптико-электронные (ОЭС), радиолокационные (РЛС), радиотехнические (РТС) и иные средства мониторинга ОКП, размещаемые на Земле и в космосе. Перспективная сеть средств мониторинга Системы (географически распределённые, в том числе за рубежом, наземные средства и КА мониторинга) должна обеспечивать глобальность охвата ОКП с минимально возможными перерывами наблюдения КО в разных областях ОКП, учитывая объективные ограничения по погодным условиям, времени суток, освещённости объектов на орбите и другие факторы.

В Концепции, с учетом накопленных технологических и научно-технических заделов, а также потенциальных возможностей отечественных разработчиков и

производителей, представлены перспективы расширения состава и номенклатуры средств мониторинга ОКП.

Развитие наземного комплекса оптико-электронных средств мониторинга ОКП требует создания новых широкопольных ОЭС с высокой проникающей способностью, а также ОЭС для получения высокоинформативной некоординатной информации. Повышение проникающей способности создаваемых измерительных средств крайне важно обеспечивать путем применения отечественных разработок.

Основу наземного комплексарадиолокационных средств мониторинга ОКП должны составить станции двух типов: РЛС обнаружения и сопровождения; РЛС барьерного типа. Предварительный анализ показывает реальную возможность создания требуемых для Системы «Млечный путь» радиолокационных станций и их развертывания в сроки проекта Концепции.

Развертывание средств мониторинга ОКП космического базирования требует создания соответствующих специализированных космических комплексов. Анализ имеющегося задела и результаты комплексного моделирования показали реализуемость проекта развертывания орбитальной группировки КА мониторинга ОКП и достижимость требуемых характеристик КА.

Создание Системы «Млечный путь» требует развития используемых и разработки перспективных методов, моделей, методик, алгоритмов и программ совместной обработки больших объемов разнородной измерительной информации мониторинга. Это критически важно для эффективного решения задач оценки и прогнозирования развития угроз безопасности космической деятельности.

Первоочередными задачами создания Системы «Млечный путь» являются: разработка и обоснование проектного облика Системы «Млечный путь»; оценка реализуемости Концепции создания Системы «Млечный путь»; разработка проекта программы создания Системы «Млечный путь».

Реализация Концепции создания Системы «Млечный путь» обеспечит: снижение риска утраты и повреждения КА, обеспечения безопасности и долгосрочной устойчивости реализации отечественных и международных космических программ; снижение астероидно-кометной опасности; укрепление роли России в решении вопросов безопасности космической деятельности, развитии положений международной нормативно-правовой основы регулирования космической деятельности, а также развитие отечественного рынка космических услуг в сфере мониторинга космического пространства; противодействие экспансии США в закреплении монопольного положения в мире в обеспечении безопасности космической деятельности.

Дальнейшее развитие АСПОС ОКП и создание Системы «Млечный путь» требует разработки и реализации комплекса нормативно-правовых документов и механизмов.

Литература

1. 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. М.: ЦНИИмаш, 2022. 39 с.

АКТИВНЫЙ АСТЕРОИД (457175) – КОМЕТА 362P

Чернетенко Ю.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

cyu@iaaras.ru

Популяция малых тел Солнечной системы включает и кометы, и астероиды. Каждая из этих групп имеет широкий диапазон физических и динамических характеристик, но имеет четкие определения: кометы проявляют активность, астероиды – инертные тела. В последние десятилетия были открыты необычные малые тела: ряд астероидов главного пояса с физическими проявлениями кометной активности (активные астероиды (АА)) и группа астероидов, находящихся на кометных орбитах ('спящие' кометы (СК)). Среди причин, приводящих к появлению АА, называют столкновения малых тел, вращательную неустойчивость, рыхлую структуру тела. Активность, наблюдаемая у комет, непродолжительна по времени из-за ограниченного количества их летучих составляющих. В результате динамическое время жизни оказывается длиннее времени активной фазы и комета становится СК, неотличимой от астероидов с низкими значениями альбедо. Обзор по этой теме можно найти, например, в работе [1].

Астероид (457175) наблюдался с 15.10.2001 по 13.10.2018, в базе данных МПЦ (https://minorplanetcenter.net/db_search/457175) находится 712 позиционных наблюдений. 77 наблюдений получено в обсерватории Санглок [2]. Все они были использованы в настоящей работе для оценки орбитальных параметров. 03 июля 2017 г. Г.Д. Леонард и Д.К. Фульс (G.J. Leonard and D.C. Fuls) [3] отметили появление яркой комы и широкого длинного хвоста, а астероид получил статус кометы с номером 362P. Критерий Тиссерана равен 2.93, т.е. орбиту астероида можно считать типичной для комет семейства Юпитера [4].

Целью настоящей работы является исследование изменений орбиты и выяснение причин проявления кометной активности. Орбита, определенная по всем наблюдениям без учета негравитационного ускорения (НУ), обнаруживает значительные систематические ошибки в представлении наблюдений. При включении в уравнения движения НУ (модель Марсдена) получены следующие значения параметров НУ: $A1 = 1.17 \pm 0.28$, $A2 = -0.015 \pm 0.148$, $A3 = -4.09 \pm 0.58$ (здесь и далее в единицах 10–8 а.е. сут.–2), $rms = 0.556''$. На сайте JPL (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>) приводятся следующие, близкие, значения: $A1 = 1.12 \pm 0.28$, $A2 = -0.151 \pm 0.124$, $A3 = -4.75 \pm 0.40$, $rms = 0.686''$. Нехарактерной для комет является значительная уверенно определяемая составляющая $A3$. Кроме того, и после учета НУ некоторые ряды наблюдений имеют систематические отклонения.

Анализ О–С наводит на мысль о том, что изменения орбиты произошли не в момент вспышки, а раньше, вблизи прохождения кометы через восходящий узел. Рассмотрим возможность столкновения кометы с каким-то малым телом в течение исследуемого интервала. Наиболее тесное реальное сближение, до 0.002 а.е., имело место 08.02.2016 с астероидом (8385) и не могло значимо изменить орбиту. Были вычислены значения MOID для всех нумерованных и нenumерованных астероидов (по состоянию каталогов на октябрь 2021 г.) и получены моменты, соответствующие сближениям орбит. График на Рис. 1 показывают, что вероятность столкновения астероида (457175) с другим малым телом особенно велика вблизи восходящего узла. С учетом этого, выполнены следующие вычисления. Из процедуры определения орбитальных параметров были исключены наблюдения 2016.0–2017.5 гг., имеющие систематические отклонения, и получена орбита, называемая далее опорной, для которой $A3 = -3.98 \pm 0.66$ ($A1$ и $A2$ для этого варианта определяются неуверенно). Рис. 2а показывает отклонения этих наблюдений от опорной орбиты. Предположено, что в момент 01.01.2016, близкий к моменту прохождения через восходящий узел, произошло отделение фрагмента и при фиксированных значениях координат получены компоненты скорости и НУ по наблюдениям 2016.0–2017.5 гг. (орбита А). Представление наблюдений этой орбитой показано на Рис. 2б. При этом изменение скорости относительно опорной орбиты составило -0.227 ± 0.013 м/сек, а $A3 = -12.5 \pm 0.5$.

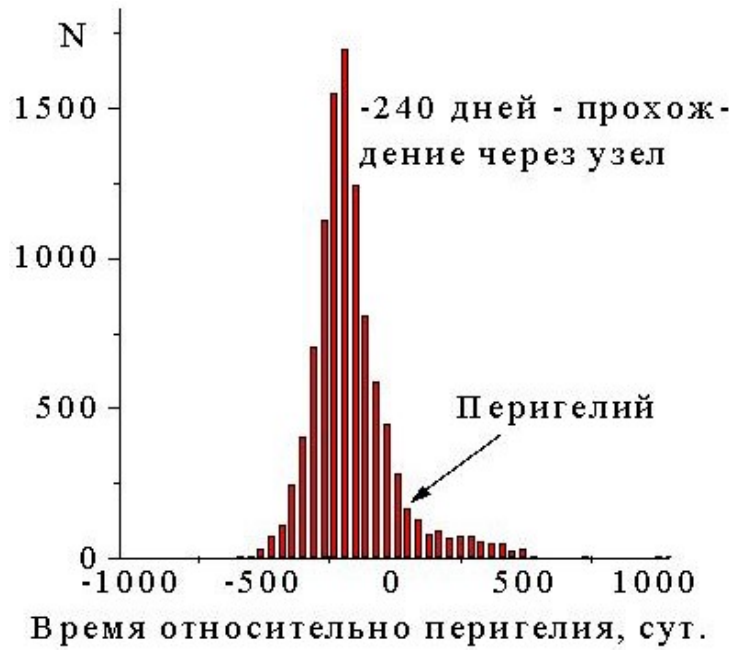


Рис. 1. Время относительно перигелия достижения $MOID < 0.012$ а.е. между орбитой астероида (457175) и орбитами других нумерованных астероидов.

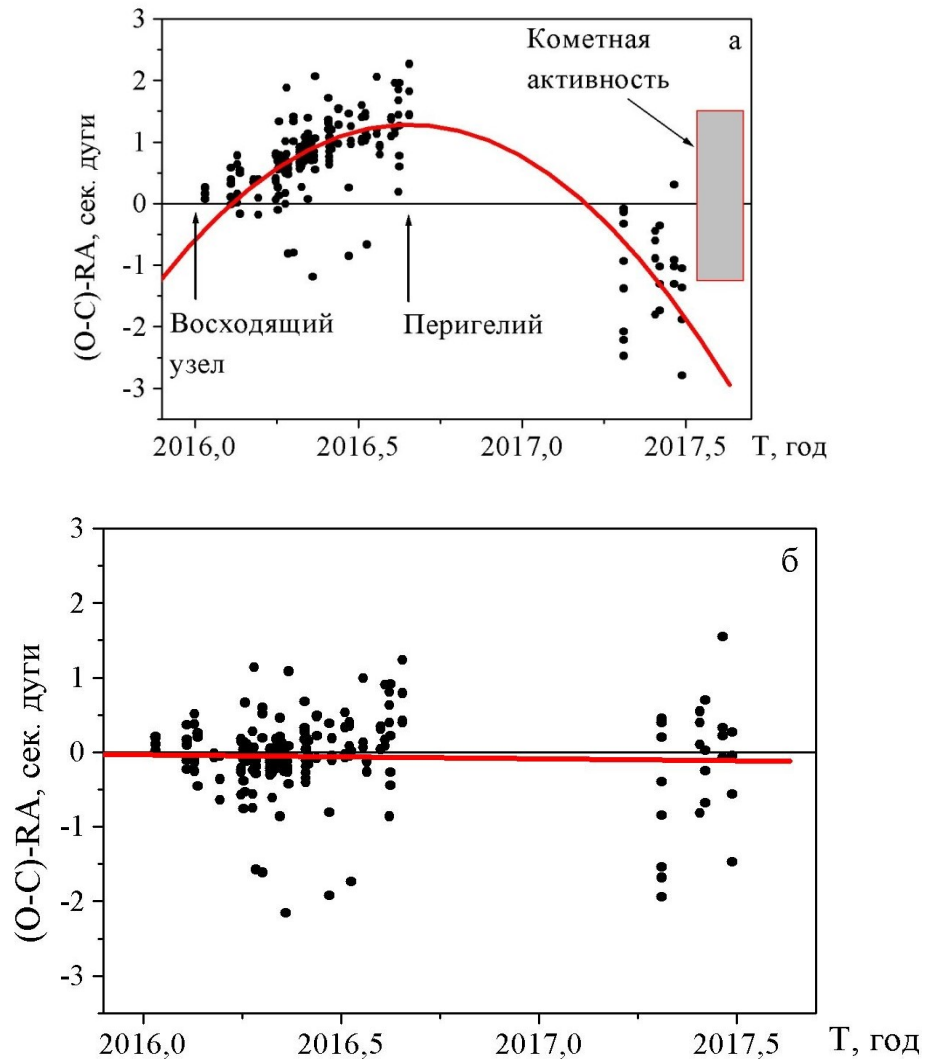


Рис. 2. а – О–С по прямому восхождению относительно опорной орбиты; б – О–С по прямому восхождению относительно орбиты (А).

Полученные результаты позволяют предположить, что вблизи прохождения астероида (457175) через восходящий узел могло произойти столкновение с некоторым

малым телом, приведшее к образованию фрагмента. Скорость разделения невелика, 0.227 ± 0.013 м/сек, что может говорить также о вращательной неустойчивости, как о причине разделения. Образовавшийся фрагмент, получивший значительное негравитационное ускорение, $A_3 = -12.5 \pm 0.5$, мог оказаться ярче основного тела, хотя и наблюдался в течение 2016.0–2017.5 гг. без проявлений признаков кометной активности. К появлению яркой комы и хвоста после 2017.5 г., возможно, привело полное разрушение этого фрагмента, или его столкновение с основным телом, или продолжение фрагментации основного тела.

В работе [2] делается предположение о том, что возможное столкновение было не существенным, т.к. катастрофических изменений с ядром спящей кометы не произошло.

Автор благодарит ст.н.с. В.Б. Кузнецова за помощь в вычислениях.

Литература

1. Jewitt, D., Hsieh, H., & Agarwal, J. The Active Asteroids // In Asteroids IV, Patrick Michel, F. E. DeMeo, & W. F. Bottke (eds.), University of Arizona Press, Tucson. 2015. P.221–241.
2. Kokhirova G. I., Ivanova O. V., Rakhmatullaeva F. Dzh., Baransky A. V., Buriev A. M. Results of observations of dual-status object 2008 GO 98 in 2017 // Advances in Space Research. 2021. V.67, N.1, P.639–647.
3. Williams, G. V. Cometary activity in (457175) 2008 GO98 // MPEC 2017–N50. 2017.
4. Jewitt, D. The active asteroids // Astron. J. 2012. V.143: 66 (14pp).

НЕКОТОРЫЕ ВАЖНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКУЩИХ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ К АСТЕРОИДАМ

В.И. Шематович
Институт астрономии РАН
shematov@inasan.ru

Малые тела Солнечной системы активно изучаются посредством как космических миссий, так и наземных средств наблюдений, так как представляют собой тела относительно небольшого размера, образовавшиеся на ранних стадиях эволюции Солнечной системы порядка 4,6 миллиардов лет тому назад. Они часто рассматриваются как носители важной информации о первичном веществе во время образования Солнечной системы.

В докладе обсуждаются некоторые данные о физических свойствах астероидов в Солнечной системе, полученные в недавних космических миссиях к астероидам. Будет дан обзор важных и наиболее интересных результатов миссий КА JAXA Hayabusa-2 к астероиду Рюгу (1999 JU₃ Ryugu) и КА NASA OSIRIS-REx к астероиду Бенну (101955 Bennu). Результаты этих миссий дают ключи к пониманию как механизмов формирования и эволюции астероидов как одних из самых ранних и сохранившихся почти в первозданном виде малых тел Солнечной системы, так и особенностей истории планеты Земля. Например, каковы химические и физические характеристики для сближающихся с Землей астероидов.

СЕКЦИЯ 2

Современные и перспективные
методы и средства наблюдений
малых тел Солнечной системы
и космического мусора

КАТАЛОГ МАЛЫХ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА САЙТЕ ИПА РАН

Аксим Д.А., Безруков И.А., Бондаренко Ю.С., Водолагина А.Г., Железнов Н.Б.,
Кочетова О.М., Кузнецов В.Б.

Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

В ИПА РАН разработан и размещен на сайте Института (URL: <http://iaaras.ru/dept/lbss/mpc/>) Каталог малых тел Солнечной системы [1,2]. В основе Каталога лежат оригинальные исследования и программное обеспечение, разработанное в ИПА РАН. По состоянию на январь 2022 г. число нумерованных малых планет в Каталоге составило более 612000, нenumерованных – около 550000. Общее число комет превышает 3700. Для хранения и извлечения информационных файлов различных типов (html-, png-, txt-тип) используется S3-совместимое объектное хранилище, построенное на базе ПО Serph. При присвоении объекту номера или имени на сайте ИПА РАН появляется информация об истории открытия и наименования объекта, параметры орбиты и ее визуализация, обстоятельства сближений с возмущающими планетами, включенными в модель движения, и другие полезные сведения. Для удобства сравнения данных Каталога с данными других центров, в Каталоге приводятся активные ссылки на сайты Центра малых планет (США), Лаборатории реактивного движения (США) и Пизанского университета (Италия). Показано, что орбитальные данные малых тел и сведения об обстоятельствах их сближений с большими планетами, вычисленные ИПА РАН и указанными выше научными организациями, вполне сопоставимы.

Литература

1. Аксим Д. А., Безруков И. А., Бондаренко Ю. С., Водолагина А. Г., Железнов Н. Б., Кочетова О. М., Кузнецов В. Б. Каталог нумерованных малых планет на сайте ИПА РАН // Труды ИПА РАН. — СПб: ИПА РАН, 2019. — Вып. 51. — С. 3–12.
2. Аксим Д. А., Безруков И. А., Бондаренко Ю. С., Водолагина А. Г., Железнов Н. Б., Кочетова О. М., В. Б. Кузнецов. Каталог малых планет на сайте ИПА РАН // Научные труды Института астрономии РАН, том 5(1), 32–35 (2020).

БОРТОВАЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА «ЦЕНТАВР» ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Архипов С.А., Журавлев В.И., Карпов А.Н., Лобода И.А.

АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия

da23@mail.ru

Бортовая оптико-электронная аппаратура «Центавр» (ОЭА) предназначена для получения координатной и некоординатной информации о космических объектах (КО), находящихся в зоне контроля на геостационарных и геосинхронных орбитах (ГСО).

ОЭА устанавливается на космической платформе космического аппарата (КА) и обеспечивает совместно с КА:

получение от наземного комплекса планирования и обработки информации (НК ПОИ) заданий на съемку заданной области ГСО и априорных данных по параметрам траектории движения КО в зоне действия ОЭА;

перенацеливание линии визирования (ЛВ) ОЭА в заданную область ГСО;

проведение съемки и обнаружение всех КО, попадающих в зону контроля ОЭА;

проведение астрометрической обработки растровых кадров и получение целевой информации по гипотетическим КО;

передачу целевой информации в НК ПОИ.

Разработаны два типа оптико-электронной аппаратуры (ОЭА-200 и ОЭА-600). Технические характеристики ОЭА представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики ОЭА.

№	Характеристика	Размерность	Величина	
			ОЭА-200	ОЭА-600
1	Диаметр зрачка	мм	200	600
2	Фокусное расстояние	мм	300	1200
3	Угловое поле зрения	°	4 x 4	3 x 3
4	Спектральный диапазон	мкм	0,45-0,95	0,45-0,95
5	Интегральное пропускание		0,66	0,7
6	Размер пиксела	мкм	11	9
7	Время экспозиции кадра	с	0,01-10	0,01-10
8	Формат матричного ФПУ		2048x2048	4096x4096
9	Масса	кг	90	150
10	Габариты	мм	400x400x1200	Ø800x2400
11	Энергопотребление	Вт	250	250

В состав ОЭА-200 входит устройство перенацеливания ЛВ, обеспечивающее отвороты ЛВ по крену и тангажу в диапазон углов $\pm 20^\circ$ за счет разворотов установленного перед объективом плоского зеркала.

Оптическая схема объектива D200 для ОЭА-200 представлена на рисунке 1.

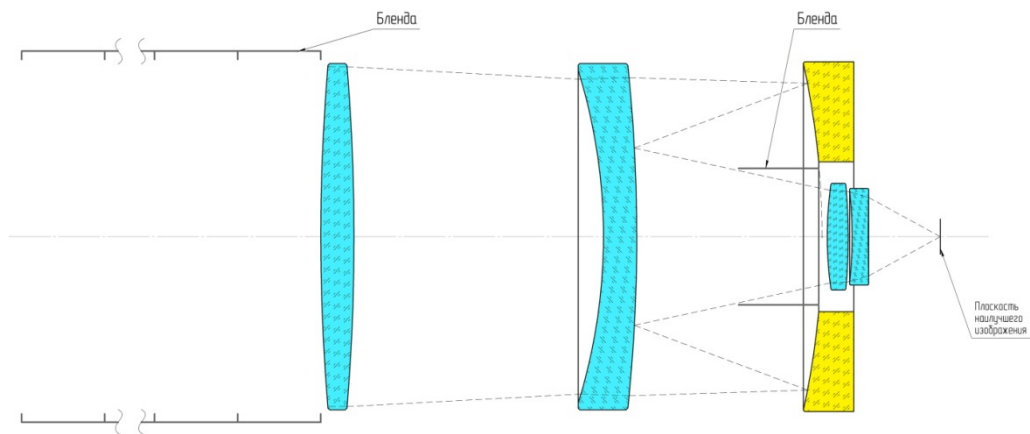


Рис. 1. Оптическая схема объектива D200 для ОЗА-200.

Зеркально-линзовый объектив D200 выполнен по принципу предфокальной удлиняющей двухзеркальной системы, дополненной двумя линзовыми компенсаторами, расположенными в параллельных и сходящихся пучках лучей. Оба зеркала имеют сферическую форму, главное – вогнутое, вторичное – выпуклое. Афокальный компенсатор, расположенный в параллельных пучках, представляет собой двояковыпуклую линзу и мениск. Линза имеет положительную оптическую силу; мениск имеет отрицательную оптическую силу. Вогнутая поверхность мениска обращена к предмету, а выпуклая поверхность совмещена с вторичным зеркалом. Компенсатор, работающий в сходящихся пучках лучей, расположен в центральном отверстии главного зеркала и также состоит из двояковыпуклой линзы с положительной оптической силой и мениска с отрицательной оптической силой, обращенного вогнутой поверхностью к предмету.

Сферическая абберация не превышает 0,01 мм; величина дисторсии на краю поля изображения составляет не более 0,03%, астигматизма – 0,015 мм; величина разности сферических аббераций во всем рабочем спектральном диапазоне для средней зоны зрачка составляет 0,06 мм. Концентрация энергии в кружке Ø20 мкм по всему угловому полю в рабочем спектральном диапазоне, не менее 80%.

Общий вид конструкции ОЗА-200 представлен на рисунке 2. В состав конструкции ОЗА-200 входят: бленда-крышка (1); корпус (2); устройство перенацеливания (3); объектив D200 (4); фотоприемное устройство (ФПУ) (5).

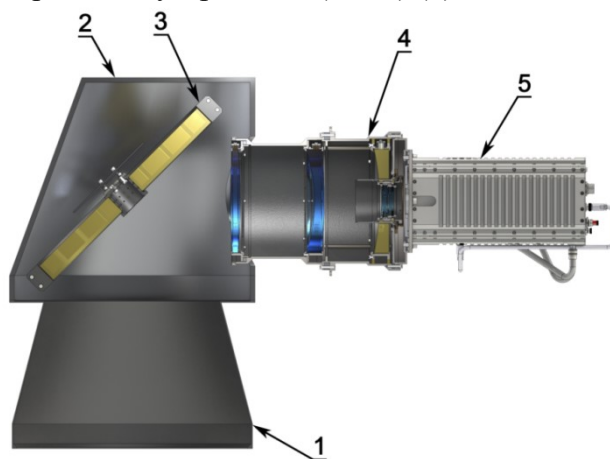


Рис. 2. Общий вид конструкции ОЗА-200.

Оптическая схема объектива D600 для ОЗА-600 представлена на рисунке 3.

Зеркально-линзовый объектив D600 выполнен по принципу двухзеркальной системы, дополненной афокальным 4-х линзовым компенсатором. Оба зеркала имеют сферическую форму, главное – вогнутое, вторичное – выпуклое. Главное зеркало имеет центральное отверстие, в котором расположен линзовый компенсатор. Первая линза –

положительный мениск, вторая линза – отрицательный мениск, третья и четвертая линзы – положительная и отрицательная соответственно. Оптическая схема объектива рассчитана с учетом размещения в заднем фокальном отрезке пластины толщиной 5 мм из кварцевого стекла.

Сферическая абберрация не превышает 0,005 мм; величина дисторсии на краю поля изображения составляет не более 0,27%, астигматизма – 0,015 мм.

Концентрация энергии в кружке $\varnothing 20$ мкм по всему угловому полю в рабочем спектральном диапазоне, не менее 80%.

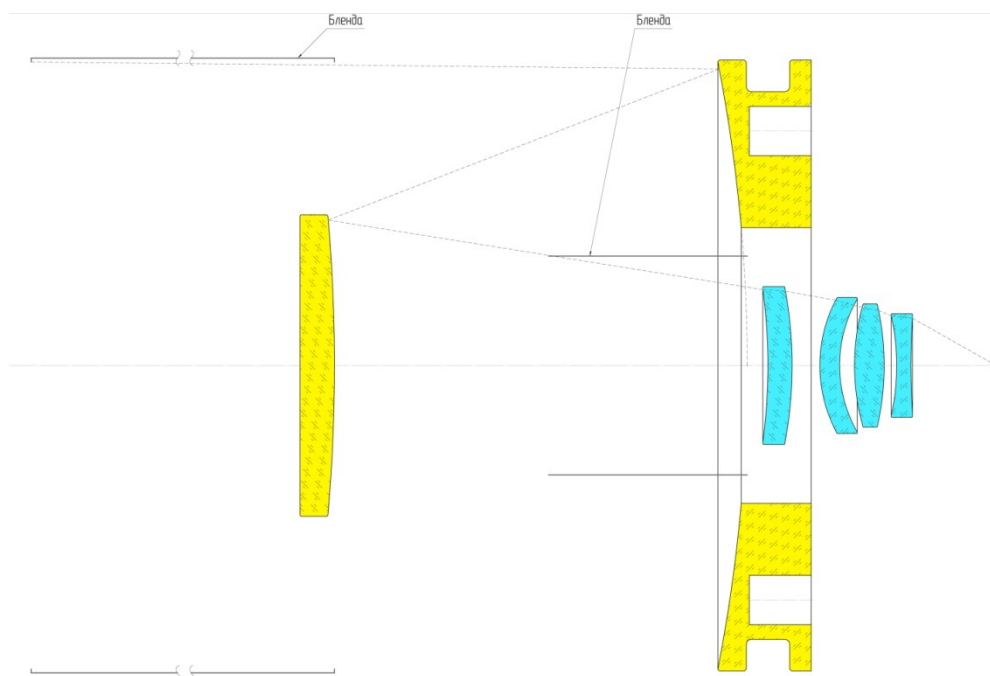


Рис. 3. Оптическая схема объектива D600 для ОЭА-600.

Общий вид конструкции ОЭА-600 представлен на рисунке 4. В состав конструкции ОЭА-600 входят: бленда-крышка (1); объектив D600 (2); фотоприемное устройство (3).

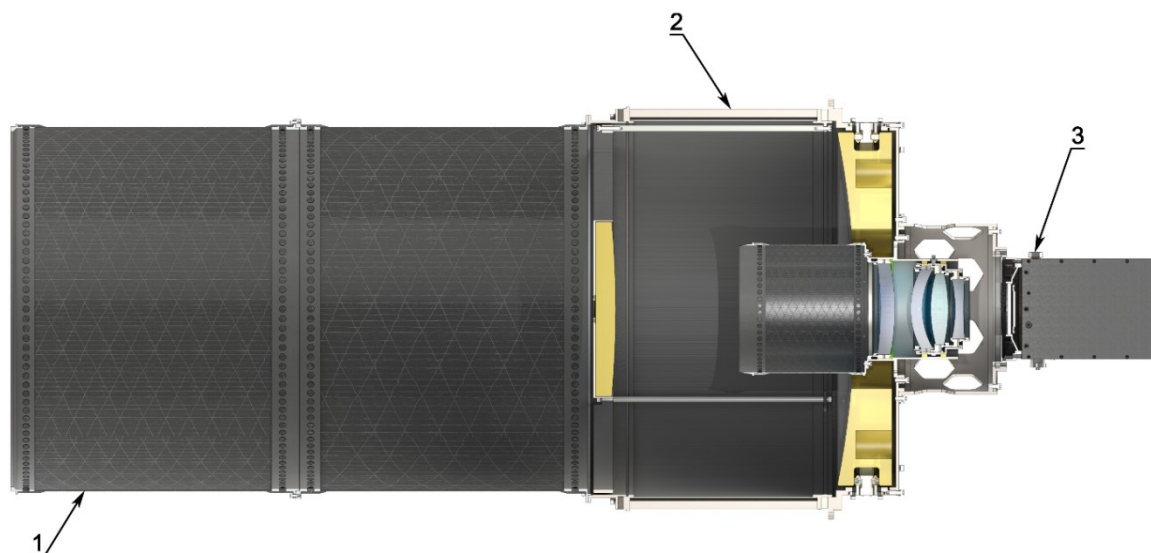


Рис. 4. Общий вид конструкции ОЭА-600.

Мониторинг заданной локальной области контроля ГСО обеспечивается циклическими движениями КА и поворотом ЛВ для ОЭА-600. Возможны различные схемы построения циклических движений в зависимости задачи контроля (задача поиска и обнаружения КО; задача сопровождения КО).

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГООБЗОРНЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РЛС ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЮ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Бабкин Ю.В.
АО РТИ, г. Москва, Россия
YuVIBabkin@yandex.ru

В работе рассмотрена возможность использования на РЛС дальнего действия алгоритмов многообзорного обнаружения космических объектов. Применение многообзорных алгоритмов с использованием преобразования Хафа позволяет существенно увеличить дальность действия радаров, позволив вести мониторинг ОКП не только в области низких орбит, но и получать измерения по высокоорбитальным космическим объектам.

ДАННЫЕ, ПОЛУЧАЕМЫЕ С МЕТЕОСПУТНИКОВ, В ТОМ ЧИСЛЕ С КА СЕРИИ «ЭЛЕКТРО-Л», ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБСТАНОВКИ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Баканас Е.С., Филькин К.Н., Бахмет Т.И., Кочубей Л.К., Мороз В.В., Андреев Р.В.
АО РКС, Москва, Россия

Земля на данный момент окружена множеством космических аппаратов, наблюдающих за миром. Основное назначение метеорологических спутников – получение метеоданных. Для полного охвата территории на орбите находятся геостационарные космические аппараты (КА), такие как КА серии «Электро-Л» и космические аппараты на околополярных орбитах, например, КА «Арктика-М», передающие на Землю информацию о том, что происходит у полюсов.

При полном охвате съемкой космическими аппаратами поверхности Земли велика вероятность того, что один или несколько из этих спутников зафиксируют, например, вход метеороида в атмосферу Земли и на получаемых с КА изображениях будет виден его след, очевидные признаки которого сохраняются довольно долго – например, в случае падения Челябинского болида – несколько часов. В докладе приводятся данные с различных метеоспутников о падении Челябинского болида как пример исследования падения космического тела при помощи метеоспутников.

Научная аппаратура, установленная на борту КА серии «Электро-Л», позволяет вести оценку обстановки в околоземном космическом пространстве: гелиогеофизический аппаратный комплекс ГТАК-Э – передает данные по потокам частиц в околоземном пространстве; МСУ-ГС (многозональное сканирующее устройство) – передает каждые 30 минут круглосуточно видеоизображения, что позволяет отслеживать вход космических тел в атмосферу Земли. При необходимости, по космическим снимкам можно определить высоту образовавшихся облаков, их толщину и длину, оценить направление и место предполагаемого падения небесного тела.

Приведены основные характеристики КА серии «Электро-Л», показаны возможности НЦ ОМЗ (АО РКС) по приему сеансов с КА «Электро-Л» №2 и №3.

Показана возможность использования данных метеоспутников для исследования падения космических тел на Землю, особенно это важно для океанических регионов и малонаселенных территорий, для которых нет должного охвата фото-видеосъемкой с Земли.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕЛЕСКОПА ЦЕЙСС-1000 В ЭКСТРЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

Барабанов С.И., Николенко И.В., Баканас Е.С.

ИНАСАН

oterma@yandex.ru

Приведены случаи экстренных фотометрических наблюдений потенциально-опасных объектов на телескопе Цейсс-1000, после получения информации об их обнаружении. Рассматривается целесообразность проведения наблюдений с целью экспресс-фотометрии объектов относящихся к категории потенциально-опасных для Земли, с неопределёнными ранее физическими характеристиками. Экспресс-наблюдения на длиннофокусном инструменте за несколько суток до прогнозируемого сближения позволят уточнить орбиту объекта и сделать окончательное заключение не только о возможности столкновения с Землей, но и ограничить район бедствия так, что возможно будет провести его эвакуацию.

Быстрая оценка физических свойств астероида или кометного ядра, особенно их размеров позволит уточнить прогноз его воздействия на земную поверхность и масштабы будущего бедствия и, при необходимости, обеспечить перехват небесного тела наземными средствами защиты.

Для наблюдений используется телескоп Цейсс-1000, установленный на Симеизской обсерватории Института астрономии. При помощи данного телескопа выполняются работы по разным темам, в том числе, в течение 12 лет, он используется в наблюдениях за малыми телами Солнечной системы, связанными скометно-астероидной опасностью для Земли. Цель наблюдений заключается в уточнении параметров движения и поверхностных физико-минералогических характеристик, параметров собственного вращения. Самый яркий результат таких наблюдений был получен в 2004 г. при наблюдении астероида Апофис (2004 MN₄) – в ИНАСАН были выполнены одни из первых наблюдений после его открытия (астрометрия и оценки блеска).

Для наблюдений используется штатное навесное оборудование, состоящее из: ПЗС-камеры FLI ProLine 16803 (формат 4096x4096, спектральный диапазон 360-800 нм, размер пикселя составляет 9м, квантовый выход 55%, колесом фильтров CFW 3-10), с набором светофильтров. В набор светофильтров входят фильтры UBVR_I системы Johnson-Cousins и GRIZ системы Sloan.

С целью расширения возможностей обнаружения и подхвата вновь обнаруженных любых транзитов была усовершенствована система управления телескопа, и в 2020 году был изготовлен и введен в эксплуатацию дополнительный оптический узел, фокальный редуктор, который в зависимости от приемника изображений позволяет увеличивать поле зрения до 0.8 градуса в диаметре, без него, поле зрения составляет около 0.5 градусов. Кроме того, проведено исследование фокального редуктора с точки зрения измерения цветов для использования в режиме измерений без перехода в стандартный режим. Это очень полезно для исследования цветовых характеристик быстротекущих транзитов, в силу ограниченности времени наблюдений.

Для демонстрации новых возможностей телескопа и его навесного оборудования мы провели наблюдательный сеанс, выбрав в качестве объекта исследования астероидиз группы Аполлона 350751 (2002AW), потенциально опасный для Земли, для которого нет известных физических характеристик, и провели цикл измерений показателей цвета и астрометрические измерения.

КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ НАНО- И МИКРОАППАРАТОВ

Бечаснов П.М.¹, Ильин А.М.²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²ООО «Лин Индастриал», Москва, Россия

bechasnov@bmstu.ru

Миниатюризация ключевых технологий космических аппаратов (КА) на широком фронте способна оказать глубокое влияние на будущие исследования Солнечной системы. В проектах действующих и перспективных нано- и микроаппаратов NASA уже сейчас значительное внимание уделяется таким исследованиям (Рис.1).

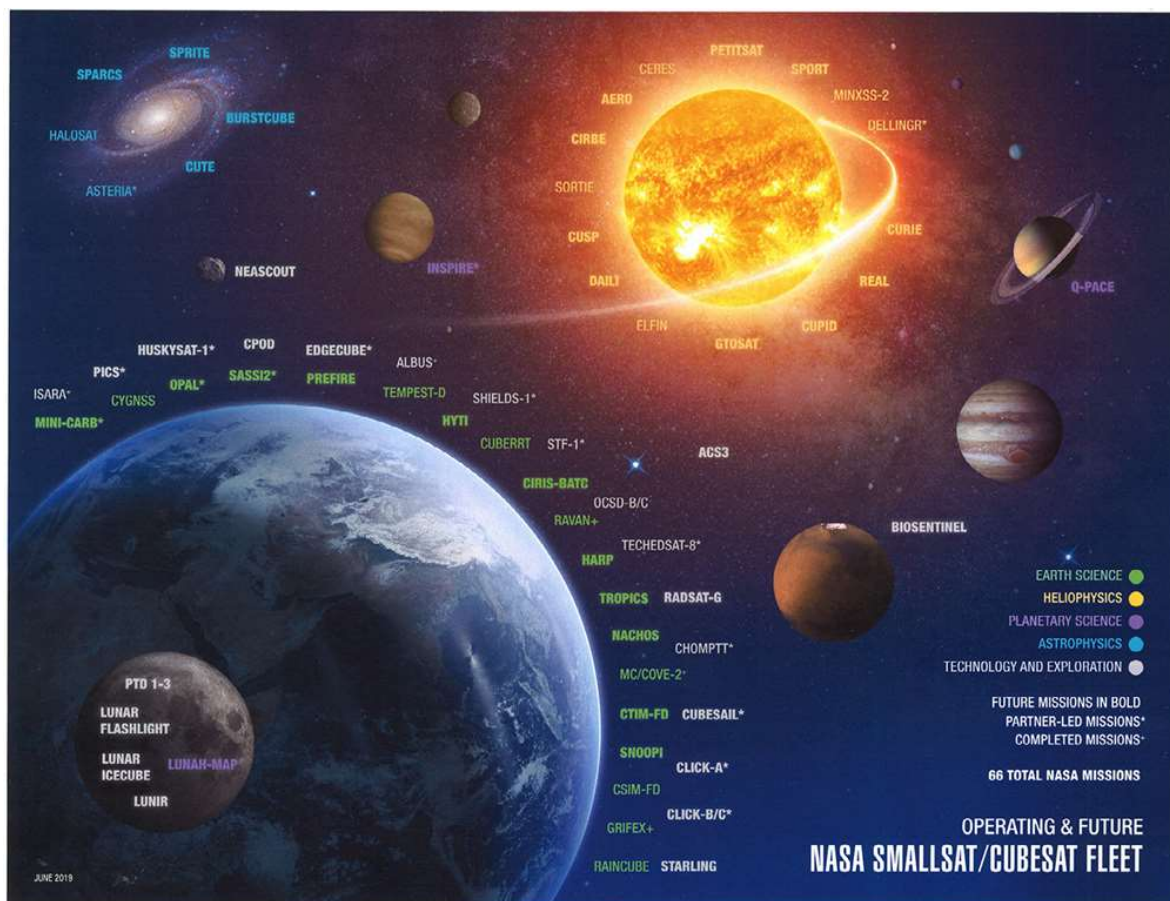


Рис.1. Современное состояние и перспективы развития группировки нано- и микроспутников НАСА.

Внутренняя Солнечная система – Луна, Венера, Марс – принципиально достижима для наноспутников в автономном полёте, в то время как полет во внешнюю потребует дополнительных мер по начальному ускорению или разгону гравитационными маневрами. Астероиды, сближающиеся с Землей (от 0,98 до 1,3 а.е. от Солнца), представляют собой еще один богатый набор целей, число которых оценивается более чем в 14 000, причем 1000 из них имеют диаметр более 1 км. Из-за больших затрат в рамках существующих подходов маловероятно, что тяжёлые аппараты с большим количеством оборудования, наподобие запускаемых NASA по программе Discovery, доберутся больше, чем до нескольких из них. Но если к этим астероидам удастся добраться с помощью кубсатов, появится возможность изучить сотни из них вблизи за пару десятков лет за цену, сопоставимую с ценой одной миссии программы Discovery. Главный пояс астероидов, расположенный на расстоянии 2,2–3,2 а.е. от Солнца, содержит от 0,7 до 1,7 миллиона объектов диаметром >1 км. К настоящему времени космические аппараты, направляющиеся к внешним планетам, позволили нам увидеть лишь некоторые из них, а

миссия Dawn предоставила подробное исследование только двух самых крупных: Церера и Веста.

Также известно более 5000 комет, орбиты которых пролегают достаточно близко к Солнцу, чтобы их можно было увидеть с Земли. Опять же, зонды человечества посетили менее десятка, что оставляет многочисленные возможности для наноспутников.

Следует отметить, что создание наноспутников для межпланетных исследований представляет собой сложную техническую задачу. Необходимо решить проблемы с автономной навигацией аппарата, передачей его данных на Землю и управления им с Земли, радиационной стойкостью электроники, созданием целевой аппаратуры. Непосредственное применение накопленного в низкоорбитальных миссиях задела невозможно либо крайне затруднено. Однако после создания унифицированной платформы, в которой эти проблемы будут решены, можно ожидать большого количества запусков после развёртывания её серийного производства.

В настоящее время создатели межпланетных наноспутников ориентируются либо на попутную доставку какой-либо миссией, запускаемой в то же место назначения, либо на самостоятельный межпланетный перелёт. Первое чревато значительным ожиданием и количеством согласований, второе крайне сложно технически. Поэтому появление нового сравнительно недорогого буксира для наноспутников будет способствовать дальнейшему развитию межпланетных кубсатов и со временем позволит окупить затраты на его создание.

По итогам проведенной поисковой работы были сформированы облик и конструкция малобюджетного космического комплекса, предназначенного для запуска нано-аппаратов на отлётные траектории. Космический сегмент такого комплекса должен состоять из двух изделий, применение которых возможно в т.ч. независимо (Рис.2).

Первым изделием является низкоорбитальный нано-буксир малой тяги, двигательная установка которого основана на применении сублимационного двигателя с адсорбентом, поглощающим воду и отдающим её в виде пара низкого давления в сопло с возможной установкой нагревателя того или иного вида для повышения удельного импульса. Нано-буксир предложено выполнить в форм-факторе кубсата 3U с массой не более 5 кг, оснащённого собственными системами энергоснабжения и управления и способного к автономному полёту.

Второе изделие – межпланетный микро-буксир большой тяги с использованием перекиси водорода в качестве окислителя или однокомпонентного топлива, самовытеснения для подачи топлива в двигатель и одноимпульсной схемы выведения с выдачей однократного перигейного импульса для перехода на отлётную траекторию. Микро-буксир может быть масштабирован под потребную массу полезной нагрузки, выводимой за пределы сферы тяготения Земли. Минимальная полезная нагрузка имеет массу около 1 кг.

В ходе работы обоснована возможность создания двигательных установок на основе испарения воды из гидрогеля для маневров с малой тягой и на основе однокомпонентного двигателя на перекиси водорода 60% для отлётного модуля, показана их достаточность для выведения нано-грузов на отлётную траекторию при запуске с геопереходной орбиты. Для запуска таких грузов с низких орбит необходимо и возможно использование двухкомпонентных ЖРД с применением перекиси водорода 60% в качестве окислителя.

Предложены упрощенные схемы реализации систем управления обоих изделий, предусматривающие отказ от использования звёздного датчика для нано-буксира и вращательную стабилизацию для отлётного модуля. Показано, что необходимые технические решения обоих изделий могут быть реализованы без привлечения отраслевых предприятий на общедоступных технологиях.

Нано-буксир имеет свой собственный рынок и перспективы развития:

- обеспечение межорбитальных переходов микро- и наноаппаратов (что полностью закрывает реализовавшиеся к настоящему времени потребности рынка с эффективностью, в несколько раз превосходящей существующие решения);

- поддержание полёта nano-аппаратов на орбитах высотой 300-350 км, имеющих преимущества по удобству и эффективности работы;
- выполнение операций с другими космическими объектами, в т.ч. при обслуживании пилотируемых станций.

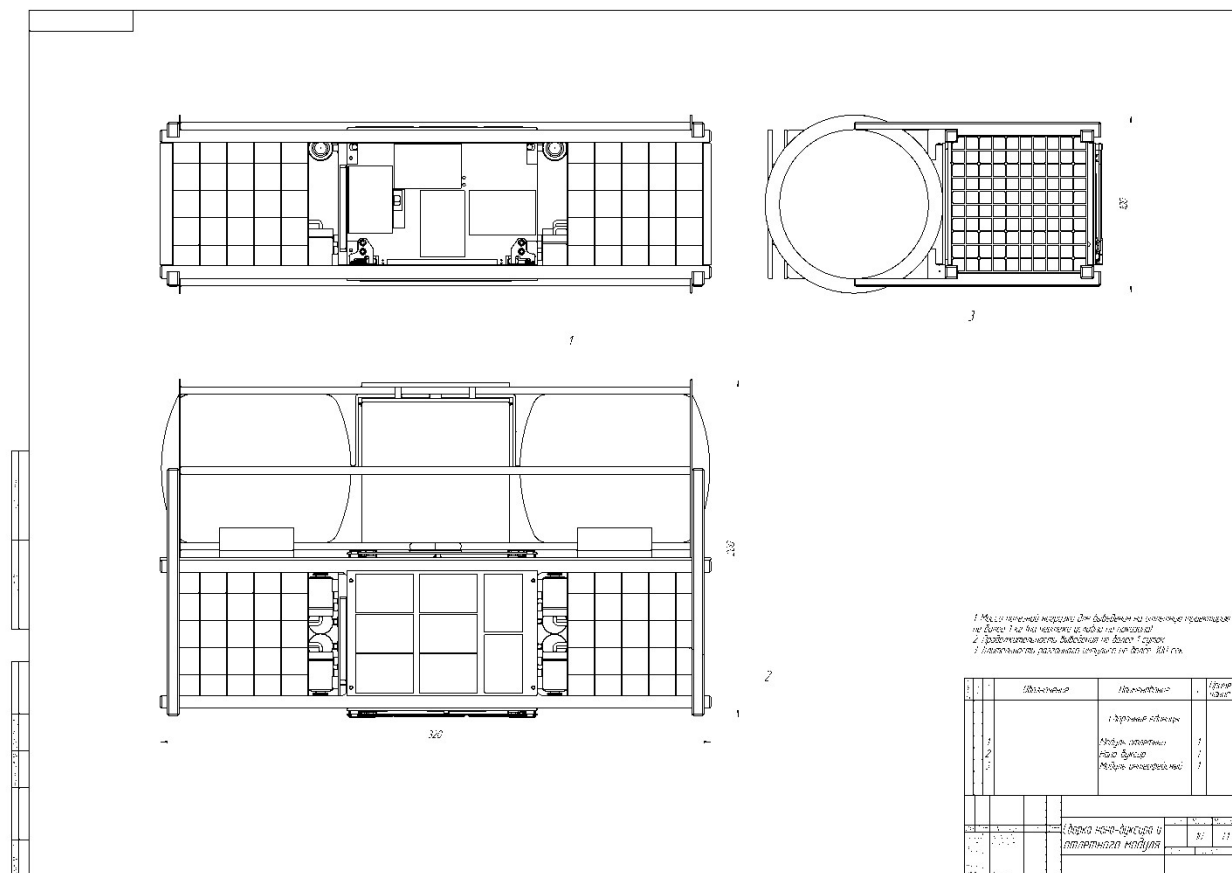


Рис. 2. Чертёж общего вида предлагаемого комплекса для выведения nano-аппаратов на отлётные траектории в варианте с массой полезной нагрузки 1 кг (условно не показана).

Задел, создаваемый при разработке отлётного модуля, может быть использован при отработке космической техники с установкой подобных ДУ на макеты изделий и создании земной ракетной техники: моделей ракет, противораковых ракет, метеорологических и геофизических ракет, ракет-носителей. Помимо этого, комплекс в целом может быть использован при отработке перспективной схемы выведения грузов на геостационарную орбиту с российских высокоширотных космодромов.

В качестве полезной нагрузки для предлагаемого комплекса могут использоваться в т.ч. космические аппараты стандарта CubeSat. Их задачи будут определяться параметрами полезной нагрузки, которая может быть размещена на такой платформе. Минимальными требованиями к ней обладает, например, концепция миссии, предусматривающая наблюдение астероида с пролётной траектории для уточнения его орбиты. Для этого на борту обрабатывается информация с камеры, совмещённой со звёздным датчиком, что позволяет определить направление на объект в зависимости от времени. В сочетании с наблюдением аппарата с Земли посредством импульсного излучателя на его борту это позволяет получить потенциально высокую точность наблюдений, в то же время предъявляя минимальные требования к каналу связи. Дополнительно может быть уточнен состав астероида при наличии гиперспектральной камеры и его геометрия при её достаточном разрешении. Полученные результаты могут иметь значение для защиты от астероидов и/или для разведки полезных ископаемых на небесных телах с целью их последующей добычи.

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА МЕТОДАМИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ АСТРОНОМИИ НА ПРИМЕРЕ РАЗГОННОГО БЛОКА «ЦЕНТАВР»

Бондаренко Ю.С., Маршалов Д.А.

Институт прикладной астрономии Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
bondarenko@iaaras.ru

В докладе представлены результаты радиолокационных наблюдений околоземного объекта 2020 SO, обнаруженного 17 сентября 2020 года, с помощью телескопа Pan-STARRS 1 в обсерватории Халеакала на острове Мауи. 2020 SO был временно захвачен земным притяжением 8 ноября 2020 года, и, совершив два больших вытянутых витка вокруг системы Земля-Луна, покинул сферу Хилла в марте 2021 года. Изначально этот объект считался обычным астероидом, сближающимся с Землей, за что получил стандартное обозначение в Центре малых планет [1], однако его орбита, похожая на земную, и малая относительная скорость дали основания полагать, что 2020 SO может иметь искусственное происхождение, а именно является частью разгонного блока «Центавр» аппарата Сервейер-2, запущенного 20 сентября 1966 года [2].

За последние 20 лет было обнаружено около десятка объектов искусственного происхождения, сближавшихся с Землей, и их число будет только расти, поскольку страны продолжают наращивать свои исследования в космосе [3,4]. Важно уметь отождествлять искусственные объекты, находящиеся на орбите вокруг Солнца, например для предотвращения их столкновений с Землей и космическими аппаратами. На сегодняшний день радиолокация является одним из наиболее эффективных методов наземного дистанционного исследования околоземных объектов, позволяя получать размеры, форму, параметры вращения и физические свойства поверхности. Основная цель нашей работы заключалась в определении физических свойств околоземного объекта 2020 SO методами радиолокационной астрономии, чтобы понять, является ли он астероидом или старым корпусом разгонного блока.

Радиолокационные наблюдения проводились 30 ноября 2020 года с использованием 70-метрового планетарного радиолокатора (DSS-14) центра дальней космической связи «Голдстоун» (США), и 32-метрового радиотелескопа (РТ-32) обсерватории Светлое (Россия), пока объект находился в общей зоне видимости двух антенн на расстоянии порядка 200 тыс. км от Земли. В результате наблюдений был определен не характерный для астероидов период вращения 2020 SO, который составил всего 9.5 сек. Было показано, что объект имеет вытянутую форму с длиной порядка 10 метров и шириной около 3 метров, соответствующую размерам разгонного блока «Центавр». Полученный коэффициент круговой поляризации объясняет наличие неровностей поверхности сантиметрового масштаба, а радиолокационное альbedo 95% подтверждает, что поверхность 2020 SO имеет высокую отражательную способность в радиодиапазоне, характерную для металлов.

Литература

1. MPEC 2020-S78: 2020 SO (2020). Minor Planet Electronic Circular. Available at <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K20/K20S78.html>
2. JPL News (2020). Earth May Have Captured a 1960s-Era Rocket Booster. Available at <https://www.jpl.nasa.gov/news/earth-may-have-captured-a-1960s-era-rocket-booster>
3. Jorgensen K., Rivkin A., Binzel R., Whitely R., Hergenrother C., Chodas P., Chesley S., Vilas F. Observations of J002E3: Possible Discovery of an Apollo Rocket Body // Bulletin of the American Astronomical Society. 2003. 35. P. 981.
4. Miles R. The unusual case of 'asteroid' 2010 KQ: a newly discovered artificial object orbiting the Sun // Journal of the British Astronomical Association. 2011. 121(6). P. 350-354.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАГМЕНТОВ ПО МАССАМ ПРИ РАЗРУШЕНИИ АСТЕРОИДОВ И МЕТЕОРОИДОВ И ОЦЕНКА МАССОВОЙ ДОЛИ МАКСИМАЛЬНОГО ФРАГМЕНТА

Брыкина И.Г., Егорова Л.А.

Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

shantii@mail.ru

Распределение фрагментов по массам является важной характеристикой разрушения космических тел – астероидов при их столкновении в космическом пространстве, метеороидов и астероидов, входящих в атмосферу Земли. Распределение фрагментов по массам необходимо знать для моделирования взаимодействия с атмосферой разрушающихся в ней космических тел, для расчета их абляции, энерговыделения и траектории. Для изучения столкновительной эволюции астероидов и моделирования их фрагментации при соударении проводятся экспериментальные исследования по разрушению твердых тел при высокоскоростном ударе. Было выполнено много экспериментов по удару более мелкого тела – ударника – о более крупное – мишень для изучения масс (размеров), форм, скоростей и вращения образовавшихся в результате разрушения мишени фрагментов [1–13 и др.].

Распределение фрагментов разрушенного тела по массам характеризуется функцией кумулятивного числа фрагментов $N_m(m)$, определяемой как количество фрагментов с массами, большими или равными m . Для описания кривой кумулятивного распределения обычно используется степенной закон, который представляется в простой форме: кумулятивное число фрагментов пропорционально некоторой степени m : $N_m \propto m^{-\beta}$. Эта корреляция между кумулятивным числом фрагментов и их массой дает линейный график в логарифмических координатах с тангенсом угла наклона, равным показателю степени. Однако эта прямая не аппроксимирует всю кривую распределения фрагментов по массам, и часто ее разбивают на два или три сегмента, которым соответствуют разные показатели степени, с более крутым наклоном для крупных фрагментов. Использование степенного закона не для кумулятивного распределения, а для плотности распределения числа фрагментов по массам, позволило [14] вывести соотношение для кумулятивного числа фрагментов, которое не является линейной функцией массы в координатах $\log N_m - \log m$:

$$N_m = \frac{1-\beta}{\beta \bar{m}_l^{1-\beta}} (\bar{m}^{-\beta} - \bar{m}_l^{-\beta}) + n_l. \quad (1)$$

Здесь $\bar{m} = m/M$ – безразмерная масса фрагмента, нормированная на общую массу фрагментов M (массу тела до разрушения), $\bar{m}_l = m_l/M$ – массовая доля наибольшего фрагмента, m_l – масса максимального фрагмента, $n_l = N_m(m_l)$ – число максимальных фрагментов ($n_l = 1$ в большинстве случаев), β – степенной индекс. Функция N_m зависит только от безразмерных параметров.

Проведено тестирование соотношения (1) путем сравнения с результатами ударных экспериментов [3–6, 9–11], моделирующих фрагментацию астероидов. Сравнения проведены для тел разной формы, изготовленных из различных материалов (три вида базальта, гипс, пироксилит, алюмооксидная керамика, цементные смеси, слабосвязанные агрегаты, метеориты), обладающих разной плотностью (от 1.1 до 3.6 г/см³) и разным пределом прочности на сжатие (от 3 до 2000 МПа), в широком диапазоне скоростей ударника V (от 300 м/с до 5.7 км/с). Рассмотрены разные типы фрагментации, определяемые, главным образом, удельной энергией удара Q (кинетическая энергия ударника с массой m_p , приходящаяся на единицу массы мишени M):

$$Q = \frac{m_p V^2}{2} / M \quad (2)$$

Показано, что формула (1) описывает экспериментальные распределения фрагментов по массам для разных типов разрушения [3, 11, 15] при $Q > 1$ кДж/кг. В случае равномерного изменения масс фрагментов формула применима, начиная с первого,

максимального, фрагмента, а в случаях, когда имеется один (или два) наибольший фрагмент, который в несколько раз больше следующего, она применима, начиная со второго (третьего) фрагмента. Пример сопоставления расчетов по формуле (1) с результатами экспериментов [9] по разрушению образца метеорита Мурчисон – углеродистого хондрита CM2 – показан на Рис. 1.

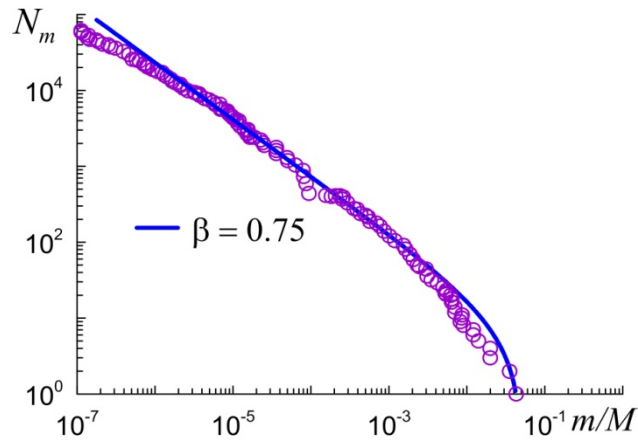


Рис. 1. Распределение фрагментов по массам. Маркеры – эксперимент [9] для метеорита Мурчисон, линия – формула (1).

Когда астероид или метеороид разрушается в атмосфере Земли, о распределении его фрагментов по массам можно в какой-то степени судить по распределению масс метеоритов, выпавших на землю. Проведено сравнение аналитического распределения (1) с распределениями по массам найденных метеоритов в тех случаях, когда их было собрано достаточно много. Показано, что формула (1) адекватно описывает распределения по массам метеоритов, найденных после одиннадцати метеоритных дождей: Царев, Сихотэ-Алинского, Алленде, Мбале, Тагиш Лэйк, Бассикуну, Алмахата-Ситта, Кошице, Саттерс-Милл, Челябинского и Сарычичек. Проведено сопоставление распределений метеоритов с распределениями, полученными в ударных экспериментах. Оценены значения степенного индекса, являющегося свободным параметром, подбираемым для наилучшего совпадения теоретического распределения с эмпирическими.

Важным параметром в исследовании и моделировании фрагментации космических тел является массовая доля максимального фрагмента m_l/M – отношение массы самого крупного фрагмента к общей массе всех фрагментов, или массе тела до его разрушения. Этот параметр в значительной мере характеризует степень разрушения. Когда мы описываем конкретное эмпирическое распределение фрагментов по массам, используя соотношение (1), параметр m_l/M считается известным. Но для моделирования (прогнозирования) распределения фрагментов по массам при разрушении астероида или метеороида этот параметр нужно задавать. На основании данных большого количества экспериментов [1–13] проведен анализ зависимости параметра m_l/M от удельной энергии удара Q , а также от параметра, введенного для рассмотрения разрушения космических тел в атмосфере под действием сил давления. Представлены результаты экспериментов, проводимых как для земных материалов: четырех видов базальта, пироксилита, гипса, цементных смесей с разными прочностными характеристиками, так и для метеоритов, обыкновенных и углеродистых хондритов: L6 ALH 85017, L3-6 NWA 869, L5/6 Mbale, L4 Saratov, L6 NWA791, H5 Gao, NWA620, MOR001, CV3 Allende, CM2 Murchison, CV3 NWA 4502. Данные аппроксимировались степенной функцией $m_l/M = CQ^\delta$, где константы C и δ подбирались отдельно для высокоскоростных ($V \geq 1$ км/с) и низкоскоростных ($V < 1$ км/с) экспериментов. Обсуждается воспроизводимость экспериментальных результатов. Для высокоскоростных экспериментов отмечается большой разброс данных для разных материалов разрушаемого тела при $Q < 8$ кДж/кг. В то же время при $Q \geq 8$ кДж/кг, для режима полного разрушения [11], данные для разных материалов близки друг к другу и хорошо аппроксимируются с точностью до множителя 2 (существует фактор случайности)

степенной зависимостью массовой доли максимального фрагмента m_i/M от удельной энергии Q .

Литература

1. Fujiwara A., Kamimoto G., Tsukamoto A. Destruction of basaltic bodies by high-velocity impact // *Icarus*. 1977. 31. P. 277–288.
2. Matsui T., Waza T. Laboratory Simulation of Planetesimal Collision // *J. Geophys. Research*. 1982. 87. B13. P. 10,968–10,982.
3. Takagi Y., Mizutani H., Kawakami S.-I. Impact fragmentation experiments of basalts and pyrophyllites // *Icarus*. 1984. 59. P. 462–477.
4. Davis D.R., Ryan E.V. On collisional disruption: Experimental results and scaling laws // *Icarus*. 1990. 83. P. 156–182.
5. Ryan E.V., Hartmann W.K., Davis D.R. Impact experiments 3: Catastrophic fragmentation of aggregate targets and relation to asteroids // *Icarus*. 1991. 94. P. 283–298.
6. Nakamura A., Fujiwara A. Velocity distribution of fragments formed in a simulated collisional disruption // *Icarus*. 1991. 92. P. 132–146.
7. Flynn G.J., Durda D.D. Chemical and mineralogical size segregation in the impact disruption of inhomogeneous, anhydrous meteorites // *Planet. and Space Sci.* 2004. 52. P. 1129–1140.
8. Cintala M.J., Hörz F. Experimental impacts into chondritic targets, part I: Disruption of an L6 chondrite by multiple impacts // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2008. 43. P. 771–803.
9. Flynn G.J., Durda D.D., Sandelc L.E., Kreftc J.W., Strait M.M. Dust production from the hypervelocity impact disruption of the Murchison hydrous CM2 meteorite: Implications for the disruption of hydrous asteroids and the production of interplanetary dust // *Planet. and Space Sci.* 2009. 57. P. 119–126.
10. Okamoto C., Arakawa M. Experimental study on the collisional disruption of porous gypsum spheres // *Meteorit. and Planet. Sci.* 2009. 44. P. 1947–1954.
11. Michikami T., Hagermann A., Kadokawa T., Yoshida A., Shimada A., Hasegawa S., Tsuchiyama A. Fragment shapes in impact experiments ranging from cratering to catastrophic disruption // *Icarus*. 2016. 264. P. 316–330.
12. Flynn G.J., Durda D.D., Patmoreet E.B., Jack S.L., Molesky M.J., May B.A., Congram S.N., Strait M.M., Macke R.J. Hypervelocity cratering and disruption of the Northwest Africa 869 ordinary chondrite meteorite: Implications for crater production, catastrophic disruption, momentum transfer and dust production on asteroids // *Planet. and Space Sci.* 2018. 164. P. 91–105.
13. Flynn G.J., Durda D.D., Molesky M.J., May B.A., Congram S.N., Loftus C.L., Reagan J.R., Strait M.M., Macke R.J. Hypervelocity cratering and disruption of the Northwest Africa 4502 carbonaceous chondrite meteorite: Implications for crater production, catastrophic disruption, momentum transfer and dust production on asteroids // *Planet. and Space Sci.* 2020. 187. id. 104916.
14. Brykina I.G., Egorova L.A. On the mass distribution of fragments of an asteroid disrupted in the Earth's atmosphere // *Advances in Astronomy*. 2021. id. 9914717.
15. Fujiwara A., Cerroni P., Davis D.R., Ryan E., Di Martino M., Holsapple K., Housen K. Experiments and scaling laws for catastrophic collisions // *Asteroids II*. 1989. P. 240–265.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИКО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АСТЕРОИДОВ, В ТОМ ЧИСЛЕ АСЗ

Бусарев В.В.^{1,2}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, Москва, Россия

²ИНАСАН, РАН, Москва, Россия

busarev@sai.msu.ru

В докладе обсуждаются методы определения физических и химико-минералогических свойств астероидов, основанные преимущественно на фотометрических и спектрофотометрических измерениях. Как известно, наблюдательная фотометрия привела к созданию системы изучения всех небесных тел по их звездным величинам. Совершенствование техники наземных оптических наблюдений, расширение используемого спектрального диапазона и создание универсальных многополосных фотометрических систем (напр., «UBVRI») для всех точечных светящихся объектов привели к прогрессу и в изучении малых планетных тел: были разработаны полуэмпирические методы дистанционной оценки их основных параметров, таких как размер, форма и геометрическое альbedo [1]. Учитывая огромное число малых небесных тел, сложность их изучения с помощью космических аппаратов, потенциальную опасность астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), эти методы не теряют своей значимости и являются наиболее простыми и эффективными.

Изучение астероидов спектральным методом в оптическом диапазоне началось еще в конце 20-х годов XX в. (с применением фотографической регистрации спектра объекта) и было направлено на поиск возможностей определения состава вещества твердых небесных тел (напр., [2-4]). Появление и внедрение в качестве приемников в астрономии высокоточных ФЭУ, а затем двумерных ПЗС-матриц в 60-70-е годы облегчило и ускорило разработку методов регистрации, изучения и химико-минералогической интерпретации спектров отражения астероидов в «окне» наибольшей прозрачности земной атмосферы – в диапазоне ~0.4-1.0 мкм (напр., [5-9]) и частично до 2.5 мкм (напр., [10]). По сравнению с другими дистанционными методами (радиолокационным, поляриметрическим и др.) спектральные исследования астероидов являются наиболее комплексными: они включают достижения целого ряда смежных наук, данные лабораторного анализа всех известных образцов метеоритов (как вероятных фрагментов этих тел), а также базируются на экспериментальном и математическом моделировании изучаемых объектов. И это не случайно, так как спектральные свойства астероидов, как реликтов древнейших тел Солнечной системы, связаны с первичными условиями и процессами формирования твердого вещества, знание которых необходимо для решения наиболее ключевых проблем (таких как происхождение жизни, механизмы образования планетных систем и т.п.). Кроме того, с учетом значительного роста интереса к внеземным природным ресурсам, особенно в околоземном пространстве, определение и изучение состава вещества астероидов сейчас необходимо уже в практическом плане.

Изучение спектральными методами пылевой или сублимационно-пылевой активности астероидов под влиянием различных физических факторов (основными из которых являются колебания подсолнечной температуры и солнечная активность) может стать новым инструментом исследования состава вещества этих тел [11]. На Рис. 1 («а–в») представлены модельные спектры интенсивности света (нормированные на $\lambda = 0.55$ мкм при фазовом угле 20°), обратно-рассеянного от условного астероида С-типа (с геометрическим альbedo 0.072 и спектром отражения, обозначенным как «поверхность»), окруженного экзосферой с оптической толщиной $\tau = 0.5$, состоящей из субмикронных агрегатов частиц разного состава [11]. Данное моделирование выполнено с применением теории переноса излучения в пылевой среде, состоящей из агрегатов субмикронных частиц с учетом действительной и мнимой части показателя преломления наиболее распространенных в космических условиях материалов, таких как водяной лед, силикаты (оливин) и органика (толины). Предполагалось, что наиболее мелкие пылевые частицы

имеют сферическую форму и образуют фрактальные структуры (размеры частиц и одна из таких структур приведены на Рис. 1а), а также применялся алгоритм расчета рассеяния света случайно ориентированными агрегатами методом суперпозиции Т-матриц [11, 12].

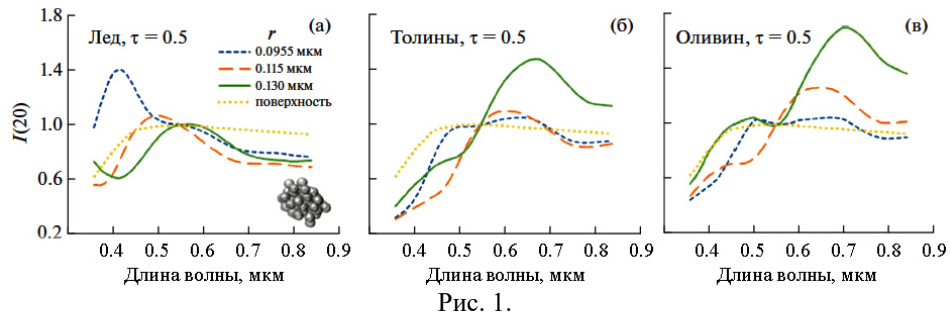


Рис. 1.

Соответствие формы одной из таких модельных кривых наблюдаемому спектру астероида, имеющего признаки активности, может быть признаком преобладания частиц определенного состава в пылевой экзосфере астероида, что позволяет судить о составе его поверхностного вещества. Возможен и другой вариант использования вышеописанных теоретических моделей. Для уточнения таксономической классификации нормированный спектр отражения астероида обычно сравнивается со всеми «шаблонами» (спектральными амплитудными границами в диапазоне 0.4-1.0 мкм) известных таксономических классов (Толена [6] или SMASSII [9]), как это было сделано в нашей недавней работе [13] при обсуждении результатов спектрофотометрии астероида Ch-типа 19 Фортуны (Рис. 2а, спектры 1 и 2). С целью контроля стабильности спектральной прозрачности земной атмосферы спектры отражения Фортуны сравнивались и со спектрами стандартной звезды солнечного типа (HIP 996; буквы «А» и «В» обозначают наиболее сильные теллурические полосы O_2) до и после наблюдений (Рис. 2б). Нами были обнаружены признаки сублимационно-пылевой активности астероида, так как его спектры 1 и 2 в длинноволновой части значительно выходят за пределы «шаблона» ранее установленного спектрального типа Ch. Полученный результат оказался ожидаемым, так как этот астероид с низкотемпературной минералогией и, вероятно, имеющий, в составе вещества водяной лед, мы специально наблюдали вблизи минимального гелиоцентрического расстояния. Кроме того, астероид непосредственно перед нашими наблюдениями подвергся действию ударной волны в солнечном ветре, возникшей при солнечном корональном выбросе вещества [13]. Таким образом, в случае сублимационно-пылевой активности астероида в момент проведения наблюдений определение его таксономического типа и соответствующей минералогии вещества может быть затруднено по причине значительных искажений спектра, которые можно объяснить и учесть при их идентификации с помощью расчета модельных спектров (Рис. 1).

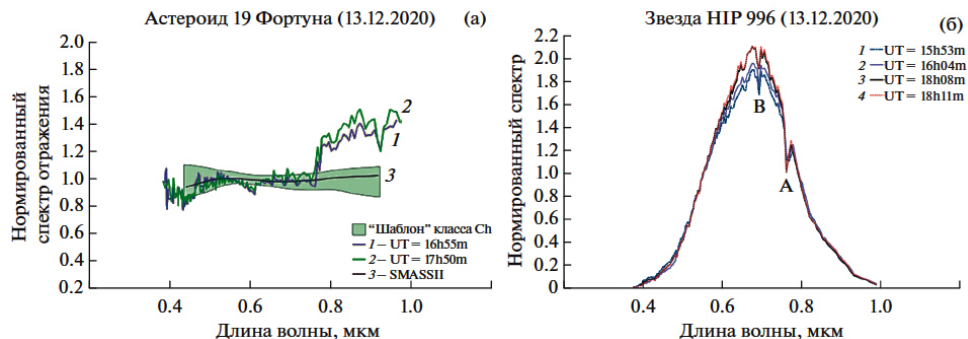


Рис. 2.

Задача выполнения обзорных наблюдений и оперативного определения физических параметров и оценки базового химико-минералогического состава большого количества астероидов при их наземных наблюдениях может быть решена в настоящее время с помощью многополосной *UBVRI*-фотометрии (как упрощенного варианта спектрофотометрии в видимом и ближнем ИК диапазонах). Осуществление

скоординированных *UBVRI*-наблюдений астероидов до 20-й звездной величины, включая AC3, с помощью нескольких автоматизированных телескопов с диаметром ~0.6-1.5 м, установленных в высокогорных обсерваториях, представляется вполне реальным с уже имеющимся оборудованием и штатом квалифицированных сотрудников.

В то же время полное исключение влияния земной атмосферы и расширение спектрального диапазона, которые могут многократно увеличить возможности в изучении малых небесных тел, достижимы только при осуществлении космических проектов. В этом плане очень перспективным и пока еще малоосвоенным является ультрафиолетовый (УФ) диапазон. Например, при изучении метеоритов и типичных для них минералов, как вероятных фрагментов астероидов, сделан вывод (напр. [14]), что их спектры отражения в диапазоне 200-400 нм более информативны для диагностики минералогии, чем в видимом диапазоне. Ближайший к осуществлению космический проект, с помощью которого такие данные мы надеемся получить, – это «Спектр-УФ» (<http://www.inasan.ru/sw/wso-uv/>), который направлен на изучение широкого круга небесных тел, включая астероиды и ядра комет, в УФ части спектра (100-320 нм). Важно, что этот международный проект возглавляет Россия, а запуск космического аппарата с 1.7-м телескопом и другим дополнительным оборудованием намечен на 2023 г.

Литература

1. Bowell E., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., Harris A. Application of photometric models to asteroids // *Asteroids II* / R.P. Binzel, T. Gehrels, M.S. Matthews (eds), Tucson: Univ. of Arizona Press. 1989. P. 524-556.
2. Bobrovnikoff N.T. The spectra of minor planets // *Lick Observ. Bull.* 1929. No. 407. P. 18-27.
3. Johnson W.A. Spectrophotometric study of three asteroids // *Harvard College Observ. Bull.* 1939. No. 911. P.13-16.
4. McCord T.B., Adams J.B., Johnson T.V. Asteroid Vesta: Spectral reflectivity and compositional implications // *Science*. 1970. V.168. Iss. 3938. P. 1445-1447.
5. Zellner B., Tholen D.J., Tedesco E.F. The eight-color asteroid survey: Results for 589 minor planets // *Icarus*. 1985. V. 61. P. 355-416.
6. Tholen D.J. Asteroid taxonomy: From cluster analysis to photometry// Ph. D. thesis, The University of Arizona, 1984. 150 p.
7. Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P. Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 98-127.
8. Бусарев В. В. Спектрофотометрия безатмосферных тел Солнечной системы // *Астрон. вестн.* 1999. Т. 33. С. 140-150.
9. Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. The Observations // *Icarus*. 2002. V. 158. P. 106–145.
10. DeMeo F.E., Binzel R.P., Slivan S.M., Bus S.J. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared // *Icarus*. 2009. V. 202. P. 160-180.
11. Busarev V.V., Petrova E.V., Irmambetova T.R., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact // *Icarus*. 2021. V. 369. 114634 (18 pp).
12. Mackowski D.W., Mishchenko M.I. Calculation of the T-matrix and the scattering matrix for ensembles of spheres // *J. Opt. Soc. Am.* 1996. A/V. 13. P. 2266–2278.
13. Бусарев В.В., Савелова А.А., Щербина М.П., Барабанов С.И. Спектральные признаки одновременной сублимационной активности и появления пылевой экзосферы у 8 астероидов Главного пояса вблизи перигелия // *Астрон. вестн.* 2022. Т. 56. С. 92-108.
14. Cloutis E.A., McCormack K.A., Bell III J.F. et al. Ultraviolet spectral reflectance properties of common planetary minerals // *Icarus*. 2008. V. 197. P. 321–347.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОБСТВЕННОГО ВРАЩЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ОТРАЖЕННОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА

Вениаминов С.С., Убоженко Д.Ю., Ремень Б.А.

Научно-исследовательский испытательный центр Центрального научно-исследовательского института Воздушно-космических сил Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва, Россия

boris.remen@gmail.com

При решении задач принудительного удаления крупногабаритного космического мусора (КМ) с орбиты его движения в околоземном космическом пространстве необходимо оценивать параметры движения КМ, в том числе параметры собственного вращения КМ относительно его центра масс. Например, при применении с этой целью космического аппарата (КА) типа автоматической руки (такого как разработанный в Тяньцзиньском университете КА захвата типа «щупальце») необходимым условием успешности операции является отсутствие интенсивного вращения подлежащего захвату космического объекта (КО). Аналогичная задача возникает при определении состояния КА после внезапного выхода из строя его системы стабилизации или другой нештатной ситуации на борту, приводящей к возникновению неконтролируемого движения КА относительно центра масс. Крайне необходимо иметь такую информацию при проведении операции восстановления работоспособности аварийного КА. Основными средствами контроля космического пространства, позволяющими получить координатную и некоординатную информацию о КО, являются оптико-электронные и радиолокационные средства. Современные наземные радиолокационные средства системы контроля космического пространства (СККП) позволяют получить детальные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) отраженного радиолокационного сигнала.

Возрастающая детализация АЧХ за счёт уменьшения длины волны излучаемого радиолокационного сигнала позволяет фиксировать разность доплеровских сдвигов, на основе которой возможно оценить параметры собственного вращения КО: угловое положение оси вращения и период вращения.

В данной статье предлагается общее описание метода определения параметров собственного вращения КО, основанного на предположении о достаточности АЧХ с двух смежных наблюдений наземными радиолокационными станциями для однозначного определения ориентации вектора вращения КО.

Определение ориентации вектора вращения КО осуществляется путём анализа зависимости разности доплеровских сдвигов от времени, полученной из АЧХ отраженного радиолокационного сигнала от КО. На примере вращения двухточечного КО показана связь разности доплеровских сдвигов с его ориентацией. Период вращения определяется на основе семейства D-методов выявления скрытых периодичностей, примененных к АЧХ.

В заключение приводятся результаты моделирования работы метода определения параметров вращения двухточечной модели КО на круговой околоземной орбите с прохождением через наземные радиолокационные станции со смежными зонами действия при разных направлениях и величинах вектора вращения.

Предложенный метод может применяться в условиях отсутствия априорной информации о КО или обучающей выборки, что является преимуществом по сравнению с методом нейронных сетей. Использование АЧХ от двух смежных прохождений позволяет оценить параметры вращения нового или изменившего свою траекторию КО на незначительном интервале времени.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СОБСТВЕННОГО ВРАЩЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО СЕРИИ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ

Вениаминов С.С., Убоженко Д.Ю., Токаев М.И.

Научно-исследовательский испытательный центр Центрального научно-исследовательского института Воздушно-космических сил Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва, Россия
whyife71@gmail.com

При решении задач принудительного удаления крупногабаритного космического мусора (КМ) с орбиты его движения в околоземном космическом пространстве, необходимо оценивать параметры движения КМ, в том числе параметры собственного вращения КМ относительно его центра масс. Например, при применении с этой целью космического аппарата (КА) типа автоматической руки (такого как разработанного в Тяньцзиньском университете КА-захвата «щупальце» [1]), необходимым условием успешности операции является отсутствие интенсивного вращения подлежащего захвату космического объекта (КО). Аналогичная задача возникает при определении состояния КА после внезапного выхода из строя его системы стабилизации или вообще какой-либо аварии на борту, приводящей к возникновению движения КА относительно центра масс. Крайне необходимо иметь такую информацию при проведении операции восстановления работоспособности аварийного КА. Основными средствами контроля космического пространства, позволяющими получить координатную и некоординатную информацию о космическом мусоре, являются оптико-электронные и радиолокационные средства. Современные наземные оптические средства системы контроля космического пространства (СККП) позволяют получить детальные фотоизображения космического мусора. Возрастающее качество оптических изображений позволяет оценить внешнее состояние объектов, его габаритные характеристики и выделить особые выделяющиеся точки на поверхности КО.

В данной статье предлагается метод определения параметров собственного вращения КО, основанный на предположении о возможности контроля положения особой выделенной точки на поверхности КО на серии фотоизображений от одного наземного оптико-электронного средства и однозначной ориентации вектора вращения КО в геоцентрической неинерциальной системе координат. Определение параметров собственного вращения космического объекта осуществляется на основе анализа параметров канонического уравнения эллипса, который образуют особые точки поверхности КО, выбранные на серии фотоизображений, фиксирующих изменение положения КО. Координаты точек определяются с помощью преобразования Хафа [2-6], как точки пересечения прямых, совпадающих с контуром изображения КО. При формировании канонического уравнения эллипса, описывающего вращение особой точки на поверхности КО, на серии изображений учитывается вращение Земли, орбитальное движение КО [7]. В заключение приводятся результаты оценки параметров вращения КО, полученных предложенным методом, от качества фотоизображений.

Предложенный метод может применяться в условиях отсутствия априорной информации об объекте или обучающей выборки, необходимой при использовании нейронных сетей. Использование небольшой последовательной серии фотоизображений позволяет на незначительном интервале времени оценить параметры вращения нового или изменившего свою траекторию КО. Использование преобразования Хафа применимо при работе с фрагментами изображений, что позволит использовать предложенный метод при небольших угловых скоростях вращения КО.

Литература

1. С. Вениаминов, Д. Убоженко, И. Гололобов. Сборник информационно-справочных материалов по отчетам НАСА. НИИЦ (г. Москва) ЦНИИ ВКС МО РФ, Москва, 2021 г.
2. А.Дягтерева, В.Веженец. Преобразование Хафа (Houghtransform) Компьютерная графика и мультимедиа. Выпуск №(1) 2003 [Электронный ресурс]. URL <http://cgm.computergraphics.ru/content/view/36>.
3. М.А. Кудрина «Использование преобразования Хафа для обнаружения прямых линий и окружностей на изображении» Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т.16, №4(2), 2014. Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет).
4. Морозовский К.В. Оценка параметров поворота изображения пространственного объекта на базе преобразования Хафа. Фундаментальные исследования (Технические науки). № 9, 2015. С. 491-496.
5. Роженцов А.А., Морозовский К.В., Баев А.А. Модифицированное обобщенное преобразование Хафа для обработки трёхмерных изображений с неизвестными параметрами вращения и масштабирования / А.А. Роженцов, К.В. Морозовский, А.А. Баев // Автометрия. - Новосибирск, 2013. - Т. 49. - № 2. - С. 30-41.
6. Роженцов А.А. Оценка параметров и распознавание изображений трехмерных объектов с неупорядоченными отсчетами / А.А. Роженцов, А.А. Баев, А.С. Наумов // Автометрия. - 2010- Т. 46. - Новосибирск,. - № 1. - С. 57-69.
7. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / [Абалакин В.К., Аксенов Е.П., Гребеников Е.А и др.] под ред. Дубошина Г.Н. – М.: Наука, Глав.ред.физ.-мат.лит, 1976. - 864 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗВЕЗДНЫХ КАТАЛОГОВ ПРИ РЕШЕНИИ ПРИКЛАДНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Гедзюн В.С.¹, Жуков А.О.^{1,2}, Переверзев А.Ф.¹, Давидович Ю.А.¹

¹ФГБНУ «Аналитический центр», Москва, Россия

²ФГБУН Институт астрономии РАН, Москва, Россия

victorgedzyun@mail.ru, aozhukov@mail.ru

Одна из основных задач астрономии – определение характеристик звезд, в том числе положений, собственных движений и лучевых скоростей, звездных величин, спектральной классификации, кривых изменения блеска (у переменных звезд) и т.п. [9–13]. Данные характеристики применяются как непосредственно в научных исследованиях (изучение строения и развития звезд и звездных систем), так и при решении прикладных задач [1–3]:

- ориентации космических аппаратов (КА) в том числе при измерении угловых координат космических объектов (КО) оптическими (оптоэлектронными) средствами наземного и космического базирования;

- высокоточной идентификации КО;

- автономной навигации КА;

- навигации и ориентации в мореплавании и авиации [4];

- геодезии;

- вычисления эфемерид важнейших объектов и составления астрономических ежегодников.

Результаты определений характеристик звезд публикуются в виде упорядоченных списков, которые называются звездными каталогами. В зависимости от содержания каталога и принципа выбора включенных в него объектов различают астрономические каталоги: обзоры неба, каталоги переменных звезд, ярких звезд и т.п. [5, 6, 14, 15].

Наиболее востребованными прикладными задачами, в которых используются звездные каталоги, являются:

- звёздная ориентация – бортовые каталоги для звёздных датчиков;

- распознавание КА по «цвету» отраженного излучения – «фотометрические паспорта КА» [7, 8];

- обзоры неба – данные, накопленные в астрономических каталогах, решают фундаментальные задачи астрофизики, звездной астрономии, космологии и геодезии.

Звезды характеризуются координатной (астрометрической) и некоординатной (фотометрической, спектральной) информацией.

Координатная (астрометрическая) информация имеет следующие параметры:

- координаты α, δ ;

- собственные движения μ_α, μ_δ (угловые скорости);

- угловые ускорения $(d^2\alpha)/dt^2$ и $(d^2\delta)/dt^2$;

- параллаксы π (расстояние до звезды: $\pi = 1/r$);

- лучевые скорости $v_r = dr/dt$.

Некоординатная (фотометрическая) информация имеет следующие параметры:

- относительные облученности на Земле, создаваемые КО, в разных диапазонах длин волн (измеряются в звёздных величинах, обозначаются – «^m»);

- типичные полосы: U, W – УФ; B – синий; V – визуальный (желто-зеленый); R – красный; I, J, H, K – ближний ИК; L, M, N, O, P, Q – средний ИК-диапазон.

В докладе проведен анализ существующего положения в звездных каталогах и их применение в прикладных задачах. Рассмотрены перспективы развития бортовых звездных каталогов в ближайшем будущем.

Показано, что точных многополосных фотометрических каталогов, необходимых для создания бортового звёздного каталога в интервале до $9...16^m$, а также астрометрических каталогов точностью лучше $0,01$ угл.с в интервале $12...15^m$ на сегодняшний день не существует. Необходима работа по их созданию. Десятиполосный

фотометрический каталог с требуемыми характеристиками предполагается получить в планируемом ГАИШ МГУ и ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» космическом эксперименте «Лира-Б», а астрометрические данные очень высокой точности получены в Европейском космическом эксперименте Gaia.

Литература

1. Жуков А. О. Современное состояние и перспективы создания новых каталогов для звёздной ориентации и прикладных задач / А. О. Жуков, В. С. Гедзюн, А. И. Гладышев, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, Н. И. Шахов. – Текст: непосредственный // XL Академические чтения по космонавтике посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов; 26–29 января 2016 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2015. – ISBN: 978-5-7038-4345-1. – С. 263.
2. Жуков А. О. Краткий обзор современных звездных каталогов, используемых при навигации космических аппаратов, решающих задачи радиомониторинга / А. О. Жуков, Е. О. Еремин. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем «РАДИОИНФОКОМ-2019»; сборник научных статей IV Международной научно-практической конференции; 11–15 ноября 2019 года. – Москва: «МИРЭА – Российский технологический университет», 2019. – ISBN: 978-5-7339-1523-4. – С. 14–17.
3. Гладышев А. И. Усовершенствование звездных каталогов для решения прикладных задач / А. И. Гладышев, А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, Н. И. Шахов, С. П. Гавриш. – Текст: непосредственный // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления; сборник тезисов докладов Всероссийской научно-практической конференции; 29 декабря 2015 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр», 2015. – ISBN: 978-5-904670-33-7. – С. 80–82.
4. Бирюков А. В. Навигационный звёздный каталог минимального объёма, привязанный к квазиравномерной сетке на небесной сфере / А. В. Бирюков, А. И. Захаров, М. Г. Никифоров, Ф. Н. Николаев, М. Е. Прохоров, М. С. Тучин. – Текст: непосредственный // Механика, управление и информатика. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2013. – № 1 (13). – ISSN: 2075-6836. – С. 230–242.
5. Жуков А. О. Моделирование фона неба в широком спектральном диапазоне в околоземном космическом пространстве / А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, Н. И. Шахов, В. С. Гедзюн, А. И. Гладышев. – Текст: непосредственный // Минцевские чтения; Вторая Всероссийская научно-техническая конференция молодых конструкторов и инженеров, посвящена 120-летию со дня рождения академика А. Л. Минца и 60-летию аспирантуры Радиотехнического института; 30–31 января 2015 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2015. – ISBN: 978-5-7038-4226-3. – С. 222–233.
6. Жуков А. О. Моделирование фона неба в широком спектральном диапазоне в околоземном космическом пространстве / А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, В. Г. Мошкалёв, Н. И. Шахов, И. А. Зиновьев. – Текст: непосредственный // Механика, управление и информатика. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2015. – Т. 7. – № 2 (55). – ISSN: 2075-6836. – С. 235–245.

7. Жуков А. О. Способ определения конструктивных особенностей космических объектов по спектральным характеристикам / А. О. Жуков, С. В. Логунов. – Текст: непосредственный // Нелинейный мир. – Москва: Издательство «Радиотехника», 2013. – Т. 11. – № 8. – ISSN: 2070-0970. – С. 554–558.
8. Жуков А. О. Разработка научно-методического аппарата построения фотометрических эталонов космических объектов / А. О. Жуков, А. А. Заверзаев. – Текст: непосредственный // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления; сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции; 29 декабря 2017 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр», 2018. – ISBN: 978-5-904670-53-5. – С. 140–143.
9. Захаров А. И. Минимальные технические характеристики звёздного датчика ориентации, необходимые для достижения заданной погрешности / А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, М. С. Тучин, А. О. Жуков. – Текст: непосредственный // Астрофизический бюллетень. – Нижний Архыз: Специальная астрофизическая обсерватория РАН, 2013. – Т. 68. – № 4. – ISSN: 1990-3391. – С. 507–520.
10. Абраменко Е. В. Метод построения и обоснование основных ТТХ бортового аппаратного комплекса космических аппаратов для решения задач получения, передачи и обработки измерительной информации в оптическом диапазоне длин волн / Е. В. Абраменко, А. И. Гладышев, А. В. Евенко, А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров. – Текст: непосредственный // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – Москва: Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», 2017. – № 2 (134). – ISSN: 1729-6552. – С. 26–31.
11. Жуков А. О. Моделирование фоновой обстановки околоземного космического пространства / А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, Н. И. Шахов, В. С. Гедзюн, А. И. Гладышев, М. С. Тучин, В. Г. Мошкалева, Н. Л. Крусанова. – Текст: непосредственный // Минцевские чтения; труды Третьей Всероссийской научно-технической конференции молодых конструкторов и инженеров, посвященной 70-летию Радиотехнического института имени академика А. Л. Минца и 70-летию ФИЗТЕХА. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2016. – ISBN: 978-5-7038-4486-1. – С. 160–169.
12. Prusti T. The Gaia mission / T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. F. Brown, A. Vallenari, et al. – Text (visual) // Astronomy and Astrophysics. – Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2016. – Vol. 595. – ISSN: 0004-6361. – Id. A1.
13. Захаров А. И. Создание комплекса научной аппаратуры многоцветного фотометрического обзора неба: монография / А. И. Захаров, А. О. Жуков, А. В. Миронов, Б. П. Папченко, М. Е. Прохоров, О. Ю. Стекольников, М. С. Тучин. – Текст: непосредственный; Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Особое конструкторское бюро Московского энергетического института. – Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр», 2018. – ISBN: 978-5-904670-52-8. – 147 с.
14. Жуков А. О. Метод проведения обзора и вариант построения космической системы для мониторинга космических объектов на околоземных орбитах / А. О. Жуков, М. Е. Прохоров, А. И. Захаров, Ф. Н. Николаев, М. С. Тучин, Н. И. Шахов. – Текст: непосредственный // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2013. – Т. 10. – № 4–3. – ISSN: 1729-5459. – С. 71–75.
15. Gaia Collaboration. Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties // Astronomy and Astrophysics. – 2016. – V. 595. – Id. A2. – P. 23.

АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В СЛОЖНОЙ ФОНО-ЦЕЛЕВОЙ ОБСТАНОВКЕ

Жуков А.О.^{1,2}, Гедзюн В.С.¹, Переверзев А.Ф.¹, Башкатов А.И.¹

¹ФГБНУ «Аналитический центр», Москва, Россия

²ФГБУН Институт астрономии РАН, Москва, Россия

victorgedzyun@mail.ru, aozhukov@mail.ru

В процессе эксплуатации оптико-электронных приборов, используемых для наблюдения космических объектов (КО), возникает необходимость оценки их текущих параметров [10, 14, 16, 17, 18]. Связано это с тем, что, во-первых, характеристики приборов деградируют со временем и, во-вторых, в различных условиях наблюдения их возможности будут отличаться. Одной из важных характеристик оптико-электронной системы, характеризующих ее функциональные возможности, является динамический диапазон.

В настоящее время для термина «динамический диапазон» в различных областях науки и техники существуют свои определения [1, 2, 3]. В общем случае динамический диапазон – это логарифм отношения максимального и минимальных возможных значений сигнала. У современных ПЗС уровень шума составляет 15-45 электронов, а для охлаждаемых достигает 2 при использовании оптимальной цифровой фильтрации [4].

Применительно к цифровым изображениям оперируют количеством уровней градации цветовых каналов, а также фотографической широтой.

При эксплуатации оптико-электронных приборов наблюдения КО важной задачей является фотометрическая обработка полученных кадров. Поэтому предлагается в качестве понятия «динамический диапазон» применительно к оптико-электронным системам наблюдения КО использовать определение, учитывающее возможность проведения качественного фотометрического анализа полученных кадров.

При фотометрической обработке кадров с изображениями КО приходится сталкиваться с ситуацией, когда далеко не все полученные изображения можно использовать для дальнейшей работы.

Динамический диапазон оптико-электронной системы наблюдения КО на фоне небесной сферы ограничен снизу проникающей способностью, а сверху – звёздной величиной, при которой начинает происходить растекание заряда в центре изображения звезды по соседним пикселям.

Практическое определение предельной регистрируемой звёздной величины требует проведения наблюдений каталожных звёзд, которые заранее выбираются в качестве опорных. При этом желательно равномерное расположение этих звёзд на небесной сфере [5]. Кроме того, в измерениях по оценке проникающей способности не должны участвовать звезды, переменность которых выше некоторого допустимого уровня.

Для оценки верхней границы динамического диапазона оптико-электронной системы предлагается использовать простой способ выявления факта наличия «срезанной» вершины трёхмерного изображения объекта:

- определение энергетического центра изображения объекта по методу взвешенной суммы [6, 7, 15];

- если все значения яркости пикселей, находящихся рядом с энергетическим центром изображения, меньше значения яркости в самом центре, то «срезанная» вершина отсутствует, иначе – присутствует факт наличия «срезанной» вершины говорит о выходе за динамический диапазон оптико-электронной системы [8, 9].

При практической оценке верхней границы динамического диапазона используются изображения достаточно ярких звёзд, содержащиеся в современных высокоточных астрономических каталогах [11–13].

1. ГОСТ 25532-89. Приборы с переносом заряда фоточувствительные. Термины и определения. [Текст] = Photosensitive charge transfer devices. Terms and definitions: межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 21.12.1989 № 3962 : дата введения 1991-01-01 / разработан А. Ф. Векслер, В. Н. Никитина, Е. Б. Кирсанова, М. Д. Аксененко, Б. Н. Разживин. – Москва: Стандартинформ, 2005. – Часть 3. – 26 с.
2. ГОСТ 28953-91. Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерения параметров. [Текст] = Photosensitive charge transfer devices. Methods of measuring parameters: межгосударственный стандарт: издание официальное : дата введения 01.01.1992. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004.
3. Howell S.B. Handbook of CCD Astronomy, 2nd ed. / S. B. Howell. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 223 p.
4. Балег Ю. Ю. Разработка новых методов наблюдений для крупнейшего оптического российского телескопа БТА: отчет о НИР / Ю. Ю. Балег, В. В. Власюк, А. С. Терехов [и др.]. – Текст: непосредственный // В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы. – Нижний Архыз: Учреждение Российской академии наук Специальная Астрофизическая обсерватория РАН, 2011. – Номер государственной регистрации: 01200964100. – 46 с.
5. Заварзин В. И. Оценка проникающей способности приёмных каналов оптико-электронных средств спутниковой астрономии / В. И. Заварзин, В. А. Сауткин. – Текст: непосредственный // Научно-технический журнал «Контенант». – 2014. – Т. 13. – № 1. – С. 50–56.
6. Никитин В. М. Адаптивная помехозащита оптико-электронных информационных систем: монография / В. М. Никитин, В. Н. Фомин, А. И. Николаев, И. Л. Борисенков. – Белгород: Издательство БелГУ, 2008. – 196 с.
7. Berry V. The Handbook of Astronomical image processing, 2nd ed. / V. Berry, J. Burnell. – Willmann-Bell, 2005. – 713 p.
8. Еремин Е. О. Динамический диапазон системы наблюдения космических объектов на высокоинтенсивном фоне / Е. О. Еремин, А. О. Жуков, Т. В. Калинин, А. И. Корчаков. – Текст: непосредственный // Современные научные исследования и инновации. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью Международный научно-инновационный центр, 2020. – № 3 (107). – С. 13.
9. Абраменко Е. В. Метод построения и обоснование основных ТТХ бортового аппаратного комплекса космических аппаратов для решения задач получения, передачи и обработки измерительной информации в оптическом диапазоне длин волн / Е. В. Абраменко, А. И. Гладышев, А. В. Евенко, А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров. – Текст: непосредственный // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. – Москва: Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас», 2017. – № 2 (134). – С. 26–31.
10. Жуков А. О. Алгоритмы учета высокочастотных атмосферных искажений в телевизионной ПЗС-фотометрии околоземных космических объектов / А. О. Жуков, Г. Ю. Харламов, Ю. Г. Харламов. – Текст: непосредственный // Нелинейный мир. – Москва: Издательство «Радиотехника», 2013. – Т. 11. – № 11. – С. 771–775.
11. Жуков А. О. Моделирование фона неба в широком спектральном диапазоне в околоземном космическом пространстве / А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, В. Г. Мошкालёв, Н. И. Шахов, И. А. Зиновьев. – Текст: непосредственный // Механика, управление и информатика. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2015. – Т. 7. – № 2 (55). – С. 235–245.

12. Жуков А. О. Моделирование фона неба в широком спектральном диапазоне в околоземном космическом пространстве / А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, Н. И. Шахов, В. С. Гедзюн, А. И. Гладышев. – Текст: непосредственный // Минцевские чтения; Вторая Всероссийская научно-техническая конференция молодых конструкторов и инженеров, посвящена 120-летию со дня рождения академика А. Л. Минца и 60-летию аспирантуры Радиотехнического института; 30–31 января 2015 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2015. – С. 222–233.
13. Жуков А. О. Моделирование фоновой обстановки околоземного космического пространства / А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, Н. И. Шахов, В. С. Гедзюн, А. И. Гладышев, М. С. Тучин, В. Г. Мошкалева, Н. Л. Крусанова. – Текст: непосредственный // Минцевские чтения; труды Третьей Всероссийской научно-технической конференции молодых конструкторов и инженеров, посвященной 70-летию Радиотехнического института имени академика А. Л. Минца и 70-летию ФИЗТЕХА. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2016. – С. 160–169.
14. Гладышев А. И. Обоснование основных характеристик бортового аппаратного комплекса космического аппарата / А. И. Гладышев, Е. В. Абраменко, А. О. Жуков, А. В. Евенко. – Текст: непосредственный // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления; сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции; ФГБНУ «Аналитический центр» Минобрнауки России; 29 декабря 2016 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр», 2017. – С. 71–75.
15. Гладышев А. И. Метод учета темновых токов в ПЗС матрицах в режимах переноса кадра и временной задержки и накопления / А. И. Гладышев, И. С. Амосов, В. С. Гедзюн, А. О. Жуков, А. И. Захаров, М. Е. Прохоров, М. С. Тучин, Ю. Г. Харламов. – Текст: непосредственный // XLI Академические чтения по космонавтике; сборник тезисов чтений, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства; 24–27 января 2017 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2017. – С. 315–316.
16. Амосов И. С. Оценивание качества обнаружения космического объекта вне атмосферы оптико-электронным комплексом в различных диапазонах / И. С. Амосов, В. С. Гедзюн, А. И. Гладышев, А. О. Жуков, А. И. Захаров, Т. В. Калинин, М. Е. Прохоров. – Текст: непосредственный // РТИ Системы ВКО – 2016; труды IV Всероссийской научно-технической конференции; 02–03 июня 2016 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2017. – С. 178–192.
17. Калинин Т. В. Потенциальная разрешающая способность оптико-электронного прибора космического базирования / Т. В. Калинин, А. О. Жуков, Е. В. Абраменко. – Текст: непосредственный // Вестник Российского нового университета; серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – Москва: Российский новый университет, 2018. – № 3. – С. 47–59.
18. Жуков А. О. Подход к выделению изображений ярких космических объектов относительно уровня фоновой-сигнальной обстановки / А. О. Жуков, Ю. Г. Харламов, М. Е. Прохоров, А. И. Захаров, Ю. А. Давидович. – Текст: непосредственный // Вопросы контроля хозяйственной деятельности и финансового аудита, национальной безопасности, системного анализа и управления; сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции; 27 декабря 2018 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр», 2019. – С. 86–90.

К ВОПРОСУ О ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ И РАЗМЕРОВ БЫСТРОДВИЖУЩИХСЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ДРОБНОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА: УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТНЫХ СВОЙСТВ ТРАССЫ

Захарченко В.Д., Бондарь Ю.А., Коваленко И.Г., Денисов З.А.
Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия
Ilya.g.kovalenko@gmail.com

При распространении сигналов через атмосферу в задачах радиолокационной астрономии возникает необходимость оценки радиальной скорости и размеров опасных для Земли астероидов. Широкополосные сигналы, проходя сквозь атмосферу, могут иметь искажения центра тяжести спектра и функции автокорреляции принятого сигнала. Здесь предполагается использование корреляционного приемника, что важно при согласованной фильтрации на приемной стороне. В данной работе производится оценка искажений оговоренных выше параметров – центра тяжести спектра, который может быть оперативно вычислен с помощью дробного дифференцирования сигнала [1,2], и длительности функции автокорреляции, связанных с неравномерностью частотной характеристики тракта распространения сигнала в атмосфере [3,4].

В работе производится теоретическая оценка функции автокорреляции сигнала, принятого с учетом неравномерности частотной характеристики атмосферы. Оценка производится по относительному изменению нормы функции автокорреляции за счет аддитивной добавки (второе слагаемое в формуле (1)):

$$B(\tau) = 2K_0 \left[B_0(\tau) \cos(2\pi f_0 \tau) + \frac{K'_0}{K_0} B'_0(\tau) \sin(2\pi f_0 \tau) \right] \quad (1)$$

где $B(\tau)$ – функция автокорреляции принятого сигнала, $B_0(\tau)$ – функции автокорреляции зондирующего сигнала, $K_0(f)$ и $K'_0(f)$ – коэффициент прохождения через атмосферу и его производная на несущей частоте f_0 сигнала, соответственно. Выражение (1) используется при оценке интегральных характеристик корреляционной функции принимаемого сигнала для различных зенитных углов и состояний стандартной атмосферы для разных климатических поясов [3,4].

Так, например, для чирп-сигнала в S-диапазоне при полосе сигнала 200 МГц (что соответствует разрешению по дальности в ~ 0.75 м) и зенитном угле 30° при зондировании в средних широтах оценка относительной погрешности измерения как скорости по центру тяжести спектра принятого сигнала, так и размеров объекта по длительности функции автокорреляции, составляет $\sim 0.15\%$. Для гауссова сигнала при тех же параметрах относительная погрешность оценивается в $\sim 0.37\%$. Следует заметить, что для космических объектов при прогнозе их траекторий столь небольшие погрешности могут быть существенны для решения задачи парирования космической угрозы.

Литература

1. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G. On protecting the planet against cosmic attack: ultrafast real-time estimate of the asteroid's radial velocity // Acta Astronautics. 2014. 56. P.158-162.
2. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G. Best Approximation of the Fractional Semi-Derivative Operator by Exponential Series // Mathematics. 2018. 6. Issue 1. Id 12. P.1-12.
3. Рекомендация МСЭ-R P.676-11 (09/2016) Затухание в атмосферных газах. Серия Р. Распространение радиоволн. Международный Союз Электросвязи. Женева: ITU. 2018.
4. Рекомендации МСЭ-R P.835-6 (12/2017) Эталонные стандарты атмосферы. Серия Р. Распространение радиоволн. Международный Союз Электросвязи. Женева: ITU. 2018.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ СЛАБЫХ МЕТЕОРОВ ПО ОПТИЧЕСКИМ И АКУСТИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Карташова А.П.¹, Рыбнов Ю.С.², Попова О.П.², Глазачев Д.О.², Болгова Г.Т.¹,
Ефремов В.В.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, РФ*

²*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, Москва, РФ*
akartashova@inasan.ru

Интерес к изучению метеоров после начала космической эры резко повысился, поскольку метеороиды могут представлять реальную угрозу безопасности космических аппаратов. В условиях открытого космоса на поверхности космических аппаратов воздействует целый ряд факторов, приводящих к эрозии поверхностей или даже к уничтожению КА. К ним относятся ударное воздействие метеорных тел, столкновения с частицами космического мусора, бомбардировка высокоэнергетическими космическими лучами, воздействие потоков заряженных частиц, идущих от Солнца, электризация космических аппаратов и оседание пыли. Теоретические оценки и натурные эксперименты показали, что метеороид массой 10^{-6} г пробивает насквозь алюминиевый лист толщиной 0,5 мм. Более мелкие частицы обладают меньшей разрушительной силой и вызывают только эрозию поверхности космических аппаратов.

Для качественного прогнозирования уровня метеорной опасности космической деятельности создаются стандарты метеорного вещества (ГОСТы), которые постоянно обновляются с целью учета динамической нестабильности метеорных потоков. Все модели основаны на компиляции накопленного разнородного наблюдательного материала.

Несмотря на длительную историю изучения метеорных явлений, проблема точного определения массы, плотности и свойств вещества метеороидов остается до конца нерешенной. Масса мелких метеороидов (меньших ~ 1 см) часто оценивается на основе эмпирических соотношений, использующих максимальную яркость метеора, скорость и угол входа [Jacchia et al., 1967; Verniani, 1965; Jenniskens, 2006; Vida et al., 2018]. Разброс оценок по различным соотношениям может превышать порядок величины.

Оценки массы мелких метеороидов по тем или иным моделям сильно зависят от предположений используемой модели, кроме того, эти модели немногочисленны. Эти модели также не совершенны, и точность определения массы не очень высока, разброс оценок может достигать двух и более раз.

Одновременная регистрация метеоров различными методами дает возможность уточнить как параметры метеоров, так и модели взаимодействия частиц с атмосферой. Целью комбинированных наблюдений является снижение неопределенности в определении масс метеороидов и изучение формирования и распространения импульсов давления, которые формируются в результате взаимодействия метеороидов с атмосферой.

Поэтому сотрудниками Института астрономии РАН и Института динамики геосфер РАН были объединены оптические и акустические наблюдения [Карташова и др., 2017].

В результате одновременно (двумя методами) было зарегистрировано несколько десятков метеоров. Анализ полученных данных показал, что акустические сигналы от небольших метеороидов могут уверенно регистрироваться на расстояниях до 100 км (зона прямого лучевого распространения). Сравнение масс и энергий, оцененных по оптическим и инфразвуковым наблюдениям, показывают значительный разброс величин (до двух порядков и более). Возможное объяснение может включать наличие больших неопределенностей во всех используемых приближениях, неточности в определении звездной величины метеоров. Представлены методы определения параметров метеорных частиц и их оценки.

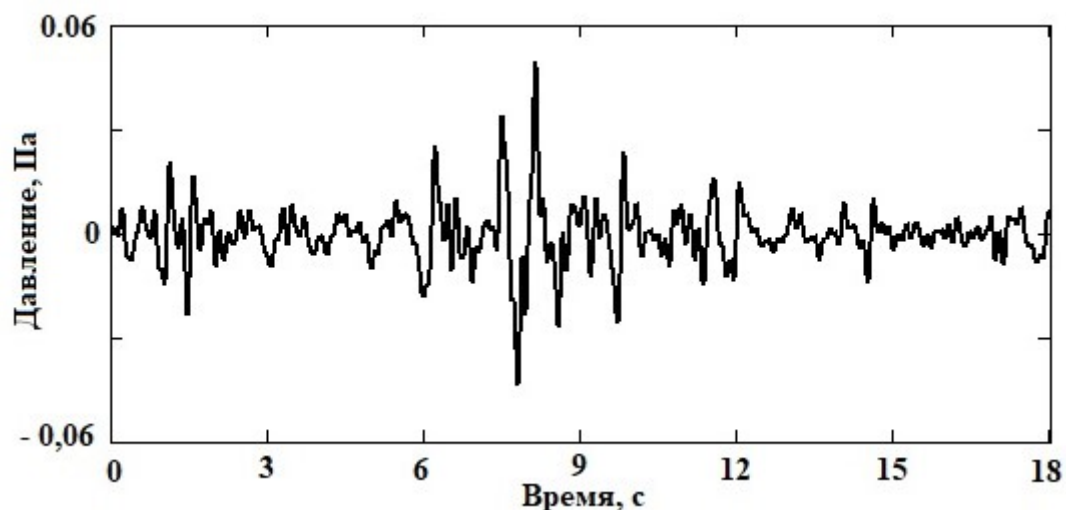


Рис. 1. Пример сигнала от метеора 20180804_222755.

Литература

1. Jacchia Luigi, Verniani Franco, Briggs Robert E. An analysis of the atmospheric trajectories of 413 precisely reduced photographic meteors // *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. — 1967. — Vol. 10. — P. 1–139.
2. Jenniskens Peter. Meteor showers and their parent comets. — Cambridge, Cambridge University Press, 2006. — P. 790.
3. Verniani Franco. On the luminous efficiency of meteors // *Smithsonian Contributions to Astrophysics*. — 1965. — Vol. 8, No 5. — P. 141–171.
4. Vida Denis, Brown Peter G, Campbell-Brown Margaret. Modelling the measurement accuracy of pre-atmosphere velocities of meteoroids // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — Vol. 479, No 4. — P. 4307–4319.
5. Карташова А.П., Рыбнов Ю.С., Глазачев Д.О., Попова О.П., Болгова Г.Т. Изучение метеорных явлений по комбинированным наблюдениям // *Триггерные эффекты в гео-системах: материалы IV-й Всероссийской конференции с международным участием (Москва, 6–9 июня 2017 г.)*. ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2017. С. 483–489.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ АСТЕРОИДОВ, КОМЕТ И СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ НА НОВЫХ ДВУХКАНАЛЬНЫХ ПОЛЯРИМЕТРАХ КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ И ОБСЕРВАТОРИИ ПИК ТЕРСКОЛ В 2018-2021 ГГ.

Киселев Н.Н.¹, Савушкин А.А.¹, Жужулина Е.А.¹, Карпов Н.В.²

¹Крымская астрофизическая обсерватория, Научный, Республика Крым

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

kiselevnn42@gmail.com

Поляриметрические исследования дают ценную информацию о природе рассеивающих частиц и физических процессах, которую невозможно получить с помощью других методов наблюдений, поскольку позволяют изучать не только скалярные свойства света (интенсивность или яркость), но также его «векторные» параметры, т.е. степень и ориентацию линейной поляризации, а также степень и направление вращения круговой поляризации.

Одной из важнейших характеристик линейно поляризованного излучения, возникающего при рассеянии солнечного излучения на реголитовых частицах малых тел Солнечной системы (астероидов главного пояса (АГП), астероидов, сближающиеся с Землей (АСЗ), спутников планет, комет и многих других безатмосферных тел, является зависимость степени поляризации от фазового угла (ФЗП). В области оппозиции (на фазовых углах менее 30°), ФЗП проявляется в виде так называемой отрицательной ветви поляризации (ОВП) этих объектов. Форма и параметры ОВП ($P_{\min}$, $\alpha_{\min}$, α_{inv} и поляриметрический наклон h) зависят от свойств реголитовых частиц и механизмов рассеяния света. Поэтому определение точной формы и параметров отрицательной ветви поляризации астероидов, комет и спутников Юпитера и Сатурна является актуальной задачей. Несмотря на доступный блеск галилеевых спутников Юпитера (около 6 зв. вел.) и больших спутников Сатурна (10 – 13 зв. вел) их ФЗП до настоящего времени плохо определены. Этот пробел мы восполнили, благодаря введенным в строй в 2018 г. двух апертурных поляриметров КРАО и обсерватории Пик Терскол.

Для измерения фазовых кривых поляризации малых тел и спутников больших планет были использованы 2,6-м (f/16) телескоп им. Шайна Крымской астрофизической обсерватории и 2-м (f/8) телескоп обсерватории Пик Терскол (Северный Кавказ), Россия. Телескопы оснащены однотипными двухканальными фотоэлектрическими поляриметрами «POLSHAKH». Красные каналы используются для наблюдений программных объектов в полосах RI. Синие каналы обеспечивают наблюдения в полосах UBV. Наблюдения поляриметрических стандартов выявили небольшую и стабильную инструментальную поляризацию на уровне 0.02% – 0.05% для UBVRI фотометрических полос обоих поляриметров.

В 2019 – 2020 гг. были проведены поляриметрические наблюдения АСЗ 163373, 52768, 159402, 162082. Используя соотношения «геометрическое альbedo – $P_{\max}$ » [1], «геометрическое альbedo – $P_{\min}$ » [2], и зависимость диаметра от альbedo [3], мы определили геометрическое альbedo астероидов и их диаметры. Кроме того, поляриметрические наблюдения астероида Главного пояса (599) Luisa позволили заключить, что астероид принадлежит к классу «барбарянцев» [4].

Новые поляриметры позволили измерять поляризацию объектов до 16 зв. в. Благодаря этому в 2018- 2021 гг. были выполнены наблюдения 12 короткопериодических (SPC) и 15 долгопериодических (LPC) комет в широкополосных и узкополосных кометных фильтрах с целью поиска различий между ними. Это существенно дополнило поляриметрический банк кометных данных [5], содержащий до настоящего времени результаты наблюдений 95 комет, полученных в 1881 – 2016 гг. На Рис. 1 представлены синтетические поляризационные кривые SPC и LPC комет в фильтре R.

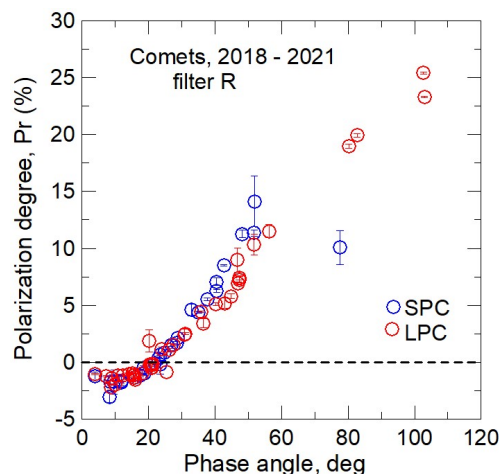


Рис. 1. Синтетические фазовые кривые поляризации короткопериодических (синие кружки) и долгопериодических комет (красные кружки) в фильтре R.

В период 2018-2021 гг. были получены новые данные о форме и параметрах отрицательной ветви поляризации спутников Юпитера (Ио, Европа, Калисто, Ганимед) и спутников Сатурна (Энцелад, Тетия, Рея, Диона, Япет). В качестве примера на Рис. 2 и 3 приведены фазовые кривые Европы, Ио, Ганимеда, а также Дионы и Энцелада в фильтре R.

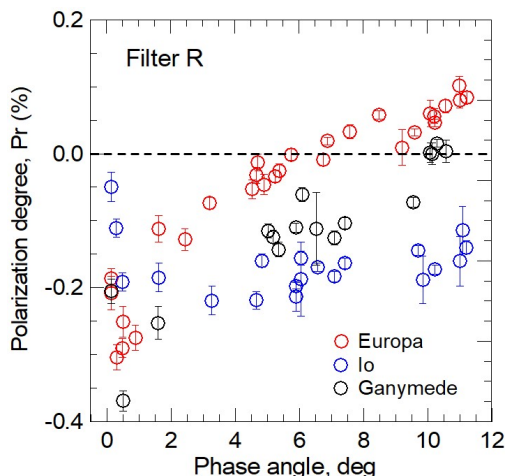


Рис. 2. Фазовые кривые поляризации Европы (красные кружки), Ио (синие кружки) и Ганимеда (черные кружки) в фильтре R.

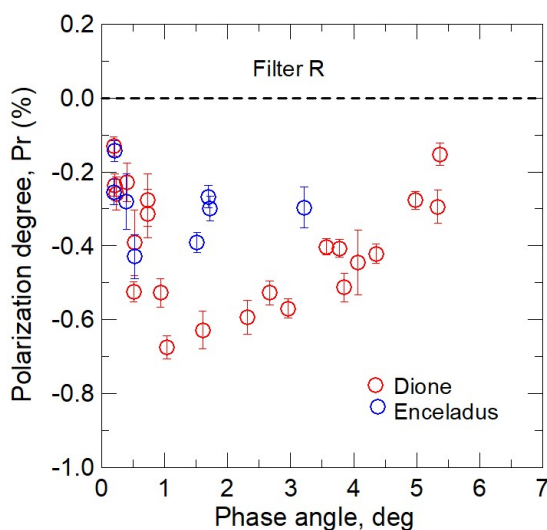


Рис. 3. Фазовые кривые поляризации Дионы (красные кружки), Энцелада (синие кружки) в фильтре R.

Как видно, отрицательная ветвь поляризации каждого спутника имеет собственную форму и индивидуальные параметры. Они будут интерпретированы с точки зрения существующих механизмов рассеяния света и свойств реголитовых поверхностей.

Литература

1. Shkuratov Yu. G., Opanasenko N. V. Polarimetric and Photometric Properties of the Moon: Telescope Observation and Laboratory Simulation. 2. The Positive Polarization // Icarus. 1992. V. 99. P. 468–484
2. Lupishko D. F. Generalized Calibration of the Polarimetric Albedo Scale of Asteroids // Solar System Research. 2018. V. 52. P. 98–114.
3. Bowell E., Hapke B., Domingue D., et al. Application of photometric models to asteroids. In Asteroids II, (eds. R. Binzel, T. Gehrels, M. Matthews) 1989. P. 524–556
4. Лупишко Д.Ф., Киселев Н.Н., Карпов Н.В. Поляриметрия астероида (599) Luisa – нового барбарианца // Астрономический Вестник. 2020. V. 54. P. 51–56
5. Kiselev N., Shubina E., Velichko S., et al. Compilation of Comet Polarimetry from Published and Unpublished Sources, urn:nasa:pds:compil-comet:polarimetry::1.0, NASA Planetary Data System, 2017. <https://pdssbn.astro.umd.edu/holdings/pds4-compil-comet:polarimetry-v1.0/SUPPORT/dataset.html>).

К ВОПРОСУ О ПОЛЯРИЗАЦИИ ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ БЕЗАТМОСФЕРНЫХ ТЕЛ

Класс Е.В.¹, Чепурова В.М.²

¹*АстрО, Москва, Россия*

²*ГАИШ МГУ, Москва, Россия*

elenaklass@yandex.ru

Солнечное излучение, отраженное от поверхности безатмосферных тел, имеет несколько особенностей. К ним следует отнести нелинейную зависимость индикатрисы отражения при малых значениях фазового угла, наличие отрицательной ветви в зависимости поляризации отраженного излучения в области малых фазовых углов и, одновременно, небольшой амплитуде положительной ветви для остальных фазовых углов. Например, для Луны спад индикатрисы составляет ~1.6 раза для углов до 20°. Отрицательная поляризация (в минимуме ~1%) наблюдается для углов в интервале 0°...23.5°, при больших значениях фазовых углов поляризация положительна и не превышает 8%. Особенностью также является то, что это справедливо для любой области Луны.

Несмотря на большое число расчетных моделей для оценки поляризации безатмосферных тел (см., например, [1, 2]), пока не удалось выработать общепризнанную модель, которая бы прогнозировала указанные особенности и по индикатрисе и по поляризации.

В [3] были представлены результаты исследований по формированию индикатрисы отражения для сферы с двумасштабным рельефом шероховатой поверхности и показано, что индикатриса обратного отражения сферы, поверхность которой содержит неоднородности в виде эллипсоидальных произвольно ориентированных пор, может иметь фазовую зависимость, близкую к зависимости для Луны. Расчеты проводились с использованием программы РОКС-RG (метод Монте-Карло, приближение геометрической оптики). Настоящая работа является в некотором роде продолжением [3] и посвящена исследованиям формирования поляризации отраженного излучения для тел, шероховатая поверхность которых содержит эллипсоидальные поры.

Методика расчета

Программа РОКС-RG разработана в приближении геометрической оптики, что позволяет при задании размеров расчетной схемы пользоваться законом подобия. Благодаря этому в программе удалось реализовать подход, позволяющий оценить отражающие свойства трехмерного объекта, имеющего многомасштабный рельеф поверхности. Искомый объект представляется на нескольких уровнях: основном и нескольких локальных. На основном уровне объект задается целиком в виде совокупности зон, имеющих гладкие поверхности. Локальные геометрии описывают шероховатости, характерные для соответствующих уровней, и представляют собой подложки конечных размеров, на которых задаются неоднородности в виде тел вращения. Например, на первом уровне основная геометрия – сфера, на втором – локальная геометрия, описывающая шероховатости поверхности этой сферы (в виде пор или выпуклых тел той или иной формы), на третьем – локальная геометрия, описывающая шероховатости поверхности второго уровня. И т.д.

Ослабление излучения в поглощающих полупрозрачных телах нелинейно зависит от толщины материала и в случае многомасштабной геометрии закон подобия не работает. Поэтому моделирование прохождения излучения через стекловидные тела проводилось без учета поглощения.

Результаты расчета

Степень поляризации отраженного излучения P принято вычислять по соотношению: $P = (F_{\perp} - F_{\parallel}) / (F_{\perp} + F_{\parallel})$ где $F_{\perp}$, $F_{\parallel}$ – компоненты оптического излучения,

отраженного от границы раздела в плоскости, перпендикулярной (s) и параллельной (p) плоскости падения, соответственно. Согласно формулам Френеля для непрозрачных тел однократно отраженное излучение всегда имеет неотрицательную поляризацию. Для прозрачных или полупрозрачных тел p -компонента преломленного излучения больше или равна s -компоненте. Если поверхность тела имеет верхний прозрачный или полупрозрачный слой, то в отражение добавляется вклад излучения, преломленного в первом материале и отраженного от границы со вторым непрозрачным материалом. Указанный процесс и может служить источником отрицательной поляризации.

Сфера из непрозрачных материалов

На Рис. 1 показана фазовая зависимость степени поляризации P излучения для сферы, поверхность которой промоделирована двумя типами шероховатостей: одноуровневой в виде выпуклых эллипсоидов (сплошная) и двухуровневой в виде волнистой поверхности с эллипсоидальными произвольно ориентированными порами (пунктир). Расчетные данные представлены для двух материалов покрытия с различными значениями коэффициента отражения $k_{отр}$. В обоих случаях степень поляризации положительна и имеет вид кривой с максимумом. При этом в соответствии с эффектом Умова наблюдается обратная связь между амплитудой положительной ветви поляризационной кривой и отражательной способностью материала.

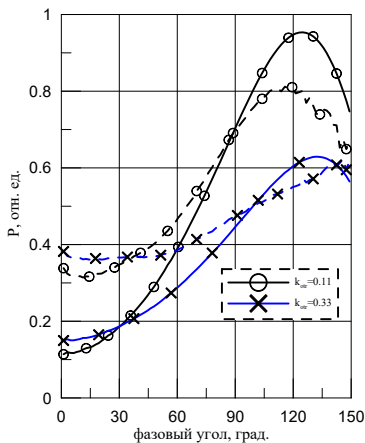


Рис. 1. Шероховатая сфера. Непрозрачный материал.

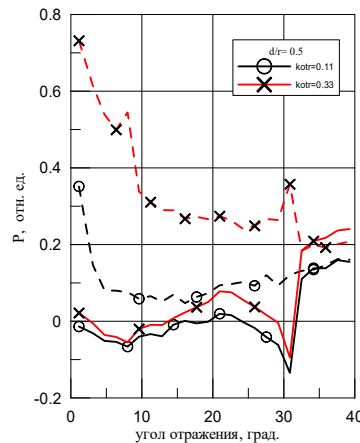


Рис. 2. Одиночная пора. Влияние материала.

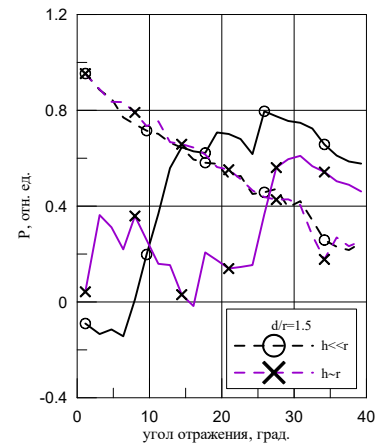


Рис. 3. Одиночная пора. Влияние толщины h .

Одиночные поры, заполненные прозрачным материалом

Рассчитывалось угловое распределение отраженного излучения для одиночных эллипсоидальных пор, облучаемых вдоль оси плоским пучком частиц. Геометрия поры имела слоистую структуру: внутри вакуум, затем прозрачный материал, за которым следует непрозрачный. Также предполагалась возможность наличия вакуумной прослойки между прозрачным и непрозрачным материалом, моделирующее неплотное прилегание стекловидного материала к основному грунту. Оптические константы, выбранные для расчетных материалов, составили: прозрачный – $n=1.6$, непрозрачный – $n_1=1.855$ $k_1=0.45$ и $n_2=4.12$ $k_2=0.048$. Результаты расчетов показали следующее.

Для мелких пор $r \gg d$, где r – внутренний радиус на поверхности поры, а d – глубина поры, степень поляризации при малых углах отражения близка к нулю, при этом изменение толщины прозрачного материала слабо влияет на степень поляризации. По мере увеличения глубины поры появляются различия в зависимости степени поляризации от наличия или отсутствия вакуумной прослойки между прозрачным и непрозрачным материалом и от толщины прозрачного материала h . В качестве примера на Рис. 2, 3 показаны соответствующие зависимости для поры с $d/r \sim 0.5$ и $d/r \sim 1.5$, соответственно. Рис. 2 демонстрирует, что при отсутствии вакуумной прослойки (пунктир) при одинаковой толщине h степень поляризации всегда положительна и зависит от

коэффициента отражения непрозрачного материала. А при ее наличии (сплошная) степень поляризации при малых значениях угла отражения может быть отрицательной и слабо зависит от коэффициента отражения непрозрачной основы. Рис. 3 показывает, что для одного и того же материала основы в отсутствии вакуума (пунктир) поляризация всегда положительна и слабо зависит от толщины h . При малых углах отражения поляризация близка к единице, с увеличением угла отражения ее значения уменьшаются. При наличии вакуума (сплошная) поляризация зависит от толщины прозрачного материала h , имеет нерегулярный характер, а ее величина может быть отрицательной.

Сфера с порами из прозрачного материала

Расчеты проводились для сферы с двухмасштабным рельефом поверхности: волнистая поверхность покрыта произвольно ориентированными порами, геометрия которых имеет слоистую структуру: вакуум, прозрачный материал и непрозрачная основа.

Исследования показали, что основное влияние на степень поляризации оказывает геометрия нижнего уровня, описывающая пористую поверхность. Для геометрий с параметрами пор $0.5 \leq d/r \leq 2.5$ и $h > d$ зависимости степени поляризации от фазового угла имеют вид кривой с максимумом (см. рис. 4). Его положение и амплитуда зависят от глубины пор. Для пор с $d/r \sim 1$ – это область углов $120^\circ \dots 130^\circ$. С увеличением глубины пор максимум сдвигается в область углов с меньшими значениями. Амплитуда максимума также зависит от наличия вакуума между прозрачным и непрозрачным материалами. При отсутствии вакуума максимум в значении поляризации близок к 1, при наличии – амплитуда максимума существенно уменьшается. Чем больше величина d/r , тем более значимо уменьшение. В качестве примера на Рис. 4 показаны зависимости степени поляризации для рельефа с параметрами пор $d/r \sim 1$ (слева) и $d/r \sim 1.5$ (справа). Видно, что при наличии вакуума амплитуда максимума в первом случае снижается в 2 раза, во втором – в 4 раза. При этом кривая поляризации практически не зависит от оптических характеристик непрозрачных материалов во всем диапазоне фазовых углов, т.е. наличие вакуума нивелирует их различия. В отсутствие вакуума различия между материалами наиболее заметно проявляются в диапазоне фазовых углов до $\sim 60^\circ$.

В рамках используемой модели в области малых фазовых углов для мелких пор $d/r \leq 1$ и толщины $h > d$ были получены нулевые и отрицательные значения P (Рис. 4, слева). Для $d/r > 1$ отрицательная ветвь поляризации отсутствует и с увеличением глубины пор значение P в нуле растет.

Следует отметить, что перепад в значениях индикатрисы обратного отражения для представленных случаев составляет $\sim 2 \dots 2.2$ раза в интервале фазовых углов $0 \dots 20^\circ$.

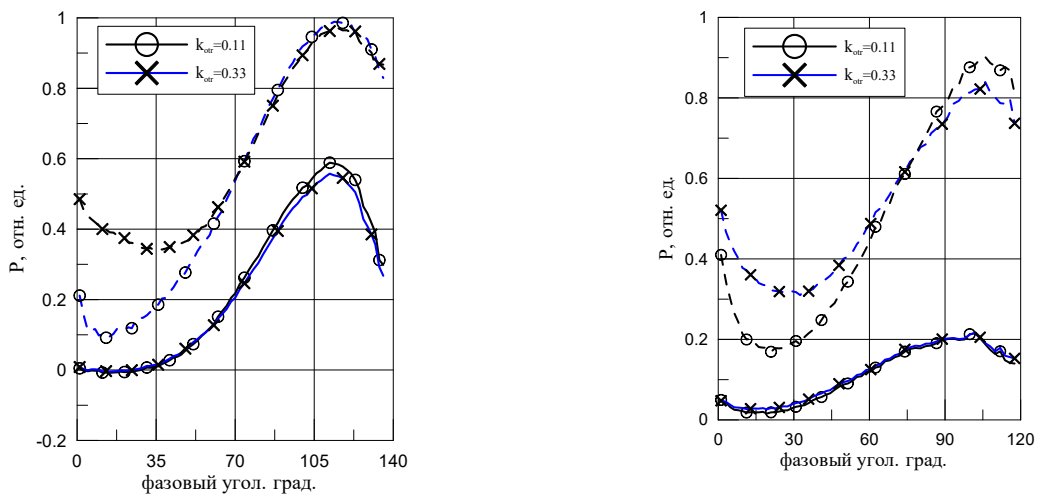


Рис. 4. Степень поляризации для сферы: слева поры с $d/r \sim 1$, $h \sim 3d$, справа – $d/r \sim 1.5$, $h \sim 2d$.

Выводы

Расчетная модель, использованная в представленных результатах исследований, достаточно далека от реальной структуры поверхности безатмосферных тел. Однако, полученные с ее помощью результаты могут оказаться полезными при разработке более корректных моделей. Это относится к показанному существенному влиянию на степень поляризации наличия вакуумной прослойки между прозрачным и непрозрачным материалами. Указанный фактор существенно снижает амплитуду положительной ветви поляризации, а также нивелирует различия в оптических характеристиках непрозрачных материалов во всем диапазоне фазовых углов.

Литература

1. Bruce Hapke. Theory of reflectance and emittance spectroscopy / Bruce Hapke. Cambridge University Press. 1993. 455pp.
2. Zubko, E., et al. Why comets reveal various positive polarization? / The Seventh Moscow international Solar System Symposium (7M-S3) October 10 – 14, 2016.
3. Е.В. Класс. Индикатриса обратного отражения сферы с двумасштабным рельефом шероховатой поверхности // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 123. №6. С. 977-984.

10 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОЙ СЕТИ ОПТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ НСОИ АФНЦЕНТРОМ АСТРОНОМИИ УНИВЕРСИТЕТА СИНАЛОА

Кокина Т.Н.^{1,2}, Мендоса Д.А.¹, Селая Р.¹, Кокина Е.Д.¹, Воропаев В.А.²

¹*Центр Астрономии Автономного Университета Синалоа, Мексика*

²*ИПМ им М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

В этом году исполняется 10 лет Центру Астрономии в Автономном Университете Синалоа (УАС), и Центр Астрономии продолжает свою работу. Вблизи города Косала на высоте 600 м находится астрономическая обсерватория ЦААУС, которая принимает активное участие в наблюдениях международной сети НСОИ АФН/ISON. В настоящее время в обсерватории работают три телескопа: ОРИ-25, ЧВ-400, ТАЛ-25. За это время работы были проведены наблюдения в течение 1442 ночей (11063 часов), в результате которых было получено 1 839 464 измерений по объектам космического мусора и активным спутникам на высоких орбитах. Обсерватория вблизи Косала приняла активное участие в обнаружении 29 некаталогизированных космических объектов. Выполнены работы по нахождению 37 потерянных объектов.

Наблюдения на ОРИ-25 проводятся автоматически в обзорном режиме. Полученные измерения поступают в базу данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, где используются для прогноза опасных ситуаций со спутниками российской и мексиканской орбитальной группировки.

С 2018 начал работу телескоп ТАЛ-250К, в режиме ЦУ ГСО/ВЭО. В 2021 обнаружены два потерянных спутника.

В 2019 году обсерватории присвоен номер Центра Малых Планет V-26UAS-ISON. С телескопом ЧВ-400 наблюдались астероиды, сближающиеся с Землёй. В 2021 году телескопы обсерватории наблюдали астероид Апофис в рамках международной наблюдений кампании IAWN.

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

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, Россия

eduard.kuznetsov@urfu.ru

В ходе выполнения проекта по исследованию динамических и физических свойств астероидов, сближающихся с Землей, в 2021 г. были выполнены позиционные и фотометрические наблюдения на телескопе СБГ (диаметр зеркала 0.4 м, фокусное расстояние 0.8 м) Коуровской астрономической обсерватории УрФУ и телескопе Цейсс-1000 (диаметр зеркала 1 м, фокусное расстояние 13 м) Симеизской обсерватории ИНАСАН. На телескопе СБГ позиционные наблюдения проводились в фильтре R, фотометрические — фильтрах V и R. На телескопе Цейсс-1000 фотометрические наблюдения выполнялись в фильтрах B–V–R–I. Количественные сведения о наблюдениях приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Количественные сведения о выполненных наблюдениях

Телескоп	Позиционные наблюдения			Фотометрические наблюдения		
	астероидов	ночей	кадров	астероидов	ночей	кадров
СБГ	6	17	533	6	39	2625
Цейсс-1000	—	—	—	2	9	541

Для наблюдений, выполненных на телескопе СБГ, астрометрическая обработка проводилась как для позиционных, так и для фотометрических наблюдений. Использовалась программа IzmCCD (<http://izmccd.puldb.ru/>). Результаты астрометрической обработки приведены в таблице 2. Среднеквадратические ошибки (СКО) координат астероидов не превышают 0.5".

Таблица 2 – Результаты астрометрической обработки наблюдений астероидов

Наблюдения в фильтрах R и V				Астрометрическая обработка		
Объект	Интервал наблюдений	Количество ночей	$N_{\phi}(R, V) + N_{\pi}(R)$	$N_{оп}(R, V)$	СКО координат	
					$\sigma_{\alpha}, "$	$\sigma_{\delta}, "$
(332446) 2008 AF4	13.01.2021 — 11.02.2021	5	472	243	0.186	0.151
(99942) Apophis	10.02.2021 — 12.04.2021	14	503	387	0.269	0.247
2015 NU13	18.01.2021	1	60	60	0.116	0.150
(159857) 2004 LJ1	03.08.2021 — 07.09.2021	13	1052	1016	0.222	0.198
(326732) 2003 HB6	12.08.2021 — 17.08.2021	5	588	583	0.100	0.111
(153591) 2001 SN263	25.12.2021 — 28.12.2021	2	295	239	0.152	0.197

Комментарии: Наблюдения потенциально опасного астероида (99942) Apophis проводились в рамках международной кампании, организованной IAWN (International Asteroid Warning Network).

$N_{\phi}(R, V)$ – количество кадров, полученных при фотометрических наблюдениях в фильтрах R и V;

$N_{\pi}(R)$ – количество кадров, полученных при позиционных наблюдениях в фильтре R;

$N_{оп}(R, V)$ – количество положений астероидов, полученных при астрометрической обработке;

$\sigma_{\alpha}, \sigma_{\delta}$ – среднеквадратические ошибки координат астероида по прямому восхождению и склонению.

С использованием результатов позиционных наблюдений выполнено улучшение орбит 9 астероидов, которые наблюдались на телескопе СБГ в 2020–2021 гг. Задача решалась с помощью программного комплекса «ИДА» (Galushina et al., 2019). Для 7 астероидов получены оценки ускорения A_2 (таблица 3), характеризующего влияние эффекта Ярковского. В таблице $3JD_1$ и JD_2 — юлианские даты начального и конечного моментов наблюдений из базы данных MPC, 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} — среднеквадратическая ошибка определения ускорения A_2 .

Таблица 3 — Оценки ускорения A_2

Объект	Эпоха элементов	JD_1	JD_2	N	N_{168}	A_2 , 10^{-14} а.е./сут.	σ_{A_2} , 10^{-14} а.е./сут.
(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	20030326	20211127	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

Первоначальная обработка фотометрических наблюдений выполнялась с помощью программы AM:PM (Крушинский, 2018). Периоды P осевого вращения астероидов (159857) 2004 LJ1 и (326732) 2003 HB6 приведены в таблице 4. Оценки периодов согласуются с данными alcddef.org. В январе 2022 г. Warner и Stephens (2022) сообщили, что у обоих астероидов заподозрено существование спутников, и привели оценки их орбитальных периодов T и амплитуд колебаний блеска A_m : $T = 35.16 \pm 0.04$ часа, $A_m = 0.11^m$ для спутника астероида (159857) 2004 LJ1 и $T = 22.903 \pm 0.006$ часа, $A_m = 0.10^m$ для спутника астероида (326732) 2003 HB6. Анализ кривых блеска пока не позволил получить надежное подтверждение орбитальных периодов спутников.

Таблица 4 – Периоды осевого вращения астероидов

Астероид	P , часы	P , часы (alcddef.org)
(159857) 2004 LJ1	2.7262 ± 0.0044	$2.72627 \pm 7 \cdot 10^{-5}$
(326732) 2003 HB6	3.457 ± 0.035	$3.4630 \pm 8 \cdot 10^{-4}$

В таблице 5 приведены значения показателей цвета V–R по результатам наблюдений на телескопе СБГ.

Таблица 5 – Показатели цвета астероидов по результатам наблюдений на телескопе СБГ

Астероид	V–R	V–R (alcddef.org)
(153591) 2001 SN263	$0.39^m \pm 0.08^m$	—
(332446) 2008 AF4	$0.44^m \pm 0.08^m$	$0.43^m \pm 0.02^m$
2015 NU13	$0.40^m \pm 0.10^m$	$0.388^m \pm 0.010^m$

В таблице 6 приведены оценки показателей цвета астероидов (159857) 2004 LJ1 и (326732) 2003 HB6. Показатели цвета V–R получены по результатам наблюдений на телескопах СБГ и Цейсс-1000, остальные — по результатам наблюдений на Цейсс-1000. Показатели цвета для астероида (159857) 2004 LJ1 в пределах ошибок совпадают

созначениями из базы alcddef.org. Для астероида (326732) 2003 HB6 показатели цвета согласуются в пределах трех стандартных отклонений. Астероиды имеют существенно различающиеся показатели цвета R–I. Это может быть связано с различиями таксономических классов, динамической и тепловой эволюции астероидов, поскольку они относятся к разным типам AC3: (159857) 2004 LJ1 принадлежит группе Аполлона, а (326732) 2003 HB6 входит в группу Атона. Показатели цвета B–R и V–I позволяют оценить таксономический тип астероида (Ieva et al., 2018). На основе показателей цвета, полученных на основе наблюдений (таблица 6), мы относим астероид (159857) 2004 LJ1 к типу S, что согласуется с результатом Ieva et al. (2018), а (326732) 2003 HB6 — к типу D, что согласуется с результатом Binzel et al. (2019).

Таблица 6 – Показатели цвета астероидов (159857) 2004 LJ1 и (326732) 2003 HB6

Показатели цвета	(159857) 2004 LJ1		(326732) 2003 HB6	
	Наблюдения	База alcddef.org	Наблюдения	База alcddef.org
B–V	$0.76^m \pm 0.11^m$	$0.78^m \pm 0.05^m$	$0.75^m \pm 0.05^m$	$0.676^m \pm 0.124^m$
B–R	$1.25^m \pm 0.10^m$	–	$0.98^m \pm 0.05^m$	–
V–R	$0.46^m \pm 0.10^m$	$0.58^m \pm 0.05^m$	$0.33^m \pm 0.08^m$	$0.388^m \pm 0.048^m$
V–I	$0.82^m \pm 0.08^m$	$0.90^m \pm 0.05^m$	$0.89^m \pm 0.04^m$	$0.786^m \pm 0.054^m$
R–I	$0.33^m \pm 0.04^m$	–	$0.66^m \pm 0.04^m$	–

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.

Литература

1. Крушинский В.В. АМ:РМ, автоматизированная астрометрия и фотометрия астероидов // Физика Космоса : труды 47-й Международной студенческой научной конференции (Екатеринбург, 29 янв. — 2 февр. 2018 г.). — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. — С. 205.
2. Binzel R.P., DeMeo F.E., Turtelboom E.V., Bus S.J., Tokunaga A., Burbine T.H., Lantz C., et al. Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) // Icarus. 2019. V. 324. P. 41–76.
3. Galushina T.Y., Bykova L.E., Letner O.N., Baturin A.P. IDA software for investigating asteroid dynamics and its application to studying the motion of 2012 MF7 // Astronomy and Computing. 2019. V. 29. Article id. 100301.
4. Ieva S., Dotto E., Mazzotta E.E., Perna D., Rossi A., Barucci M.A., Di Paola A., et al. Photometric survey of 67 near-Earth objects // A&A. 2018. V. 615. Article id. A127.
5. Warner B.D., Stephens R.D. On Confirmed and Suspected Binary Asteroids Observed at the Center for Solar System Studies // The Minor Planet Bulletin. Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers. 2022. V. 49. No. 1. P. 22–29.

ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ ТЕКУЩИХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО И НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ ПРОГРАММНЫМИ СРЕДСТВАМИ

Ломаев М.С.¹

¹АО «ОКБ МЭИ», г. Москва, Россия

Lomaev.mixal@yandex.ru

При длительной эксплуатации оптико-электронных приборов неизменно происходят изменения их рабочих параметров. И не всегда есть возможность произвести повторную калибровку прибора в лабораторных условиях. Так, например, в космической среде дестабилизирующие факторы вызывают деформации конструкции, которые приводят к изменению взаимного положения элементов оптической системы, нарушая её юстировку, и как следствие, к ухудшению качества изображения, изменению параметров оптической системы.

В работе описывается алгоритм действий, позволяющий без установки дополнительного оборудования, а пользуясь лишь тем, что «есть» определить такие параметры прибора как: темновые токи, динамический диапазон, чувствительность, поле зрения, координаты направления оптической оси, углы взаимного расположения нескольких ОЭП и т.д.

Для определения вышеперечисленных параметров необходимо идентифицировать астрономические объекты, попавшие в кадр. Таким образом, мы получаем таблицу соответствия объектов на изображении с объектами в звездных каталогах. Для получения корректных результатов необходимо уменьшить ошибку определения энергетических центров звезд. Подспорьем для этого служат серии калибровочных темновых снимков и кадров плоского поля. Из таких серий, в работе представлены методы получения карт нормировочных коэффициентов чувствительности матрицы фотоприемного устройства, и получения информации о распределении шумовой составляющей сигнала.

Проведя идентификацию звезд на снимке (как минимум двух), представляется возможность поставить в соответствие любую точку на изображении со сферическими координатами. А именно определить направление центра оптической оси.

ОЦЕНКА ПРОГНОЗА ПОГОДЫ ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ОПТИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Лопаченко В.В., Мохнаткин А.В., Воропаев В.А.

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

photometry@mail.ru

Получение оперативной информации о текущем положении и состоянии искусственных спутников Земли (ИСЗ) является комплексной задачей, требующей привлечения различных измерительных средств и совершенствования планирования их применения. Оптические средства являются основными инструментами для наблюдения космических объектов (КО) на средних и высоких орбитах. При этом, в отличие от всепогодных радиотехнических средств возможность работы оптических инструментов напрямую зависит от наличия благоприятных погодных условий, в первую очередь отсутствия значительной облачности, осадков, сильного ветра.

Учет прогноза погоды, перед проведением оптических наблюдений, как правило, осуществляется персоналом обсерватории (пункта наблюдений) вручную и непосредственно перед началом работ. Различные обсерватории используют разные по содержанию и достоверности источники метеорологической информации, при этом нет общепринятой методики для выработки надёжных критериев пригодности погодных условий. Как следствие, принятие бесспорного решения о проведении или отмене предстоящих работ возможно только в случае явно благоприятного или явно неблагоприятного прогноза погоды. Для промежуточных данных волевое решение так же принимается, но его результат варьируется в широком диапазоне, исходя из личного опыта и субъективной оценки. Для отдельно работающей обсерватории отмеченное обстоятельство не является существенным, т.к. в зависимости от специфики решаемой задачи, получение целевой информации возможно даже в условиях переменной облачности, а решение о прекращении работ может быть принято оператором на основании фактического состояния окружающей среды и качества принимаемых данных.

Вместе с тем ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (далее ИПМ) координирует работу сети, которая объединяет более двух десятков оптических телескопов, расположенных на разных континентах. При объединении нескольких удаленных обсерваторий в единую сеть, выполняющую наблюдения по скоординированной программе, возникает ряд дополнительных требований по автоматизации планирования и синхронизации проводимых работ. В этой связи, необходимо решить задачу проведения сопоставимой и объективной оценки степени благоприятности погодных условий. Наличие такой оценки для различных обсерваторий сети позволяет в центре принятия решения осуществлять распределение между обсерваториями неперекрывающихся заданий и тем самым в полной мере использовать имеющийся потенциал по наблюдению большего числа КО.

В работе предлагается рациональный вариант объективного числового критерия, который может служить обобщенной характеристикой прогнозных погодных условий и позволяет учесть специфику проведения оптических наблюдений. Введение данного критерия даёт возможность стандартизировать оценку погодных условий для различных обсерваторий, сформировать критерии принятия решения о способности обеспечить выполнение запланированного объёма работ, осуществить оценку необходимого числа дублирования заданий по каждому объекту, с учетом принятого порога обнаружения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ ПО ПОЗИЦИОННЫМ, ФОТОМЕТРИЧЕСКИМ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Медведев Ю.Д., Бондаренко Ю.С. Вавилов Д.Е., Маршалов Д.А,
Павлов С.Р., Чернетенко Ю.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия
medvedev@iaaras.ru

Интерес к проблемам динамической и физической эволюции малых тел Солнечной системы и, в частности, малых тел, сближающихся с Землей, вызван рядом причин, как практических, так и теоретических. Сближения и возможные столкновения этих объектов с Землей могут представлять реальную угрозу, масштаб которой определяется их физическими и динамическими характеристиками. Изучение физических свойств астероидов позволяет заглянуть в далекое прошлое нашей системы, поскольку по современным теориям малые тела образовались в протопланетном облаке, из которого образовывались более крупные тела. При изучении астероидов используется радиолокационные, фотометрические, спектрометрические и поляриметрические наблюдения. Особую ценность имеют радарные наблюдения, поскольку они дают не только очень точную информацию об орбитальном движении астероида, но и данные о его физических свойствах.

Институтом прикладной астрономии РАН и центром дальней космической связи «Голдстоун» налажены регулярные сеансы межконтинентальных радиолокационных наблюдений околоземных объектов, с использованием 70-метровой антенны центра дальней космической связи (DSS-14) в качестве передатчика и 32-метровых радиотелескопов (РТ-32) РСДБ-сети «Квазар-КВО» в качестве приемников.

Зарегистрированы и обработаны эхо-сигналы от 12 астероидов: 2011 UW158, 2003 TL4, 2003 YT1, 2003 BD44, 2014 JO25, 3122 Florence, 2017 VR12, 2003 SD220, 1998 OR2, 2021 AF8, 4660 Nereus и 2003 SD220. Эхо-сигналы от этих астероидов принимались и записывались на обсерваториях «Квазар-КВО» отдельно в левой и правой круговых поляризациях. На сайте института создан информационный ресурс «Радиолокационные наблюдения околоземных объектов», на котором размещены спектры мощности астероидов, полученные по наблюдениям сети «Квазар-КВО», а также другая полезная информация (iaaras.ru/observations/echo/).

Для астероида 2011 UW158 вычислены 10 спектров мощности на различные моменты времени. Используя эти спектры, оценено изменение уширения сигнала, которое возникает из-за осевого вращения астероида. Из анализа изменения уширения со временем построен полярный контур поверхности астероида и уточнено значение его осевого периода. Он оказался равным 36 ± 3 мин. Столь быстрое осевое вращение астероида позволяет сделать вывод, что он обладает высокой механической прочностью, представляя собой единое монолитное тело [1]. Для астероида 2003 BD44 сделана оценка отношения мощностей отраженного сигнала с прямой и обратной поляризацией. Полученные значения свидетельствуют о том, что поверхность астероида неоднородна.

Для двойного астероида 2003 YT1 определена величина проекции радиальной скорости спутника относительно центрального тела. Оценено значение эксцентрической аномалии спутника на момент наблюдения. Получены оценки периода осевого вращения астероида 2003 BD44, имеющего большие размеры. Период вращения оказался равным 67 ± 6 часа.

Получены спектры, указывающие, что астероид 2014 JO25 – бинарный, т.е. он состоит из двух скрепленных перемычкой частей и по форме напоминает гантелю. На спектрах астероида 3122 Florence выявлены два всплеска, которые могут интерпретироваться как отражение от двух спутников. Значения смещения этих пиков на спектре мощности относительно нуля позволяют оценить величины лучевых скоростей спутников величинами: $\dot{r}_a = -0.29 \pm 0.01$ и $\dot{r}_b = -0.18 \pm 0.01$ м/с, соответственно.

Проведены совместные радиолокационные и фотометрические наблюдения астероида 2017 VR12 [2]. По фотометрическим наблюдениям была получена кривая блеска астероида, определен период вращения, и построен двумерный контур его поверхности. По радиолокационным наблюдениям оценены размеры полученного контура астероида, особенности поверхности и радиолокационное альбедо. Показано, что 2017 VR12 относится к астероидам S или M-класса с яркой поверхностью, которая оказалась морфологически более грубой, чем у большинства исследованных радиолокационным методом астероидов.

Получен эхо-сигнал от медленно вращающегося астероида 2003 SD220. Его период осевого вращения оказался равным 285 часам. По уширению сигнала, полученного для разных моментов, сделан вывод, что астероид, возможно, имеет сильно вытянутую форму.

Рассмотрена задача изменения формы кометного ядра под действием сублимации вещества с поверхности кометы. Впервые получено аналитическое решение уравнения изменения формы для случая однородного ядра (состав и плотность вещества внутри ядра одинаковы) и широкого множества функций, описывающих темп испарения вещества, включая известную модель Секанины для ледяного кометного ядра [3]. Показано, что в ходе эволюции формы кометное ядро принимает вытянутую форму вдоль оси вращений. Рассмотрен случай, когда структура ядра неоднородна (к центру плотность уменьшается). Показано, что в рассмотренном случае из первоначально сферического ядра образуются гантелеобразные, ядра, подобные ядрам комет 67P/Churyumov-Gerasimenko, 103P/Hartley 2, 19P/Borrelly, 1P/Halley и 8P/Tuttle.

Наблюдениями зафиксирован результат столкновения астероида (596) Scheila с некоторым малым телом, размеры которого оцениваются в несколько десятков метров. Из анализа пылевой комы оценена относительная скорость столкновения астероида с гипотетическим телом. Выполнен поиск такого тела среди известных астероидов, комет и метеорных потоков. Показано, что фрагмент возможного метеорного потока кометы 232P/Hill мог быть искомым телом-ударником. Из позиционных наблюдений астероида определены орбитальные параметры и компоненты изменения скорости астероида в результате столкновения на момент 27 ноября 2010 [4].

Исследованы физические и динамические особенности астероида 1I 'Oumuamua – первого межзвездного небесного тела, проникшего в Солнечную систему и сблизившегося с Землей. Показано, что необычно сильно вытянутая форма астероида объясняется столкновениями с высокоскоростными частицами пыли в межзвездном пространстве [5]. Такие столкновения приводят к значительной поверхностной эрозии. Из-за сложного вращения астероида эрозия уменьшает его почти равномерно со всех сторон. Моделирование показывает, что данный объект мог приобрести текущую сильно вытянутую форму если он путешествовал в диске Галактики от 20 млн до 2 млрд лет или пролетел через пылевое облако размером 10 килопарсек. Столкновения с космической пылью также объясняет наличие на поверхности астероида крупнодисперсной пыли, которая может быть причиной загадочной негравитационной активности этого астероида.

В настоящее время становятся доступными наблюдения, дающие разрешать диски астероидов и комет: адаптивная оптика, интерферометрия, радиоизображения, и наблюдения, позволяющие получать интегрированную информацию о диске – фотометрические или инфракрасные световые кривые. Для отдельных астероидов также удастся отследить затмение звезды их дисками, т.е. получить так называемые «разрезанные силуэты». Это дает дополнительную информацию о физических свойствах астероидов, что позволяет определять их форму и параметры осевого вращения. Эти знания становятся необходимыми при построении высокоточных численных теорий движения малых тел. Дело в том, что с повышением качества оптико-электронных средств, с внедрением новых опорных каталогов (каталог Gaia) на порядки повышается точность позиционных наблюдений астероидов и комет. Это приводит к необходимости учета фазы в позиционных наблюдениях. А поскольку большинство астероидов имеет неправильную форму, то изменение фазы требует знания и их вращательного движения. Для астероидов, сближающихся с Землей, учет эффект актуален даже для астероидов

небольших размеров. Поэтому при построении высокоточных численных теорий возникает необходимость построения поступательно-вращательных теорий движения малых тел. Физические данные астероидов и комет позволяют учитывать более точно негравитационные эффекты в их движении.

Исследованы динамические особенности нескольких наиболее долгоживущих околосолнечных комет с наибольшим числом наблюдений. Среди них представители семейств Марсдена: кометы 321P, 322P, 323P, 342P, P/1999 J6 и Крахта: комета P/2008 N4.

Возможность определения орбит и негравитационных эффектов из наблюдений SOHO показана для солнечной кометы 323P / SOHO. Оценена точность наблюдений SOHO и выяснено, что они примерно в 400 раз менее точны, чем наземные для этой кометы. Было выяснено, что центр масс кометы 323P / SOHO, скорее всего, совпадает с центром яркости. Разработан подход, который позволил объединить все доступные наблюдения кометы по объединенной орбите. Были оценены некоторые физические параметры кометы 323P / SOHO. Температуры на поверхности кометы в афелии и перигелии были рассчитаны из энергетического баланса энергии на поверхности ядра кометы. Оценен диаметр кометы по абсолютной звездной величине, который оказался равным 30 м для альбедо 50%. Исследована ретроспективная эволюция орбиты кометы. Рассчитан средний параметр MEGNO для орбиты кометы, который показал, что орбита кометы сильно хаотична, и оценили время Ляпунова, которое оказалось равным ~ 40 лет. Было сформировано облако виртуальных комет с учетом ковариационной матрицы и проследили ретроспективную эволюцию каждой виртуальной кометы. Было определено, что некоторые кометы могут быть «выброшены» из-за близкого сближения с Юпитером, но большая часть из них остается на околосолнечной орбите. Были рассчитаны негравитационные ускорения, которые обеспечивают при ретроспективном движении кометы ее чрезвычайно тесное сближение кометы с Юпитером на расстояние менее 0,007 а.е. в 1967 г., в результате которого комета перебрасывается на орбиту со значительно большим перигелийным расстоянием.

Литература

1. Ипатов А.В., Бондаренко Ю.С., Медведев Ю.Д., Мишина Н.А., Маршалов Д.А., Беннер Л.А. Радиолокационные наблюдения астероида 2011 UW158 // Письма в Астрономический журнал. — 2016. — Т. 42, № 12 — С. 935–940.
2. Yu. S. Bondarenko, D. A. Marshalov, Yu. D. Medvedev, G. I. Kornienko, A. V. Kochergin, M. S. Zheltobryukhov, L. A. Benner: Physical Parameters of the Asteroid 2017 VR12 from Radar and Photometric Observations // Astronomy Letters. — 2019 — Vol. 45 No. 2. — P. 104–107.
3. Vavilov D.E., Medvedev Yu.D., Eggl S., Zaititskiy P.B. Shape evolution of cometary nuclei via anisotropic mass loss // Astronomical and Astrophysical Journal: Letters. — 2019. — V. 622. — p. L5.
4. Чернетенко Ю.А. Столкновения астероидов: астероид (596) Шейла // Астрофизический бюллетень. — 2019 —. Том 74, No 2. — С. 218–223.
5. Vavilov D.E., Medvedev Yu.D. Dust bombardment can explain the extremely elongated shape of 1I/Oumuamua and the lack of interstellar objects // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters — 2019. — V. 484. — P. L75–L78.

ТЕКУЩИЙ СТАТУС ПРОЕКТА ИСОН

Молотов И.Е., Еленин Л.В., Стрельцов А.И., Захваткин М.В., Сибиченкова М.А.
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия
im62@mail.ru

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 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.

Текущий состав НСОИ АФН

Проект ИСОН [1] был начат в 2004 году на средства российских и зарубежных грантов. Для оснащения сети были разработаны несколько серий специализированных обзорных телескопов апертурой от 12,5 см до 65 см с большими полями зрения [1], типовый набор программного обеспечения для управления оборудованием [2] и обработки ПЗС-кадров, отлажены новые наблюдательные методики, проведены переговоры с рядом отечественных и зарубежных обсерваторий, организованы новые пункты наблюдений. Что позволило в 2007 г. впервые в отечественной практике перекрыть наблюдениями всю геостационарную орбиту (ГСО). Проект ИСОН стал инкубатором инновационных решений в области мониторинга ОКП, которые были внедрены при создании обсерваторий Роскосмоса [1] и телескопов организаций промышленности. В 2015 году для эксплуатации обсерваторий сети была создана специализированная компания – МИП «ИСОН Баллистика-Сервис», на баланс которой было поставлено 32 телескопа. На пике развития проект ИСОН включал в себя до 100 телескопов. После выделения средств Роскосмоса и кооперации ПАО «МАК «Вымпел» в отдельные подсистемы, а также выхода ИПМ им. М.В. Келдыша РАН из соучредителей МИП, проект ИСОН стал координироваться компанией «ИСОН Баллистика-Сервис». Теперь сеть ИСОН составляют 32 телескопа этой компании 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 АФН реализуются еще на 10 более крупных телескопах, на которых наблюдательное время получается по научным заявкам. Географическое расположение и названия 30 обсерваторий, участвующих в проекте НСОИ АФН показано на Рис. 1.

В МИП «ИСОН Баллистика-Сервис» создан новый центр планирования наблюдений ИСОН, проводятся работы по разработке базы данных измерений и орбит.

НСОИ АФН до сих пор остается российским лидером по количеству телескопов и обсерваторий. С 2020 года поддержка наблюдений НСОИ АФН снова осуществляется за счет российских и зарубежных грантов. В 2021 году 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).

Наблюдения космического мусора

В рамках НСОИ АФН была создана обзорно-поисковая сеть, реализующая с использованием 20–25 см телескопов принцип т.н. «сплошных» обзоров в широкой полосе 18 градусов [3], с помощью которой впервые была решена задача обнаружения и сопровождения всех ГСО-объектов с блеском не слабее 15,5^m с целью самостоятельного ведения каталога. До сих пор она продолжает вносить важнейший вклад в мониторинг

ярких (до 15.5^m) ГСО-объектов и обеспечивает полное перекрытие ГСО. Регулярно получают измерения по 90% ярких КО, обеспечивая поддержание точных орбит у 98% популяции, что является необходимым условием для прогнозов опасных сближений.

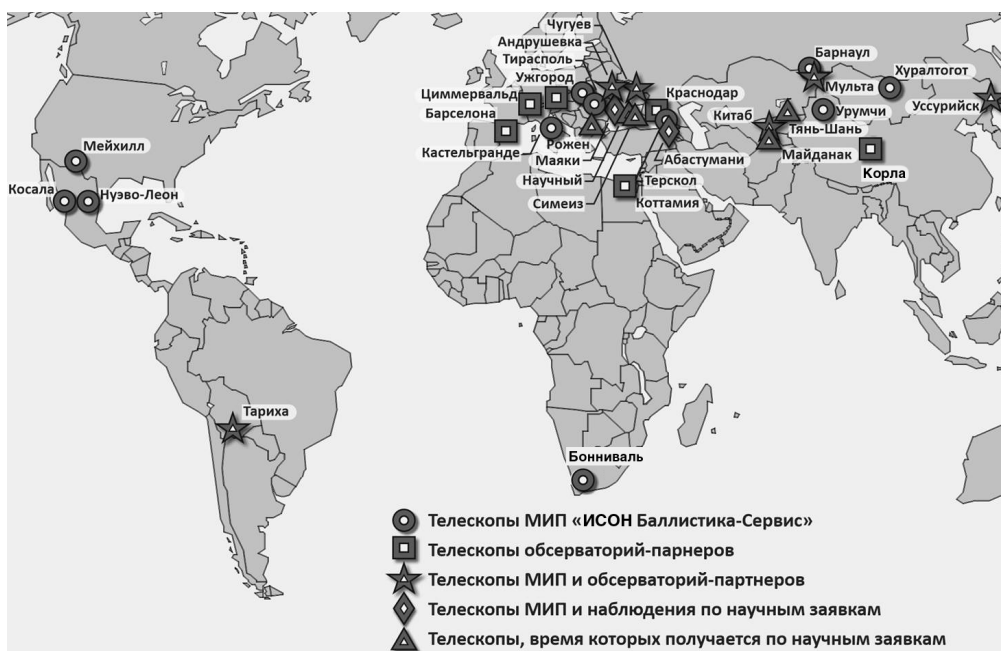


Рис. 1. Географическое расположение обсерваторий, вовлеченных в проект ИСОН.

На конец 2021 года база данных ИПМ им. М.В. Келдыша РАН содержала орбитальную информацию по 7829 КО (2537 ГСО, 4753 на высокоэллиптических орбитах (ВЭО) и 539 на средневисоких орбитах (СВО)). Распределение этих КО по величине блеска представлено на Рис. 2.

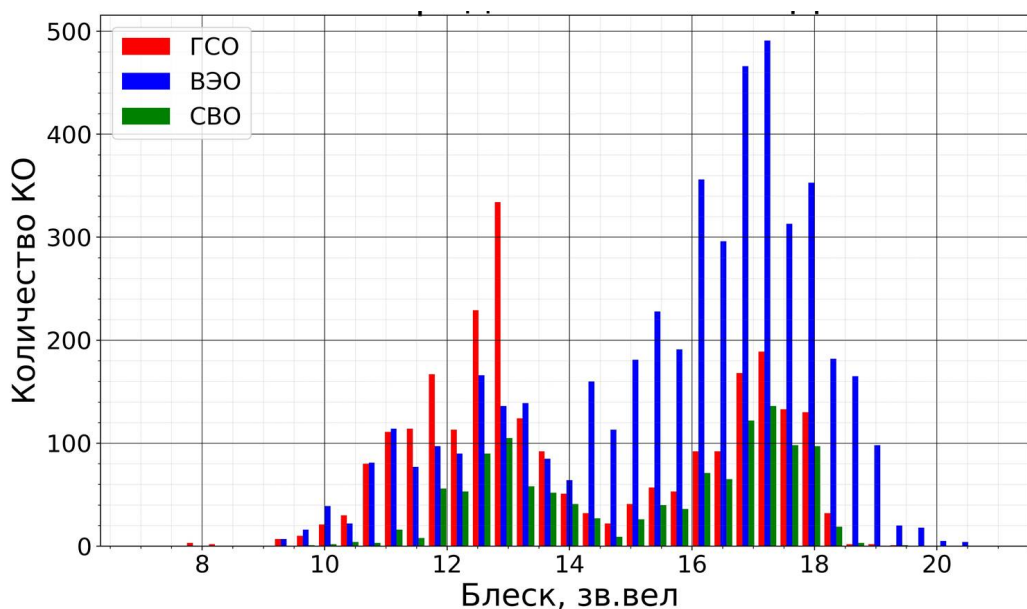


Рис. 2. Распределение КО на ГСО, ВЭО и СВО по величине блеска.

На телескопах 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 разрушением спутников и ступеней ракет. Впервые в мире было отработано сопровождение объектов с большим

отношением площади к массе на длительных интервалах времени, что позволило реконструировать их орбиты, проанализировать баллистическую эволюцию и определить источники образования. По нашим оценкам, объекты с отношением площади к массе больше 1 кв.м/кг составляют не менее половины популяции фрагментов космического мусора на высоких орбитах [3]. 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. 3.

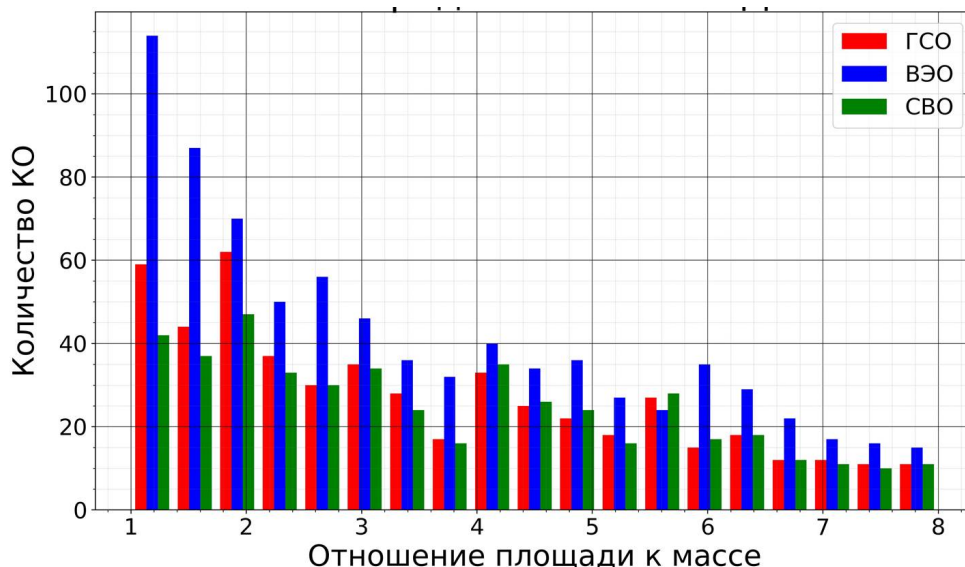


Рис. 3. Распределение КО на ГСО, ВЭО и СВО по величине отношения площади к массе.

Данные с 80-см телескопа на пике Терскол используются для калибровки модели ненаблюдаемой фракции КМ, развиваемой в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН [4].

В настоящее время проводится отработка обзорных наблюдений на 40-см телескопе САНТЕЛ-400/500 в Мульте, с его помощью за ночь получают до 934 проводок с 5765 измерениями по 409 различным КО с блеском до 14,5m. В плане развития проекта планируется использовать 28 см телескопы с полем зрения 6x6 градусов китайского производства. Также начата разработка новых высокопроизводительных оптических средств на основе сдвоенных 28 см телескопов с общим полем зрения 7x14 градусов – по оценкам с его помощью можно будет получать до 5000 проводок с 35000 измерениями по 1000 КО за ночь.

Литература

1. Молотов И.Е., Воропаев В.А., Юдин А.Н. и др. Комплексы электронно-оптических средств для мониторинга околоземного космического пространства // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017. В4(2). Р. 110-116.
2. Еленин Л.В., Молотов И.Е. Программный комплекс автоматизированного управления оптическими роботизированными наблюдательными пунктами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. В6. Р. 83-95.
3. Агапов В.М., Молотов И.Е., Боровин Г.К., Стрельцов А.И. Исследование популяции объектов космического мусора с большим отношением площади к массе на высоких околоземных орбитах // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. В2(98), Р. 1-26
4. Боровин Г.К., Захваткин М.В., Степаньянц В.А., Усовик И.В. Статистическая модель распределения космических объектов в пространстве орбитальных параметров // Математическое моделирование и численные методы. 2019. В4(24). Р. 69-90.

НАБЛЮДЕНИЯ АСТЕРОИДОВ В ПРОЕКТЕ ИСОН

Молотов И.Е.¹, Инасаридзе Р.Я.^{2,3}, Эгамбердиев Ш.А.⁴, Рева И.В.⁵,
Айвазян В.Р.^{2,3}, Сибиченко М.А.¹

¹ООО Малое инновационное предприятие «ИСОН Баллистика-Сервис», Москва, Россия

²Абастуманская астрофизическая обсерватория им. Е.К. Харадзе,
Государственный университет Ильи, Тбилиси, Грузия

³Самухе-Джавахетский Государственный Университет, г. Ахалцихе, Грузия

⁴Астрономический институт имени Улугбека, УАН, Ташкент, Узбекистан

⁵Астрофизический Институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

im62@mail.ru

Введение

Освоение и исследования околоземного космического пространства (ОКП) привело к осознанию т.н. астероидной опасности, вызываемой астероидами, сближающимися с Землей (АСЗ). Задачи обнаружения и каталогизации АСЗ, исследования эволюции их орбит и изучения их физико-минералогических свойств представляются чрезвычайно важными. 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.

Перечень обсерваторий НСОИ АФН, участвующих в наблюдениях астероидов

В рамках проекта ИСОН в 2008 году была организована подсистема телескопов для наблюдений астероидов [1]. Были разработаны новые телескопы апертурой 40–50 см, модернизированы или оснащены фотоприемной аппаратурой несколько существующих телескопов апертурой более 60 см. В дополнение астероидные наблюдательные программы ИСОН реализуются на 5 телескопах, время которых получается по научным заявкам. С 2021 года покупается время на 80-см телескопе АСА обсерватории Серро-Тололо в Чили. Текущий состав обсерваторий, сотрудничающих с ИСОН, показан на Рис. 1. Красным цветом на нем выделены пункты, участвующие в наблюдениях астероидов.

Направления астероидных исследований и полученные результаты

Астероидные исследования проводятся по двум основным направлениям [2] – поиск и изучение двойных астероидов, исследование влияния негравитационных эффектов на динамику астероидов (при руководящей роли НИИ Астрономии ХНУ им. В.Н. Каразина) и оперативный подхват новых открываемых объектов (по контрактам Европейского космического агентства и обсерватории Пурпурной горы Китайской академии наук, заключенным с МИП «ИСОН Баллистика-Сервис»).

Получение на протяжении нескольких оппозиций большого массива кривых блеска избранных АСЗ позволило принять участие в целом ряде пионерских теоретических и наблюдательных работ [4, 5]. Пример составной кривой блеска для астероида (1685) Торо показан на Рис. 2.

В 2018-2020 гг. в течение более 400 ночей проведены фотометрические наблюдения более 150 астероидов, сближающихся с Землей (АНЗ). Наблюдения проводились скоординировано в тринадцати обсерваториях мира с использованием 15 телескопов: 70-см АЗТ-8 в Чугуеве, 70-см АС-32 в Абастумани, 80-см К-800 в Маяках, 1-м Цейсс-1000 в Симеизе, 60-см Цейсс-600 и 2-м Цейсс-2000 в Рожен, 2-м Цейсс-2000 на Терсколе, 2,6-м ЗТШ в Научном, 60-см Цейсс-600 и 1,5-м АЗТ-22 на Майданаке, 36-см РК-360 в Китабе, 1-м Цейсс-1000 на Тянь-Шане, 22-см ОРИ-22 в Кастельгранде, 40-см ЧВ-400 в Косала и 40-см ЧВ-400 в Дереновке. Среди наблюдавшихся АСЗ – 29 вновь открытых, более 40 потенциально опасных и 10 двойных. Целью наблюдений являлось изучение параметров вращения, размеров, формы тел и свойств поверхности астероидов. Были найдены периоды вращения для 26 АСЗ с диаметрами более 500 м, в том числе для (144332) 2004

DV24, (505657) 2014 SR339, 2003 NW1; (18172) 2000 QL7; (89959) 2002 NT7; (152754) 1999 GS6; (162082) 1998 HL1. Также подтверждены периоды вращения для более, чем 20 АСЗ. Наблюдалось более 35 АСЗ с диаметрами менее 300-500 м, среди которых 28 – это вновь открытые астероиды. Определены или сделаны оценки периодов вращения для 22 из них.



Рис. 1. Географическое расположение обсерваторий, вовлеченных в проект ИСОН. Красным цветом выделены обсерватории, которые участвуют в наблюдениях астероидов.

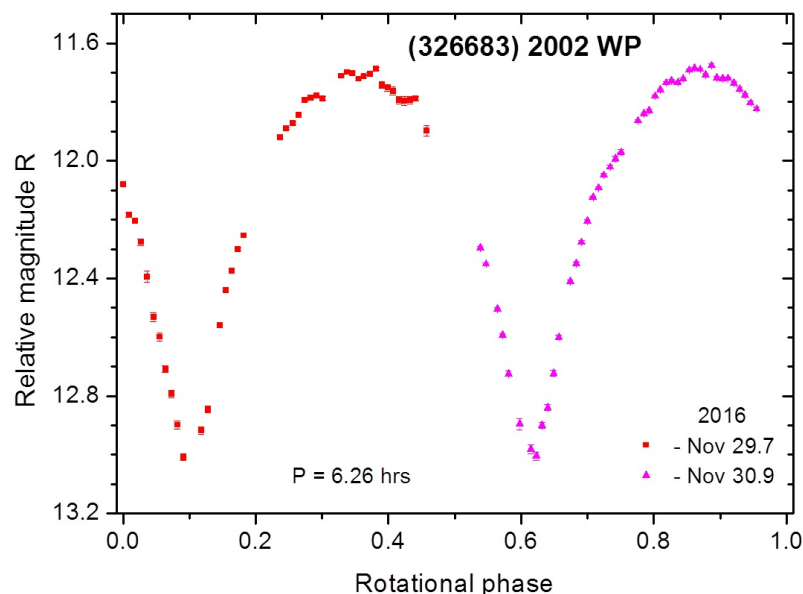


Рис. 2. Составная кривая блеска АСЗ (326683) 2002 WP по наблюдениям на 1-м телескопе Цейсс-1000 на Тянь-Шаньской обсерватории, показала очень вытянутую, сигарообразную форму тела астероида. Впервые определен период вращения астероида. (Построена Ю.Н. Круглым).

Ряд астероидов наблюдался с целью поиска проявлений двойственности. Например: (1943) Anteros, (15745) Yuliya, (16816) 1997 UF9, (1866) Sisyphus, (68216) 2001 CV26, (152931) 2000 EA107, (454177) 2013 GJ35. Получены первые указания на двойственность АСЗ (15745) Yuliya и (68216) 2001 CV26, кривые блеска которых показали наличие отклонений от периодической формы, что может быть проявлением возможных явлений затмений в двойной системе, но требует дальнейших исследований.

Проведены интенсивные наблюдения для нескольких известных двойных АСЗ: (7088) Ishtar, (31345) 1998 PG, (35107) 1991 VH, (65803) Didymos, (66391) 1999 KW4, (137170) 1999 HF1, которые будут использованы для улучшения параметров численных моделей этих двойных систем и дальнейшего анализа эволюции двойных астероидов для установления влияния BYORP эффекта.

Проведены интенсивные наблюдения для нескольких известных двойных АСЗ: (7088) Ishtar, (31345) 1998 PG, (35107) 1991 VH, (65803) Didymos, (66391) 1999 KW4, (137170) 1999 HF1, которые будут использованы для улучшения параметров численных моделей этих двойных систем и дальнейшего анализа эволюции двойных астероидов для установления влияния BYORP эффекта.

Астрометрический подхват новых объектов проводился в основном на телескопах апертурой 40 см, а также периодически на телескопах апертурой 60 см, 70 см, 80 см и 1 м. В 2018-2020 гг. международным Центром малых планет (MPC) было получено от обсерваторий сети ИСОН 13802 астрометрических измерений. Измерения с телескопов ИСОН были включены в 164 циркуляра МРЕС. Отработано детектирование объектов со сложением кадров. За счет этого для медленных объектов достигалась 20^m на телескопах 40 см апертуры.

В 2022 г. предполагается продолжить отработку технологии астероидных обзоров, т.н. «второй волны» (на малых телескопах с большим полем зрения) [1], в интересах обнаружения астероидов и комет. 40-см телескоп ASA с полем зрения 2x2 градуса планируется установить в Мексике. Также предполагается использовать для этой задачи два сдвоенных 28 см телескопа с общим полем зрения 7x14 градусов, разработка которых проводится в интересах наблюдений космического мусора.

Результаты данной работы основаны, в том числе, на наблюдательных данных, полученных на 1-м телескопе Цейсс-1000 ЦКП ИНАСАН в Симеизе и 2-м телескопе Цейсс-2000 на пике Терскол.

Литература

1. Еленин Л.В., Круглый Ю.Н., Молотов И.Е. и др. Роботизированный астероидный обзор сети ISON, поиск АСЗ и комет из обоих полушарий Земли// Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017. В4(3). Р. 32-38
2. Молотов И.Е., Еленин Л.В., Круглый Ю.Н. и др. Наблюдения астероидов и космического мусора в проекте НСОИ АФН // Научные труды ИНАСАН. 2020. В.5(1). Р. 13-16
3. Еленин Л.В., Воропаев В.А., Молотов И.Е., Боровин Г.К. Автоматизированный комплекс сбора и анализа оптических измерений малых тел Солнечной системы // Научные труды ИНАСАН. 2020. В5(1). Р. 1-4
4. Pravec P., Fatka P., Vokrouhlický D., et al. Asteroid pairs: a complex picture // Icarus. 2019. В333. Р. 429-463.
5. Scheirich P., Pravec P., Kusnirak P., et al. A satellite orbit drift in binary near-Earth asteroids (66391) 1999 KW4 and (88710) 2001 SL9 — Indication of the BYORP effect // Icarus. 2021. В360. P114321

РАДИО-ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТНОШЕНИЯ СВЕЧЕНИЯ К ИОНИЗАЦИИ ОТ СКОРОСТИ МЕТЕОРОВ РАЗНЫХ ЯРКОСТЕЙ

Нарзиев М.

Институт астрофизики НАН Таджикистан, г. Душанбе, Таджикистан

mirhusseyn_narzi@mail.ru

Исследование взаимосвязи оптической яркости со свойствами ионизированного следа и, в частности, корреляция между интенсивности свечения к ионизацией, а также зависимость отношения коэффициентов свечения к ионизации от скорости метеоров имеют первостепенное значение в области метеорной физики. Эти взаимосвязи важны не только для коррекции шкал масс фотографических и радиолокационных метеоров, но и необходимы для проверки достоверности данных о физических характеристиках метеороидов (шкала масс), определяемых фото и радиолокационными методами, и корректировки шкалы радиолокационных звездных величин, что облегчает переход от результатов радиолокационных наблюдений к результатам оптических наблюдений. Практическая реализация этой цели основана на исследовании связи между интенсивности свечения клинейной электронной плотности от скорости метеора.

Формула, выражающая связь отношения коэффициентов свечения и ионизации с параметрами метеора, может быть получена из уравнения свечения и ионизации в виде:

$$I_{ph}/q = \tau_{ph}\mu V^3/2\beta \quad (1)$$

где I_{ph} – интенсивности свечения, q – величина линейной электронной плотности, τ_{ph} — коэффициент свечения, определяемый как доля расходуемой кинетической энергии, преобразованной в свет, β — коэффициент ионизации, определяемый как среднее число электронов, генерируемых одним метеорным атомом, V — скорость метеора, а μ — средняя масса метеорного атома. Согласно уравнению (1), отношение I/q является функцией не только коэффициентов свечения и ионизации, но также скорости и химического состава метеороида. Согласно уравнению (1) для исследования зависимости отношения коэффициента свечения к ионизации от скорости необходимы наблюдательные данные об отношении интенсивности свечения к линейной электронной плотности в одной и той же точке на следе метеора.

Ранее Дэвис, Холл и Бабаджанов [Davies J. Getall, 1959 г; Бабаджанов, 1969] по результатам одновременных радио–фотографических наблюдений исследовали связь отношения интенсивности светового излучения к ионизации для отдельных групп метеоров по скоростям. Однако эти работы охватывали ограниченные диапазоны метеорных звездных величин и скоростей метеоров.

В настоящей работе для исследования связи между интенсивностью свечения и ионизации от скорости используются данные одновременных радио-оптических наблюдений метеоров полученных в [Davies et al, 1959; Бабаджанов, 1969; Cook et al., 1973; Znoil et al., 1985; Нарзиев и Малышев, 2006; Нарзиев, 2016], которые охватывают широкий диапазон метеорных скоростей и звездных величин метеоров от $+8^m$ до -8^m . Накопленные данные позволяли исследовать зависимость логарифма отношения интенсивности свечения к величине линейной электронной плотности от скорости для двух групп звездных величин: а) метеоров сосредоточенных в диапазоне от 0^m до $+8^m$ и б) метеоров со звездными величинами от -0^m до -8^m .

Для исследования зависимости коэффициентов свечения к ионизации от скорости метеоров входящих в первую группу, нами использованы полученные результаты зависимости $\log I_{ph}/q$ от скорости V , по работе [Нарзиев 2010] данные которых для заданного интервала скоростей ΔV предоставлены в Табл.1.

Таблица 1 – Зависимость $\log I_{ph}/q$ от скорости V для метеоров в интервале $0 \leq m \leq +8$

ΔV	<14.9	15-25	25-35	35-45	45-55	55-65	65-75
$V, \text{ km/s}$	14.9	20.0	30.3	40.4	50	60	62.3
$(\log I_{ph}/q)$	-3.3	-3.35	-3.45	-4.1	-4.4	-4.42	-4.55

Очевидно, что в диапазоне метеорных скоростей по мере увеличения скорости метеора значение $\log I_{ph}/q$ уменьшается на порядок. В настоящей работе нами порезультатам двух станционных телескопических и радиолокационных наблюдений метеоров, в 1972-1973 гг. в обсерватории Оренджееве [Знойлом и др. 1985] дополнительно исследована зависимость $\log I_{ph}/q$ от скорости для четырёх групп спорадических метеоров (Табл. 2).

Таблица 2 – Отношение интенсивности свечения к линейной электронной плотности для четырех групп спорадических метеоров

Source	Нср. (km)	Мср.	Тср. (сек.)	$\log I_{ph}/q$	n
Апексные	97.75 ± 1.25	4.45 ± 1.25	0.793	-4.95	30
Тороидальные	93.08 ± 1.34	5.38 ± 1.72	0.428	-4.76	72
Антиапексные	93.0 ± 2.66	4.44 ± 1.43	0.315	-4.26	40
Отстающие	90.68 ± 0.94	5.03 ± 1.27	0.293	-4.32	41

Эти результаты согласуются с выводами, полученными нами ранее в [Нарзиев, 2011] для слабых метеоров. Данные о $\log I_{ph}/q$ (Табл.1) позволяют вычислить $\log \tau/\beta$ для различных значений скоростей при среднем атомном весе метеорного вещества равным $\mu = 3,82 \cdot 10^{-23}$ г. Результаты расчёта приведены на Рис.1.

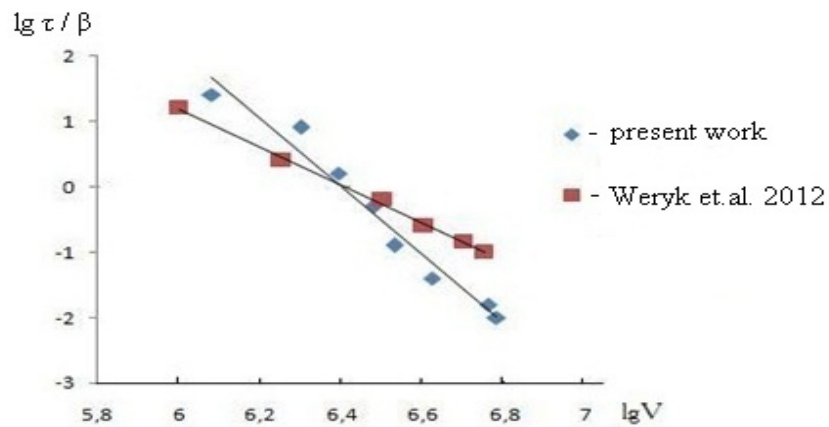


Рис.1. Зависимость отношения коэффициентов свечение к ионизации от скорости.

Несколько позже Верик и Броун в [Weryk and Brown 2012] на основе данных одновременных видео- и радиолокационных наблюдений метеоров в Канаде, рассчитывали отношение линейной электронной плотности к интенсивности свечения, а затем вычисляли значение $\log \beta/\tau$. Зависимость отношения коэффициента ионизации к свечению от скорости ими получено в виде

$$\log \beta/\tau = (3,00 \pm 0,62) \log V - (4,27 \pm 1,37) \quad (2)$$

Преобразуя выражение (2) в виде $\log \tau/\beta$

$$\log \tau/\beta = (4,27 \pm 1,37) - (3,00 \pm 0,62) \log V$$

нами для заданного значения скорости вычисляли $\log \tau/\beta$, полученные результаты нанесены также на Рис. 1. Видно, что результаты обоих циклов наблюдений при значении скорости $V = 40$ км/с хорошо согласуются друг с другом. Очевидно, что $\log \tau/\beta$ в диапазоне метеорных скоростей с ростом скорости уменьшается на три порядка.

Исследование $\log I_{ph}/q$ от скорости для ярких метеоров со звездной величиной в диапазоне $-0,15^m \div -7,2^m$, а скорость - в диапазоне $14 \div 72$ км/с осуществлялось по 27 метеоров полученных в [Davies et al, 1959, Бабаджанов, 1969; Нарзиев, Малышев, 2006; Нарзиев 2016].

При этом метеоры сгруппированы в семь групп по скоростям с интервалом 10 км/с, и для каждой группы рассчитаны среднее арифметическое значение $\log I_{ph}/q$ и их

среднеквадратичное отклонение. Результаты расчета представлены в таблице 3, где N — количество метеоров, входящих в каждую группу.

Таблица 3 – Зависимость $\log I_{ph}/q$ от скорости по результатам комбинированных радио-оптических наблюдений метеоров ярче -0^m

V, км/с	10–20	20–30	30–40	40–50	50–60	60–70	70–80
($\log I_{ph}/q$)	-4.09	-4.720	-3.957 ± 0.65	-4.207 ± 0.16	-3.42 ± 0.7	-4.216 ± 0.16	-3.7 ± 0.01
N	1	1	3	3	2	14	2

Анализ средних значений $\log I_{ph}/q$ показывает, что в диапазоне метеорных скоростей, $\log I_{ph}/q$ меняется незначительно и остается практически постоянным. Среднее значение $\log I_{ph}/q$ составляет $-4,12 \pm 0,12$. Используя уравнение (1) и усредненное значение $\log I_{ph}/q$ для каждой группы метеоров ярче -0^m по таблице 3 и вычисляя коэффициент светимости по формуле $\tau_{ph} = \tau_o \cdot V$, где $\log \tau_o = -9,3$, (используемые для расчета фотографической массы метеороидов), нами рассчитаны коэффициенты ионизации при заданном значении скорости метеора. Результаты расчета значения β для различных значений скорости приведены в таблице 4.

Таблица 4. Зависимость коэффициента ионизации β от скорости при использовании численных значений отношения $\lg I_{ph}/q = -4,12 \pm 0,12$.

V км/с	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	>70
β	0.00013	0.0020	0.010	0.032	0.0789	0.16	0.30

Таким образом, впервые на основании результатов одновременных радио-оптических наблюдений рассчитаны отношения $\lg I_{ph}/q$ и $\log \tau/\beta$ от скорости для всего диапазона метеорных скоростей, как для слабых, так и ярких метеоров в отдельности.

Литература

1. Davies J.G., Greenhow J.S., Hall J.E. Combined photographic and radio echo observations of meteors // Proc. Roy. Soc., 1959, A 253, N 1272, P. 121-129.
2. Бабаджанов П.Б. Свечение и ионизация метеоров // ДАН СССР, 1969, т.184, № 4, с. 800-802.
3. Бабаджанов П.Б., Малышев И.Ф., Нарзиев М., Чеботарев Р.П. Кривые свечения и ионизации метеоров по результатам параллельных телевизионных и радиолокационных наблюдений // Кометы и метеоры, 1985, № 37, с. 28-33.
4. Нарзиев М., Малышев И. Ф. Результаты комплексных радио-телевизионных (ТВ) наблюдений метеорных потоков в Таджикистане. I. Динамические характеристики. Бюллетень Института астрофизики Академии Наук Республики Таджикистан. Душанбе-2006, No 85, с. 35-45.
5. Znoil V., Hollan J., Simek M. The relation between meteor optical brightness and properties of the ionized trail. III. Double Station Observation. // Bull. Astron. Inst. Czechosl. 1985, V.36, N 1, p. 44-56.
6. Нарзиев М.О результатах поиска совместных фото-радиолокационных наблюдений метеоров в Таджикистане. Труды международной конференции 31 августа-5 сентября 2015 г. п. Терскол. Окоземная астрономия 2015. с.64-69.
7. Weryk R.J., Brown P.G. Simultaneous radar and video meteors—II: Photometry and ionisation. Planetary and Space Science. Volume 81, June 2013, Pages 32–47.
8. Нарзиев М. Зависимость свечения и ионизации от скорости и химсостава метеоров. Радиотехника, 160/2010, Харків, с. 127-131.

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

skruch@inasan.ru , nikolenko@inasan.ru , mansur@inasan.ru ,
mkruch@inasan.ru , arshinkin@inasan.ru

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 метра, 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 метр и более, поля зрения 0.1-1 угловых градуса. В статье также описана система управления 1-м телескопом, позволяющая автоматизировать описанный процесс наблюдений.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Олейников И.И.¹, Архипов С.А.², Геча В.Я.², Тунгушпаев А.Т.¹, Хромов А.В.²

¹АО «НПК «СПП», г. Москва, Россия

²АО «Корпорация ВНИИЭМ», г. Москва, Россия

da23@mail.ru

Одно из важнейших направлений развития средств мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) – создание космических средств обнаружения космических объектов (КО). Размещение оптико-электронных средств контроля на космических аппаратах (КА) позволяет полностью устранить влияние атмосферы на результаты измерений, обеспечить независимость от погоды и времени суток. Космические средства мониторинга не имеют территориальных ограничений (в отличие от наземных средств, которые размещаются в основном на территории России), что дает уникальную возможность наблюдения всех КО в ОКП.

В докладе представлен технический облик (состав, орбитальное построение, логика функционирования) космической оптико-электронной системы наблюдения (КОЭСН), разработанный с учетом технологических возможностей и перспектив развития отечественного оптико-электронного приборостроения и ракетно-космической техники.

Получаемая с использованием КОЭСН информация о КО дополнит базу данных Автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (АСПОС ОКП) [1], повысит достоверность и оперативность наблюдений. КОЭСН обеспечит беспропускной контроль КО со следующими характеристиками:

- проникающая способность $\sim 18^m$;
- точность измерения угловых координат $\sim 0,5$ угл. сек.
- в зоне действия, ограниченной приэкваториальной областью ОКП (по долготе: $0^\circ \dots 360^\circ$; по наклонению: $0^\circ \pm 15^\circ$; по высотам: от 34 000 км до 37 000 км), включающая геостационарные и геосинхронные орбиты (ГСО).

Вероятность достижения желаемого функционального состояния АСПОС ОКП по контролю ГСО за счет создания КОЭСН возрастет с 0,25 до 0,94.

На основе научно-технического задела по разработкам, изготовлению и эксплуатации оптико-электронных и квантово-оптических систем [2] предложен состав и основные схемотехнические решения по двум вариантам оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) «Центавр» (диаметры зрачков 200 мм (ОЭА-200) и 600 мм (ОЭА-600)), включая оптические схемы и конструкции объективов, схемные решения системы приема и преобразования информации на основе матричных фотоприемных устройств, систему управления ОЭА, обеспечивающую ее автоматическое функционирование, а также схемотехнические решения системы обмена информацией между КА с использованием терминалов лазерной связи. В таблице 1 представлены основные характеристики ОЭА «Центавр».

Таблица 1 – Ориентировочные технические характеристики ОЭА «Центавр»

	Характеристика	Размерность	Величина	
			ОЭА-200	ОЭА-600
1	Фокусное расстояние	мм	300	1200
2	Относительное отверстие		1:1,5	1: 2
3	Угловое поле зрения	°	4x4	3 x 3
4	Спектральный диапазон	мкм	0,4-0,9	0,4-0,9
5	Диапазон углов перенацеливания линии визирования	°	± 20	-
6	Масса		90	150
7	Габариты	мм	400x400x1200	Ø800x2400
8	Энергопотребление	Вт	250	250

В качестве космических комплексов, оснащенных ОЭА «Центавр», предлагается использовать системотехнические решения АО «Корпорация ВНИИЭМ» [3], включая платформу и бортовой комплекс обеспечивающих систем, средства выведения, ретрансляции и наземный комплекс управления, обеспечивающие запуск и функционирование КОЭСН.

На рисунках 1 и 2 представлено орбитальное построение КОЭСН.

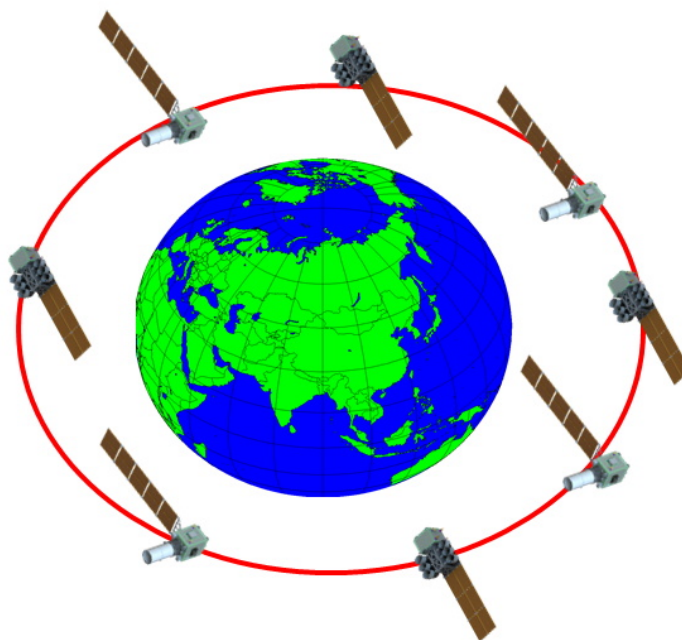


Рис. 1. Размещение КА с ОЭА-200 и КА с ОЭА-600 на ССО терминатора.

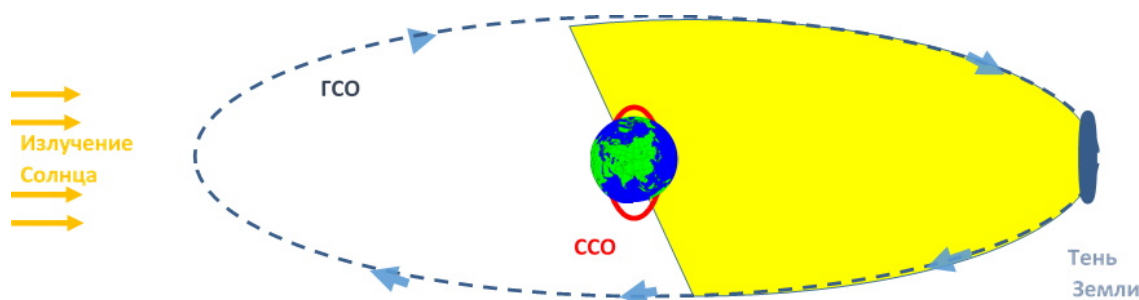


Рис. 2. Схема контроля ГСО. Зона контроля КОЭСН обозначена желтым цветом. Стрелками на ГСО показано суточное движение космических объектов.

В состав орбитальной части КОЭСН входят восемь КА, равномерно размещенных на солнечно-синхронной орбите (ССО) терминатора.

Два КА, разнесенные по фазе на 180° , оснащены «веером» из шести ОЭА-200, ориентированным в противоположные стороны ГСО в плоскости ССО.

Другие два КА, разнесенные по фазе на 180° , оснащены «веером» из шести ОЭА-200, ориентированным под углами плюс 24° один и минус 24° другой, относительно ориентации на тень Земли. ОЭА-200, установленная на КА, производит съемку ГСО периодически с интервалом 0,85 часа и обеспечивает беспрерывной 100% контроль КО, обеспечивая минимальное время 12 часов и две «засечки» орбиты любого КО, либо за 24 часа 4 засечки орбиты любого КО. Беспрерывной 100% контроль КО на протяжении всего времени существования 4-х КА обеспечивается либо компенсационными движениями КА, либо за счет разворота зеркал перенацеливания.

Орбитальное построение четырех КА, каждый из которых оснащен одной ОЭА-600, аналогично орбитальному построению КА с ОЭА-200. Зона действия каждого КА

составляет примерно $\pm 30^\circ \times \pm 45^\circ$. Требуемая ориентация линии визирования ОЭА-600 в зоне действия КА обеспечивается компенсационными движениями КА.

Мониторинг заданной локальной области контроля ГСО обеспечивается циклическими движениями КА. Возможны различные схемы построения циклических движений в зависимости задачи контроля (задача поиска и обнаружения КО; задача сопровождения КО).

Предлагается консервативная стратегия создания КОЭСН – поэтапное решение задач с ограниченными техническими характеристиками (контроль ГСО), с максимальным использованием научно-технических заделов космической техники (космические системы и ОЭА дистанционного зондирования Земли), математического и программно-алгоритмического обеспечения наземных средств мониторинга ОКП, с постепенным вовлечением в проект КОЭСН новых технических решений (в начале лазерная связь, бортовая астрометрическая обработка, далее малые КА и т.д.). В связи с отсутствием отечественных аналогов КОЭСН такая стратегия представляется наиболее рациональной. С учетом изложенного предлагаются следующие стадии создания КОЭСН.

I Стадия. Исследование схемных решений, разработка и изготовление экспериментальных образцов ОЭА и программно-алгоритмического обеспечения, обоснование технических характеристик КОЭСН. Формирование требований к экспериментальной КОЭСН.

II Стадия. Выполнение ОКР по созданию и натурным испытаниям экспериментальной КОЭСН на базе 2-х КА. Формирование требований к штатной КОЭСН.

III Стадия. Выполнение ОКР по созданию штатной КОЭСН.

Литература

1. <https://www.tsniimash.ru/science/scientific-and-technical-centers/flight-control-center-fcc/security-in-space/>
2. ppt-online.org> 427229 Штатные оптико-электронные системы поиска, обнаружения, определения орбит и изображений в видимом и лазерном диапазоне.
3. Горбунов А.В. и др. Состояние и перспективы развития космических комплексов «Канопус-В» и «Метеор-М» // РКП и ИС, 2015, том 2, вып.4, с.14-19.

МЕТЕОРОИДЫ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Попова О.П.

Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН, Москва, Россия

olga@idg.chph.ras.ru

Метеорные наблюдения позволяют исследовать все типы объектов Солнечной системы, попадающие на пересекающиеся с Землей орбиты. Они позволяют изучать структуру, состав и другие свойства метеороидов. Атмосфера Земли является естественным детектором для космических тел (КТ), взаимодействие которых с атмосферой сопровождается излучением, образованием ионизованных областей и генерацией ударных/инфразвуковых волн. При подходящих условиях пролет метеороида через атмосферу может привести к падению метеорита на Землю или даже к образованию ударного кратера, но в большинстве случаев только генерируемые пролетом эффекты доступны для исследования и являются основанием для определения свойств КТ. Наиболее естественным способом оценки свойств метеороидов по наблюдательным данным является применение модели для их интерпретации.

Маленькие (размером менее сантиметра) и большие метеороиды выделяют свою энергию на разных высотах, и их взаимодействие с атмосферой происходит в разных режимах. Физические условия при пролете метеороида через атмосферу значительно меняются с высотой, и различные процессы ответственны за абляцию на разных стадиях пролета. Для описания пролета маленьких и больших метеороидов используются разные модели. Многие модели направлены на воспроизведение наблюдательных данных в различных режимах. Другие модели описывают физические условия, возникающие вокруг метеорного тела.

В презентации будут обсуждаться определение свойств метеороидов по наблюдательным данным (в основном по оптическим), используемые модели и их границы и ограничения.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, НАХОДЯЩИМИСЯ В ОКРЕСТНОСТЯХ ТОЧЕК ЛИБРАЦИИ

Пупков М.В., Эйсмонт Н.А., Федяев К.С., Зубко В.А.
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
m.pupkov@iki.rssi.ru

В данной работе рассматривается изучение возможностей определения физических характеристик околоземных объектов при помощи космического аппарата, находящегося в окрестности солнечно-земной точки либрации, после окончания его основной миссии. Продление миссии космического аппарата возможно, если его основные бортовые системы еще функционируют и в топливных баках остается достаточное количество рабочего тела для осуществления необходимых перелетных импульсов. Примером такого подхода является проект ICE-3 (ISEE-3), целью которого в расширенной миссии было достижение кометы Джакобини-Циннера и Галлея из окрестности точки либрации L_1 системы Солнце-Земля. После выполнения нескольких гравитационных маневров у Луны космический аппарат был выведен на траекторию сближения с этими кометами в 1983 году, после чего успешно достиг их.

В качестве космических аппаратов, которые можно перенаправить на траектории тесного сближения с околоземными объектами, рассматриваются космическая обсерватория «Спектр-Рентген-Гамма» (СРГ), которая была успешно запущена в июле 2019 года и в настоящее время находится на орбите вокруг солнечно-земной точки либрации L_2 , и спутник «Deep Space Climate Observatory» (DSCOVR), находящийся в окрестности точки либрации L_1 системы Солнце-Земля. Основная миссия СРГ – создание карты видимой Вселенной в рентгеновском диапазоне. Спутник DSCOVR, в свою очередь, предназначен для наблюдения за Солнцем и земным климатом, а также для усовершенствования системы оповещения о природных катаклизмах. Используя имеющиеся навигационные ресурсы, системы ориентации и орбитального управления данных космических аппаратов, мы получаем возможность проводить ряд дополнительных экспериментов, включающих оценку массы астероида или кометы путем измерения изменений параметров траектории космического аппарата, вызванных гравитационным влиянием исследуемого небесного тела.

По предварительным оценкам после выполнения основных задач проекта к 2029 году на борту обсерватории СРГ останется достаточное количество топлива для осуществления орбитальных маневров, необходимых для достаточно близкого пролета некоторых астероидов. 2029 год представляет особый интерес, поскольку в этом году состоится очередное тесное сближение с Землей астероида Апофис. Помимо этого астероида в качестве кандидатов для подобной миссии рассматриваются астероиды 1990 MU и 1997 XF₁₁, очередные тесные сближения с которыми состоятся, соответственно, в 2027 и 2028 годах, а также кометы 289P/Blanpain и 300P/Catalina, пролет мимо которых возможен в 2035 и 2036 годах соответственно. Также показано, что спутник DSCOVR может приблизиться к астероиду 1997 XF₁₁ при тех же ограничениях на требуемую характеристическую скорость, что и для обсерватории СРГ.

Предварительные расчеты показывают перспективность данного подхода, основными преимуществами которого являются оперативность миссии и экономия земных ресурсов.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ «ШАБЛОНОВ» СПЕКТРАЛЬНЫХ ТИПОВ АСТЕРОИДОВ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ МИНЕРАЛОГИИ ЭТИХ ТЕЛ И ОБНАРУЖЕНИЯ ПРИЗНАКОВ СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВОЙ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Савелова А.А.¹, Бусарев В.В.^{1,2}, Щербина М.П.^{2,1}, Барабанов С.И.²

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, Москва, Россия

²ИНАСАН, Москва, Россия

aa.rezaeva@physics.msu.ru

В последние десятилетия появляется все больше сообщений (например, [1-3]) о регистрации сублимационной активности на астероидах. Этот факт представляет большой интерес, так как традиционно считалось, что активность является отличительной особенностью комет. В 2020 году нашей группой были получены новые спектры отражения 9 астероидов Главного Пояса в основном примитивных типов (с низкотемпературной минералогией): 19 Фортуны, 52 Европы, 102 Мириам, 177 Ирмы, 203 Помпеи, 250 Беттины, 266 Алины, 379 Гуенны и 383 Янины. Восемь из девяти астероидов (за исключением 102 Мириам) по результатам исследования их спектров отражения [4], по-видимому, проявляют сублимационно-пылевую активность, следствием которой является временная пылевая экзосфера. Такой вывод был сделан на основе анализа полученных спектров отражения астероидов и наблюдательных условий, при которых были получены спектры, а именно: было проведено сравнение спектров отражения астероидов с их же спектрами отражения из базы данных SMASS, принятых за «эталонные», и с «шаблонами» спектральных классов (типов), к которым эти астероиды ранее были отнесены. Стабильность спектральной прозрачности земной атмосферы была проконтролирована по спектрам стандартных звезд солнечного типа, которые регистрировались до и после наблюдений астероидов [4].

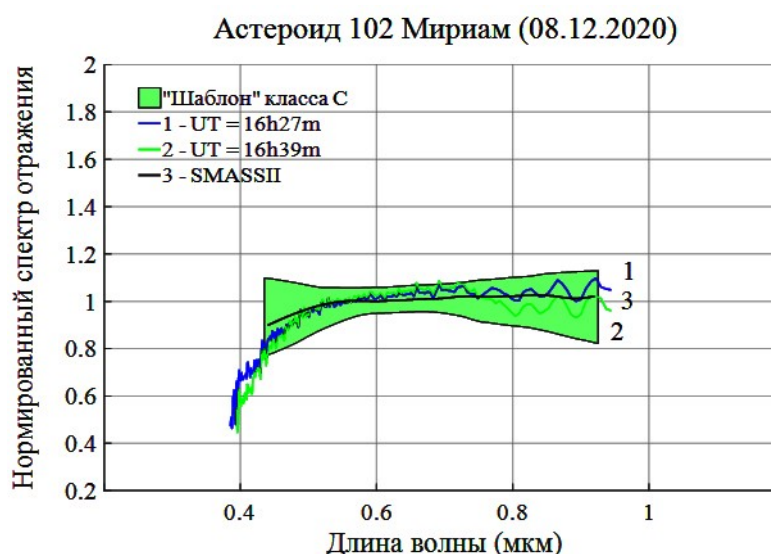


Рис.1. Нормированные спектры астероида 102 Мириам (кривые 1 и 2), «шаблон» таксономического типа C, нормированный спектр астероида (кривая 3) из базы данных SMASSII [6].

«Шаблоном» мы называем спектральные границы таксономического типа (или класса) астероидов в двумерном пространстве «отражательная способность – длина волны в диапазоне ~0.4-0.9 мкм» [5]. Такие границы были рассчитаны с использованием всех нормированных спектров отражения астероидов каждого известного таксономического типа из базы данных SMASSII[6]. Если рассматривать координатную плоскость с нормированной отражательной способностью, отложенной по оси Oy, и длиной волны, отложенной по оси Ox, «шаблон» представляет собой на ней область, в пределах которой должен находиться спектр отражения астероида этого спектрального типа (если последний

известен). Если таксономический тип астероида неизвестен, то сравнение его спектра отражения с разными «шаблонами» может помочь таксономический тип установить. Кроме того, степень соответствия спектра отражения астероида «шаблону» дает возможность сделать оценку минералогических особенностей вещества его поверхности. Как видно на Рис. 1, полученные спектры отражения астероида 102 Мириам находятся в пределах шаблона таксономического типа С и их общая форма в основном хорошо согласуется со спектром отражения этого астероида из базы SMASSII, что подтверждает его низкотемпературную минералогию. Вместе с этим нами был сделан вывод об отсутствии признаков сублимационно-пылевой активности этого астероида в момент его наблюдений.

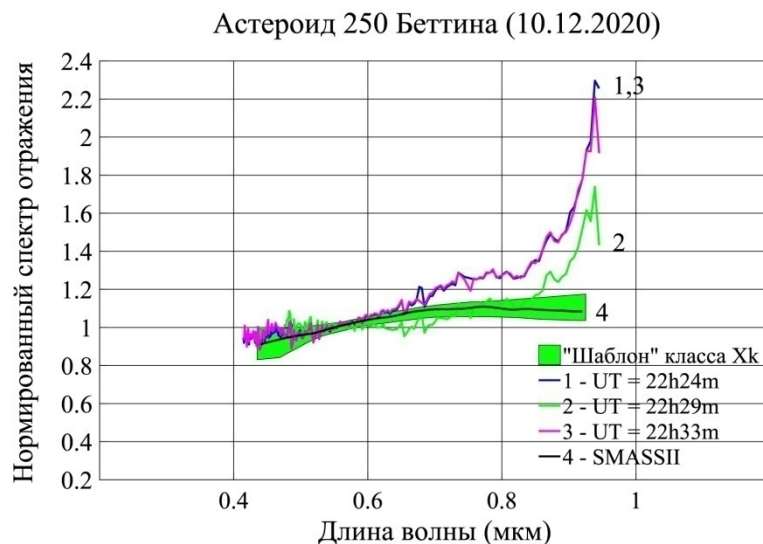


Рис.2. Нормированные спектры астероида 250 Беттина (кривые 1,2,3), «шаблон» таксономического типа Xk, нормированный спектр астероида (кривая 4) из базы данных SMASSII [6].

На фоне «шаблонов» особенно хорошо заметны изменения спектров отражения, которые, как предполагается, связаны с сублимационной активностью астероидов вблизи перигелия (в основном после его прохождения) и образованию вокруг них временной пылевой экзосферы с характерными спектральными особенностями [7]. В качестве примеров на Рис. 2 и 3 приведены «эталонные» SMASSII-спектры отражения астероидов

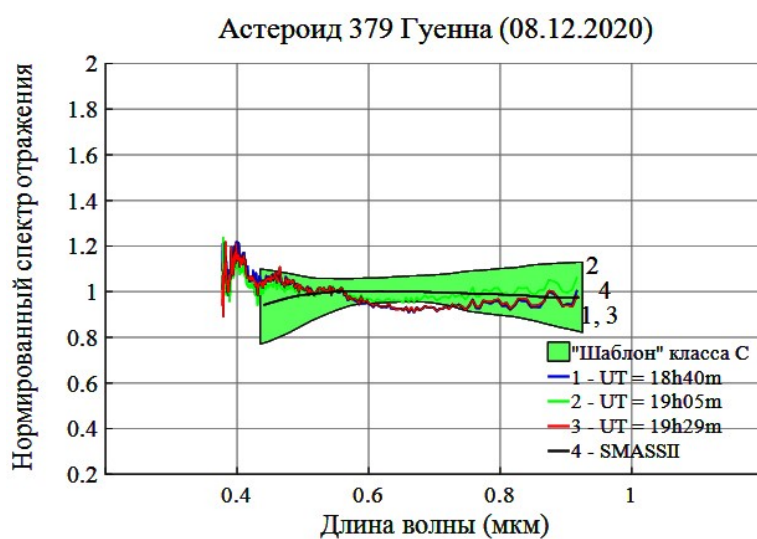


Рис. 3. Нормированные спектры астероида 379 Гуенна (кривые 1, 2, 3), «шаблон» таксономического типа С, нормированный спектр астероида (кривая 4) из базы данных SMASSII [6].

250 Беттина и 379 Гуенна [6] (обозначенные черным цветом), а также их спектры отражения (обозначенные номерами 1-3), полученные в момент времени, когда астероиды находились вблизи перигелия [4]. Видно, что при прохождении астероидами своих перигелиев их спектры отражения оказались сильно искаженными по сравнению с «эталонными» и даже частично выходят за границы соответствующих «шаблонов». Главное различие этих двух астероидов между собой состоит в том, что 250 Беттина отнесена к таксономическому классу М [8] (или Xk [9]) и может иметь в основном высокотемпературную минералогию [10], а 379 Гуенна – к таксономическому классу В [8, 9], которому соответствует низкотемпературная минералогия [10]. Исходя из этого, а также с учетом результатов численного моделирования спектров отражения условного активного астероида [7], можно предполагать, что временная пылевая экзосфера Беттины состояла в основном из частиц силикатного состава, а у Гуенны имела смешанный состав – из ледяных и силикатных (возможно с примесью органики) частиц.

Основной дополнительной причиной появления у астероидов пылевой активности может быть активность Солнца [4]. Мы называем эту причину «дополнительной», так как она имеет эпизодический характер в отличие от регулярного колебания подсолнечной температуры на астероидах, ведущего к периодической сублимационно-пылевой активности на некоторых из них. Явление отклонения спектров отражения астероидов от соответствующих им «шаблонов» таксономических типов может помочь в исследовании структуры и характеристик ударных магнетогидродинамических волн, возникающих при солнечных эруптивных событиях.

Литература

1. Chandler C.O., Curtis A.M., Mommert M., Sheppard S.S., Trujillo C.A. SAFARI: Searching Asteroids for Activity Revealing Indicators // Publ. Astron. Soc. Pacif. 2018. V. 130. № 993.P. 114502.
2. Jewitt D. The active asteroids // Astron. J. 2012. V. 143. № 3. P. 66.
3. Бусарев В.В., Барабанов С.И., Пузин В.Б. Оценка состава вещества и обнаружение сублимационной активности астероидов 145 Адеоны, 704 Интерамнии, 779 Нины и 1474 Бейры // Астрон. вестн. 2016. Т. 50. № 4. С. 300–312.
4. Бусарев В. В., Савелова А. А., Щербина М. П., Барабанов С. И. Спектральные признаки одновременной сублимационной активности и появления пылевой экзосферы у восьми астероидов Главного пояса вблизи перигелия // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. №2. С. 92–108.
5. Щербина М.П., Савелова А.А., Бусарев В.В. Метод «шаблонов»: определение спектральных типов астероидов // Сборник тезисов Всероссийской конференции "Наземная астрономия в России. XXI век". 2020. С.196.
6. SMASS: Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey // URL: <http://smass.mit.edu/smass.html>. Дата обращения: 8 марта 2022.
7. Busarev V.V., Petrova E.V., Irsambetova T.R., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact // Icarus. 2021. V. 369. 114634 (18 pp).
8. Tholen D. J. Asteroid taxonomic classifications // Asteroids II/ Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 1139–1150.
9. Bus S. J., Binzel R. P. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. The Observations // Icarus. 2002. V. 158. P. 106–145.
10. Gaffey M. J., Bell J. F., Cruikshank D. P. Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // Asteroids II/ Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 98–127.

МАСШТАБИРУЕМЫЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБСТАНОВКИ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Самыловский И.А., Сазонов В.В., Морозов О.В., Егоров М.В., Филиппов А.А.,
Абрамова В.В., Царегородцев А.Ю., Богачева А.Е.

ФКИ МГУ имени М.В. Ломоносова

ivan.samylovskiy@cosmos.msu.ru

Космическая система представляет собой сложную, иерархически организованную структуру, элементы которой взаимодействуют друг с другом с учетом набора связей различной природы. Проектирование, анализ и управление такой системой – процесс, требующий использования специализированного программного обеспечения. При этом, как правило, возникает необходимость совмещения отработанных и многократно проверенных решений в области баллистических расчетов различных этапов функционирования составных частей системы в единый программно-математический конвейер, допускающий работу в режиме реального времени и настраиваемый под потребности конкретного оператора.

Настоящее сообщение посвящено разработке баллистического центра ФКИ МГУ имени М.В. Ломоносова, имеющей целью предоставить проектантам, производителям и эксплуатантам космических систем функциональность среды разработки (IDE – Integrated Development Environment) миссий, включающих в себя наземные и космические средства, работающие в виртуальной среде моделирования физического мира. Демонстрируется набор программных средств, реализующих моделирование различных систем с использованием набора элементарных структурных единиц, включающих:

- Объекты физического мира:
 - Планеты и планетоиды,
 - Звезды,
 - Космические аппараты,
 - Наземные станции,
 - Бортовые приборы
- Абстрактные объекты:
 - Системы координат,
 - Координаты,
 - Углы,
 - Ориентации
 - Точки,
 - Векторы,
 - Плоскости,
 - Треки точек и векторов,
 - Поля зрения,
 - Модели движения,
 - Источники данных.

Демонстрируются примеры создания с использованием таких структурных блоков «проектов», реализующих анализ и моделирование таких структур как:

- Системы дистанционного зондирования Земли и планет;
- Космические комплексы, содержащие наземный и космический сегмент, включая средства выведения;
- Многоспутниковые группировки связи, навигации, ДЗЗ;
- Орбитальные телескопы для наблюдения астрономических объектов;
- Системы наблюдения за космическим мусором и т.д.

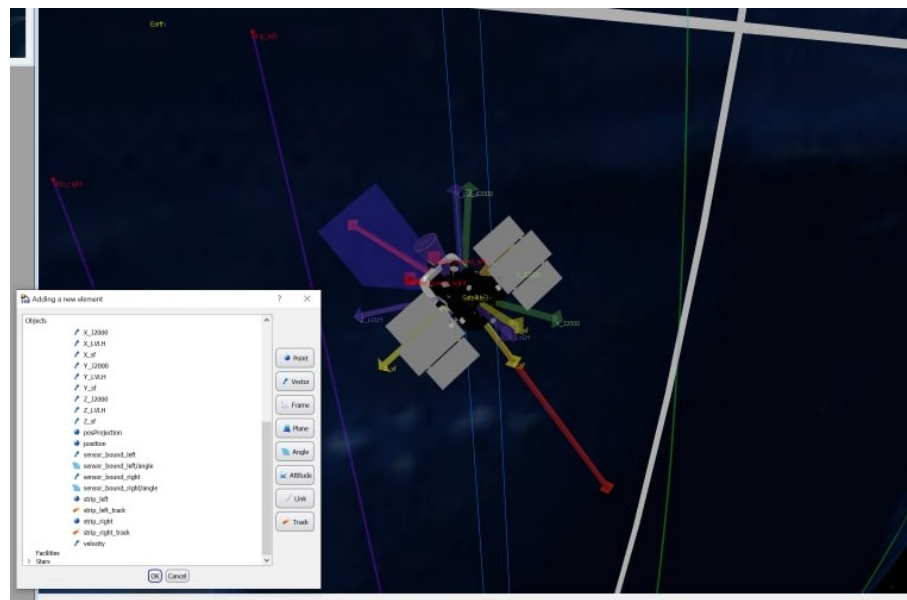


Рис. 1. Формирование полосы захвата полезной нагрузки спутника дистанционного зондирования

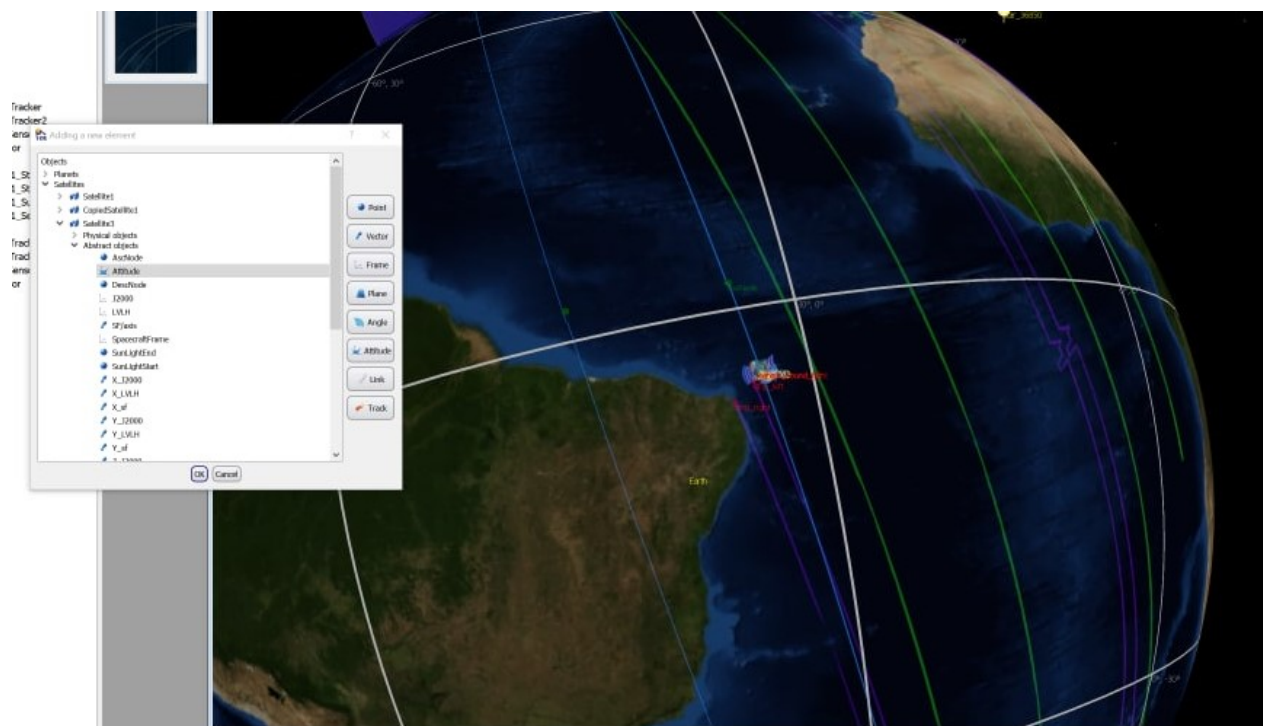


Рис. 2. Полоса захвата спутника ДЗЗ в ходе маневров вращения

Функциональность источников данных позволяет добавить в «проект» внешнюю телеметрию в заданном формате, а также расчеты, проведенные в верифицированных программных комплексах, что с учетом кроссплатформенности модулей программного комплекса позволяет говорить о платформе для создания и развития:

Средств создания центров управления, планирования и обработки данных имеющихся и перспективных миссий различного назначения,

Пополняемой среды комплексного моделирования космических систем.

АНДРОМЕТИДЫ И ИХ СВЯЗЬ С ОКОЛОЗЕМНЫМИ АСТЕРОИДАМИ

Сергиенко М.В.¹, Соколова М.Г.¹, Нефедьев Ю.А.^{1,2}

¹Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

²Астрономическая обсерватория им. В.П.Энгельгардта, Россия

maria_sergienko@mail.ru

Андрометиды являются подтвержденным метеорным потоком, который связывают с кометой 3D/Biela [1]. Комета 3D/Biela была трижды обнаружена за свою историю, а также была потеряна, поэтому имеет в своем названии букву «D», тогда как периодические кометы обозначены буквой «P». Комета распалась в 1842, 1843 гг. и продолжила распадаться в 1846, 1852 гг. Фрагментация породила активный метеорный поток Андрометиды. Поток был впервые зарегистрирован в 1798 г. и сопровождался высокой метеорной активностью в 1872 и 1885 гг. [2], затем интенсивность потока уменьшалась и к началу 20 века фиксировалось уже несколько метеоров в час [3]. В 1845 и 1852 гг. наблюдатели зафиксировали два фрагмента ядра кометы – главный и вторичный. Предполагалось, что высокая метеорная активность потока в эти годы связана именно с распадом кометы и являлась следствием ее фрагментации. При последующем своем появлении в 1859 г. комета не была найдена, поэтому было выдвинуто предположение, что она полностью распалась [4].

В данной работе с помощью авторской многопараметрической модели [5] исследуется генетическая связь метеорного потока Андрометиды с околоземными объектами, которые возможно могут иметь с потоком общее происхождение. Возможные генетические связи рассматривались среди астероидов группы Аполлоны, которые пересекают орбиту Земли. Для идентификации метеороидов с астероидами на близких орбитах применен метод сопоставления многопараметрических критериев. В качестве исходных данных использовался телевизионный каталог метеорных орбит (КМО) – каталог Meteoroid Orbit Database v3.0 за 2010-2016 г. (<http://cams.seti.org/>) (далее CAMS), в котором приведены значения ошибок определения элементов орбит метеоров.

В результате был выполнен поиск астероидов с орбитами, близкими орбитам Андрометид, с использованием D-критерия Драммонда [6], метрики Холшевникова [7], постоянной Тиссерана [8], эволюционных динамических орбитальных параметров – квазистационарных параметров μ и ν [9] ограниченной задачи трех тел и долготы перигелия π орбиты [10]. Метод отождествления, представленный авторами, подразумевает вычисление и задание пороговых величин по каждому из используемых критериев с учетом дисперсии орбит метеороидов в потоке, обусловленной как начальными условиями выбросов из родительского тела (РТ) и последующей эволюцией их орбит, так ошибками каталога в определении элементов орбит в результате телевизионных наблюдений. Степень близости орбит астероида и метеороида определялась на основе статистического анализа интервальных оценок средних квадратических ошибок выполнения всех используемых критериев в совокупности. Данная методика позволяет более строго обосновать пороговые значения критериев, которые широко используются для отождествления метеорных потоков с неизвестными родительскими телами с астероидами как возможно потухшими кометами или фрагментами их распада.

Для потока Андрометиды получено усредненное значение постоянной Тиссерана T_J 2.7, что указывает на движение метеороидов потока по кометным орбитам. Для двух выделенных астероидов, имеющих близкие орбиты с Андрометидами, постоянные Тиссерана T_J также имеют значения интервале от 2.6 до 2.9. Таким образом, можно предположить, что выделенные астероиды являются объектами переходной природы и, не исключается возможность, что они могут быть фрагментами ядра кометы 3D/Biela.

Литература

1. Jenniskens P. and Vaubaillon J. 3D/Biela and the Andromedids: Fragmenting versus Sublimating Comets // *AJ*. 2007.V. 134, P.1037–1045.
2. Kronk, G. W. Meteor Showers: A Descriptive Catalog // Hillside, NJ: Enslow. 1988.
3. Hawkins, G. S., Southworth, R. B., Steinon, F. Recovery of the Andromedids //, *AJ*. 1959. V. 64. P. 183–188.
4. Kronk G. W., Comets: A Descriptive Catalog // New Jersey: Enslow Publishers, Inc. 1984, p. 223.
5. Сергиенко М.В., Соколова М.Г., Холшевников К.В. Многофакторная методика поиска малых тел на близких орбитах // *Астрономический журн.* 2020. № 97/5. С. 432–440.
6. Drummond J.D. A test of comet and meteor shower associations // *Icarus*. 1981. V. 45. P. 545-553.
7. Kholshchevnikov K.V., Kokhirova G. I., Babadzhanov P. B., Khamroev U. H. Metrics in the space of orbits and their application to searching for celestial objects of common origin // *MNRAS*. 2016. V. 462/2. P. 2275–2283.
8. Jenniskens P., Mostly dormant comets and their disintegration into meteoroid streams: a review// *Earth Moon Planet*. 2008. V. 102 (1–4), P. 505–520.
9. Babadzhanov P.B., Williams I.P., Kokhirova G.I., Near-earth objects in the Taurid complex // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2008. V. 386 (3), P. 1436–1442.
10. Sokolova M., Sergienko M., Nefedyev Y., Andreev A., Nefedyev L., Genetic analysis of parameters of near earth asteroids for determining parent bodies of meteoroid streams // *Advances in Space Research*. 2018. V. 62, Issue 8, P. 2355-2363.

СУБД-ЦЕНТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ИДЕНТИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Трушкова Е.А., Юрасов В.С.
АО «НПК «СПП», Москва, Россия
astro@npk-spp.ru

Идентификация новых измерений с каталогизированными объектами космического мусора (ОКМ) является одним из затратных с вычислительной точки зрения этапов обработки траекторных угловых измерений, получаемых от оптических измерительных средств. Для решения этой задачи требуются трудоемкие расчеты критериев близости между измеренными параметрами движения ОКМ и их расчетными значениями, полученными прогнозированием оценок векторов состояния ОКМ и характеристик погрешностей этих оценок на моменты измерений.

В настоящее время в центрах обработки информации для хранения измерительной информации и каталога ОКМ преимущественно стали использоваться современные СУБД. Наблюдающаяся тенденция возрастания числа каталогизированных ОКМ и потока оптических измерений по ним требует совершенствования применяемых способов идентификации для такого рода центров. Разработан СУБД-центрический подход к идентификации измерений в части расчета, хранения и использования эфемерид каталогизированных ОКМ, а также в части ранжированного выбора объектов-претендентов на идентификацию. Основное отличие данного метода идентификации от других [1] заключается в том, что выбор объектов-претендентов на идентификацию производится на этапе записи измерительной информации в СУБД, а окончательное принятие решения о привязке измерений ОКМ осуществляется лишь по результатам уточнения орбит ОКМ. Такой подход позволяет существенно увеличить производительность обработки измерительной информации за счет снижения трафика запросов между клиентскими приложениями и СУБД, а также сокращения числа рассматриваемых объектов-претендентов на идентификацию.

Для ускорения расчета эфемерид каталогизированных ОКМ, существенного сокращения объемов хранимой информации, а также удобства использования предлагается применять универсальный численно-аналитический метод (УЧАМ) прогнозирования движения ОКМ [2]. Под универсальностью метода понимается его пригодность для эффективного по точности и быстродействию прогнозирования орбит ОКМ с различными высотами, эксцентриситетами и наклонениями. Универсальность достигается за счет выбора неособенных элементов орбит и учета в обобщенном виде возмущений, обусловленных нецентральностью гравитационного поля Земли, сопротивлением атмосферы, световым давлением и притяжением Луны и Солнца.

В качестве зависимых переменных в уравнениях движения ОКМ в УЧАМ используются Лагранжевы (равноденственные) элементы орбит $(a, \xi, \eta, P, Q, \lambda)$, где a – большая полуось, $\xi = e \cos(\omega + \Omega)$, $\eta = e \sin(\omega + \Omega)$, e – эксцентриситет, ω – аргумент перигея, Ω – долгота восходящего узла, $P = \sin \frac{i}{2} \cos \Omega$, $Q = \sin \frac{i}{2} \sin \Omega$, i – наклонение, $\lambda = \omega + \Omega + M$, M – средняя аномалия. В отличие от Кеплеровых элементов орбиты равноденственные элементы не имеют особенностей при малых эксцентриситетах и наклонениях. В качестве независимой переменной используется время t .

Основная идея численно-аналитических методов заключается в разделении медленных и быстрых переменных в уравнениях движения ОКМ и переходу к интегрированию усредненных уравнений, не содержащих в правых частях быстрых переменных. При интегрировании усредненных уравнений используется гораздо больший шаг, чем при численном интегрировании первоначальных уравнений движения в оскулирующих элементах. Вследствие этого численно-аналитические методы обеспечивают большее быстродействие при проведении расчетов, чем численные методы.

По отношению к аналитическим методам они имеют лучшую точность, поскольку позволяют более строго учесть при интегрировании изменчивость возмущений.

Предлагаемый СУБД-центрический способ идентификации оптических измерений включает следующие автоматически выполняемые основные этапы расчетов:

1. *Расчет и запись в БД эфемерид на предстоящие сутки по всем каталогизированным ОКМ.* В разработанном способе идентификации оптических измерений эфемериды в БД хранятся в виде средних элементов, точнее в виде средних элементов в четырех узловых значениях времени на одном шаге интегрирования, достигающем одних суток. За счет этого существенно сокращается объем записываемой и хранимой информации в БД по эфемеридам каталогизированных ОКМ. В промежуточные моменты времени эфемериды орбит рассчитываются интерполированием [2].

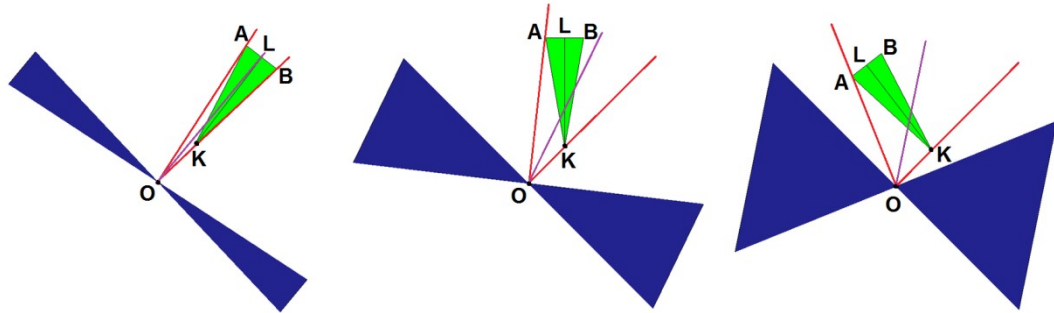
2. Расчет и запись в БД эфемерид на предыдущие и предстоящие сутки по вновь каталогизируемым ОКМ. Осуществляется по мере появления ранее некаталогизированных ОКМ аналогично этапу 1.

3. *Выбор объектов-претендентов и расчет критериев ранжирования при записи в БД новых проводок.* Задача ранжированного выбора объектов-претендентов на идентификацию была ускорена за счет аналитических формул расчета возможных нормалей орбит по конусу наблюдения наземной станции

$$C(\mathbf{k}, \mathbf{l}, \varepsilon, h) = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 | (\mathbf{x} - \mathbf{k}) \cdot \mathbf{l} \geq \cos \varepsilon \cdot \|\mathbf{x} - \mathbf{k}\|, (\mathbf{x} - \mathbf{k}) \cdot \mathbf{l} \leq h\},$$

где $\mathbf{k} = \|\mathbf{k}\|(k_1, k_2, k_3)^T$ – вектор направления от центра Земли на измерительную станцию (вершина конуса), единичный вектор $\mathbf{l} = (l_1, l_2, l_3)^T$ направления от станции на ОКМ, рассчитываемый по текущему измерению прямого восхождения и склонения, $0 \leq \varepsilon \leq \frac{\pi}{2}$ – половина раствора конуса, $h > 0$ – высота конуса (расстояние от вершины до основания конуса, выбираемое по типу орбиты). Требуется найти допустимые положения нормали к плоскости орбиты ОКМ, т.е. такие плоскости орбит, которые в момент t имеют непустое пересечение с конусом наблюдения станции.

Согласно рисунку, заметим, что если мы найдем объемлющий конус $C_{span} = C(0, \mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3)^T, \gamma_{min}, \infty)$ для конуса наблюдения, т.е. конус с вершиной в точке О (центр Земли) и минимальным раствором, содержащий конус наблюдения от точки К (измерительная станция), то возможными направлениями нормали к плоскости орбиты будет множество направлений $\mathbb{R}^3 \setminus \left(\left\{0, \mathbf{q}, \frac{\pi}{2} - \gamma_{min}, \infty\right\} \cup \left\{0, -\mathbf{q}, \frac{\pi}{2} - \gamma_{min}, \infty\right\} \right)$.



Видно, что направляющий вектор конуса C_{span} лежит в плоскости OKL, определяемой векторами $\mathbf{k}$ и $\mathbf{l}$. Проведем все необходимые геометрические построения в этой плоскости (см. рисунок).

а. Обозначим $\beta = \angle OKL = \pi - \arccos(\mathbf{l} \cdot \mathbf{k})$, $\beta_{bound} = \pi - 2\varepsilon$.

$$\begin{aligned} \text{б. } |OA| &= \sqrt{k^2 + \frac{h^2}{\cos^2 \varepsilon} - \frac{2kh}{\cos \varepsilon} \cos(\beta - \varepsilon)}, \angle AOK = \arccos\left(\frac{1}{2 \cdot |OA| \cdot k} \left(OA^2 + k^2 - \frac{h^2}{\cos^2 \varepsilon}\right)\right); \\ |OB| &= \sqrt{k^2 + \frac{h^2}{\cos^2 \varepsilon} - \frac{2kh}{\cos \varepsilon} \cos(\beta + \varepsilon)}, \angle BOK = \arccos\left(\frac{1}{2 \cdot |OB| \cdot k} \left(OB^2 + k^2 - \frac{h^2}{\cos^2 \varepsilon}\right)\right). \end{aligned}$$

в. Если $\mathbf{l} \times \mathbf{k} = 0$, то положим $\mathbf{q} = \mathbf{k}$, $\gamma_{min} = \angle AOK$, иначе перейдем к следующему пункту.

г. Обозначим $\mathbf{a} = \frac{OA}{|OA|}$, $\mathbf{b} = \frac{OB}{|OB|}$, $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{l} \times \mathbf{k}}{\|\mathbf{l} \times \mathbf{k}\|}$. Поставим вспомогательную задачу:

$$\begin{aligned} \mathbf{n} \cdot \mathbf{a} = 0, \mathbf{k} \cdot \mathbf{a} = \cos(\angle AOK), \|\mathbf{a}\| = 1, (\mathbf{a} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{n} > 0; \\ \mathbf{n} \cdot \mathbf{b} = 0, \mathbf{k} \cdot \mathbf{b} = \cos(\angle BOK), \|\mathbf{b}\| = 1, (\mathbf{b} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{n} < 0. \end{aligned}$$

Ее решение найдено в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \frac{\cos(\angle AOK)}{\Delta_j} \left(\Delta \left(k_j \pm \sqrt{k_j^2 + n_j^2 - 1 + \Delta_j^2 \cos^2(\angle AOK)} \right) + FP_j \right), \\ \mathbf{b} &= \frac{\cos(\angle BOK)}{\Delta_j} \left(\Delta \left(k_j \pm \sqrt{k_j^2 + n_j^2 - 1 + \Delta_j^2 \cos^2(\angle BOK)} \right) + FP_j \right), \end{aligned}$$

где знак “+” или “-” в каждом равенстве берется согласно выполнению соответствующего условия $(\mathbf{a} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{n} > 0$ или $(\mathbf{b} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{n} < 0$, $\Delta = (\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3)^T$, $\Delta_1 = n_2 k_3 - n_3 k_2$,

$$\Delta_2 = -n_1 k_3 + n_3 k_1, \Delta_3 = n_1 k_2 - n_2 k_1, F = \begin{pmatrix} 0 & n_3 & -n_2 \\ -n_3 & 0 & n_1 \\ n_2 & -n_1 & 0 \end{pmatrix}, j = \arg \max_{i=1,2,3} |\Delta_i|,$$

FP_j – трехмерный единичный вектор-столбец, содержащий единицу на j -ом месте.

д. Если $\beta - \beta_{bound} \leq 0$, тогда положим $\mathbf{q} = \frac{1}{2}(\mathbf{a} + \mathbf{k})$, $\gamma_{min} = \frac{1}{2}\angle AOK$, иначе положим $\mathbf{q} = \frac{1}{2}(\mathbf{a} + \mathbf{b})$, $\gamma_{min} = \frac{1}{2}(\angle AOK + \angle BOK)$.

При переборе каталогизированных ОКМ в список объектов-претендентов включаются ОКМ, нормаль к орбите которых позволяет им потенциально попасть внутрь конусов наблюдения станции в рассматриваемые моменты времени. Дополнительное ранжирование претендентов осуществляется по возрастанию величины отклонения от направляющей соответствующего конуса.

4. Выбор объектов-претендентов и расчет критериев ранжирования при отправке проводок на повторную идентификацию. Осуществляется по мере необходимости повторной идентификации измерений аналогично этапу 3.

5. Принятие решения по однозначно идентифицируемым проводкам.

6. Выявление одновременно полученных проводок ОКМ. Для дальнейшего принятия решения об идентификации измерений существенным для наблюдений области ГСКО является разделение проводок по группам, полученным от одного и того же измерительного средства на одних и тех же кадрах.

7. Принятие решения об идентификации измерений на основе уточнения орбит объектов-претендентов с учетом ранжирования и наличия одновременно полученных проводок.

Разработанный СУБД-центрический подход к идентификации измерений успешно применяется в течение двух лет. За это время в БД, реализованной на СУБД PostgreSQL накоплено около 70 миллионов записей эфемерид. Средний размер одной записи составляет около 400 байт. Среднесуточное число эфемерид ОКМ, рассчитываемых и записываемых в БД по более, чем 30000 ОКМ, составило около 98000. Реализация данного подхода позволила на порядок увеличить скорость обработки измерений от оптических средств. За этот период было обработано более 216 миллионов измерений по более, чем 13.8 млн проводкам. Среднее число обрабатываемых измерений составило более 300 тысяч в сутки, пиковые значения достигали 500 тысяч. При этом за счет использования внутренних механизмов СУБД удалось обеспечить масштабируемость решения данной задачи.

Литература

1. Khutorovsky Z.N., Correlation of Measurements in the Process of Satellite Catalog Maintenance, Proceedings of the Fourth US/Russian Space Surveillance Workshop, US Naval Observatory, Washington, DC, October 23-27, 2000, pp. 97-116.
2. Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Юрасов В.С., Стрельников С.В. Навигационно-баллистическое обеспечение полета ракетно-космических средств. Системный анализ НБО. В 2-х книгах. Книга 2. М.: Радиотехника, 2018.

ВКЛАД ГРАЖДАНСКИХ ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ В КОНТРОЛЬ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Хуторовский З.Н., Сорокин К.В.

ПАО «МАК «Вымпел»

Гражданские измерительные оптические средства вносят значительный вклад в решение задачи контроля околоземного космического пространства (ОКП). Характеристиками качества решения задачи поддержания орбитальной базы данных (БД) космических объектов являются полнота, оперативность и точность. Рассматриваются числовые показатели вклада телескопов и их группировок в решение задачи контроля (эффективность) за 2021 год, в которых вышеуказанные характеристики получают своё конкретное выражение. Приводится оценка характеристик ошибок измерений телескопов. Делается вывод о динамике изменения характеристик контроля ОКП.

КОСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВЫХ АСТЕРОИДОВ, ЛЕТАЮЩИХ СО СТОРОНЫ СОЛНЦА (ПРОЕКТ СОДА)

Шугаров А.С., Шустов Б.М., Шмагин В.Е., Буслаева А.И.
Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия
shugarov@inasan.ru

Падение челябинского тела в 2013 г. наглядно показало, что проблема массового обнаружения малых тел (от 5-10 м), в т.ч. приходящих со стороны Солнца, в настоящий момент не решена. Задача обнаружения таких декаметровых тел имеет как научный, так и практический смысл.

Для обнаружения декаметровых тел в ближней зоне, приходящих с ночного неба, могут быть использованы наземные широкоугольные телескопы умеренных апертур, аналогичные применяемым в СККП.

Примерно половина всех опасных тел приходит со стороны дневного неба, задача их массового обнаружения не может быть решена наземными средствами и требует размещения телескопов в космосе на достаточном удалении от Земли.

В Институте астрономии РАН предложена концепция проекта СОДА (Система Обнаружения Дневных Астероидов). Один или два КА будут размещены в окрестности точки L1 (в системе Земля–Солнце) на расстоянии около 1.5 млн км от Земли.

Для массового обнаружения тел, летящих со стороны Солнца, будет использоваться метод обнаружения на оптическом барьере вокруг Земли, 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.

Критическая технология проекта СОДА - космический широкоугольный телескоп с апертурой 30 см, способный каждые несколько минут осматривать конусный барьер вокруг Земли с прониканием до 17^m и обеспечивать точность угловых измерений лучше $0.5''$ в режиме сопровождения объекта.

В работе представлена оптическая схема телескопа с полем зрения 3.75° с предапертурным поворотным зеркалом, обеспечивающим область наведения $50^\circ \times 120^\circ$. Время перенаведения составит не более 3 с, время однократного обзора оптического барьера вокруг Земли 3-мя телескопами составит 3.5 минуты.

Представлены основные характеристики проекта СОДА при использовании данного телескопа.

Показано, что совместная работа космической системы СОДА и сети наземных телескопов с прониканием до 19^m позволит обнаруживать практически все декаметровые тела, приходящие как с дневного, так и с ночного неба, с временем упреждения около 10 часов.

Литература

1. А. С. Шугаров, Б. М. Шустов, С. А. Нароенков, М. А. Зверева. Космическая система обнаружения опасных небесных тел, приближающихся к земле с дневного неба («СОДА») // Космические исследования. – 2018. – Т. 56, № 4. – С. 300–310. – DOI 10.1134/S0010952518040056. – WOS 000438675500004.
2. A. Shugarov, B. Shustov, S. Naroenkov System of observation of day-time asteroids (SODA) // Open Astronomy. – 2018. – Vol. 27, № 1. – P. 132–138. – DOI 10.1515/astro-2018-0023. – WOS 000439082300014.
3. Буслаева А.И., Шмагин В.Е., Шугаров А.С. Управляемое предапертурное зеркало с областью наведения $50^\circ \times 120^\circ$ для 30 см телескопа космической системы обнаружения декаметровых астероидов (проект СОДА) // Научные труды Института Астрономии РАН. – 2021. – Т. 6, № 3. – С. 74-81. – DOI 10.51194/INASAN.2021.6.3.002.

4. Шугаров А.С., Шмагин В.Е., Буслаева А.И., Шустов Б.М. Оптический телескоп с полем зрения 3.75° с преапертурным поворотным зеркалом с областью наведения $50^\circ \times 120^\circ$ для космической системы обнаружения дециметровых астероидов (проект СОДА) // Научные труды Института Астрономии РАН. – 2021. – Т. 6, № 2. – С. 60-67. – DOI 10.51194/INASAN.2021.6.2.006.

Иллюстрации

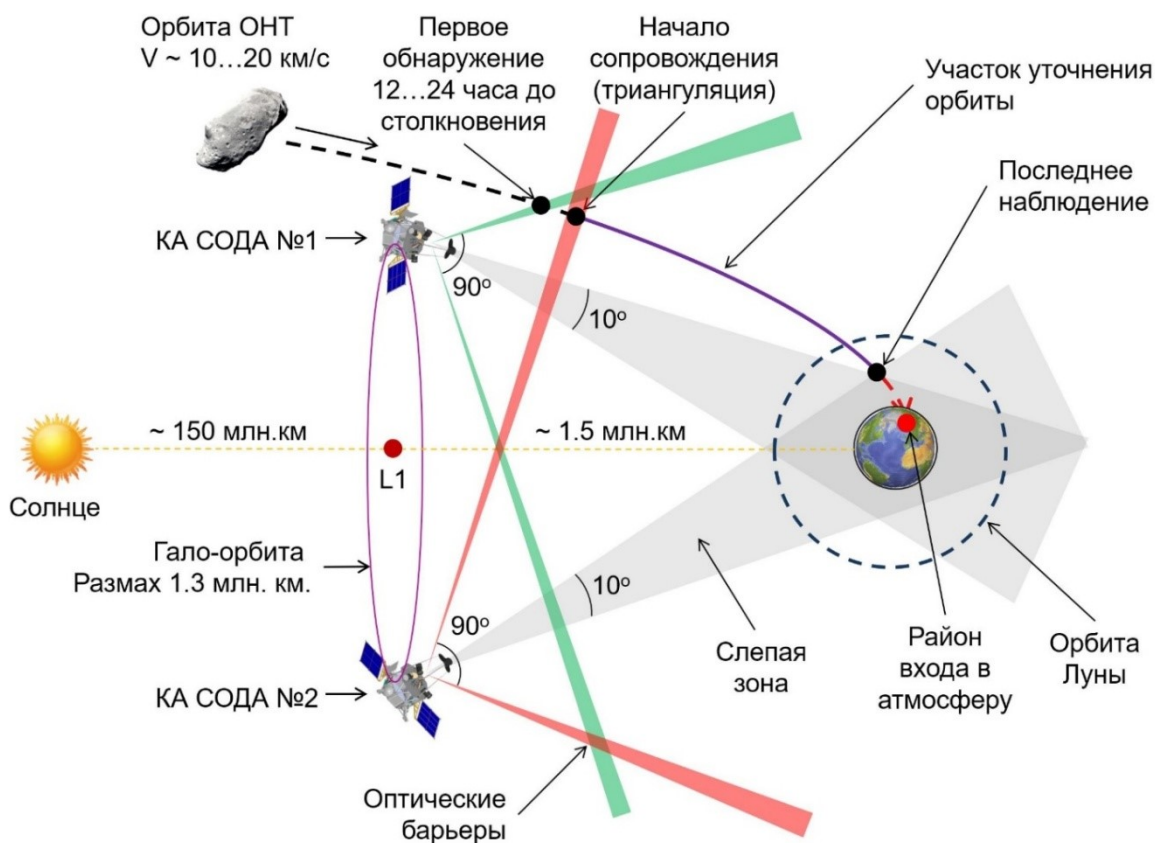


Рис. 1. Принципиальная схема работы космической системы СОДА.

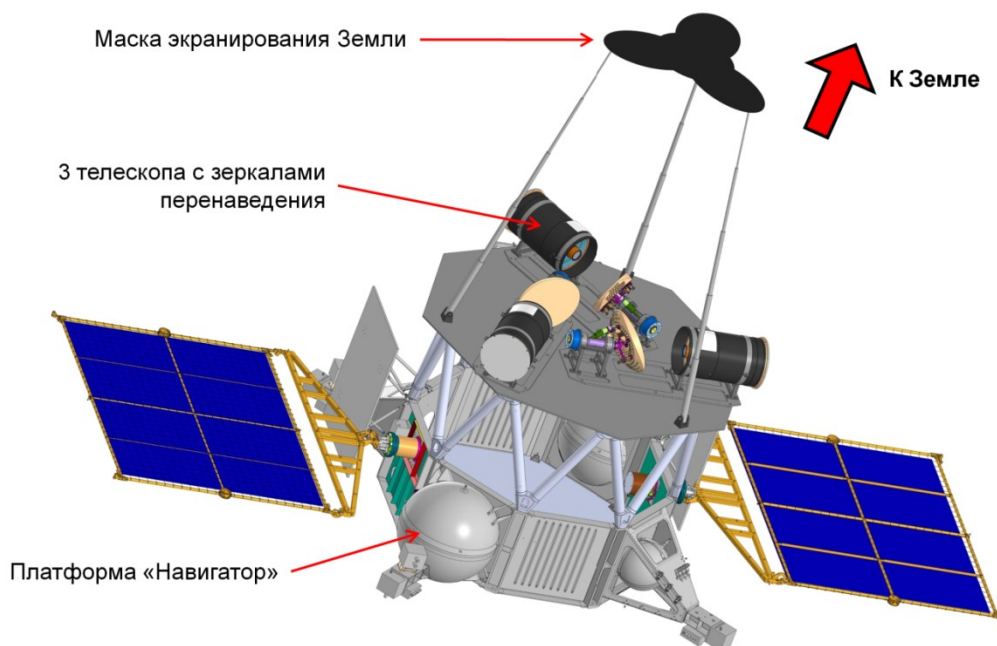


Рис. 2. Концептуальный вид КА СОДА с 3-мя телескопами.

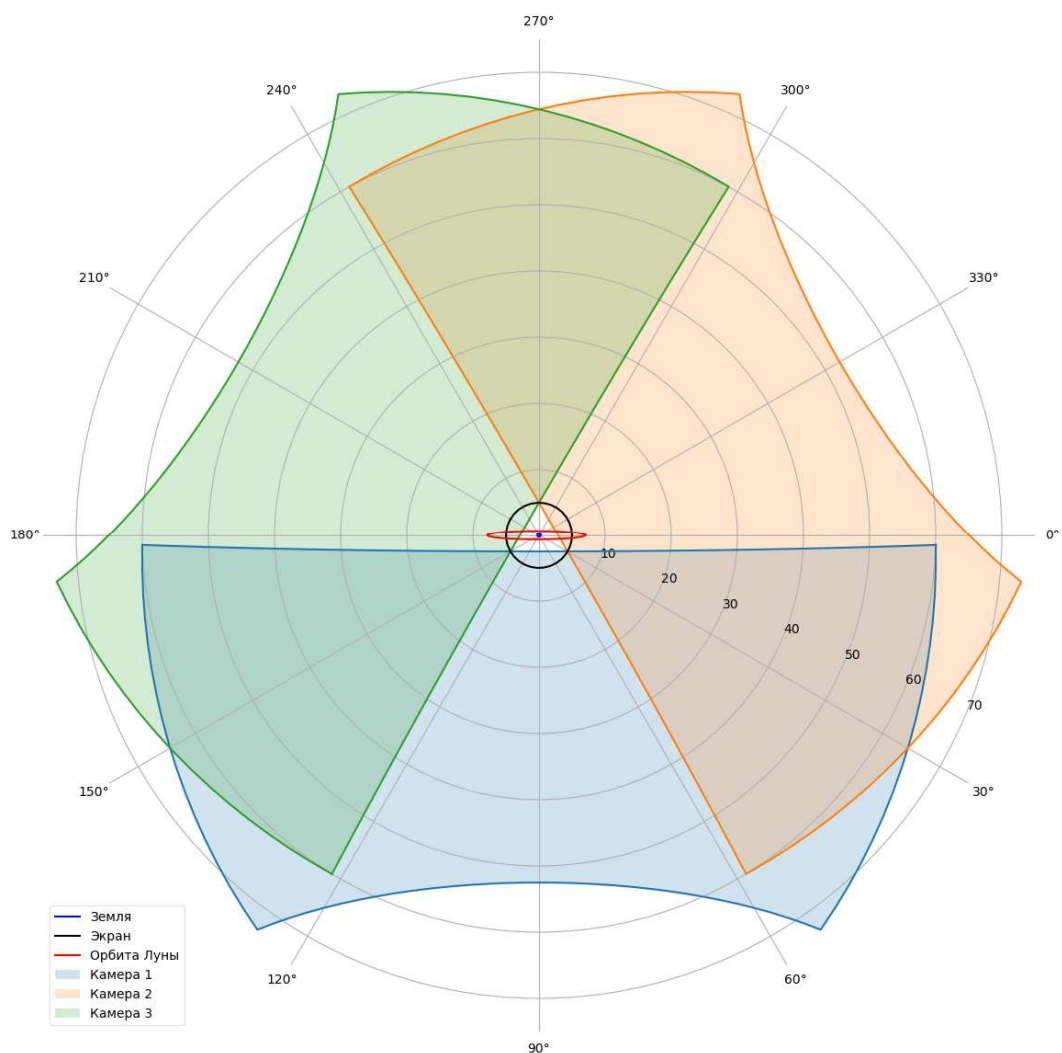


Рис. 3. Поле зрения 3-х телескопов системы СОДА из точки L1 в полярной системе координат (Земля в центре).

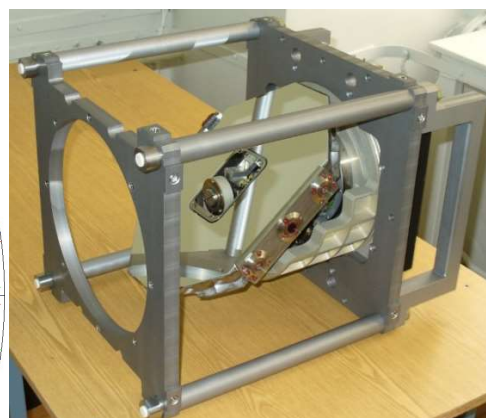
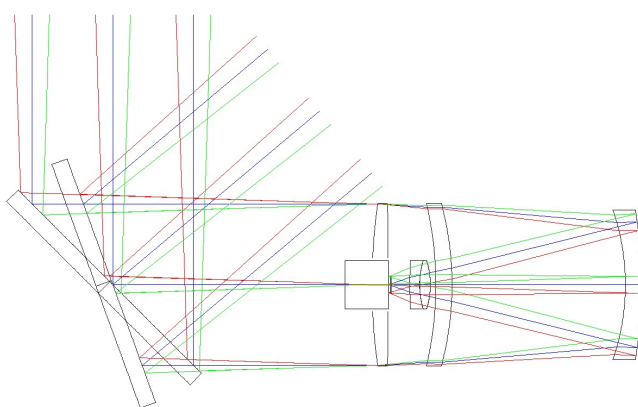


Рис. 4. Вариант оптической схемы телескопа с предапертурным зеркалом перенаведения телескопа для проекта СОДА (слева), двухкоординатное оптико-механическое сканирующее устройство БСКР-Т на КАЭлектро-Л (справа).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АСТЕРОИДОВ ПРИМИТИВНЫХ ТИПОВ С ВЕРОЯТНЫМИ ПРИЗНАКАМИ СУБЛИМАЦИОННО-ПЫЛЕВОЙ АКТИВНОСТИ

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

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*ГАИШ МГУ, Москва, Россия*

morskayaa906@yandex.ru

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 сублимационно-пылевой 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 возникшем эффекте активности можно судить по изменению формы спектров отражения астероидов (находящихся вблизи перигелия), нехарактерному для примитивных типов астероидов, который невозможно объяснить различиями в составе вещества этих тел, наблюдаемых при их вращении.

С декабря 2021 по март 2022 года на полуавтоматическом телескопе RC-600 КГО ГАИШ (Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ) были проведены UBVRI-наблюдения более 40 астероидов Главного Пояса преимущественно примитивных типов, движущихся вблизи перигелия. Целью такой значительной наблюдательной программы был охват максимального числа астероидов для уточнения их спектрального класса, а также выявления признаков вероятной квазисовременной сублимационной активности. Для объектов, наблюдения которых удалось выполнить, был проведен предварительный анализ динамических параметров, таких как период вращения тела вокруг собственной оси, большая полуось орбиты, эксцентриситет, наклон плоскости орбиты к плоскости эклиптики и принадлежность к крупным семействам астероидов. Данная работа дала возможность систематизировать параметры астероидов с сублимационно-пылевой активностью. Результаты будут представлены в докладе.

Литература

1. Chandler C.O., Curtis A.M., Mommert M., Sheppard S.S., Trujillo C.A. SAFARI: Searching Asteroids for Activity Revealing Indicators // Publ. Astron. Soc. Pacif. 2018 V. 130 № 993 114502 (16 pp).
2. Busarev V.V., Makalkin A.B., Vilas F., Barabanov S.I., Scherbina M.P. New candidates for active asteroids: Main belt (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (1474) Beira, and near-Earth (162,173) Ryugu // Icarus. 2018 V. 304 P. 83–94.
3. Busarev V.V., Petrova E.V., Irsambetova T.R., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact // Icarus. 2021 V. 369, 114634 (18 p.)

СЕКЦИЯ 3

Прогнозирование движения
космических объектов.

Методы и оценки вероятности столкновений
и их последствий

РАЗМЕЩЕНИЕ СПУТНИКОВ НА ОРБИТАХ ВЫСОТОЙ 300-350 КМ КАК СРЕДСТВО УМЕНЬШЕНИЯ УЩЕРБА ОТ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Бечаснов П.М.¹, Ильин А.М.²

¹МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

²ООО «Лин Индастриал», Москва, Россия

bechasnov@bmstu.ru

По состоянию на 2021 год на всех высотах околоземного пространства находилось 130 млн. объектов размером 0,1—1 см. Из них 20 млн — на низкой околоземной орбите (НОО) на высотах до 2 000 км. Количество объектов размером 1—10 см на всех высотах составило 900 тыс., на НОО — 500 тыс. Количество объектов свыше 10 см на ОКП — 34 тыс., из них на НОО — 23 тыс. [1]

При этом их распределение по орбитам таково, что посещение нескольких объектов одним аппаратом-мусорщиком будет затруднено в силу значительного потребного запаса характеристической скорости. Таким образом, удаление каждого объекта с орбиты потребует отдельного пуска РН с одноразовым мусорщиком, в ходе работы которых возможно появление нового мусора, особенно в результате технических отказов. Заявленная стоимость подобных миссий [2] показывает, что стоимость удаления с орбиты накопленного мусора составит триллионы долларов. Тем не менее, проекты подобных аппаратов разрабатываются практически всеми космическими агентствами и рядом частных фирм.

Существуют проекты, предусматривающие вместо сведения с орбиты пристыковку к мусору средств торможения, создающих аэродинамические, электромагнитные силы или использующие солнечный свет [3]. Безотносительно их сложности и реализуемости следует отметить, что все они связаны с увеличением эффективной площади сводимых с орбиты объектов, что повышает вероятность столкновений с последующим размножением мусора.

Таким образом, в ближайшие десятилетия не следует ожидать появления средства, способного очистить от мусора околоземные орбиты. При этом количество наблюдаемого мусора уверенно возрастает (Рис.1). Это заставляет искать способы сохранения орбитальной инфраструктуры человечества в случае мусорного коллапса, если он всё же произойдёт.

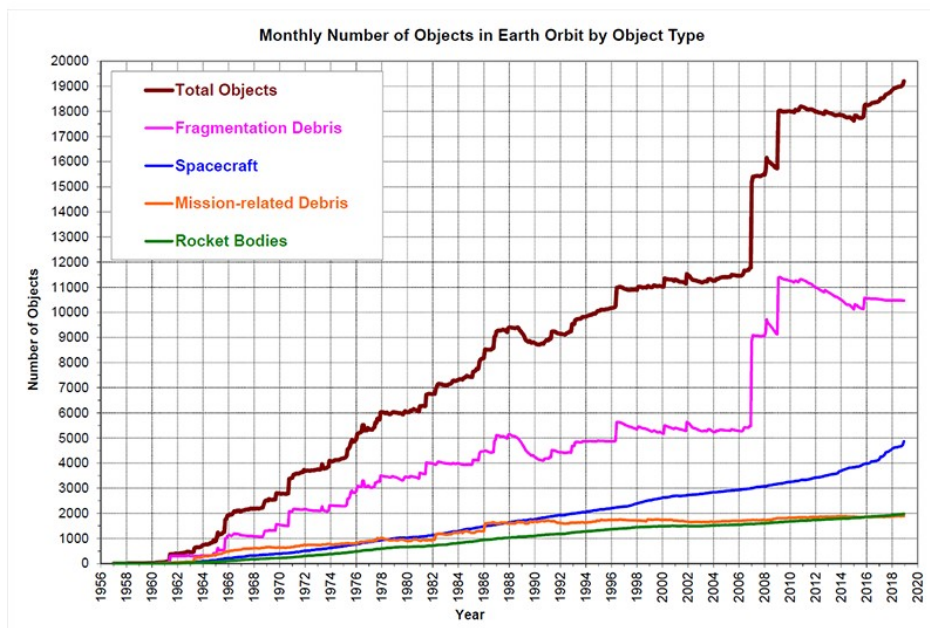


Рис.1. Темпы роста космического мусора на околоземных орбитах [4].

Моделирование долгосрочной эволюции мусора показывает, что низкие орбиты находятся на грани начала синдрома Кesslera [4, 5]. Развёртывание на них

многоспутниковых группировок ещё больше усугубляет ситуацию – вероятность поражения спутника Starlink на высоте 550 км в течение года фрагментом ненаблюдаемого мусора составляет 0,003. Предлагаемые [6] способы тотальной расчистки низких орбит выведением облака частиц способны также уничтожить сохранившиеся работоспособные спутники.

В этой ситуации может быть использован перенос задач, решаемых существующими спутниками, на нано-группировки, расположенные на высотах 300-350 км. Опыт работы КА на орбитах такой высоты уже существует, например, GOCE (ЕКА), работавший четыре года на орбите высотой 260 км или советские ДС-МО - на высоте 240-342 км.

На высоте 300 км количество и суммарная масса мусора более чем на порядок меньше, чем на высотах 400-600 км. Не имеющие двигателя объекты, попавшие на эти высоты, быстро теряют скорость из-за сопротивления атмосферы и сгорают в её нижних слоях. Поток космического мусора различного размера, приходящийся на 1 м² площади КА за годовой срок полёта, приведена на Рис. 2. Расчёты проводились по модели ЕКА Master 2.0.8 по текущему состоянию засорения околоземного космического пространства. (Рис. 2).

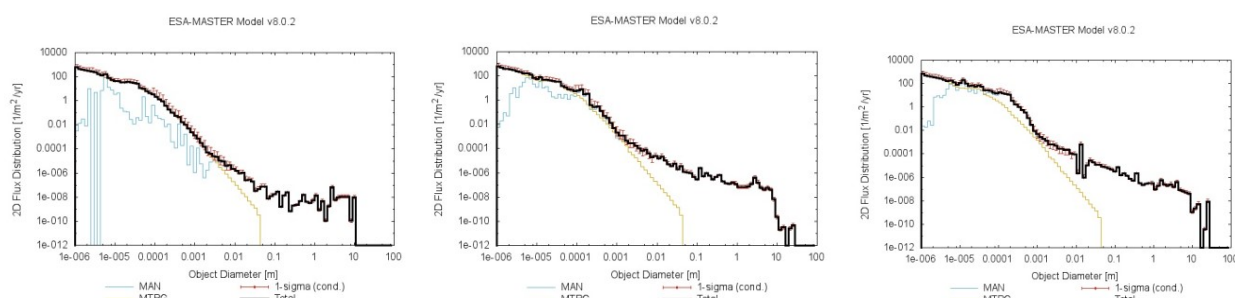


Рис.3. Поток космического мусора на ССО высотой 300, 600 и 800 км.

На орбитах высотой 300-350 км будут практически полностью отсутствовать необнаружимые фрагменты мусора. Баллистическое моделирование показывает, что на высоте 350 км баллистический срок существования куска алюминия сантиметрового диаметра составляет меньше месяца, миллиметрового – 5 дней. На высоте же 300 км эти сроки уменьшатся ещё в несколько раз.

Это позволяет рассчитывать на низкую микрометеоритную эрозию, практически полную сохранность внешних поверхностей КА, а также ничтожную вероятность пробоя кожуха герметичного отсека. Низкий риск столкновения с мусором даст возможность использовать герметичные КА, от которых ранее отказались именно по причине малого срока службы, обусловленного быстрым пробоем гермоконтейнера.

По данным ЕКА, в настоящее время частота столкновений КА с космическим мусором на наиболее «населённых» им высотах составляет в расчёте на один аппарат примерно 1 раз в 10 лет при отсутствии маневров уклонения. Соответственно, на низких орбитах эта частота снижается до одного случая раз в несколько столетий. Это даёт значительный запас даже при серьёзном ухудшении ситуации с мусорной опасностью. Что особо интересно, даже при столкновении низкоорбитальных объектов не генерируется долгоживущего и опасного мусора.

Расчёты накапливаемой за 1 год полёта радиационной дозы в программном комплексе OMERE показали, что радиационная обстановка на ССО высотой 300 км в целом соответствует наблюдающейся на орбите МКС. При этом большая часть потока частиц будет представлена электронами с энергией меньше 1 МэВ, что позволяет защититься от них экраном с толщиной около 1 мм и/или установкой электромагнитной защиты.

Наконец, по результатам баллистического расчёта нано-спутник массой 10 кг с направленной по потоку гранью 10*10 см будет в среднем тратить на поддержание орбиты 35 м/с/год характеристической скорости на высоте 300 км и 6,5 м/с/год – на высоте 350 км.

Такие коррекции могут выполняться простейшими малобюджетными двигателями, например, электротермическими, работающими на воде.

Размещение на низких орбитах также повышает характеристики целевого оборудования спутников. Так, при уменьшении высоты орбиты с 600 км до 300 км вдвое улучшается геометрическое разрешение камер оптического диапазона и в 16 раз (!) снижается энергопотребление радиолокационной аппаратуры, поскольку энергия сигнала уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от источника. Для спутников связи и навигации эффект будет пропорционален второй степени расстояния из-за рассеивания сигнала. Это позволит заместить существующие группировки при решении указанных задач аналогами нано-класса без ухудшения характеристик.

Итого, на орбитах высотой 300-350 км условия работы полезной нагрузки, обусловленные минимальным расстоянием до Земли, сочетаются с уникальными эксплуатационными условиями для полезной нагрузки, особенно в сочетании с герметичными корпусами, а требования к поддержанию орбиты легко выполнимы.

Аппаратура, размещённая в таких корпусах, не будет испытывать значимого воздействия радиации, вакуума, температурных перепадов, микрометеоритов, а влияние атомарного кислорода будет ограничено внешним корпусом. Таким образом, состав испытаний, сроки и стоимость проектирования и производства таких КА радикально сокращаются и приближаются к принятым для наземной и авиационной аппаратуры. Также исчезает зависимость от радиационно-стойкой элементной базы.

Рост количества космического мусора практически не угрожает спутникам, размещённым на орбитах высотой 300-350 км, и позволяет рассчитывать на сохранение низкоорбитальной инфраструктуры даже при возникновении синдрома Кесслера, т.е. неконтролируемого размножения космического мусора в столкновениях его между собой и с действующими аппаратами. Соответственно, развитие таких аппаратов представляется потенциально рентабельной инвестицией в отличие от планово убыточных и технически нереальных планов по тотальной уборке космического мусора.

Литература

1. Чак Дики. Новый «Союз—Апполон» из космического мусора / Чак Дики, Валентин Уваров // Эксперт : журн.. — 2021. — № 40 (1223) (27 сентября). — ISSN 1812-1896
2. <https://www.slashgear.com/esa-signs-contract-with-clearspace-to-clean-up-space-debris-27649035>
3. Слепченко, Е. А. Методы борьбы с космическим мусором / Е. А. Слепченко, А. Л. Чулкин, О. В. Тасейко // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2014. – Т. 1. – № 10. – С. 239-240.
4. Boley A.C., Byers M. Satellite mega-constellations create risks in Low Earth Orbit, the atmosphere and on Earth. Scientific Reports, 2021, vol.11, 10642. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89909-7>
5. Ключников В. Ю. Синдром Кесслера: будет ли закрыта дорога в космос? // Воздушно-космическая сфера. 2021. № 4. С. 32-43.
6. Ganguli G., Crabtree C., Rudakov L., Chappie S. A Concept For Elimination Of Small Orbital Debris. Transactions of the Japan Society for aeronautical and Space Sciences, Aerospace technology Japan, 2011, vol. 10, p. 5. DOI:10.2322/tastj.10.Pr_23

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СТОЛКНОВЕНИЯ АСТЕРОИДА С ЗЕМЛЕЙ

Вавилов Д.Е.

ФГБУН Институт Прикладной Астрономии РАН

vavilov@iaaras.ru

Оценка вероятности столкновения основывается на знании орбит сталкивающихся тел. Орбита Земли в настоящее время известна достаточно надежно. Орбита угрожающего тела, особенно вновь открытого, никогда не может быть определена вполне точно, поскольку она находится из наблюдений, отягощенных случайными и систематическими ошибками. Большую роль в точности орбиты играет дуга наблюдений. Чем меньше прошло времени от первого до последнего наблюдения астероида, тем хуже будет известна орбита. Номинальная орбита, определяемая по методу наименьших квадратов, минимизирует сумму квадратов остающихся невязок, и элементы орбиты являются компонентами оценки математического ожидания случайного нормального вектора.

Поэтому существует бесконечное множество других начальных условий движения, которые не противоречат наблюдениям, на основе которых найдена орбита, но для соответствующих орбит сумма квадратов остающихся невязок является несколько большей, чем для номинального решения. Каждое из таких начальных условий определяет возможный или виртуальный астероид. Обычно считается, что совокупность допустимых начальных условий занимает область шестимерного пространства элементов орбит (или начальных значений координат и скоростей в начальную эпоху) и называется облаком виртуальных астероидов. Размер и плотность этого облака определяются функцией распределения ошибок параметров орбиты.

Заметим, прежде всего, что для самого номинального решения вероятность столкновения может иметь только два значения: единица или ноль, поскольку столкновение либо будет иметь место, либо нет. Но, найдя номинальное решение для орбиты некоторого тела, мы не можем утверждать, что реальное тело движется именно по этой орбите. Фактически оно может двигаться по любой орбите, совместимой в пределах заданной точности с имеющимися наблюдениями, с той или иной вероятностью. Поэтому при решении задачи о вероятности столкновения приходится учитывать возможность столкновения с Землей любого астероида из облака виртуальных астероидов, окружающего номинальное решение.

Таким образом, задача определения вероятности столкновения астероида с Землей может быть разбита на две подзадачи. Первая состоит в нахождении номинальной орбиты астероида, описываемой шестью параметрами, и определении функции распределения ошибок этих параметров. Вторая задача состоит в том, чтобы определить меру множества тех виртуальных астероидов, которые ведут к столкновению с Землей. Отношение меры столкновительных виртуальных астероидов к мере всех виртуальных астероидов непосредственно является вероятностью столкновения этого астероида с Землей.

Существует несколько видов методов оценок вероятности столкновения астероидов с Землей. В основном можно выделить три:

Нелинейный

Линейный

Комбинированный

1. К нелинейным методам относится метод Монте-Карло и его модификации. Это самый простой и самый теоретически обоснованный метод для вычисления вероятности того или иного события. Идея метода состоит в том, чтобы провести большое число испытаний, и вероятность некоторого события будет равна отношению количества испытаний, в котором произошло это событие, к общему числу испытаний.

Для случая определения вероятности столкновения астероида с Землей из облака виртуальных астероидов выбираются астероиды, орбиты которых интегрируются вперед до момента, немного превышающего предполагаемый момент столкновения. Количество

объектов, столкнувшихся с Землей, деленное на общее количество выбранных объектов, и является вероятностью столкновения этого астероида с Землей.

Скорость сходимости метода Монте-Карло определяется величиной $n^{-1/2}$. Количество виртуальных астероидов, орбиты которых нужно проинтегрировать, чтобы полученная вероятность столкновения отличалась от реальной на величину ϵ с надежностью 0.9974, задается: $n_{\min} = \frac{9P_c}{\epsilon^2}$, где P_c – вероятность столкновения. Заметим, что если вероятность столкновения равна 10^{-6} , то для того, чтобы получить ошибку меньше 100% с надежностью 0.9974, нужно проинтегрировать 10^7 орбит виртуальных астероидов. Для получения ошибки 30% – 10^8 . Этот факт делает метод Монте-Карло неэффективным, для случая не очень высокой вероятности столкновения. Хотя это вовсе не означает, что этот метод не применим для такого рода вычислений. Он с успехом может применяться для определенных интересных случаев, как, например, случай с астероидом Апофис, но абсолютно нецелесообразно применение этого метода для каждого вновь открытого астероида, поскольку вычисления могут занять от нескольких месяцев до нескольких лет. Наряду с этим, вероятности, получаемые по методу Монте-Карло, вообще говоря, всегда будут различны из-за наличия случайности в процессе вычисления.

2. Наряду с вышеописанным методом оценки вероятности столкновения имеются так называемые «линейные методы». Впервые метод такого типа был описан в работе Чодаса (Chodas 1993) и применен для вычисления вероятности столкновения кометы Шумекера-Леви 9 с Юпитером в 1993 году.

В этих методах делается предположение, что ошибки параметров орбиты на момент наблюдений (получаемые из метода наименьших квадратов) линейным образом связаны с ошибками на момент столкновения. Это достаточно грубое предположение, которое вводит ограничения на использование методов такого типа, однако приводит к резкому уменьшению времени вычисления вероятности. Тем самым область неопределенности астероида на момент потенциального столкновения может быть найдена путем интегрирования номинальной орбиты астероида. Вероятность столкновения уже будет вычисляться как мера области, которую занимает Земля, в этой области неопределенности.

Основное преимущество линейных методов это скорость вычисления. При вычислении вероятности требуется проинтегрировать орбиту малого тела только один раз, в отличие от нелинейных методов, где требуется проинтегрировать больше нескольких тысяч орбит виртуальных астероидов.

Основным и серьезным ограничением является само предположение линейной зависимости ошибок на всем рассматриваемом интервале времени. Это означает, что не должно быть тесных сближений с массивными телами, которые могут разорвать линейную зависимость. Таким образом, такие методы могут подойти тогда, когда гравитационное влияние остальных тел, кроме Солнца, являются незначительными. Существуют современные модификации данных методов, которые значительно улучшают предел их применимости (Vavilov&Medvedev, 2014; Vavilov, 2020).

3. Основная цель методов такого типа состоит в том, чтобы учесть возможные нелинейные связи между ошибками параметров орбиты на различные эпохи, при этом время вычисления должно быть разумным, скажем не больше нескольких часов и не должно напрямую зависеть от значения вероятности столкновения, как в методе Монте-Карло. В то время как метод Монте-Карло делает выборку виртуальных астероидов из шестимерной области, можно производить выборку по какой-нибудь уменьшенной области, скажем одномерной, которая, достаточно хорошо представляет распределение шестимерной области ошибок параметров орбиты. Такие методы получили название методы «вариации одного параметра».

Вычисления производятся следующим образом (Milani et al., 2002). Варьируя один параметр орбиты тела, исследуются потенциальные сближения данного тела с Землей. Находится виртуальный астероид, имеющий самое тесное сближение. Далее, этот виртуальный астероид рассматривается как номинальный, и вычисляется его вероятность

столкновения с Землей линейным методом. И делается поправка на значение вероятности столкновения, поскольку этот виртуальный астероид не является номинальным.

Точность методов вариации одного параметра не зависит от количества орбит виртуальных астероидов, которые нужно проинтегрировать. В связи с этим, требуемое количество виртуальных астероидов обычно значительно меньше, чем необходимо методу Монте-Карло. Метод вариации одного параметра является нелинейным, однако учет нелинейности между ошибками параметров на разные моменты времени идет только для одного параметра (варьируемого), поэтому его скорее можно назвать комбинированным.

Усовершенствование методов данного типа представляется наиболее перспективным для дальнейшего развития по данной задаче. Причем усовершенствования, возможно, будут идти из улучшения линейных методов, которые используются в методе вариации одного параметра.

Литература

1. Chodas P.W. Estimating the impact probability of a minor planet with the Earth // Bull. Am. Astron. Soc. –1993. –Vol. 25 –P. 1236.
2. Milani A., Chesley S.R., Chodas P.W., Valsecchi G.B. Asteroid Close Approaches: Analysis and Potential Impact Detection // Asteroid III /eds. Bottke W. F. Jr., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R. P., –Space Science Series: Univ. Arizona Press. –2002. –P. 55-69.
3. Vavilov D. E., Medvedev Yu. D. A fast method for estimation of the impact probability of near-Earth objects // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. –2015. –446 –P. 705-709.
4. Vavilov D. E. The partial banana mapping: a robust linear method for impact probability estimation // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020. – 492 – P. 4546-4552.

ПРОГРЕСС И ПРОБЛЕМЫ В МЕТОДАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Галушина Т.Ю.¹, Авдюшев В.А.¹, Левкина П.А.²

¹Томский государственный университет, г. Томск, Россия

²Институт астрономии РАН, г. Москва, Россия

volna@sibmail.com

Прогнозирование движения астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), представляет собой комплексную задачу, требующую использования сложной техники, различных методик и больших вычислительных затрат. В последние десятилетия достигнут существенный прогресс в данной области, однако многие проблемы еще ожидают своего решения.

Качество получаемых наблюдений является неотъемлемой составляющей для решения задач высокоточного прогнозирования движения астероидов, сближающихся с Землей. С развитием наблюдательных возможностей наземных и космических телескопов выросло количество обнаруживаемых объектов и точность получаемых измерений. Помимо прогресса в телескопостроении важную роль играет совершенствование методик обработки получаемых снимков. Астрометрические каталоги, используемые при отождествлении и обработке измерений, обновляются и дополняются, в значительной степени благодаря миссии Gaia (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3>).

Высокоточное прогнозирование движения астрономических объектов невозможно без достаточного количества измерений. Основные проблемы получения продолжительного наблюдательного ряда могут быть связаны как с повышенной нагрузкой определённого инструмента (отсутствие достаточного количества наблюдательного времени в расписании, невозможность заказать требуемое количество ночей), так и в целом с ухудшением астроклимата на отдельных обсерваториях, если речь идёт о наземных оптических наблюдениях.

При моделировании вероятностной орбитальной эволюции астероидов очень важен этап формирования начального облака неопределенности по данным измерений. Для АСЗ, наблюдавшихся в одном появлении на очень короткой дуге, огромная параметрическая неопределенность вследствие скудной наблюдательной информации является одной из основных причин сильной нелинейности в обратных задачах орбитальной динамики. В настоящее время достигнут значительный прогресс как в развитии математического инструментария для оценивания нелинейности [1, 2], так и в разработке нелинейных стохастических методов для моделирования начальной орбитальной неопределенности [3].

Важный вопрос, на который надо ответить уже на этапе улучшения орбиты, касается используемой модели сил. Повышение точности наблюдений и увеличение требований к точности прогноза приводят к необходимости учета все более слабых, в том числе негравитационных, эффектов и тщательному выбору модели сил. Особое внимание в последние десятилетия уделяется YORP-эффекту [4], в частности эффекту Ярковского [5]. К сожалению, физические параметры большинства АСЗ неизвестны или определены с плохой точностью, что существенно осложняет учет эффекта Ярковского и светового давления [6].

Эффективность численного моделирования орбитального движения зависит также от выбора интегратора, который составляет ядро любой численной орбитальной модели. В небесной механике хорошо зарекомендовал себя интегратор Эверхарта [7] и некоторые его современные модификации [8].

При исследовании движения астероидов нельзя не рассматривать такие важные особенности, как орбитальные и вековые резонансы [9] и хаотичность движения [10]. Для опасных объектов возникает необходимость оценки вероятности столкновения, для чего в настоящее время разработано множество методов, отличающихся разной степенью точности и эффективности [11]. Отдельного упоминания заслуживает существенный

прогресс в развитии программного обеспечения, предназначенного для исследования различных аспектов динамики астероидов [12-13].

Таким образом, необходимо отметить, что прогнозирование движения АСЗ в настоящее время является активной, быстро развивающейся сферой, в которой достигнут существенный прогресс. Однако остается еще много нерешенных проблем, обусловленных все увеличивающимися требованиями к точности.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020-0049).

Литература

1. Черницов А.М., Сюсина О.М., Тамаров В.А. Оценивание нелинейности в задаче построения доверительных областей движения потенциально опасных астероидов, наблюдаемых в одной оппозиции // Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Том 59. № 12. С. 139-145.
2. Авдюшев В.А., Сюсина О.М., Тамаров В.А. Нелинейность в обратных задачах астероидной динамики // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2021. Том 55. № 1. С. 84-96.
3. Черницов А.М., Тамаров В.А., Баранников Е.А. Построение доверительных областей в задаче определения орбит астероидов // Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы. 2017. Том 51. № 5. С. 432-440.
4. Vokrouhlicky D., Bottke W. F., Chesley S. R. et al. The Yarkovsky and YORP Effects // Asteroids IV / ed. by P. Michel, F. E. DeMeo, W. F. Bottke. 2015. P. 509 – 531.
5. Farnocchia D. et al. Near Earth Asteroids with measurable Yarkovsky effect // Icarus. 2013. V. 224. Is. 1. P. 1–13.
6. Galushina, T. Yu., Letner, O. N., Niganova, E. N. Notes on force models for near-Sun asteroids // Planetary and Space Science. 2021. Vol. 202, article id. 105232.
7. Everhart E. An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings // Dynamics of comets: their origin and evolution // Proc. 83rd IAU Colloq. Rome, 11–15 June 1984 / Eds Carusi A., Valsecchi G.B. Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1985. P. 185–202.
8. Авдюшев В.А. Новый коллокационный интегратор для решения задач динамики. I. Теоретические основы // Изв. вузов. Физика. 2020. Т 63 №. 11. С. 131–140.
9. Галушина Т.Ю. Орбитальные и вековые резонансы в движении астероидов, сближающихся с Землей // Физика космоса: тр. 49-й Международ. студ. науч. конф. Екатеринбург, Россия, 27 – 31 янв. 2020 г. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2020. С. 6–18.
10. Шефер В.А. Индикаторы хаоса второго порядка MEGNO2 и OMEGNO2: теория // Известия высших учебных заведений. Физика. 2017. Том 60. № 10. С. 71-79.
11. Шор В.А., Вавилов Д.Е., Виноградова Т.А., Железнов Н.Б., Кочетова О.М., Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А. Сравнение точности и эффективности методов оценивания вероятности столкновения небесных тел с Землей // Труды института прикладной астрономии РАН. 2018. №46. С. 117–125.
12. Львов В. Н., Цекмейстер С. Д. Использование программного пакета EPOS для исследования объектов Солнечной системы // Астрон. вестник. Т. 46, № 2. Москва: «Наука», 2012 г. С. 190-192.
13. Железнов Н.Б., Новиков Ф.А., Шор В.А. AMPLE 3 – Многоцелевой программный пакет для исследования малых планет и комет // Труды ИПА РАН. Вып. 21. Санкт-Петербург: «Наука», 2010 г. С. 230-235.
14. Galushina T.Yu., Letner O.N. Modified version of IDA software and its application to the study of the motion of asteroid 2007 PR10 // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2021. V. 32. Is.4. P. 355–370.

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ СТОЛКНОВЕНИЙ АСТЕРОИДОВ И КОМЕТ С ЗЕМЛЁЙ

Глазачев Д.О., Попова О.П., Подобная Е.Д., Шувалов В.В.,
Артемяева Н.А., Светцов В.В., Хазинс В.М.

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского, Москва, Россия
GlazachevD@gmail.com

Удары космических тел (КТ) по Земле приводят к возникновению опасных эффектов, которые могут сразу после удара или впоследствии оказать вредное или губительное воздействие на человека, животных и растения, и на хозяйственные объекты.

Одними из наиболее важных и опасных последствий падений астероидов и комет, являются разрушения на поверхности Земли, вызываемые ударной волной и тепловое излучение. Например, в случае Челябинского события 15 февраля 2013 г. именно избыточное давление в ударной волне было главным поражающим фактором. Челябинское событие продемонстрировало, что в современных условиях даже небольшое по астрономическим меркам космическое тело (КТ) представляет опасность для людей. Падения небольших (порядка 10 м) КТ невозможно предсказать заранее, они могут случиться в любой точке нашей планеты в отличие от других природных катастроф, например, землетрясений и цунами. Большая часть таких КТ неизвестна ввиду малости их размера. Для надежной оценки последствий возможного удара необходимо проводить довольно сложные и затратные расчеты, причем нужно как можно точнее определить параметры космического тела, траекторию и скорость входа. Такие параметры, как правило, наиболее точно определяются лишь в последний момент (перед входом в атмосферу), когда на проведение детальных расчетов уже нет времени. Учитывая сложность и трудоемкость оценки последствий через непосредственное моделирование взаимодействия метеороида с атмосферой и поверхностью Земли, представляется актуальной и важной возможность простой быстрой оценки поражающих факторов по аппроксимационным формулам, построенным по результатам заранее проведенных детальных расчетов ударов космических тел разного размера [Glazachev et al., 2021].

Для оценки последствий падения на Землю космических тел нами был разработан комплекс программ, моделирующий все стадии взаимодействия комет и астероидов с атмосферой Земли и твердой поверхностью. Модель базируется на предположении, что деформация космических тел размером больше нескольких десятков метров начинается на высотах, где аэродинамическая нагрузка существенно превышает их прочность, и, следовательно, тело уже полностью разрушено, можно считать его квазижидким (QL-модель) [Shuvalov et al., 2016; Svetsov et al., 2019]. Перенос излучения учитывался в приближении лучистой теплопроводности на низких высотах и в приближении объемного высвета на больших высотах. Излучение, падающее на поверхность тела (или его фрагментов), использовалось для расчета испарения вещества метеороида [Svetsov and Shuvalov 2018; Svetsov et al., 2018].

Вхождение в атмосферу высокоскоростного КТ можно классифицировать как «воздушный взрыв», если основная часть энергии этого тела выделяется в атмосфере, и основная масса тела не достигает поверхности (или достигает ее со скоростью, намного меньшей, чем скорость входа), но возникающие ударные волны достаточно сильны, чтобы достичь поверхности Земли и вызвать те или иные повреждения [Shuvalov et al., 2013]. «Воздушные взрывы» характерны для вертикального входа астероидов размером менее 100 м и комет менее 150 м, уменьшение угла наклона траектории сдвигает эти границы к большим размерам. Удары космических тел размером более 300 м как правило приводят к возникновению кратера, в этом случае лишь небольшая часть энергии КТ выделяется в атмосфере.

Разработанные модели были использованы для моделирования падений КТ в широком диапазоне их параметров. Размеры метеороидов изменялись в диапазоне от 20 м до 3 км, плотности вещества — от 1 до 3,3 г/см³, скорость — от 20 до 70 км/с, угол наклона

траектории — от 15 до 90 градусов, энергия от 0,5 Мт до 29 Тт ТНТ. Таким образом, рассматривались сценарии как метеорного взрыва, так и кратерообразующих ударов под разными углами.

Излучение, возникающее как при полете космического объекта в атмосфере, так и в результате выбросов из образующегося кратера, является одним из основных опасных последствий космических ударов. При достаточной интенсивности теплового излучения, оно может стать опасным для людей, приводить к ожогам и повреждениям сетчатки, привести к возникновению пожаров и даже к плавлению грунта [Svetsov and Shuvalov, 2018].

Анализ результатов проведенного серийного моделирования позволил разработать аппроксимационные формулы для быстрой оценки параметров последствий (распределение избыточного давления и теплового излучения) для произвольно задаваемых параметров КТ.

Помимо моделирования ударной волны и излучения была разработана модель генерации и распространения ионосферных возмущений, инициированных торможением космического тела в нижней атмосфере и кратерообразующим течением. Расчеты показали, что при «метеорных взрывах», возмущения плотности на ионосферных высотах составляют 1-100%, а при ударах километровых тел плотность воздуха увеличивается на порядки. Максимальный нагрев воздуха происходит на высотах около 100 км [Artemieva et al., 2019; Shuvalov and Khazins, 2018]. По результатам расчетов были получены интерполяционные формулы для максимальных значений избыточной относительной плотности и температуры.

Для кратерообразующих ударов важными характеристиками являются размер самого кратера и параметры слоя выбросов из него (толщина слоя выбросов и оценка количества расплава в них).

Падение астероидов и комет приводит к возникновению сейсмического эффекта. Проведенное моделирование позволило оценить энергию сейсмических волн и сейсмическую эффективность для метеорных взрывов и кратерообразующих ударов [Khazins et al., 2018].

Проведенное моделирование ударов и построенные аппроксимационные соотношения позволили создать интернет сайт – калькулятор «ImpactEffects», размещенный по адресу <http://AsteroidHazard.pro>. По сравнению с самым распространенным в сети интернет калькулятором «ImpactEarth!» (Collins et al 2005, 2017), наш калькулятор обладает целым рядом преимуществ. Во-первых, калькулятор «ImpactEarth!» в основном основан на упрощенных моделях и данных о ядерных взрывах. Во-вторых, в нем отсутствуют некоторые эффекты. Например, ImpactEarth не оценивает излучение, возникающее при пролете и разрушении космического тела в атмосфере и ионосферные возмущения. В-третьих, наши интерполяции учитывают пространственную неоднородность распределения избыточного давления и теплового излучения относительно проекции траектории движения КТ на поверхности Земли. Такое дополнение позволило значительно увеличить точность оценки опасных последствий.

Интернет калькулятор позволяет определить распределение избыточного давления и теплового излучения. Оценки максимальных значений избыточной относительной плотности и температуры представлены в таблице результатов в группе «возмущения атмосферы» на сайте калькулятора. Калькулятор предоставляет оценки размера кратера, толщины слоя выброс и оценку количества расплава в выбросах для вариантов кратерообразования. Калькулятор предоставляет оценки магнитуды сейсмического возмущения по шкале Рихтера, интенсивность по шкале Меркалли, максимальные скорость и ускорение поверхности Земли, и время прихода возмущения, отсчитанное от момента максимального энерговыделения, в точку наблюдения.

Таким образом, интернет калькулятор «ImpactEffects» предоставляет комплексную оценку катастрофического воздействия на Землю ударов космических тел, а именно оценку эффектов ударной волны, теплового излучения, размеров кратера и выбросов из него, сейсмического воздействия и атмосферных возмущений.

Литература

1. Artemieva N., Shuvalov V.V., Khazins V.M. Upper atmosphere effects after the entry of small cosmic bodies: Dust trains, plumes, and atmospheric disturbances // *Icarus*. 2019. V. 327. P. 60-71
2. Collins, G.S., Melosh, H.J., Marcus, R.A. Earth impact effects program: a web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // *Meteoritics & Planetary Science*. 2005. V. 40. №. 6. P. 817–840.
3. Collins, G.S., Lynch, E., McAdam, R., Davison, T.M. A numerical assessment of simple airblast models of impact airbursts // *Meteoritics & Planetary Science*. 2017. V. 52. №. 8. P. 1542–1560.
4. Glazachev D.O., Popova O.P., Podobnaya E.D., Artemieva N.A., Shuvalov V.V., Svetsov V.V. Shock Wave Effects from the Impacts of Cosmic Objects with Diameters from 20 m to 3 km // *Izv., Phys. Solid Earth*. 2021.V. 57. P. 698–709
5. Holsapple, K. The Scaling of Impact Processes in Planetary Sciences // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1993. V. 21. P. 333-373
6. Shuvalov V., Popova O., Svetsov V., Trubetskaya I., and Glazachev D., Determination of the height of the “meteoric explosion” // *Solar System Research*. 2016. V. 50. I. 1. P. 1-12
7. Shuvalov, V. V., Svetsov, V. V., Trubetskaya, I. A. An estimate for the size of the area of damage on the Earth’s surface after impacts of 10–300-m asteroids // *Solar System Research*. 2013. V. 47. №. 4. P. 260-267.
8. Shuvalov, V.V., Khazins, V.M. Numerical Simulation of Ionospheric Disturbances Generated by the Chelyabinsk and Tunguska Space Body Impacts // *Solar System Research*. 2018. V.52, P. 129–138.
9. Svetsov V.V., Shuvalov V.V. Thermal radiation and luminous efficiency of superbolides// *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. V. 503 P. 10–16
10. Svetsov, V.V., Shuvalov, V.V., Popova, O.P. Radiation from a Superbolide // *Solar System Research*. 2018. V. 52. P. 195–205
11. Svetsov V., Shuvalov V., Collins G., Popova O., in Ryabova G., Asher D., and Campbell-Brown M., eds., *Meteoroids: Sources of Meteors on the Earth and Beyond*, chapter 12, 275–298, (Cambridge, UK: Cambridge University Press 2019).

ОСОБЫЕ АСТЕРОИДЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

Девяткин А.В., Львов В.Н., Цекмейстер С.Д.,
Горшанов Д.Л., Петрова С.Н., Мартюшева А.А.
ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия
a9kin@mail.ru

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. С использованием программного пакета ЭПОС определены группы астероидов, которые могут иметь сближения с двумя и более планетами. Показано, что в фазовом пространстве элементов орбит существуют области, в которых длительное время могут находиться астероиды, потенциально опасные одновременно для всех внутренних планет.

В 2022 г. рядом с Землёй пролетел астероид 2022 AE1, который на начальном этапе накопления наблюдений показывал высокую вероятность столкновения с Землёй. Астероид относится к группе Аполлон и имеет эксцентриситет, равный 0.547. У астероидов данного типа афелии находятся в области Главного пояса астероидов. Проведены исследования эволюции его орбиты и показана важность учета возможных его сближений с другими астероидами.

В 2000-х годах в ГАО РАН на телескопах ЗА-320М и МТМ-500М и на телескопах других обсерваторий проводился поиск объектов, расположенных вблизи треугольных точек либрации (точки Лагранжа) орбит Земли и других планет. В частности, в рамках проекта «Стереоскоп» предполагалась выполнить оценку заселённости этих областей и исследование движения гипотетических космических аппаратов, запущенных и установленных в окрестности точек L4 и L5. Нам не удалось обнаружить астероиды вблизи этих точек, однако, наблюдения на крупных инструментах мировых обсерваторий позволили это сделать. В 2010 г. был открыт астероид 2010 ТК7, а в 2020 г. астероид 2020 XL5. Оба они имеют абсолютную звёздную величину около 20.5^m и имеют размер около 300 м. С помощью пакета программ ЭПОС в рамках задачи двух неподвижных центров проведено исследование движения этих астероидов с помощью интегрирования уравнений их движения на длительных интервалах времени, смоделирована эволюция их орбит. Несмотря на накопление ошибок при вычислениях, можно проследить некоторые особенности в поведении этих объектов. Астероид 2010 ТК7, двигаясь по циркулирующей орбите, вошёл в режим земного троянца в середине первого тысячелетия новой эры, до сих пор описывает широкие петли и будет это делать ещё несколько тысячелетий. Однако с большой вероятностью тип его орбиты потом изменится. Астероид 2020 XL5 за предыдущее тысячелетие сменил 3 типа орбиты: из подковообразной перешёл на циркулирующую, а около 400 лет назад закрепился на несколько тысячелетий вблизи точки L4. Отметим, что петли, описываемые обоими астероидами, не совсем типичны для большинства троянцев. Центр петель отстоит достаточно далеко от точки L4, а размах петель очень широк, что в конце концов и предопределяет переход на другой тип орбиты. Поэтому, эти два астероида нельзя считать членами компактного сгущения материи вблизи точки L4, если таковое существует.

На основе наблюдений астероида 2020 SO (который впоследствии оказался вернувшимся к Земле фрагментом разгонного блока «Центавр» космического аппарата «Сервейер-2» американской ракеты Centaur»), полученных на телескопе МТМ-500М, уточнена орбита объекта. Выполнены расчеты эволюции орбиты и оценки светового давления и эффекта Ярковского. Случай с 2020 SO показал, что некоторые обломки КА могут возвращаться к Земле даже спустя десятилетия (и столетия) и вызвать возможные проблемы в околоземном пространстве.

О ДИНАМИЧЕСКОЙ ШКАЛЕ ЭВОЛЮЦИИ НАСЕЛЕНИЯ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЁЙ

Золотарёв Р.В., Шустов Б.М.

Институт астрономии РАН, г. Москва, Россия

rv_zolotarev@mail.ru , bshustov@inasan.ru

Изучение населения АСЗ является важным в связи с вопросами астероидно-кометной опасности, вопросами происхождения Солнечной системы, а также перспективами добычи астероидных ресурсов. Одной из особенностей эволюции населения АСЗ является то, что численность АСЗ на протяжении приблизительно 2-3 последних миллиардов лет оставалась неизменной (о чём свидетельствуют исследования истории кратерообразования на Луне [1]), в то время динамическая шкала текущего населения АСЗ 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 АСЗ 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 АСЗ, на оценки численности АСЗ, времени жизни Главного пояса астероидов и т.д.

В работе [2] было показано, что время жизни текущего населения астероидов 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 в исходном населении АСЗ. В данной работе эта зависимость от начального набора параметров орбит астероидов исследована количественно. Такое исследование проводится впервые.

Основная идея расчётов состоит в том, чтобы проследить динамическую эволюцию текущей популяции АСЗ с «выключенными» источниками пополнения АСЗ. Для этого, при помощи выборки из базы данных Центра малых планет (<https://www.minorplanetcenter.net/data>), задаётся начальное распределение параметров орбит АСЗ. Для выборки были взяты АСЗ диаметром $d > 1$ км, поскольку она может считаться достаточно полной. Далее производилось интегрирование движения астероидов на 20 млн. лет при помощи программного комплекса REBOUND с использованием гибридной схемы MERCURIUS [3]. В модели учитывалось гравитационное поле планет и Солнце, в то время как астероиды считались как безмассовые частицы.

На Рис. 1 проиллюстрированы результаты расчетов зависимости от времени отношения N/N_0 для всего ансамбля АСЗ. Хорошо видно, что значение t_{NEA} составляет примерно 3.0 млн. лет. Зависимость N/N_0 хорошо аппроксимируется выражением

$$\frac{N}{N_0} = e^{-0.5t^{0.33}},$$

где время t задано в млн. лет.

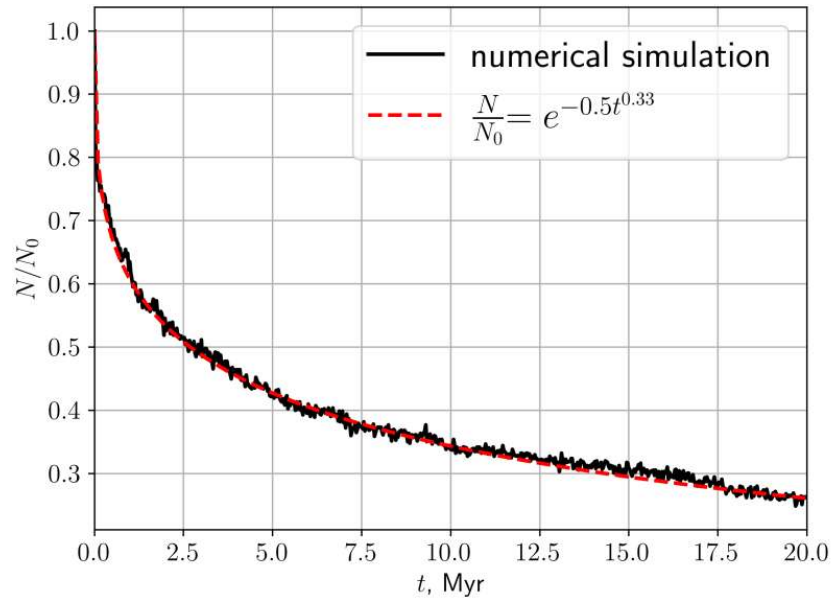


Рис. 1. Зависимость от времени отношения N/N_0 для всего ансамбля АСЗ.

Для выяснения характера зависимости $t_{NEA}(a, e, i)$ вся область орбитальных параметров населения АСЗ была разбита на ячейки. Эволюция отношения N/N_0 во времени прослеживалась для каждой такой ячейки, и, соответственно, для каждой ячейки определялось значение t_{NEA} . На Рис. 2 проиллюстрированы результаты расчетов.

Рис. 2 хорошо иллюстрирует основной характер зависимости t_{NEA} от орбитальных параметров. Основные выводы кратко следующие:

1) Значения t_{NEA} существенно выше для АСЗ, орбиты которых изначально имели большие значения i . Качественно это можно объяснить тем, что астероиды на этих орбитах (при прочих одинаковых параметрах) имеют меньше тесных сближений с планетами.

2) При больших значениях a значения t_{NEA} наоборот существенно уменьшаются. Это как раз обусловлено тем, что на таких орбитах происходит больше сближений с планетами.

3) То же справедливо и для зависимости от эксцентриситета, при большей вытянутости орбиты сближений с планетами происходит больше и t_{NEA} поэтому имеет большие значения.

Конечно, было бы неплохо получить аппроксимационную формулу $t_{NEA}(a, e, i)$, 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.

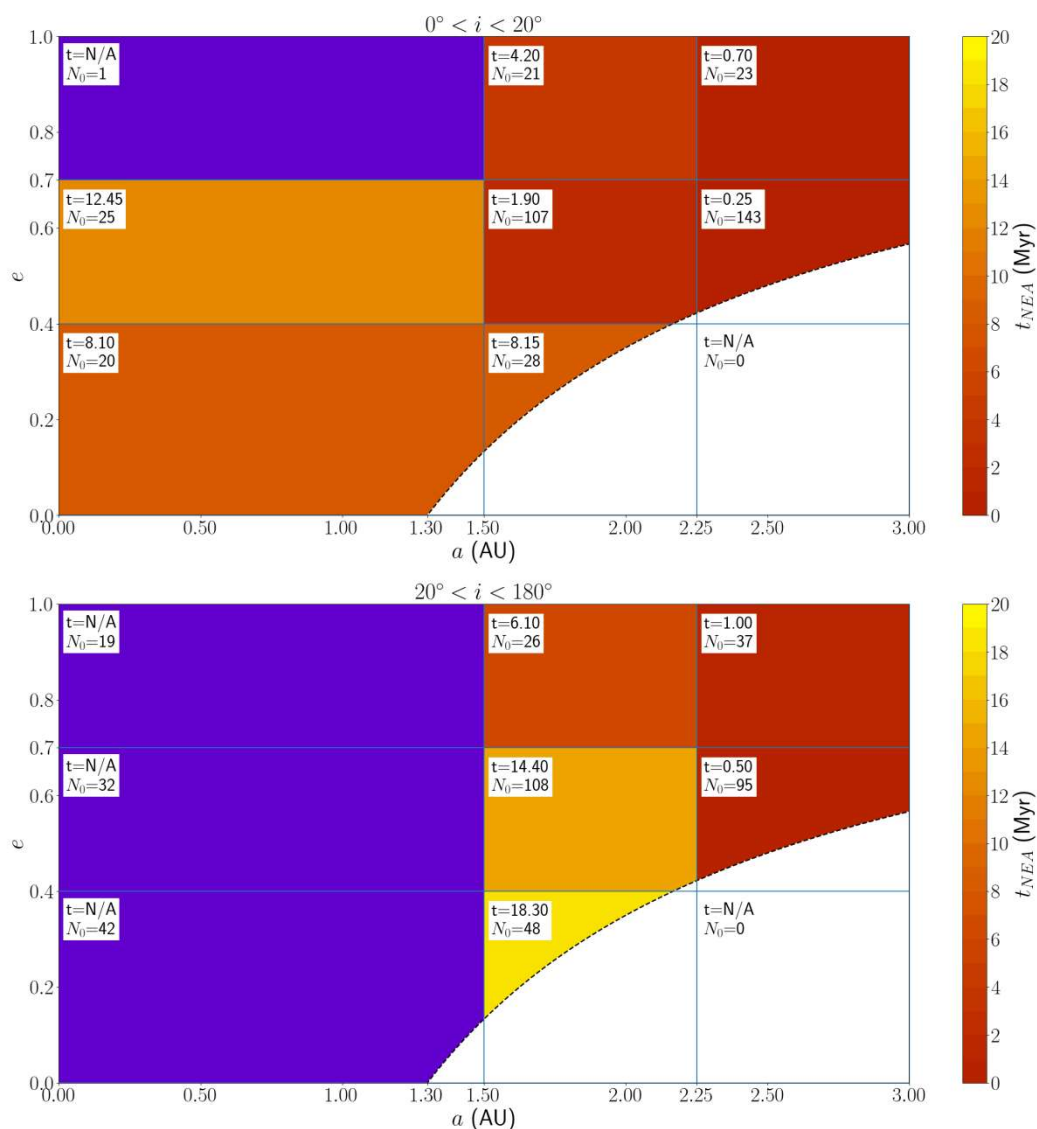


Рис. 2. Зависимость $t_{NEA}(a, e)$ для двух диапазонов i . Цветом и текстом показаны значения t_{NEA} (млн. лет) и количество частиц N_0 в начальный момент в каждой области параметров исходных орбит АСЗ.

Литература

1. Neukum G., Ivanov B.A., Early Lunar Cratering Record // 33rd Annual Lunar and Planetary Science Conference, March 11-15, 2002, Houston, Texas, abstract no.1263
2. Р. В. Золотарев, Б. М. Шустов, О динамической эволюции населения астероидов, сближающихся с Землей // Астрономический журнал. 2021. Т. 98, № 6, стр. 518-527
3. Rein H., Hernandez D.M. et al., Hybrid symplectic integrators for planetary dynamics // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 485, Issue 4, p.5490-5497

ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПАДЕНИЙ НА ЗЕМЛЮ И ЛУНУ ТЕЛ, ВЫБРОШЕННЫХ С ЗЕМЛИ ПРИ ВЫПАДЕНИЯХ НА НЕЁ ТЕЛ-УДАРНИКОВ

Ипатов С.И.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия
siipatov@hotmail.com

Введение: Тела, выбрасываемые с Земли при столкновениях Земли с телами-ударниками, могут двигаться вокруг Солнца, а затем сталкиваться с планетами и Луной. Движение таких тел рассматривалось в [1-2] на интервале времени, равном 30 тыс. лет. В этих работах рассматривался выброс тел со всей поверхности Земли со скоростями, перпендикулярными ее поверхности. Рассматривалось несколько значений скоростей. Реально углы выброса i_{ej} в основном не превышают 55° , и большая часть выброшенных тел остается на орбитах после 30 тыс. лет. Вероятность столкновения ударника с Землей различна для разных точек земной поверхности (например, больше из пространства вне земной орбиты, чем внутри земной орбиты).

Масса m_{ej} выбрасываемого материала быстро уменьшается с увеличением скорости выброса v_{esc} . Согласно [3], m_{ej} пропорционально $v_{esc}^{-1.65}$. Поэтому большая часть вещества покидала Землю со скоростями, немного превышавшими параболическую скорость. Согласно [4], значения угла выброса i_{ej} тел с Земли находятся в основном между 20° и 55° , чаще между 40° и 50° . Аналогичные значения i_{ej} были получены в [5] для столкновений тел с астероидами. В экспериментах с микронными частицами и скоростями до 2.5 км/с i_{ej} было от 40° до 70° (от 40° до 80° при скоростях около 1 км/с) [6].

Модель и исходные данные, использовавшиеся для расчетов: Миграция тел, выброшенных с Земли, заканчивалась в момент времени T_{end} , когда все тела сталкивались с планетами или с Солнцем или выбрасывались на гиперболические орбиты. Тела начинали свое движение на высоте 10 км от более удаленной от Солнца точке земной поверхности. Значения угла выброса i_{ej} (отсчитываемого от поверхности) равнялись 30° , 45° или 60° . Скорость v_{esc} выброса равнялась 11.22, 12, 12.7 или 16.4 км/с. Для интегрирования уравнений движения использовался симплектический алгоритм из пакета интегрирования SWIFT [7]. Учитывалось гравитационное влияние Солнца и всех восьми планет. В каждом варианте расчетов было 250 исходных тел. При интегрировании из рассмотрения исключались тела, столкнувшиеся с планетами и Солнцем или удалившиеся от Солнца на 2000 а.е.

Расчеты с различными значениями шага интегрирования: Для интервала времени $T=T_{end}$ интегрирование проводилось с шагом t_s , равным 10 дням. Для нескольких исходных данных для интервала времени T , не меньшего 10 млн. лет, были проведены расчеты с меньшими значениями шага интегрирования (равными 1, 2 или 5 дням). При таких значениях t_s вычислялись значения p_{ej} , p_{Sun} , p_{Me} , p_V , p_E , p_{Ma} и p_J , где p_{ej} – вероятность выброса тела на гиперболическую орбиту, p_{Sun} , p_{Me} , p_V , p_E , p_{Ma} и p_J – вероятности столкновения выброшенного тела с Солнцем, Меркурием, Венерой, Землей, Марсом и Юпитером, соответственно. Движение рассматриваемых тел хаотично из-за тесных сближений тел с планетами. Поэтому вероятности столкновений тел с планетами различны для интегрирования с разным шагом по времени и для близких исходных данных.

На основании полученных результатов нельзя сделать вывод о том, что значения вероятности p_E столкновения тела с Землей имеют тенденцию к увеличению или к уменьшению при меньших значениях t_s , а значения p_E не сильно различаются при разных t_s . При $v_{esc} = 11.22$ км/с и $i_{ej} = 30^\circ$ наблюдалась небольшая тенденция к большим значениям p_E при меньших t_s . При $v_{esc} = 11.22$ км/с и $i_{ej} = 45^\circ$, наоборот, получена небольшая тенденция к меньшим значениям p_E при меньших t_s , а при $v_{esc} = 12.7$ км/с и $i_{ej} = 45^\circ$ значения p_E были примерно одинаковыми при $t_s = 2^d$ и $t_s = 10^d$. При $T = 10$ млн. лет и шаге интегрирования, равном 1 или 2 дням, значение p_E варьировалось от 0.044 (при

$v_{\text{esc}} = 11.22$ км/с и $i_{\text{ej}} = 45^\circ$) до примерно 0.08 (при $v_{\text{esc}} = 11.22$ км/с и $i_{\text{ej}} = 30^\circ$, а также при $v_{\text{esc}} = 12.7$ км/с и $i_{\text{ej}} = 45^\circ$).

Вероятность p_V столкновения тела с Венерой при $t_s = 10^d$ была больше (иногда в 2 раза), чем при меньших значениях t_s (равных 1, 2 или 5 дням) для $T \leq 10$ млн лет. Однако при $T = 100$ млн лет, $v_{\text{esc}} = 11.22$ км/с и $i_{\text{ej}} = 30^\circ$ значения p_V были одинаковыми при $t_s = 10^d$ и $t_s = 5^d$. В случае $v_{\text{esc}} = 12.7$ км/с, $i_{\text{ej}} = 45^\circ$ и $T = 10$ млн лет p_V при $t_s = 2^d$ было больше в 1.2 раза, чем при $t_s = 10^d$. Значения p_{Me} и p_{Ma} были малы (при $T = 10$ млн лет были меньше 0.02 и 0.01, соответственно), чтобы сделать выводы об их зависимости от t_s . Для различных начальных данных вероятность p_{Sun} столкновения тела с Солнцем при $t_s = 10^d$ могла быть меньше, больше или равна, чем при меньших значениях t_s . В среднем значения p_{Sun} были примерно одинаковыми при разных значениях t_s и равнялись примерно 0.1 при $T = 10$ млн лет. Вероятности p_{ej} выброса тел на гиперболические орбиты были в среднем одинаковыми для различных рассмотренных значений t_s и не превышали 0.03 за $T = 10$ млн лет. В целом можно сделать вывод, что по сравнению с результатами при $t_s \leq 5^d$ расчеты с $t_s = 10^d$ могли завышать значения p_V , но значения p_{ej} , p_{Sun} , p_{Me} , p_E , p_{Ma} и p_J были примерно одинаковыми при $1^d \leq t_s \leq 10^d$.

Вероятности столкновений тел с Землей: В течение первых 30 тыс. лет вероятность столкновения тел с Землей p_E не превышала 0.04 (как в [1-2]). В таблице 1 приводятся полученные при $t_s = 10^d$ значения вероятности столкновения тела с Землей за весь рассмотренный интервал времени T_{end} при выбросе тела с Земли со скоростью v_{esc} при угле выброса i_{ej} . В различных вариантах интервал времени T_{end} составлял от 190 до 360 млн лет. После 100 млн лет на эллиптических орбитах оставалось менее 10% тел. Значения p_E в таблице 1 принимали значения от 0.06 до 0.19. Они были примерно в 2-3 раза больше, чем при интервале, равном 10 млн лет. Для данных таблицы 1 видна некоторая тенденция больших значений p_E при меньших значениях v_{esc} и при больших значениях i_{ej} . Для $v_{\text{esc}} \leq 12.7$ км/с p_E было около 0.01-0.02 при $T = 1$ млн лет и 0.056-0.12 при $T = 10$ млн лет.

Вероятности выброса тел на гиперболические орбиты и вероятности столкновений тел с другими планетами и с Солнцем за весь рассмотренный интервал времени: Доля p_{ej} тел, выброшенных на гиперболические орбиты за весь рассмотренный интервал времени, не превышала 0.1, за исключением варианта с $v_{\text{esc}} = 16.4$ км/с и $i_{\text{ej}} = 30^\circ$. В случае $12 \leq v_{\text{esc}} \leq 16.4$ км/с значения p_{ej} были больше при $i_{\text{ej}} = 30^\circ$, чем при $i_{\text{ej}} = 45^\circ$ и $i_{\text{ej}} = 60^\circ$. Значения p_{ej} были в основном больше для больших v_{esc} . Доля p_{Sun} тел, столкнувшихся с Солнцем, находилась в пределах от 0.34 до 0.49. Значения p_{Me} находились в пределах от 0.036 до 0.08, а p_{Ma} и p_J не превышали 0.024 и 0.001, соответственно. Значения p_V находились между 0.18 и 0.28 при $t_s = 10^d$, но, возможно, могли быть меньше (до 2 раз) при расчетах с меньшими t_s .

Обсуждение роста зародыша Луны: На основе массивов элементов орбит мигрировавших тел, аналогично [8], были рассчитаны вероятности столкновений тел с Землей и Луной. Отношение p_E/p_M вероятностей столкновений тел с Землей и Луной было в основном в интервале 20-30 (см. табл. 2). В проведенных расчетах рассматривались тела, вышедшие из сферы Хилла Земли и двигавшиеся по гелиоцентрическим орбитам. Доля тел, выпавших на Луну в течение своего динамического времени жизни, была относительно невелика (~ 0.006). При некоторых столкновениях масса Луны может не увеличиваться из-за выброса вещества. При современной орбите Луны вероятность столкновений выброшенных с Земли тел с Луной еще меньше для тел, не покинувших сферу Хилла Земли, чем после движения тел по гелиоцентрическим орбитам. Тела, выброшенные с Земли, могли участвовать в формировании внешних слоев Луны. Для того, чтобы содержать нынешнюю долю железа, Луна должна была аккумулировать основную часть своей массы из мантии Земли [9]. Тел, выброшенных с Земли и выпавших на зародыш Луны, двигавшийся по современной орбите Луны, вероятно, было недостаточно для роста Луны из маленького зародыша. Поэтому предпочтительнее формирование крупного зародыша Луны вблизи Земли. В [9] предполагалось, что зародыши Земли и Луны образовались из общего разреженного сгущения. При малых углах падения на

Землю небесного тела с массой $\sim 0.01-0.1m_E$ (m_E – масса Земли) в материале диска выброшенного вещества преобладал материал мантии Земли [10]. Возможно, такое преобладание земного вещества существует и в случае меньших масс ударников. Однако при малых (по сравнению с $0.01-0.1m_E$) массах ударников выброшенное вещество не образовало новый диск вокруг Земли, хотя могло бы быть захвачено предыдущим диском, если бы он существовал.

Выводы: За весь рассматриваемый интервал времени T_{end} доля тел, выброшенных с Земли и позже столкнувшихся с Землей, равнялась 0.1-0.2 (в среднем около 0.15). Отношение p_E/p_M вероятностей столкновений тел с Землей и Луной было в основном в интервале 20-30, а вероятность столкновения тела с Луной часто была около 0.006. Доля тел, столкнувшихся с Венерой, может немного превышать долю тел, столкнувшихся с Землей. Доли тел, столкнувшихся с Меркурием и Марсом, составляли около 0.04-0.08 и не более 0.02, соответственно. Около $1/3 - 1/2$ выброшенных тел столкнулись с Солнцем. Доля тел, выброшенных на гиперболические орбиты, не превышала 0.1.

Признательности: Исследования вероятностей столкновений тел с Землей выполнены по Госзаданию ГЕОХИ РАН. Исследования вероятностей столкновений тел с Луной выполнены при поддержке РФФИ, проект 21-17-00120.

Литература

1. Gladman B. et al. Impact seeding and reseeded in the inner Solar System // *Astrobiology*. 2005. V. 5, p. 483–496.
2. Reyes-Ruiz M. et al. Dynamics of escaping Earth ejecta and their collision probabilities with different Solar System bodies // *Icarus*. 2012. V. 220, p. 777-786.
3. Svetsov V. Cratering erosion of planetary embryos // *Icarus*. 2011. V. 214, p. 316-326.
4. Шувалов В.В., Трубецкая И.А. Численное моделирование высокоскоростных выбросов при ударах комет и астероидов: предварительные результаты // *Астрон. вестник*. 2011. Т. 45, с. 402-411.
5. Raduncan S.D., Davison T.M., Collins G.S. Ejecta distribution and momentum transfer from oblique impacts on asteroid surfaces // 2021. arXiv:2105.01474.
6. Barnouin O.S. et al. Impacts into coarse-grained spheres at moderate impact velocities: Implications for cratering on asteroids and planets // *Icarus*. 2019. V. 325, p. 67-83.
7. Levison H.F., Duncan M.J. The long-term dynamical behavior of short-period comets // *Icarus*. 1994. V. 108, p. 18-36.
8. Ипатов С.И. Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной // *Астрон. вестник*. 2019. Т. 53, с. 349-379. <http://arxiv.org/abs/2003.11301>
9. Ипатов С.И. Формирование зародышей Земли и Луны из общего разреженного сгущения и их последующий рост // *Астрон. вестник*. 2018. Т. 52, с. 411-426. <http://arxiv.org/abs/2003.09925>
10. Rufu R., Aharonson O. A multiple-impact origin for the Moon // *Nature Geoscience*. 2017. V. 10, p. 89-94.

Таблица 1 – Вероятность столкновения тела с Землей за весь рассмотренный интервал времени T_{end} при выбросе тела с Земли со скоростью v_{esc} при угле выброса i_{ej} .

i_{ej} , град	$v_{esc}=11.22$ км/с	12 км/с	12.7 км/с	16.4 км/с
30	0.152	0.112	0.136	0.064
45	0.156	0.152	0.136	0.088
60	0.192	0.168	0.128	0.124

Таблица 2 – Отношение p_E/p_M вероятностей столкновений тел с Землей и Луной во время эволюции диска тел, выброшенных с Земли со скоростью v_{esc} (в км/с) при угле выброса i_{ej} (в градусах) за T млн. лет

i_{ej} , град	T , млн лет	11.22км/с	12км/с	12.7км/с	16.4км/с
30	1	22.0	29.3	23.5	19.9
30	10	22.4	28.5	22.6	19.4
30	100	20.6	28.5	20.8	18.1
45	1	24.5	23.2	21.7	21.5
45	10	23.4	21.4	23.7	22.5
45	100	23.4	19.8	21.9	24.0
60	10	29.4	26.5	31.2	22.3
60	100	27.3	24.4	28.4	20.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРБИТ НЕНУМЕРОВАННЫХ МАЛЫХ ПЛАНЕТ

Кузнецов В.Б.

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

vb.kuznetsov@iaaras.ru

Настоящая работа посвящена результатам определения предварительных орбит нenumерованных малых планет и их последующего улучшения. Для определения предварительных орбит использовался метод [1], который является обобщением ранее рассмотренного метода [2] для любого количества наблюдений больше или равного трём. Он основывается на поиске решений минимумов двумерной целевой функции и позволяет находить несколько орбит по данному набору наблюдений.

На 12 января 2022 года, по данным Minor Planet Center (MPC) [3], известно 713059 нenumерованных астероидов. При этом для 68871 из них орбиты неизвестны. Для 59859, наблюдавшихся с 1916 по 2022 годы, число наблюдений 3 или более (до 198). Для них было получено 19558 решений, причём 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* [4] по всем наблюдениям, которая изменяется в интервале от 1.1×10^{-7} до 1.1×10^{-6} угловых секунд. С дуговой невязкой менее 1 угловой секунды имеется 3808 решений для 3373 планет. Из них, для одной планеты есть 4 решения, для 16 – 3 решения и для 392 – 2.

Из общего числа полученных 19558 решений, для 18054 число наблюдений > 3 . Для этих решений была проведена процедура улучшения полученных орбит с использованием МНК и учётом возмущений от больших планет, вычисленных по эфемериде DE440 [5]. В результате, были улучшены 10253 решения для 10103 астероидов. Далее было отобрано 9445 решений с СКО менее 1 угловой секунды, из них 7497 эллиптических и 1948 гиперболических. На Рис. 1 представлена зависимость между значением целевой функции решения и интервалом наблюдений. Здесь хорошо видно, что преобладает односуточный интервал, соответствующий двум ночам наблюдений, а среднее значение целевой функции соответствует $10^{-5} \div 10^{-6}$, что свидетельствует о среднем качестве большинства предварительных орбит и необходимости их улучшения. Стоит отметить, что не все предварительные орбиты можно улучшить используемым классическим методом и здесь требуются дальнейшие исследования. На Рис. 2 показана гистограмма, представляющая распределение решений по числу наблюдений. Подавляющее число успешно улучшенных орбит получено для 6–8 наблюдений, что соответствует двум наблюдательным сессиям. Наличие достаточно большого числа гиперболических решений ставит вопрос о корректности идентификации наблюдаемого тела во время второй сессии.

Полученные результаты показывают, что метод [1] может быть использован для определения предварительных орбит в ряде тех случаев, когда это не удаётся сделать другими способами.

Литература

1. Кузнецов В. Б. Определение предварительной орбиты в некомпланарном случае // *Астрономический вестник*. 2022. Т. 56, № 3., С. 1–11.
2. Кузнецов В. Б. К вопросу об определении предварительной орбиты небесного тела // *Астрономический вестник*. 2019. Т. 53, № 6., С. 456–466.
3. <https://minorplanetcenter.net>
4. Херрик С. *Астродинамика* // Москва: «Мир». 1977. т. 2. с. 264.
5. Park R. S., Folkner W. M., Williams J. G., and Boggs D. H. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441 // *AJ*. – 2021. V. 161, № 105. – P. 15.

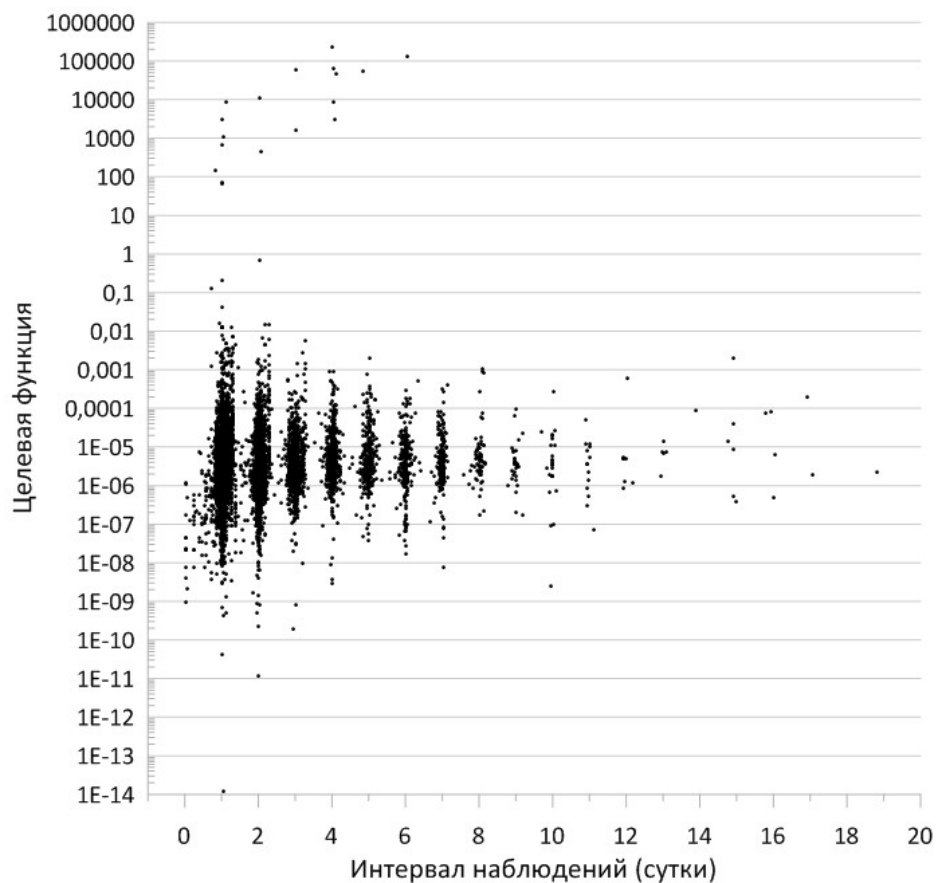


Рис. 1. Зависимость значения целевой функции от длины интервала наблюдений.

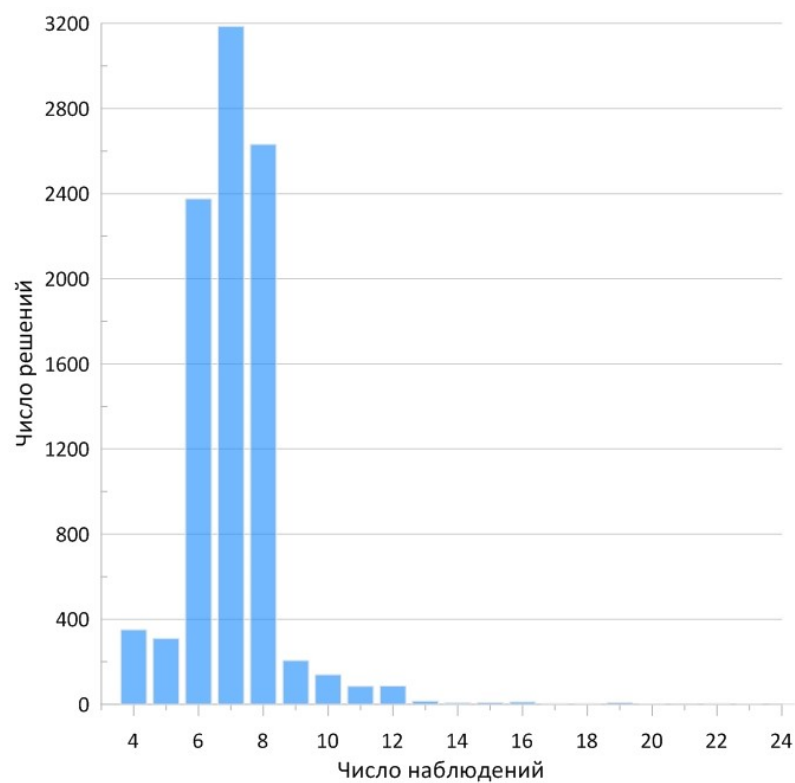


Рис. 2. Распределение решений по числу наблюдений.

НЕГРАВИТАЦИОННОЕ УСКОРЕНИЕ В ДВИЖЕНИИ АСТЕРОИДОВ, СБЛИЖАЮЩИХСЯ С ЗЕМЛЕЙ

Кузнецов В.Б., Чернетенко Ю.А.
ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
vb.kuznetsov@iaaras.ru, cya@iaaras.ru

Негравитационное ускорение (НУ) в движении астероидов вызывается эффектом Ярковского (ЭЯ) [1], хотя для астероидов с признаками кометной активности возможно и НУ, вызываемое сублимацией кометных льдов. При учете действия НУ удобно представлять его тремя составляющими общего НУ $\bar{A}$: (A_1 , A_2 , A_3), радиальной, трансверсальной и нормальной, так что $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2$. Для учета ЭЯ предполагается, что зависимость его от гелиоцентрического расстояния имеет вид $1/r^2$. Общее негравитационное ускорение зависит от физического состава тела, его размера и формы, характера вращения, и, возможно, других характеристик. Влияние составляющей A_2 на скорость тела имеет вековой характер и поэтому определяется увереннее по сравнению с A_1 и A_3 , влияние которых на орбитальные параметры является периодическим в течение одного оборота. По этой причине для большинства астероидов статистически уверенно можно определить только A_2 , хотя эта величина не дает представление о величине общего НУ.

Целью настоящей работы являлось определение параметров негравитационного ускорения (НУ) для всех нумерованных астероидов, сближающихся с Землей (АСЗ), анализ этих значений, выявление возможных активных астероидов и 'спящих' комет, оценка составляющих A_1 и A_3 .

Для 2945 нумерованных АСЗ, получены значения параметров A_2 и A_3 НУ, вызываемого эффектом Ярковского (ЭЯ). Принятая в работе модель движения включает возмущения от больших планет по эфемериде DE440 [2], от Плутона, Цереры, Паллады и Весты; релятивистские члены от Солнца; динамическое сжатие Земли и Солнца. Раздельно учитывались возмущения от Земли и Луны. Учитывалось действие ускорения, вызываемого ЭЯ.

Использовались позиционные наблюдения из каталога Международного центра малых планет (https://minorplanetcenter.net/db_search), радарные наблюдения взяты из базы данных JPL (<https://ssd.jpl.nasa.gov/sb/radar.html>). Позиционные наблюдения приведены на систему одного каталога в соответствии с рекомендациями работы [3].

Для 686 АСЗ ошибка определения A_2 (σ_{A_2}) в три и более раз меньше самой величины A_2 . Для 534 АСЗ $\sigma_{A_2} < 5.0$ (здесь и далее все величины приводятся в единицах 10^{-14} а.е. сут.⁻²) и для 267 – $\sigma_{A_2} < 1.0$. Только для 150 АСЗ ошибки A_2 и A_3 в три и более раз меньше самих этих величин. Составляющая A_1 для большинства астероидов определяется неуверенно, поэтому этот вариант вычислений далее не анализировался. В результате включения в модель движения НУ для $\sim 3/4$ из 686 рассмотренных астероидов произошло уменьшение значений СКО, для $3/4$ – увеличение СКО, несмотря на статистически уверенное определение параметров НУ. Влияние НУ на представление наблюдений невелико, и включение в процедуру улучшения или исключение из нее даже одного наблюдения, может изменить значение СКО. Поэтому, в качестве критерия при отборе надежных результатов определения параметров НУ мы рассматривали ошибку определения A_2 (как наиболее надежного результата).

Для астероида (99942) оказалось возможным определить все три составляющие НУ. Были получены оценки их вклада в значение минимального расстояния от Земли при сближении в 2029 г.

Полученные значения A_2 сопоставлены со значениями диаметров астероидов, что показано на Рис.1. Значения диаметров были взяты в базе данных JPL (<https://ssd.jpl.nasa.gov/>) и, в случае их отсутствия в этой базе, в базе [4] или оценены на основании данных об абсолютных звездных величинах. График показывает, что есть только тенденция зависимости A_2 от размера астероида, особенно это заметно для малых

значений диаметров: при значениях диаметров до 1 км значения изменяются от нуля до 14. Возможно, это объясняется тем, 1) что диаметр является только одним из ряда параметров, от которых зависит величина НУ; 2) чем меньше астероид, тем более его форма может отличаться от сферической.

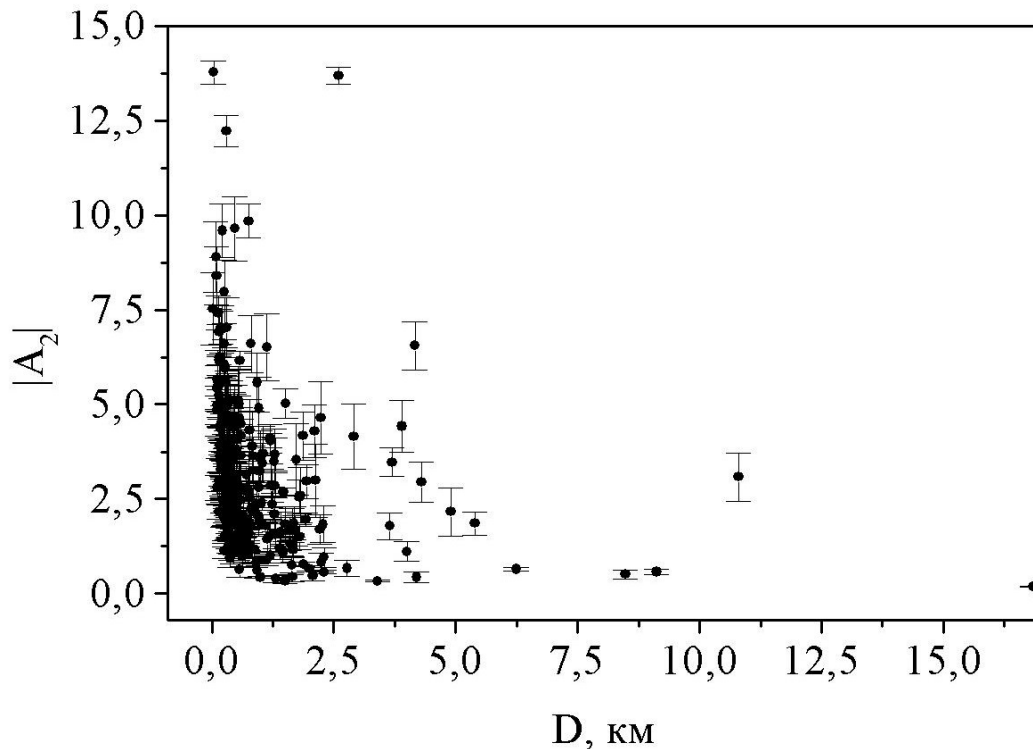


Рис. 1. Сопоставление значений $|A_2|$ для 267 астероидов ($\sigma_{A_2} < 1.0 \cdot 10^{-14}$ а.е. сут. $^{-2}$) со значениями их диаметров, D .

Обращает внимание тот факт, что большинство значений A_2 отрицательны. Так, из 686 астероидов отрицательные значения A_2 имеют 71% астероидов. Эта тенденция видна также и по результатам работы [5]: 75% астероидов имеют отрицательные значения A_2 . Знак параметра A_2 определяется, главным образом, направлением вращения астероида (положением оси вращения в пространстве). Конечно, это верно, если малое тело имеет сферическую форму. Для небольшого количества рассмотренных здесь АСЗ, для 34, оказалось возможным найти в работе [6] параметры, характеризующие ориентацию оси вращения. На рис.2 орбитальная широта северного полюса оси вращения сопоставлена со значениями A_2 . Видно, что действительно большинство из этих АСЗ имеют обратное вращение, что, по-видимому, определяет преобладание отрицательного знака параметра A_2 . Однако заметно также, что среднее значение A_2 отрицательно и составляет ~ -1.5 . Возможные причины обсуждаются.

Обнаружены астероиды, для которых значения A_2 значительно превышают среднее значение для всего ряда, а ошибки A_2 существенно меньше самих значений. Это астероид (209924) ($A_2 = -121.1 \pm 5.3$) и астероид (523599), для которого $A_2 = +207.3 \pm 2.3$. При учете НУ СКО для первого астероида уменьшилась с $0.327''$ до $0.294''$, а для второго – с $1.182''$ до $0.273''$. Проверка наличия тесных сближений с крупными малыми планетами показала их отсутствие. В работе [7] в течение 4-х лет исследовались 75 потенциально активных астероидов, находящихся на кометных орбитах, с целью поиска проявлений кометной активности. Астероид (523599) был включен в эту программу, но никакие проявления активности для него обнаружены не были. Возможно, такие проявления (или столкновения) происходили до рассматриваемого в работе [7] интервала или же оказались вне интервалов наблюдений этого астероида в 4-х оппозициях.

Кроме этого, можно привести примеры существенного уменьшения СКО после учета НУ для астероидов (480883), (483656), (524522): $A_2 = -6.61 \pm 0.11$, -13.77 ± 0.31 , -5.58 ± 0.05 , соответственно. СКО без учета НУ: $0.911''$, $1.220''$, $1.188''$; после учета – $0.315''$, $0.446''$, $0.284''$.

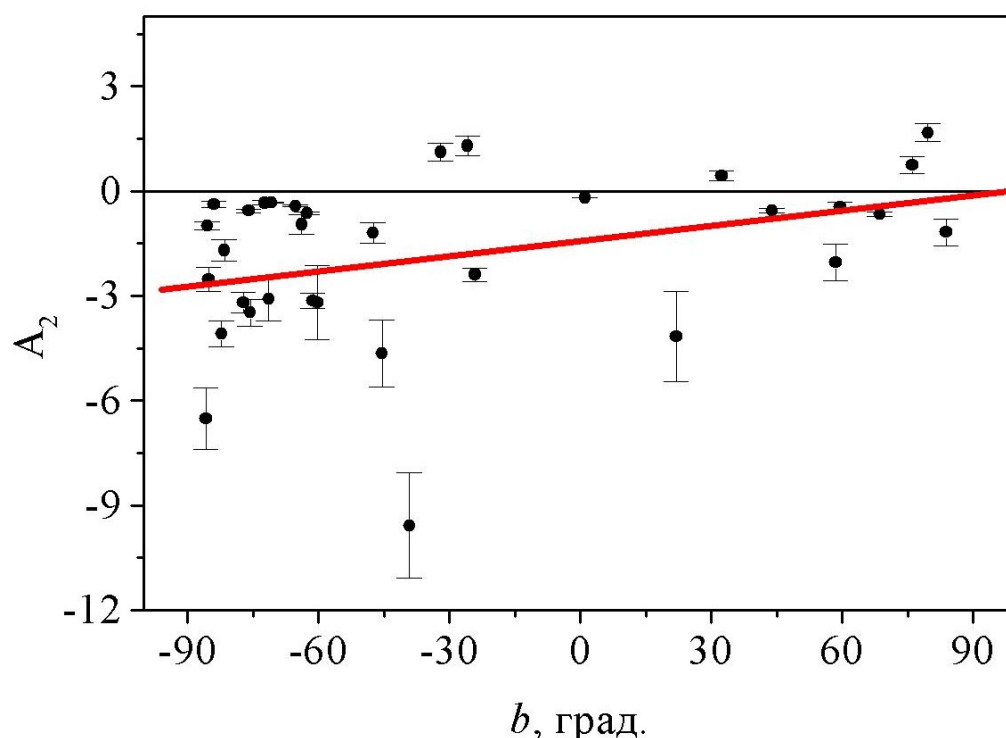


Рис. 2. Сопоставление значений A_2 со значениями широты северного полюса осей вращения астероидов, b .

Литература

1. Bottke, Jr., William, F. et al. The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for Asteroid Dynamics // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2006. V.34. P.157–191.
2. Park R.S., Folkner W.M., Williams J.G., and Boggs D.H. The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441. // The Astronom. J. 2021. 161:105, (15pp).
3. Farnocchia, D., Chesley, S., Chamberlin, A., Tholen, D. Star catalog position and proper motion corrections in asteroid astrometry // Icarus. 2015. V.245. P.94–111.
4. Johnston, Wm. R. Asteroid diameters and albedos from Spitzer Space Telescope observations. // <https://www.johnstonsarchive.net/astro/spitzerasteroids.html>. 2 January 2022.
5. Del Vigna, A., Faggioli, L., Milani, et al. Detecting the Yarkovsky effect among near-Earth asteroids from astrometric data // Astronomy & Astrophysics. 2018. V.617, A61.
6. Ephemerides of minor planets for 2021. Отв. редактор Ю.А. Чернетенко. Санкт–Петербург, 2020. P. 8338–8446.
7. Mommert, M., Trilling, D. E., Hora, J. et al. Systematic Characterization of and Search for Activity in Potentially Active Asteroids // The Planetary Science Journal. 2020. 1:10 (14pp).

ДИНАМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОБЪЕКТОВ С БОЛЬШОЙ ПАРУСНОСТЬЮ В ОБЛАСТИ СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ОРБИТ

Кузнецов Э.Д.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

eduard.kuznetsov@urfu.ru

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 площади сечения A к массе m (парусностью) $\gamma = A/m$ на длительных интервалах времени. Как правило, объекты, обладающие большой парусностью ($\gamma \geq 1 \text{ м}^2/\text{кг}$), относятся к космическому мусору, для которого важно знать особенности долгопериодической орбитальной эволюции.

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 [16]:

$$\mathbf{F} = F \frac{\mathbf{p}}{\rho} + F \left(\frac{\dot{\rho} \mathbf{p}}{c \rho} + \frac{\dot{\mathbf{p}}}{c} \right), \quad F = k \gamma P \Psi \left(\frac{a_E}{\rho} \right)^2. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{p}$ и $\dot{\mathbf{p}}$ — гелиоцентрические радиус-вектор и вектор скорости объекта, c — скорость света, k — коэффициент отражения поверхности (1 — полное поглощение или зеркальное отражение, 1.44 — полное диффузное рассеивание), $P = 4.56 \times 10^{-6} \text{ Н/м}^2$ — давление света, Ψ — функция тени, a_E — 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 [6].

Практический интерес к проблеме изучения динамической эволюции объектов с большой парусностью усилился после того, как в начале 2000-х годов в области геостационарной орбиты было открыто более ста объектов с парусностью от 1 до 50 $\text{м}^2/\text{кг}$ [8, 17]. Парусность этих объектов, относимых к фрагментам космического мусора, в 100–10000 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 [1]). Световое давление оказывает существенное влияние на орбитальную эволюцию объектов при значениях парусности $\gamma \geq 1 \text{ м}^2/\text{кг}$. Увеличение парусности ведет к возрастанию амплитуд колебаний эксцентриситета и наклона орбиты и к сокращению периодов этих колебаний. Максимальные значения наклонов увеличиваются от 15° (при $\gamma = 1 \text{ м}^2/\text{кг}$) до 46° (при $\gamma = 30 \text{ м}^2/\text{кг}$) при сокращении периода колебаний с 53 до 5 лет [9]. При $\gamma \geq 16 \text{ м}^2/\text{кг}$ в зависимости от начальных условий эксцентриситет орбиты может достигать значений $e \geq 0.83$, обеспечивающих вход геостационарного объекта в плотные слои атмосферы Земли [9].

В работах [12, 18] показано существование стационарной точки (e_0, π_0) на фазовой плоскости «эксцентриситет e — долгота перицентра π », соответствующей следующим начальным условиям:

$$e_0 = \frac{3}{2} k \gamma P \frac{(\cos(\varepsilon/2))^2}{a n n_s} \approx \frac{0.01}{l} k \gamma, \quad \pi_0 = \lambda_s. \quad (2)$$

Здесь ε — наклон эклиптики к экватору, a — большая полуось орбиты спутника, n и n_s — средние движения спутника и Солнца, l — количество оборотов спутника вокруг Земли в течение звездных суток, λ_s — эклиптическая долгота Солнца.

Исследование стохастических свойств движения геосинхронных объектов показало, что с ростом парусности увеличиваются размеры зон стохастичности [2, 3, 19, 20]. В работе [19] обнаружены вторичные резонансы, обусловленные соизмеримостью частот резонансной переменной либрационного резонанса и эклиптической долготы Солнца. Математическое описание явления дано в работе [14].

Качественные характеристики орбитальной эволюции объектов с большой парусностью на геосинхронных, геопереходных [15] и GPS-орбитах [10] близки. Отмечается сложная зависимость результатов от начальных данных и значений парусности.

При исследовании движения объектов, обладающих большой парусностью, ктуальным становится учет вековых возмущений. В работах [4, 5] 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 переизлученногоповерхностью спутника солнечного и земного излучения [4]. Показано, что вековые возмущения, обусловленные эффектом Пойнтинга–Робертсона, более, чем на порядок, превосходят возмущения от остальных рассмотренных факторов.

В работе [7] 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 [1].

В работах [11, 13] исследованы условия, приводящие к флипам орбит (переходам наклона орбиты через 90°), обусловленным световым давлением, для спутников глобальных навигационных систем, а также спутников с большими полуосями орбит 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.

Таким образом, фрагменты космического мусора, обладающие как правило, более высокой, чем спутники, парусностью, имеют более сложный характер динамической эволюции, который приводит к качественным изменениям орбитальной эволюции.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (FEUZ-2020-0030).

Литература

1. Кузнецов Э.Д. О влиянии светового давления на орбитальную эволюцию геосинхронных объектов // *Астрономический вестник*. 2011. Т. 45. № 5. С. 444–457.
2. Кузнецов Э.Д., Кайзер Г.Т. Стохастическое движение геосинхронных спутников // *Космич. исслед.* 2007. Т. 45. С. 378–386.

3. Кузнецов Э.Д., Кудрявцев А.О. Особенности движения геосинхронных спутников в окрестности неустойчивых стационарных точек // *Космич. исслед.* 2008. Т. 46. С. 452–456.
4. Смирнов М.А., Микиша А.М. Вековая эволюция высокоорбитальных космических объектов под действием светового давления // *Проблема загрязнения космоса (космический мусор)*. М.: Космосинформ, 1993. С. 126–142.
5. Смирнов М.А., Микиша А.М. Вековая эволюция высокоорбитальных космических объектов под действием светового давления. Часть II. Определение параметров, характеризующих действие светового давления на геосинхронные спутники, по фотометрическим наблюдениям // *Столкновения в околоземном пространстве (космический мусор)*. М.: Космосинформ, 1995. С. 252–271.
6. Соколов Л.Л., Кузнецов Э.Д. Нелинейная эволюция эксцентриситета орбиты сферически-симметричного спутника-баллона // *Космич. исслед.* 2006. Т. 44. № 6. С. 540–547.
7. Туева О.Н., Авдюшев В.А. О влиянии светового давления и эффекта Пойтинга–Робертсона на динамику космического мусора // *Околоземная астрономия–2005: Сб. трудов конф.* / Ред. Нефедьев Ю.А., Рыхлова Л.В., Смирнов М.А., Баканас Е.С. Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина, 2006. С. 261–267.
8. Agapov V., Biryukov V., Kiladze R., Molotov I., Rumyantsev V., Sochilina A., Titenko V. Faint GEO objects search and orbital analysis, in: Danesy, D. (Ed.), *Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris*, ESA SP-587, ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands, pp. 119–124, 2005.
9. Anselmo L., Pardini C. Orbital evolution of geosynchronous objects with high area-to-mass ratios // *Proc. of the Fourth European Conf. on Space Debris*, (ESA SP-587). ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands. 2005. P. 279–284.
10. Anselmo L., Pardini C. Dynamical evolution of high area-to-mass ratio debris released into GPS orbits // *Adv. Space Res.* 2009. V. 43. P. 1491–1508.
11. Belkin S.O., Kuznetsov E.D. Orbital flips due to solar radiation pressure for space debris in near-circular orbits // *Acta Astronautica*. 2021. V. 178. P. 360–369.
12. Chao C.C. Analytical investigation of GEO debris with high area-to-mass ratio // *Proc. 2006 AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf. Keystone, Colorado*. AIAA Paper, No. AIAA-2006-6514. 2006. 8 p.
13. Kuznetsov E. Orbital flips due to solar radiation pressure for orbital debris in MEO and GSO // *Proceedings of the 72nd International Astronautical Congress* 2021. October 25–29, 2021. Dubai, United Arab Emirates. Dubai, 2021. Id. IAC-21-A6.IP.x63400. 6 p.
14. Lemaître A., Delsate N., Valk S. A web of secondary resonances for large A/m geostationary debris // *Celest. Mech. Dyn. Astron.* 2009. V. 104. P. 383–402.
15. Musci R., Schildknecht T., Flohrer T., Beutler G. Evolution of the orbital elements for objects with high area-to-mass ratios in geostationary transfer orbits // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. P. 1071–1076.
16. Ragos O., Zafiropoulos F.A. A numerical study of the influence of the Poynting–Robertson effect on the equilibrium points of the photogravitational restricted three-body problem. I. Coplanar case // *Astron. and Astrophys.* 1995. V. 300. P. 568–578.
17. Schildknecht T., Musci R., Flohrer T. Properties of the high area-to-mass ratio space debris population at high altitudes // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. P. 1039–1045.
18. Valk S., Lemaître A., Anselmo L. Analytical and semi-analytical investigations of geosynchronous space debris with high area-to-mass ratios influenced by solar radiation pressure // *Adv. Space Res.* 2008. V. 41. P. 1077–1090.
19. Valk S., Delsate N., Lemaître A., Carletti T. Global dynamics of high area-to-mass ratios GEO space debris by means of the MEGNO indicator // *Adv. Space Res.* 2009. V. 43. P. 1509–1526.
20. Wytrzyszczak I., Breiter S., Borczyk W. Regular and chaotic motion of high altitude satellites // *Adv. Space Res.* 2007. V. 40. P. 134–142.

ОЦЕНКИ ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ НЕДАВНИХ ИМПАКТОВ НА МАРСЕ

Подобная Е.Д., Попова О.П., Глазачев Д.О.

Институт Динамики Геосфер РАН им. академика М.А. Садовского, Москва, Россия

epodobnaya@gmail.com

Введение

В течение последних лет на Марсе было обнаружено около 700 недавно образовавшихся мест падения метеороидов (Malin et al., 2006; Daubar et al., 2010, 2019), приведших к образованию одиночных кратеров и кратерных полей, с размерами кратеров от 1 до 50 м. Благодаря более разреженной (в сравнении с Землей) атмосфере Марса, падающие метеороиды меньше разрушаются. Тем не менее, около 50% метеороидов фрагментируют в Марсианской атмосфере и образуют кратерные поля. (Daubar et al., 2010, 2019; Hartmann et al., 2018). При сравнении с земными метеороидами близких размеров можно предположить, что в 40-50% случаев аналогичные объекты привели бы к образованию кратерных полей на Марсе. Исследование кратеров на Марсе позволяет изучать детали фрагментации, которые не могут быть обнаружены в земных условиях.

Эллипсы рассеяния

В работе рассматриваются эллипсы рассеяния, построенные для кратерных кластеров. Это описание позволяет оценить азимут и угол входа метеороида, размер эллипса содержит информацию о фрагментации. Полученные результаты показывают хорошую корреляцию с результатами, представленными в работе Daubar et al. (2019). Площадь поля рассеяния была оценена с точностью около 1.5 раз. Оценки угла входа в атмосферу показывают отличие от оценок, представленных в независимом источнике (Daubar et al., 2019) не более 15° в большинстве случаев. Разница в оценках угла проекции траектории метеороида составила не более 20° , в половине случаев направления полета совпадают.

Выбросы из кратера

Выбросы из кратера в некоторых случаях дают возможность оценить направление полета. При косых ударах выбросы из образующегося кратера распределены ассиметрично, и более выражены по направлению полета (Shuvalov, 2011). Кроме того, в некоторых случаях для определения азимута можно использовать пылевые следы на поверхности Марса – параболические элементы, которые рассматриваются как поверхностные записи взаимодействия атмосферных ударных волн (Ivanov et al., 2010; Burleigh et al., 2012). Изображения Марса, представленные проектом HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) позволяют детально рассмотреть выбросы кратеров для ряда кластеров и найти соответствующие направления азимутов.

Оценки азимутов по выбросам из кратеров были получены для 42 из 55 рассмотренных кластеров. Примеры сравнения траектории метеороида для двух различных кластеров показаны на Рис. 1.

Направление полета, определяемое выбросами, сравнивалось с оценками, полученными по эллипсам рассеяния. Кластер ESP_024646_1890 (Рис. 1А) демонстрирует хорошую корреляцию оценок азимута: азимут, полученный по эллипсам рассеяния составляет 340° , тогда как, исходя из расположения выбросов, направление полета составляет 330° . Оценки, полученные для кластера ESP_026009_1920 (Рис. 1В) различаются на 70° , то есть полученные оценки направления полета расположены практически перпендикулярно.

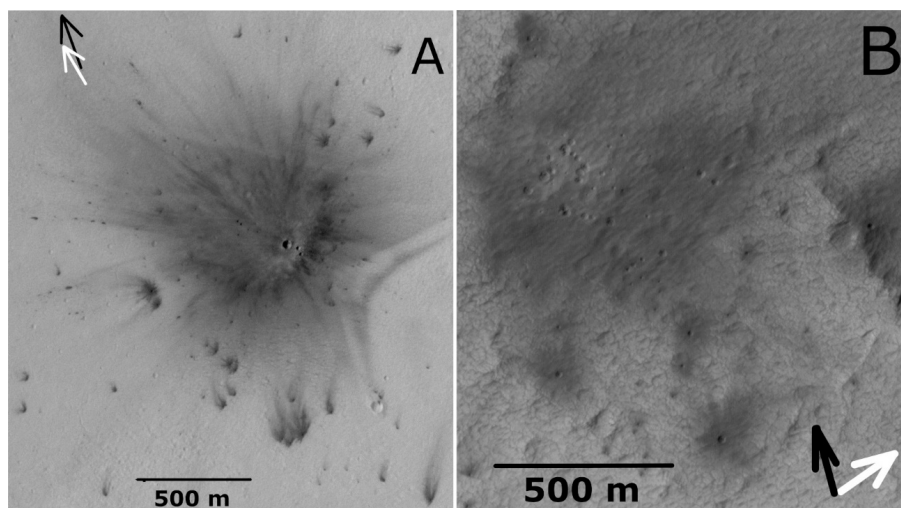


Рис. 1. Изображения, полученные проектом HiRISE для двух кластеров. Стрелки показывают направление полета метеороида, полученное с помощью эллипса рассеяния (черная стрелка) и по расположению выбросов из кратера (белая стрелка). А: Кластер ESP_024646_1890. В: Cluster ESP_026009_1920.

Результаты оценки азимута полета метеороида по выбросам из кратера сравнивались с азимутами кластеров, оцененными в Daubar et al. (2019) и полученными по эллипсам рассеяния (Подобная и др., 2020). Сравнение получившихся оценок угла проекции траектории показывает хорошее совпадение с оценками этого угла, рассчитанными по эллипсу рассеяния для 80% кластеров. Для половины из этих 80% случаев направление полета не совпадает. В остальных 20% кластеров выбросы направлены перпендикулярно большой оси эллипса рассеяния. Это показывает необходимость рассмотрения других методов определения направления полета. Следующим шагом будет моделирование полей рассеяния.

Предварительные результаты математического моделирования показывают, что развиваемая модель фрагментации позволит описать кластеры и предложить методы определения направления полета и свойств ударника.

Литература

1. Burleigh K. J., Melosh H. J., Tornabene L. L. et al. Impact airblast triggers dust avalanches on Mars // *Icarus*. 2012. Vol. 217. № 1. P. 194–201.
2. Daubar I. J., McEwen A. S., Byrne S., Dundas C. M., Kennedy M., & Ivanov B. A. The current Martian cratering rate // *Lunar and Planetary Science Conference*. 2010. V. 1533. P. 1978.
3. Daubar I. J., Banks M. E., Schmerr N. C., Golombek M. P. Recently formed crater clusters on Mars // *J. Geophys. Res.* 2019. V. 124. № 4. P. 958–969.
4. Hartmann W. K., Daubar I. J., Popova O. P., Joseph Emily C. S. Martian cratering 12. Utilizing primary crater clusters to study crater populations and meteoroid properties // *Meteoritics & Planetary Science*. 2018. V. 53. № 4. P. 672–686.
5. Ivanov B. A., Melosh H. J., McEwen A. S., Team HiRISE. New small impact craters in high resolution HiRISE images-III // *Lunar and Planetary Science Conference*. 2010. P. 2020.
6. Malin M. C., Edgett K. S., Posiolova L. V., McColley, S. M., & Noe Dobrea, E. Z. Catalog of new impact sites on Mars formed May 1999–March 2006 // *Malin Space Science Systems, Inc., San Diego, California*. 2006.
7. Shuvalov V. V. Ejecta deposition after oblique impacts: An influence of impact scale // *Meteoritics & Planetary Science*. 2011. V. 46. № 11. P. 1713–1718.
8. Подобная Е. Д., Попова О. П., Глазачев Д. О. Эллипсы рассеяния для недавно образованных кластеров кратеров на Марсе // *Динамические процессы в геосферах*. Выпуск 12. Москва, 2020. С. 172.

КВАЗИСПУТНИКИ И МИНИЛУНЫ

Сидоренко В.В.

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

vvsidorenko@list.ru

Астероид, приблизившийся к Земле, при определенных обстоятельствах может находиться в ее окрестности достаточно долгое время. Объекты, демонстрирующие подобное динамическое поведение, разделяются на две группы: квазиспутники и минилуны.

Квазиспутники отличаются от настоящих спутников тем, что их орбиты располагаются вне сферы Хилла планеты. Длительное пребывание квазиспутника в окрестности планеты обеспечивается резонансом 1:1 их средних движений [1]. В настоящее время у Земли обнаружено пять квазиспутников: (164207) 2004 GU₉, (277810) 2006 FV₃₅, 2013 LX₂₈, 2014 OL₃₃₉ и (469219) Камоалева [2]. Длительность квазиспутникового режима орбитального движения у этих объектов достигает $10^2 \div 10^3$ лет.

Объекты, именуемые минилунами, совершают несколько оборотов вокруг планеты по орбитам, существенным образом пересекающим сферу Хилла [3]. Достоверно установлено, что минилунами Земли были астероиды 2006RH₁₂₀ и 2020CD₃.

В докладе предполагается сравнить динамические механизмы, удерживающие квазиспутники и минилуны в окрестности планеты.

Доклад основан на результатах исследований, выполненных при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-01-00312А).

Литература

1. Sidorenko, V.V., Neishtadt, A.I., Artemyev, A.V., Zelenyi, L.M.: Quasi-satellite orbits in the general context of dynamics in the 1: 1 mean motion resonance: perturbative treatment // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy 120, 131-162 (2014)
2. de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R.: Asteroid (469219) 2016 HO₃, the smallest and closest Earth quasi-satellite // Mon. Not. R. Astron. Soc. 462, 3441–3456 (2016)
3. Bolin, B., Jedicke, R., Granvik, M., Brown, P., Howell, E., Nolan, M.C., Jenniskens, P., Chyba, M., Patterson, G., Wainscoat, R.: Detecting Earth's Temporarily-Captured Natural Satellites — Minimoons // Icarus 241, 280-297 (2014)

ВЫДЕЛЕНИЕ ОПАСНЫХ АСТЕРОИДОВ И ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ СОУДАРЕНИЯ ИХ С ПЛАНЕТАМИ

Соколов Л.Л., Баляев И.А., Кутеева Г.А., Петров Н.А., Эскин Б.Б.
Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия
lsok@astro.spbu.ru, balasteravan@yandex.ru, g.kuteeva@spbu.ru,
petrov@astro.spbu.ru, esk@astro.spbu.ru

Настоящая работа посвящена задачам, связанным с актуальной проблемой обеспечения астероидной безопасности. Речь идет о выделении реально опасных астероидов среди множества известных, нахождении их возможных соударений и сближений с Землей, а также Луной и другими планетами, оценке вероятности этих событий.

Для поиска возможных соударений и сближений астероидов с планетами мы используем два метода. Первый метод предполагает перебор начальных данных на одномерном многообразии, минимизацию планетоцентрического расстояния астероида и ряд других приемов. Этот метод описан, например, в работе [1]. С его помощью мы успешно нашли множество ранее неизвестных соударений ряда опасных астероидов, особенно — Апофиса.

Второй метод описан в работе [2]. Он использует численное интегрирование уравнений движения семейства виртуальных астероидов с помощью быстродействующего программного комплекса. Начальные данные каждого семейства виртуальных астероидов выбираются случайным образом в соответствии с нормальным распределением, задаваемым математическим ожиданием и матрицей ковариаций элементов орбиты исследуемого астероида. Используется база данных малых тел Солнечной системы <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>. Для генерации случайных чисел используется вихрь Мерсенна. Выделяются соударения и сближения с планетами на фиксированные расстояния. Если число виртуальных астероидов велико, появляется возможность получить оценку кумулятивной вероятности соударения исследуемого астероида методом Монте-Карло. Высокое быстродействие программного комплекса позволяет исследовать вторым методом возможные соударения большого числа астероидов, выявить ранее неизвестные опасные объекты, а также получить оценки вероятностей соударений не только с Землей, но также с Луной и другими планетами. Большинство вычислений проведено до 2132 года.

Обычно опасные для Земли астероиды ищут среди тех, перигелийные расстояния которых менее 1.3 а.е. («астероиды, сближающиеся с Землей»), и это представляется естественным. Однако орбиты астероидов эволюционируют, особенно сильно при тесных сближениях с планетами. В результате возможен переход в класс «сближающихся с Землей» объекта, который в этом классе не был, и даже превращение его в реально опасный для Земли. Проведена оценка возможности такой трансформации орбиты с использованием приближенного аналитического метода точечных гравитационных сфер и серьезных упрощений модели движения. Как хорошо известно, сближение с Юпитером может значительно изменить орбиту астероида, сближение с Марсом — существенно меньше, это легко показать указанным простым методом. Для того, чтобы оценить реальность перехода астероидов в класс «сближающихся с Землей», а также соответствующий масштаб времени, было проведено численное исследование возможных движений большого числа известных астероидов, включая те, перигелийные расстояния которых превосходят 1.3 а.е. Эксперимент состоял в следующем.

Из множества астероидов с известными орбитами (данные были взяты 06.03.2021 из указанной выше базы данных) исключаются имеющие перигелийное расстояние $q > 1.8$ а.е. и одновременно афелийное расстояние $Q > 4.0$ а.е., исключаются также малые астероиды с абсолютной величиной $H > 26$. Остается 127 тысяч астероидов.

1 этап. Для каждого из оставшихся объектов при $N=2000$ виртуальных астероидов ищутся возможные сближения на расстояние менее 1000 радиусов одной из планет или

Луны. Если таковых нет, астероид исключается. Остается 11 тысяч астероидов, которые берутся в следующий этап.

2 этап. Для каждого из оставшихся объектов при $N=20$ тысяч виртуальных астероидов ищутся возможные сближения на расстояние менее 100 радиусов одной из планет или Луны. Если таковых нет, астероид исключается. Остается чуть больше 3000 астероидов, которые берутся в следующий этап.

3 этап. Каждый оставшийся астероид моделируется $N = 200000$ отдельных виртуальных экземпляров. Ищутся возможные сближения на 100, 10 и 1 радиус каждой из планет и Луны.

Результаты этого эксперимента приведены на сайте: http://www.astro.spbu.ru/sites/default/files/stats_200000.xls

В частности, найдено 11 астероидов с перигелийным расстоянием более 1.3 а.е., имеющие за указанное время сближения с Землей на расстояние менее 100 ее радиусов. Для почти всех этих астероидов зафиксированы сближения и возможные соударения с Юпитером, много сближений зафиксировано с Марсом. Два астероида имеют сближения с Венерой менее, чем на 100 ее радиусов, два астероида — сближения с Сатурном менее, чем на 100 его радиусов. Рассмотрим для примера астероид 2011 XD3. Его перигелийное расстояние 1.53 а.е., точность — 0.0008 а.е. (1 сигма), афелийное расстояние — 5.16 а.е., точность — 0.07 а.е. (1 сигма). Зафиксировано два сближения этого астероида с Землей на менее чем 100 ее радиусов, 6 сближений с Марсом на менее чем 100 его радиусов, 3751 сближение с Юпитером на менее чем 100 его радиусов, 512 сближений с Юпитером менее чем на 10 его радиусов, 103 возможных соударения с Юпитером.

Астероиды, имеющие перигелийное расстояние больше 1.3 а.е. и сближающиеся с Землей на расстояние меньше 100 ее радиусов до 2132 года: 2020 KH, 2012 SO23, 2011 XD3, 2006 CQ, 2020 RJ8, 2019 YH3, 2010 UC8, 2019 WY6, 2019 UQ10, 2009 LB. Отметим, что для астероида 2006 CQ нами было найдено возможное соударение с Землей в 2169 году.

Приведем примеры кумулятивных вероятностей (умноженных на 200000) соударений различных астероидов с планетами и Луной. Земля: 2000 SG344 — 709, 2008 HJ — 53. Луна: 2015 AZ43 — 12, 2008 JL3 — 9. Меркурий: 2009 UM1 — 5, 2018 VB1 — 2. Венера: 2009 CE — 144, 2020 MA1 — 132. Марс: 2007 WD5 — 34, 2006 BX39 — 9. Юпитер: 2018 BJ11 — 463, 2019 JD14 — 303. Рассматривалась также точность оценок вероятностей в зависимости от числа виртуальных астероидов N . Для астероида 2021 QM1 ниже приведены вероятности P (умноженные на 10^5) соударения с Землей и Луной.

N	Земля ($P \times 10^5$)	Луна ($P \times 10^5$)
10^4	10.0	10.0
10^5	13.0	6.0
10^6	16.0	5.3
10^7	15.0	4.5

Подводя итоги, можно сказать, что опасность для Земли могут представлять и астероиды, не принадлежащие пока к числу «сближающихся с Землей». Выделение и исследование таких объектов — актуальная задача, решение ее возможно с использованием современных вычислительных средств. Напомним, что всего астероидов с известными орбитами порядка миллиона, из них сближающихся с Землей около 30 тысяч.

Литература

1. Nikita Petrov, Leonid Sokolov, Elena Polyakhova, and Kristina Oskina. Predictions of asteroid hazard to the Earth for the 21st century. AIP Conference Proceedings 1959, 040012 (2018)
2. I. A. Balyaev, Acceleration of numerical integration of the equations of motion of asteroids, Sol. Syst. Res. 54, 557–566 (2020)

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ФРАГМЕНТА КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПО ОПТИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Чазов В.В.¹, Бахтигараев Н.С.², Левкина П.А.²
¹ГАИШ МГУ, ²Институт астрономии РАН

Исследованы особенности поступательно-вращательного движения фрагмента космического мусора на геосинхронной орбите по результатам наблюдений в Терскольской обсерватории с 2011 по 2022 годы. Объект этот для нас интересен тем, что движется в режиме либрации вокруг точки долготы в 75^0 в.д., блеск меняется от 13 до 20 звёздной величины, коэффициент отношения средней площади к массе более $3 \text{ м}^2/\text{кг}$. Приводятся диаграммы изменения блеска, коэффициенты отношения средней площади миделева сечения к массе, коэффициент корреляции фаза-блеск. Определены точности прогноза движения.

Вычисления элементов орбит и оценки точности прогноза движения выполнены на основе численно-аналитической теории движения ИСЗ, разработанной в ГАИШ МГУ.

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ОРБИТАЛЬНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ОБЪЕКТОВ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ЗОНЫ

Чувашов И.Н.¹, Левкина П.А.²

¹Томский государственный университет, Томск, Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, Россия

chuvashovin@gmail.com

На текущий момент в геосинхронной зоне находятся 975 объектов, за которыми ведется постоянное наблюдение (space-track.org), 260 из данных объектов находятся на орбите уже больше 30 лет. Большинство из них — это крупные объекты космического мусора, которые имеют достаточно малые отношения площади миделевого сечения к массе, что исключает возможность их выметания из геосинхронной зоны. За это время, в основном, под действием лунно-солнечных возмущений, элементы орбиты этих объектов изменяют свои значения, в основном это касается наклона орбиты и долготы восходящего узла. Как показано в монографии [1], наклон орбиты у геостационарных объектов за 27 лет изменяется с 0 до 15 градусов, а потом начинает возвращаться к первоначальным значениям, что способствует обогащению геостационарной зоны. К тому же за время миграции объекты могут разрушаться и порождать большую совокупность однородных объектов, что может сильнее осложнять навигацию в геостационарной зоне.

Наблюдения, представленные на space-track.org, позволяют отследить механику изменения орбитальных элементов выбранных объектов геосинхронной зоны и оценить изменение плотности объектов в данной области за счет их миграции. К тому же такой большой наблюдательный ряд позволяет определить среднее значение коэффициента парусности (отношение миделевого сечения к массе) и оценить влияние светового давления на движение выбранных объектов.

В нашей работе мы хотим проверить на реальных наблюдениях утверждение о дрейфе объектов геосинхронной области, который может проявляться только на значительных интервалах времени, возраст к начальным значениям орбиты и оценить изменения плотности геостационарной области из-за возврата таких объектов либо совокупности объектов, вследствие распада родительского тела на орбите.

Для численного моделирования совокупности объектов используется численная модель движения, разработанная в Томском государственном университете, и включающая в себя все рекомендации IERS [2]. В качестве наблюдений были взяты TLE-элементы орбиты геосинхронной зоны на интервале времени 60 лет.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2020-0049).

Литература

1. Киладзе Р.И., Сочилина А.С. Теория движения геостационарных спутников. – СПб: ООО "ВВМ", 2008. – 132 с.
2. Александрова А.Г., Бордовицына Т.В., Чувашов И.Н. Численное моделирование в задачах динамики околоземных объектов // Изв. вузов. Физика. 2017. Т. 60. № 1. С. 69-76.

СЕКЦИЯ 4

Методы парирования угроз
и уменьшения потенциального ущерба.
Экология околоземного космического пространства

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ ДЛЯ УВОДА КРУПНОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА: ОРБИТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА И КОМПОНОВОЧНЫЕ СХЕМЫ

Баранов А.А.¹, Гришко Д.А.², Щеглов Г.А.², Стогний М.В.²

¹ИПМ им М.В. Келдыша РАН

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

dim.gr@mail.ru, h15r@yandex.ru

В докладе рассматриваются аспекты формирования проектного облика специального космического аппарата, который предназначен для совершения перелётов между крупными объектами космического мусора с целью их увода на орбиту захоронения. Проект совместно разрабатывается группой авторов из ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и МГТУ им. Н.Э. Баумана. Исследования охватывают низкие околокруговые орбиты и окрестность геостационарной орбиты. Предложены схемы облёта объектов, основанные на использовании естественных возмущений орбиты, что позволяет заметно уменьшить затраты на маневрирование при перелётах между объектами. Выполнена проектная проработка конструкции тормозного двигательного модуля и самого космического аппарата, составлена предварительная массовая сводка, позволившая оценить стартовую массу всей системы. Доказана предпочтительность конкретного варианта увода объектов (буксировка или отделяемые модули) из обеих высотных зон, определено рациональное количество отделяемых модулей на борту одного космического аппарата. Предложена система фиксации стыковочного узла в сопле уводимого объекта, исследована динамика захвата объекта при помощи многозвенного манипулятора.

Начиная с 2013 года, сотрудники ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно работают [1] над проблемой увода крупных объектов космического мусора (ОКМ) с наиболее загрязнённых околоземных орбит с использованием специального космического аппарата (КА). Под крупными ОКМ понимаются, прежде всего, последние ступени ракет-носителей и разгонные блоки. Проводимые исследования охватывают низкие орбиты (5 групп объектов) с высотами 700-1100 км и окрестность геостационарной орбиты.

Последние три года ознаменовались успехами коммерческих компаний SSTL, NorthropGrumman и Astroscale при проведении экспериментов в миссиях «RemoveDebris», «MEV-1», «MEV-2» и «Elsa-D». Положительно были оценены и результаты более ранних миссий, например, «Orbital Express Advanced Technology» (DARPA) 2007 года. Устойчивый интерес к сервисным операциям, показываемый как бизнесом, так и космическими агентствами (JAXA, NASA, ESA, CNES), в перспективе приведёт к возникновению востребованного рынка услуг по очистке ценного орбитального ресурса от нефункционирующих крупных объектов [2].

В докладе сравнивается эффективность двух основных вариантов миссий, которые могут быть организованы для увода нескольких ОКМ на орбиты захоронения (ОЗ). Первый вариант предполагает наличие на борту КА-сборщика тормозных двигательных модулей (ТДМ), которые могут быть закреплены на ОКМ и независимо от КА-сборщика обеспечивают увод объекта на ОЗ. При втором варианте КА-сборщик играет роль буксира, уводя объекты на ОЗ и возвращаясь обратно за следующим объектом. Для указанных вариантов увода выполнена проработка возможных конструктивно-компоновочных схем КА-сборщиков, а также проанализированы имеющиеся проекты-аналоги. Эффективность обоих вариантов увода ОКМ можно полноценно сравнить, используя оценки сухой массы КА-сборщиков и имея рассчитанные параметры манёвров, обеспечивающих облёт группы ОКМ [3].

При перелётах между объектами в случае низких орбит было целенаправленно использовано свойство прецессии долготы восходящего узла орбиты в нормальном гравитационном поле [4]. Последовательность облёта объектов определяется при помощи портрета отклонений долгот восходящих узлов. При выборе «последовательной» схемы облёта активный КА переводится на специально рассчитываемую орбиту ожидания,

скорость прецессии которой отличается от скорости прецессии орбиты цели. При выборе «диагональной» схемы облёта роль орбиты ожидания выполняет орбита очередного уводимого объекта [5, 6]. При маневрировании между ОКМ в окрестности геостационарной орбиты последовательность облёта объектов определялась исходя из долговременной эволюции наклонения под действием земных и лунно-солнечных возмущений. Были рассмотрены две близкие по смыслу схемы облёта объектов в приэкваториальной области [7, 8].

Для реализации низкоорбитальных миссий предлагается оригинальная компоновочная схема КА-сборщика длиной 11.5 м и диаметром 3.0 м, который состоит из трех отсеков: двигательного, приборно-агрегатного и отсека полезной нагрузки [9]. Сухая масса аппарата в первом приближении равна 4170 кг. Двигательный отсек, предназначенный для управления движением центра масс КА, может быть выполнен на основе существующего разгонного блока «Бриз-М». Приборно-агрегатный отсек, содержащий необходимые системы бортового оборудования имеет цилиндрическую форму и расположен между двигательным отсеком и отсеком полезной нагрузки. Отсек полезной нагрузки выполнен в виде открытого с одного торца цилиндрического контейнера для ТДМ. На продольной оси контейнера размещается стыковочный манипулятор, имеющий телескопические звенья. Особенность ТДМ заключается в том, что они имеют кольцевую компоновку с центральным отверстием, что позволяет разместить их соосно продольной оси КА-сборщика в виде блока-обоймы. Таким образом, удаётся исключить использование дополнительного монтажного манипулятора, применяемого в других компоновках КА-сборщиков. Предлагаемое техническое решение позволяет обеспечить заданную центровку КА за счёт поступательного перемещения обоймы по мере расходования ТДМ и запасов топлива в маршевой двигательной установке.

Захват объекта за сопло маршевого жидкостного ракетного двигателя осуществляется телескопическим манипулятором, длина которого в рабочем положении составляет 13 м. Проведенное численное моделирование показало, что при захвате объекта типа верхней ступени РН «Зенит-2» массой 9000 кг максимальные нагрузки не превысят 1.2 кН, а моменты – 11 кН*м [10]. При этом проектная масса манипулятора составит около 500 кг. За счёт большой длины манипулятора удаётся компенсировать значительные рассогласования в начальных условиях стыковки и уменьшить угловую скорость комплекса «КА-ОКМ» после стыковки с 12 до 0.3 градусов/с.

Проведённые исследования позволили сформулировать требования к облику перспективного КА, предназначенного для увода крупных ОКМ с рабочих орбит. Доказана возможность запуска такого КА при помощи существующих средств выведения. В 2013-2018 годах были определены предпочтительные схемы облёта интересующих объектов, в период 2018-2019 годов выполнены разработка компоновочных схем активного КА-сборщика и предварительный анализ его стартовой массы, с 2020 года продолжаются работы по исследованию динамики процесса захвата объекта манипулятором.

Анализ стартовой массы КА-сборщика показывает, что очистку ГСО целесообразно выполнять в соответствии со вторым вариантом увода при помощи КА, играющего роль буксира. Очистку низких орбит выгоднее осуществлять в соответствии с первым вариантом увода посредством двухступенчатого космического комплекса, состоящего из активного КА с некоторым количеством ТДМ на борту. Проведённые расчёты позволяют утверждать, что очистка низких орбит обходится существенно дороже, чем очистка ГСО, следовательно, контролю населённости низких орбит должно уделяться повышенное внимание.

Литература

1. Баранов А.А., Гришко Д.А., Майорова В.И. Исследование затрат характеристической скорости, необходимой для обслуживания и восполнения спутниковых систем на круговых орбитах // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. № 3 (15). С. 26.

2. Zelentsov V., Shcheglov G., Mayorova V. and Biushkina T. Spacecrafts Service Operations as a Solution For Space Debris Problem // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), 2018. Vol. 9, Iss. 7, pp. 1503 – 1518.
3. Baranov A.A., Grishko D.A., Shcheglov G.A., Sholmin A.S., Stognii M.V., Kamenev N.D. Feasibility analysis of LEO and GEO large space debris de/re-orbiting taking into account launch mass of spacecraft-collector and its configuration layout // Advances in Space Research, 2021, Vol. 67, pp.371–383.
4. Баранов А.А., Гришко Д.А. Вопросы минимизации затрат суммарной характеристической скорости, необходимой для обслуживания и восполнения спутниковых систем на некомпланарных круговых орбитах // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013, № 9, с. 289-312.
5. Гришко Д.А. Исследование схем облёта объектов крупногабаритного космического мусора на низких орбитах // Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук / Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. Москва, 2018.
6. Баранов А.А., Гришко Д.А. Способ определения последовательности перелётов между объектами космического мусора при значительном отличии в долготе восходящего узла их орбит // Патент на изобретение № 2688120. Дата регистрации 17.05.2019.
7. Baranov A.A., Grishko D.A., Khukhrina O.I., Chen D. Optimal transfer schemes between space debris objects in geostationary orbit // Acta Astronautica, 2020, Vol. 169, pp. 23-31.
8. Баранов А.А., Гришко Д.А. Способ определения последовательности перелётов между объектами космического мусора в окрестности геостационарной орбиты // Патент на изобретение № 2759026. Дата регистрации 08.11.2021.
9. Щеглов Г.А., Стогний М.В. Космический комплекс для утилизации группы объектов крупногабаритного космического мусора // Патент РФ на изобретение № 2695155 Опубликовано 22.07.2019. Бюл. №21.
10. Mayorova, V.I., Shcheglov, G.A., Stognii, M.V. Analysis of the space debris objects nozzle capture dynamic processed by a telescopic robotic arm // Acta Astronautica, 2021, V.187, pp. 259–270.

ОРГАНИЗАЦИОННО-ПРАВОВЫЕ ВОПРОСЫ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА ПО ПРОБЛЕМЕ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

Волынская О.А.

Факультет космических исследований МГУ, Москва, Россия

o.a.volynskaya@gmail.com

Засорение околоземного космического пространства фрагментами космического мусора становится одной из главных угроз для мировой космонавтики. С увеличением числа и разнообразия объектов в космос¹ возрастают риски столкновений функционирующих и нефункциональных аппаратов и их частей. Окружающая среда Земли и космоса становится всё более уязвимой².

Проблеме космического мусора, которая, безусловно, является глобальной, уделяется серьёзное международное внимание.

Так, Генеральная Ассамблея ООН в своих ежегодных резолюциях о международном сотрудничестве в области исследования и использования космического в мирных целях подчёркивает важность совместной и индивидуальной работы государств над снижением техногенного засорения космоса³.

В рамках Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях (Комитет ООН по космосу) – специализированного органа ООН, который уполномочен обеспечивать развитие международного сотрудничества и международно-правовых рамок космической деятельности⁴ – государства рассматривают научно-технические и юридические аспекты проблемы космического мусора. В 2007 году были приняты разработанные Комитетом Руководящие принципы по предупреждению образования космического мусора⁵. В данном рекомендательном документе сформулированы ориентиры для государств и международных организаций, которых следует придерживаться при планировании полётов, проектировании, изготовлении и эксплуатации космических аппаратов и орбитальных ступеней ракет-носителей⁶. При разработке Руководящих принципов Комитет ООН по космосу опирался на Свод руководящих принципов предупреждения образования космического мусора, разработанный Межагентским координационным комитетом по космическому мусору (МККМ)⁷.

¹См.: NASA Orbital Debris Quarterly News, March 2022. URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv26i1.pdf> (датаобращения: 20.03.2022); Space debris by the numbers. URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers(датаобращения: 20.03.2022).

²Подробнее см.: Stubbe P. State Accountability for Space Debris. A Legal Study of Responsibility for Polluting the Space Environment and Liability for Damage Caused by Space Debris. Leiden. Boston: Brill, 2018. P. 1-4; Freeland S. Space Debris: A Major Challenge for the Future of Humanity // ILA Reporter. 12 July 2021. URL: <https://ilareporter.org.au/2021/07/space-debris-a-major-challenge-for-the-future-of-humanity-steven-freeland/>(датаобращения: 20.03.2022).

³См. пункты 15-16 резолюции Генеральной Ассамблеи ООН 76/76 от 09.12.2021 «Международное сотрудничество в использовании космического пространства в мирных целях». URL: https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/resolutions/2022/general_assembly_76th_session/ares7676_html/AR-ES_76_076R.pdf(дата обращения: 20.03.2022).

⁴Пункт 1 резолюции Генеральной Ассамблеи ООН 1472 (XIV) А от 12.12.1959 «Международное сотрудничество в области использования космического пространства в мирных целях».

⁵Одобрены Генеральной Ассамблеей ООН в её резолюции 62/217 от 22.12.2007. Текст Руководящих принципов см.: Международное космическое право: документы организации Объединённых Наций. Нью-Йорк: ООН, 2017. С. 89-93.

⁶Там же. С. 91.

⁷Приняты в 2002 году, пересмотрены в 2007, 2020 и 2021 годах. Актуальный текст Свода руководящих принципов МККМ (по состоянию на 20.03.2022) см.: IADC SpaceDebrisMitigationGuidelinesRev 3. URL: https://www.iadc-home.org/documents_public/view/id/172#u (дата обращения: 20.03.2022).

Принятые Комитетом ООН по космосу в 2019 году Руководящие принципы обеспечения долгосрочной устойчивости космической деятельности⁸ также содержат ряд рекомендаций, применимых в отношении космического мусора⁹.

Упомянутые документы Комитета ООН по космосу и МККМ, несмотря на их рекомендательный характер, соблюдаются целым рядом государств 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 обновляется¹⁰. Вклад в эту работу внесли, среди прочих, Европейское космическое агентство¹¹, Международная организация по стандартизации (ИСО)¹² и Международный союз электросвязи (МСЭ)¹³.

Вопросы снижения техногенной засорённости космоса исследуются также рядом международных неправительственных организаций (к примеру, Международной академией астронавтики (IAA)) и профессиональных объединений (например, SpaceSafetyCoalition). Международному сообществу предлагаются различные подходы к решению обозначенной проблемы без «привязки» к Комитету ООН по космосу и другим традиционным (т.е. межгосударственным) площадкам¹⁴.

Важно понимать, что любые практические инструменты по борьбе с космическим мусором должны получить надлежащее правовое оформление. Спектр нерешённых 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 причинён 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. Упомянутые 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 1967 года¹⁵ – являются обязательными и формируют базовый режим всей космической деятельности. Однако применимость этих универсальных норм к

⁸Приложение II к документу ООН A/74/20 «Доклад Комитета по использованию космического пространства в мирных целях. Шестидесятвторая сессия (12–21 июня 2019 года)». URL: https://www.unoosa.org/oosa/en/oosadoc/data/documents/2019/a/a7420_0.html (дата обращения: 20.03.2022).

⁹В первую очередь, Руководящий принцип A2 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 засорённостью космического пространства в долгосрочной перспективе.

¹⁰См.: Compendium of space debris mitigation standards adopted by States and international organizations. URL: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/space-debris/compendium.html> (дата обращения: 20.03.2022).

¹¹ESA SpaceDebrisMitigationPolicyforAgencyProjects. URL: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/ESA.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).

¹²International Organization for Standardization (ISO): Standards and technical reports. URL: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/ISO20180921.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).

¹³International Telecommunications Union (ITU): Recommendation ITU-R S.1003.2. URL: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/ITU.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).

¹⁴См., например: Best Practices for the Sustainability of Space Operations. URL: https://spacesafety.org/wp-content/uploads/2019/11/Endorsement-of-Best-Practices-for-Sustainability_v28.pdf (дата обращения: 20.03.2022); NetZeroSpace. URL: <https://parispeaceforum.org/en/initiatives/net-zero-space/> (дата обращения: 20.03.2022).

¹⁵См.: Международное космическое право: документы организации Объединённых Наций. Нью-Йорк: ООН, 2017. С. 3-9.

проблеме уменьшения техногенного засорения и засорённости космоса опосредована и не всегда однозначна. До тех пор, пока не будет выработан специальный международно-правовой 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.

Литература:

1. Документ ООН A/74/20 «Доклад Комитета по использованию космического пространства в мирных целях. Шестидесят вторая сессия (12–21 июня 2019 года)».
2. Международное космическое право: документы организации Объединённых Наций. Нью-Йорк: ООН, 2017. 106 с.
3. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН 1472 (XIV) Аот 12.12.1959 «Международное сотрудничество в области использования космического пространства в мирных целях».
4. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН 62/217 от 22.12.2007 «Международное сотрудничество в области использования космического пространства в мирных целях».
5. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН 76/76 от 09.12.2021 «Международное сотрудничество в использовании космического пространства в мирных целях».
6. Best Practices for the Sustainability of Space Operations. URL: https://spacesafety.org/wp-content/uploads/2019/11/Endorsement-of-Best-Practices-for-Sustainability_v28.pdf (дата обращения: 20.03.2022).
7. Compendium of space debris mitigation standards adopted by States and international organizations. URL: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/space-debris/compendium.html> (дата обращения: 20.03.2022).
8. ESA Space Debris Mitigation Policy for Agency Projects. URL: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/ESA.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).
9. Freeland S. Space Debris: A Major Challenge for the Future of Humanity // ILA Reporter. 12 July 2021. URL: <https://ilareporter.org.au/2021/07/space-debris-a-major-challenge-for-the-future-of-humanity-steven-freeland/> (дата обращения: 20.03.2022).
10. IADC Space Debris Mitigation Guidelines Rev 3. URL: https://www.iadc-home.org/documents_public/view/id/172#u (дата обращения: 20.03.2022).
11. ISO Standards and technical reports. URL: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/ISO20180921.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).
12. NASA Orbital Debris Quarterly News. March 2022. URL: <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv26i1.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).
13. NetZeroSpace. URL: <https://parispeaceforum.org/en/initiatives/net-zero-space/> (дата обращения: 20.03.2022).
14. Recommendation ITU-R S.1003.2. URL: <https://www.unoosa.org/documents/pdf/spacelaw/sd/ITU.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).
15. Space debris by the numbers. URL: https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers (дата обращения: 20.03.2022).
16. Stubbe P. State Accountability for Space Debris. A Legal Study of Responsibility for Polluting the Space Environment and Liability for Damage Caused by Space Debris. Leiden. Boston: Brill, 2018. 534 p.

УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМ ДВИЖЕНИЕМ МЕТОДОМ ЕДИНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ОПАСНЫХ СИТУАЦИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Павлова Е.А., Захваткин М.В., Лопаченко В.В., Стрельцов А.И., Степаньянц В.А.
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия
elenae312@gmail.com

Безопасность космической деятельности в околоземном пространстве - одно из важных направлений развития российской космической отрасли. Основной целью развития российского направления обеспечения безопасности должна составлять полная ситуационная осведомленность о деятельности в космическом пространстве, включая информативность об объектах техногенного и естественного происхождения, связанных с ними событиях в космосе и угрозах национальной безопасности.

Практический опыт мониторинга, предупреждения и предотвращения опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве подтверждает возникновение событий, представляющих риск для успешного осуществления космических миссий, выполнения целевых операций космического полета для аппаратов российской орбитальной группировки, перспективных многоспутниковых систем орбитальных группировок типа «Сфера», «Марафон IoT» и других приоритетных государственных задач в части наращивания орбитального потенциала России. В то же время, зона контроля опасных ситуаций существующими системами предупреждения диктуется традиционными рамками технических заданий, что накладывает существенные ограничения на контроль иных событий, возникающих в связи с возрастающей космической активностью и необходимостью обеспечения ее безопасности и долгосрочной устойчивости [1].

В сложившейся обостренной геополитической обстановке для минимизации определенных рисков важной задачей является выработка стратегий и правил поведения в космосе. Кроме того, необходимость решения задачи управления космическим движением определяется непрерывно возрастающей активностью участников космической деятельности в вопросах освоения околоземного пространства. Мировые космические державы на международных площадках предлагают различные подходы к решению задачи управления космическим движением, анализ которых показывает, что при таком существенном различии в подходах участникам будет сложно прийти к единому мнению и консолидированно решить задачу управления космическим движением [2].

Специалистами ИПМ им. М.В. Келдыша РАН предлагается собственный, отличающийся от предложений западных и проамериканских акторов, подход к решению задачи управления космическим движением и выработки «правил поведения в космосе», основанный на систематизации всех событий в едином классификаторе опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве, разработке критериев опасности для каждого отдельно взятого случая и принципов недопущения негативных сценариев.

Классификатор раскрывает полное представление о возможных событиях, наступление которых создаст угрозу безопасному проведению космических операций, с учетом их возможной конфигурации и сценариев развития [3].

Показано, что вероятность наступления опасной ситуации при превышении пороговых значений критериев опасности определяет необходимость управляющего воздействия на защищаемый объект (например, проведения маневра уклонения), как части общей стратегии управления космическим движением.

В докладе представлен подход к управлению космическим движением методом единой классификации опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве. Рассмотрены отдельные события в космосе, а также критерии опасности для принятия решений по парированию неблагоприятных последствий, учитывающие различные сценарии космической деятельности. Представлен цифровой двойник текущего состояния околоземного космического пространства [4].

Литература

1. Павлова Е.А., Воропаев В.А. Миссии и вызовы безопасности и долгосрочной устойчивости космической деятельности // Инженерный журнал: наука и инновации. 2021 №9(117)/2021.
2. Кутоманов А.Ю., Матюшин М.М., Павлова Е.А. Анализ российских и зарубежных подходов к организации управления космическим движением // Космонавтика и ракетостроение. 2022. № 1 (124). С. 5-12.
3. Павлова Е.А., Захваткин М.В., Стрельцов А.И., Воропаев В.А., Еленин Л.В. Формирование единого классификатора опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве // Космические исследования, издательство Наука (М.), том 59, № 2, С. 126-134.
4. Serebryanskiy A. Akniyazov Ch. Demchenko B. Komarov A. Omarov Ch. Reva I. Krugov M. Voropaev V. Statistical analysis of object congestion in the geostationary region // Acta Astronautica. 2021. Vol. 182, P. 424-431.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МКС КАК МУЗЕЯ НА ОРБИТЕ

Петрукович А.А., Эйсмонт Н.А., Зубко В.А., Беляев А.А.
Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
neismont@iki.rssi.ru

Международная Космическая Станция успешно функционирует на околоземной орбите уже более 20 лет. В течение этого времени она пополнялась новыми модулями и выполняемые на ее борту задачи постоянно расширялись и усложнялись. Соответственно изменялись и применяемые для решения этих задач бортовые системы. Причинами этих изменений были естественные моральное и физическое старение используемых компонентов и аппаратуры. Начиная с какого-то момента стали выдвигаться предложения вывести МКС из эксплуатации и свести с орбиты, как это было сделано со станцией Мир. Однако такой подход вызывает серьезные сомнения в его целесообразности. И цена операций по сведению станции с орбиты, хотя и является существенной, не играет решающей в выборе дальнейшей судьбы станции. Это уникальное космическое устройство помимо своей роли выполнения продолжающихся научных исследований, может, безусловно, рассматриваться как исторический памятник.

В предлагаемом докладе рассматриваются способы перевода МКС в режим эксплуатации, который позволит в дальнейшем играть именно эту научно-историческую роль.

Предлагается выполнить операции по подъёму высоты круговой орбиты станции на 200 км по отношению к принятому рабочему значению. После этого станция будет переведена в режим эксплуатации вахтового характера, т.е. с её периодическими миссиями посещения и обслуживания. Что не исключает научных исследований и, быть может, решения задач космического туризма.

Указанная выше высота орбиты выбирается на основе опыта эксплуатации космического аппарата Хаббл, который, как известно, эксплуатируется более 30 лет без использования ракетных двигателей для компенсации аэродинамического торможения. При этом, с другой стороны, принималось во внимание ограничение допустимой высоты сверху в силу приближения к радиационным поясам с ростом высоты орбиты.

Для перевода станции на более высокую орбиту предлагается использовать космический буксир с электроракетным двигателем. В работе даются оценки времени для выполнения операций повышения орбиты до предлагаемой высоты и необходимые затраты рабочего тела, в качестве которого предлагается широко используемый для этих целей ксенон. Это время зависит от удельного импульса двигателя и располагаемой мощности энергетической установки. Как реалистичные величины принимаются характеристики уже существующих двигателей. Что касается располагаемой электрической мощности, оценки базируются на приводимые в открытой литературе значения.

МЕТОДЫ ПАРИРОВАНИЯ УГРОЗЫ СТОЛКНОВЕНИЙ С АСТЕРОИДАМИ И КОМЕТАМИ

Рогачёв В.Г., Стародубцев П.В.
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия
[oefimova@otd13.vniief.ru](mailto: oefimova@otd13.vniief.ru)

В докладе приводится обзор современных предложений по устранению угроз, связанных с возможностью столкновения Земли с крупными космическими объектами [1, 2]. Общеизвестно, что результат операции противодействия должен прогнозироваться однозначно и гарантировать безопасность.

Рассмотрены методы отклонения астероидов, необходимые для их реализации технические средства [3, 4] и пространственно-временные ограничения, накладываемые этими средствами.

Наиболее перспективным способом защиты на современном уровне развития технической проработки проблемы авторам представляется разрушение астероида за счет действия мощных ударных волн. Для реализации этого способа предлагается использовать энергию ядерного взрыва, что было ранее рассмотрено в широком круге расчётно-теоретических работ [5].

Отмечается, что большинство идей по организации непосредственного противодействия (т.е. недопущения катастрофического столкновения) страдает недостатком количественных оценок различных аспектов проблемы. В докладе сообщается о работе, проделанной с целью смоделировать на мини-макетах разрушительное воздействие ядерного взрыва на астероиды с помощью импульсного лазерного излучения. Анализ результатов экспериментальных и расчётных исследований позволил предложить рекомендации по мощности контактных ядерных взрывов в борьбе с опасными астероидами [6, 7]. Авторы считают, что данный подход открывает перспективы в исследованиях астероидной проблематики.

Представлены предложения по возможным опытам на основе методов подобия, с помощью которых можно моделировать как слабые, так и сильные воздействия в рамках стратегии увода или манёвра опасных астероидов. Отмечена целесообразность кооперации усилий различных институтов при проведении этих работ.

Литература

1. Артемьев Н.А., Баканас Е.С., Барабанов С.И. и др. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. Под редакцией Шустова Б.М., Рыхловой Л.В. // ФИЗМАТЛИТ. 2010. 283 с.
2. Шустов Б.М. О роли науки в изучении и парировании космических угроз. // Вестник российской академии наук. 2019. Том 89, №8. С. 777-799.
3. Шубин О.Н. // Сборник по итогам круглого стола на тему «О разработке мер по обеспечению планетарной защиты от космических рисков и угроз». Комитет Совета Федерации по науке. 2013. С. 43-45.
4. Акимов В.А., Глазачев Д.О. и др. Астероидно-кометная опасность: стратегия противодействия / Под общей редакцией В.А. Пучкова / М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. 272 стр.
5. Шаненко А.К. Возможность предотвращения столкновения астероида Апофис с Землёй с помощью ядерных взрывов. // Атомная энергия. 2014. Том 116, вып. 1. С. 47-52.
6. Аристова Е.Ю., Аушев А.А. и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерных взрывов на опасные астероиды. // ЖЭТФ. 2018. Том 153, вып. 1. С. 157-172.
7. Белов И.А., Бельков С.А. и др. Лазерное моделирование разрушительного воздействия ядерного взрыва на ледяные и железные астероиды. ЖЭТФ, 2020 г, том 157, вып. 5. С. 928-935.

СИСТЕМА МОНИТОРИНГА И ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБ АСТЕРОИДНО-КОМЕТНОЙ ОПАСНОСТИ КАК ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА. МЕТОД СТРУКТУРНОЙ НАДЁЖНОСТИ

Савельев М.И.
ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)
savelev-22@mail.ru

Проблема астероидно-кометной опасности – это аспект глобального характера, связанная с угрозой столкновения с Землей с малыми телами Солнечной системы. В нынешних условиях это столкновение стало бы неизбежным, а по своим последствиям было бы сопоставимо с ограниченной термоядерной войной. Астероидно-кометная опасность (далее АКО) может стать источником природно-техногенной чрезвычайной ситуации космического происхождения. Несмотря на всю серьезность угрозы и катастрофичность возможных последствий, Земля плохо подготовлена к потенциальному столкновению с опасными небесными телами (далее – ОНТ). Для принятия мер по противодействию и (или) проведению превентивных мероприятий по защите территорий и населения от АКО может быть отведено очень мало времени.

В целях уменьшения ущерба и людских потерь назрела объективная потребность в создании системы предупреждения и парирования астероидно-кометной опасности и, в первую очередь – систему мониторинга и предупреждения астероидно-кометной опасности (далее – СМП АКО), которая должна стать её подсистемой. При её разработке следует выделить следующие основные проблемы реагирования на астероидно-кометную опасность. Прежде всего, решить проблему обнаружения и выявления опасных тел, проблему определения степени угроз и своевременного предупреждения об угрозах АКО, проблему рискови оценки оперативной обстановки в зоне проявления АКО с последующим принятием неотложных мер по уменьшению ущерба и снижению возможных людских потерь.

Основу технического облика СМП АКО должны составлять ситуационно-аналитический центр, телекоммуникационную сеть, астрономические инструменты оптического и радиолокационного диапазонов наземного и космического базирования, аппаратно-программный комплекс моделирования возможных сценариев эволюции опасных небесных тел и оценки рисков в зоне чрезвычайной ситуации, обусловленной проявлением поражающих факторов АКО. Данная система должна строиться на принципах функционально-управляющей системы и функционировать совместно системой космического мониторинга чрезвычайных ситуаций МЧС России (далее – СКМ МЧС России). Последняя призвана обеспечить по данным дистанционного зондирования из космоса проведение оценки оперативной обстановки в зоне чрезвычайной ситуации, источником которой является АКО.

В целом необходима интеграция указанных систем в комплексную многофункциональную систему предупреждения и парирования астероидно-кометной опасности (далее – Систему) с топологией, обладающей структурной надёжностью, как по отношению к СМП АКО, так и в отношении СКМ МЧС России.

Предлагается достаточно простой в употреблении графоаналитический метод приближенных вычислений структурной надёжности Системы. Для чего топология Системы отображается в виде взвешенного графа $G_c = (A_c, X_c)$ с множеством вершин A_c и дуг X_c . Каждой вершине $a_i \in A_c, \forall i = \overline{1, N}$ ставится в соответствие конкретный орган управления или ситуационный центр Системы, а дуге $x_{ij} \in X_c, \forall i = \overline{1, N}; \forall j = \overline{1, M}$ – линии взаимодействия по каналам связи. Веса дуг характеризуются вероятностями наличия связи между органами управления и (или) ситуационными центрами в условиях воздействия поражающих факторов АКО.

Принимая во внимание, что Система относится к классу сложных информационно-аналитических систем, то граф $G_c = (A_c, X_c)$, отображающий её структуру, будет содержать, как зависимые и независимые пути между произвольными вершинами графа. Согласно теории графов данные свойства графа позволяют отнести его топологию соответственно к графу типа **Н** с непараллельно-последовательной структурой и графу типа **П** параллельно-последовательной структурой.

Сущность предлагаемого метода заключается в определении на основе вероятной связности графа $G_c = (A_c, X_c)$ наличие всех вероятных путей между его произвольными вершинами (от управляющего к управляемому объекту), включая подграф типа **П** с независимыми путями $G'_{сн} = (A_c, X'_{сн})$, $\forall X'_{сн} \supseteq X_c$ и подграф типа **Н** $G'_{сз} = (A_c, X'_{сз})$, $\forall X'_{сз} \supseteq X_c$ с зависимыми (общими) дугами. В дальнейшем осуществляется его преобразование в подграф типа **П'** с условно независимыми путями и введением соответствующей поправки в формулу расчёта надёжности для параллельной структуры с условно независимыми путями.

Для расчёта структурной надёжности Системы разработана соответствующая процедура введения поправки, учитывающей зависимость путей в математическое выражение надёжности для параллельной структуры.

Предложенный графоаналитический метод позволяет проводить расчёты структурной надёжности сложных информационно-управляющих систем и оптимизировать их конфигурацию.

ПРОБЛЕМА ТЕМНОГО И СПОКОЙНОГО НЕБА (DARK AND QUIET SKY)

Шустов Б.М.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

bshustov@inasan.ru

В последние годы большое внимание в мире уделяется проблеме влияния технологий на перспективы развития астрономических наблюдений с поверхности Земли и из околоземного космического пространства. Это проблема глобальная и поэтому все международное научное сообщество заинтересовано в том, чтобы защитить возможность проведения во всем мире астрономических наблюдений от неблагоприятных искусственных помех. Выделяют три категории таких искусственных помех, отрицательно влияющих на астрономические наблюдения: а) освещение городов или искусственное освещение в ночное время; б) оптические/инфракрасные следы спутников на низкой околоземной орбите; и с) передача радиосигналов наземными и космическими излучателями, особенно со спутников на низкой околоземной орбите. Если с первой категорией помех человечество сталкивается уже давно и в меру возможностей разрабатывает и применяет меры технического и организационного характера, то обострение озабоченности помехами категорий б) и в) связано с бурным развертыванием большого количества спутников на низких околоземных орбитах, предназначенных для обеспечения глобальной сетевой связи. Примеры таких спутниковых созвездий, реализация которых идет полным ходом, известны всем. Это мегасозвездия Starlink, OneWeb, Amazon, Samsung и др., включая отечественный проект «Сфера».

За последние два года астрономы и другие эксперты по наблюдениям объектов в ОКП провели несколько конференций по данной тематике. Одной из самых представительных стала конференция «Темное и спокойное небо науке и обществу», которая была проведена в режиме онлайн 3–7 октября 2021 г. Проблема темного и спокойного неба (Dark and Quiet Sky) была вынесена на повестку дня на заседании Научно-технического подкомитета ООН Комитета по мирному использованию космоса в феврале 2022 г. Международный астрономический союз создаёт центр, который поможет астрономам справиться с воздействием мегагруппировок спутников на астрономические наблюдения. Этот центр (Centre for the Protection of the Dark and Quiet Sky from Satellite Constellation Interference) будет действовать на базе исследовательской лаборатории NOIRLab и обсерватории SKAO. Он начнёт свою работу 1 апреля. В общем, астрономическое сообщество активно готовится к парированию опасностей, связанных с проблемой Dark and Quiet Sky, и Россия не может оставаться в стороне. В докладе обсуждаются как технические, так и организационные аспекты проблемы тихого и спокойного неба в привязке к российским реалиям.

КОНЦЕПЦИЯ ПЛАНЕТАРНОГО ЩИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АСТЕРОИДА НА РЕЗОНАНСНОЙ ОРБИТЕ

Эйсмонт Н.А., Зубко В.А., Беляев А.А., Федяев К.С.

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

neismont@iki.rssi.ru

Работа является продолжением исследования возможности отклонения потенциально опасных околоземных астероидов от траектории столкновения с Землей при помощи малых естественных небесных тел ("астероидов-снарядов"), заранее переведенных на орбиту, резонансную в соотношении 1:1 с орбитой Земли, посредством размещенной на их поверхности двигательной установки и гравитационного маневра у Земли. Идея такого подхода была предложена ранее, при этом для обеспечения его достаточной эффективности предлагалось использовать несколько подобных "астероидов-снарядов", сближающихся с Землей в разных точках ее орбиты. В настоящей работе показано, что эффективность подхода обеспечивается и при наличии только одного "астероида-снаряда". Также в рамках данного подхода оценивается минимально допустимый интервал времени между обнаружением потенциально опасного астероида ("астероида-мишени") и попаданием в него "астероида-снаряда".

Предлагаемая концепция планетарного щита с единственным "астероидом-снарядом" состоит в том, что этот астероид находится на гелиоцентрической орбите с периодом, равным периоду орбитального вращения Земли. При обнаружении потенциально опасного объекта "астероид-снаряд" переводится на траекторию одного или нескольких облетов Земли и последующего столкновения с "астероидом-мишенью". При наличии свободного выбора параметров траектории сближения с Землей можно утверждать, что возможно достижение любого направления гиперболического вектора скорости "астероида-снаряда" относительно Земли. Были исследованы возможные сценарии реализации концепции при условии, что "астероид-мишень", летящий с любого направления, перехватывается задолго до того, как он может врезаться в Землю. Поверхность точек перехвата образуется положениями "астероида-снаряда", которые могут быть им достигнуты после последнего гравитационного маневра, направляющего этот астероид к цели. Эта поверхность меняется со временем, расширяясь, до неизбежной встречи с целью.

В работе представлены результаты моделирования сценария реализации концепции с использованием реальных "астероидов-снарядов" и виртуальных потенциально опасных объектов. Обсуждается, как в качестве планетарного щита построить упомянутую поверхность точек перехвата таким образом, чтобы обеспечить попадание "астероида-снаряда" в любой потенциально опасный объект, предотвращая его столкновение с Землей.

СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ

МОНИТОРИНГ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДИСБАЛАНСА И КЛИМАТА ЗЕМЛИ, А ТАКЖЕ ЭКЗОПЛАНЕТ С ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ

Абдусаматов Х.И.

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

abduss@gaoran.ru

Высокоточный мониторинг абсолютной величины энергетического дисбаланса Земли (ЭДЗ) между интегральной мощностью потока солнечного излучения, поступившего на внешние слои атмосферы – солнечной постоянной (СП), и потоков, ушедших в космос за счет отражения от поверхности и атмосферы (сферическое альbedo Бонда), а также собственного теплового излучения – важнейшая проблема в исследованиях изменения энергетики и климата Земли и обуславливающих эти изменения физических механизмов. Научно обоснованные исследования климата и прогноз его грядущих глубоких изменений в перспективе должны основываться на высокоточных ($\approx 0.1\%$) непрерывных однородных данных о среднегодовом ЭДЗ, полученных на постоянной основе в течение многих десятилетий. Изменение ЭДЗ, независимо от его причин, за период около 30 лет и более является основным показателем последующего изменения климата и глобальной температуры. Это непременно требует создания и использования новых долгосрочно стабильных фиксированных космических платформ для постоянного и непрерывного репрезентативного наблюдения одновременно за всей земной поверхностью. В настоящее время радиометрами измеряются интегральные мощности составляющих ЭДЗ с помощью КА на низкоорбитальных и геостационарных спутниках, которые могут наблюдать только ограниченные области Земли. При этих наблюдениях погрешность измерений с ошибками калибровки составляет порядка 1% [1,2]. Кроме того, эти КА имеют относительно короткий срок службы, что исключает проведение крайне необходимых достаточно длительных высокоточных и однородных измерений абсолютной величины ЭДЗ. Видимая поверхность Луны является идеальной стабильной платформой в космосе для проведения на временных масштабах многие десятилетия непрерывных наблюдений одновременно всей поверхности Земли только в ночное время, когда температура стабилизируется на уровне около 100 К. Разрабатываемая нами Лунная обсерватория (ЛО) представляет собой единую систему двух специальных оптических роботизированных телескопов-близнецов с апертурой 300 мм (СОТР-300К), функционирующую последовательно в автоматическом режиме как единый телескоп, по единой научной программе наблюдений Земли: рабочее поле зрения $\varnothing 132$ угл.мин.; с многоканальными спектрально-разделенными широко- и узкополосными спектроболометрами (взамен традиционно используемых интегральных радиометров); защита от лунной пыли и ее наэлектризованности – выдвижной козырек и обеспечение стока зарядов. Разработана внеосевая трехзеркальная оптическая система СОТР-300К с матричным микроболометрическим приемником излучения ($\sim 2048 \times 2048$ пикс) динамическим диапазоном четыре порядка, чувствительные элементы которой покрыты золотой чернью. СОТР-300К будут располагаться вдоль экваториальной зоны на противоположных краях Луны на удалении $\pm (80.9 \pm 0.1^\circ)$ от ее видимого центра. Последовательное использование двух близнецов СОТР-300К позволяет вести наблюдения Земли непрерывно в ночное время в течение более 94% лунных суток. Разработанная система близнецов СОТР-300К и их защита от лунной пыли и ее наэлектризованности защищены 4-мя патентами РФ: №№ 2613048, 2591263, 164303 и 155044. Система СОТР-300К позволит измерять комплекс глобальных климатических параметров: энергий, отраженной Землей доли солнечного излучения в диапазоне 0.2–4 мкм, и теплового излучения самой планеты в диапазоне 4–50 мкм с целью изучения взаимосвязи этих вариаций с изменениями СП, ЭДЗ и климата. Определение относительного вклада парниковых газов в атмосфере в климатические изменения, независимо от причин их вариаций, будет осуществляться по дополнительному каналу мониторинга уходящей в космос энергии в полосе 8–13 мкм окна прозрачности атмосферы. Мониторинг и исследование долговременных однородных высокоточных данных ЭДЗ являются

необходимым условием глубокого понимания физических механизмов изменения климата и определения закономерностей его формирования. Долговечность лунной платформы, ее неизменная температурная стабильность около 100 К в ночное время и одновременный обзор всего диска Земли, и его непрерывные наблюдения в течение более 94% лунных суток разработанным нами системой НА позволит проводить однородные измерения абсолютных среднегодовых значений ЭДЗ и его составляющих с точностью $\approx 0.1\%$ в течение многих десятилетий.

ЛО предназначена для решения важнейших научно-прикладных проблем:

- Мониторинг мощности потоков энергий отраженного планетой солнечного излучения и исходящего собственного теплового излучения Земли в диапазонах 0.2-4 и 4-50 мкм;

- Мониторинг потока собственного теплового излучения Земли в диапазоне 8-13 мкм окна прозрачности атмосферы для изучения вклада парниковых газов в изменение климата;

- Исследование важнейшего климатообразующего физического процесса по динамике соотношения потоков энергий излучения между низкими и высокими широтами;

- Исследование облачного и снежно-ледяного покровов, растительности, концентраций аэрозолей и озона, и др. по мониторингу в 10 узких полосах диапазона 0.3-3 мкм;

- Изучение величины среднегодового ЭДЗ – накопления тепла или его дефицита в Океане с использованием известных значений СП; их зависимость от циклических вариаций СП;

- Исследование вариаций сферического альбедо Бонда планеты и физических параметров атмосферы и поверхности в зависимости от циклических изменений СП;

- Определение физических механизмов формирования, причины и закономерности изменения климата, направления и глубины его изменений;

- Создание недостающей, крайне необходимой, наиважнейшей фундаментальной базы высокоточных среднегодовых данных ЭДЗ и его составляющих;

- Поиск экзопланет в свободной от наблюдений Земли дневное время последовательно системой СОТР-300К методом транзитов в диапазоне 0.2-4 мкм.

Общая конфигурация научной полезной нагрузки: масса одного комплекса НА СОТР-300К с облегченными зеркалами в защитной (от заряженных частиц лунной пыли) чаше без солнечных батарей, аккумуляторов и двигателей мягкой посадки менее 100 кг, а его габариты менее $1500 \times 1500 \times 1500$ мм³; требуемая электрическая мощность – при наблюдении Земли ночью менее 100 Вт, а при наблюдении экзопланет днем – около 200 Вт. СОТР-300К устанавливается в центральной зоне специально оборудованной пылезащитной чаши на высоте более 1000 мм над поверхностью (рис. 1,2). Специальная пылезащитная чаша будет приспособлена как посадочный модуль с двигателями мягкой посадки для установки телескопа на лунной поверхности (аналогично установке китайского Lunar-based Ultraviolet Telescope [3]). Комплекс СОТР-300К не требует установки на поверхности Луны, обслуживания и настройки космонавтами. Ежемесячная калибровка близнецов СОТР-300К между собой производится по результатам их одновременных параллельных измерений в течение 30 час в период каждого новолуния. Слежение за Землей будет осуществляться ступенчато интервалом через каждые 6-16 час, поскольку земной диск висит в небе Луны почти неподвижно, а его изображение всегда будет несколько меньше размера площадки чувствительных элементов приемника излучения. ЛО в течение более 15 лет впервые обеспечит важнейшими однородными высокоточными данными об абсолютной величине ЭДЗ и накапливаемого ежегодно избытка или дефицита энергии в Океане благодаря его термической инерции. Это позволит калибровать и определять зависимость мощности среднегодового ЭДЗ от циклических вариаций СП. Полученная зависимость будет надежным индикатором для реконструкции изменений ЭДЗ за весь период космических высокоточных измерений СП с 1978 г., что позволит впервые надежно и достоверно выявить физические механизмы

формирования, причины и закономерности изменений климата за период ~ 70 лет и разработать наиболее надежные методы его прогнозирования.

СОТР-300К снабжен сменным матовым стеклом, устанавливаемым на его входном зрачке во время проведения ежемесячного контроля стабильности чувствительности матричного приемника излучения. На рис. 1 представлен общий вид СОТР-300К в продольном разрезе с откинутым матовым стеклом, а на рис. 2 его общий вид, где 1 – герметичная труба; 2 – 1-ое вогнутое зеркало; 3 – 2-ое выпуклое зеркало; 4 – 3-ье вогнутое зеркало; 5 – ФПУ; 6 – входной зрачок с диаметром D ; 7 – противозасветочные бленды; 8 – выдвижной козырек; 9 – механизм перемещения выдвижного козырька с приводом 10; 11 – матовое стекло; 12 – шарнир с приводом; 13 – пылезащитная чаша; 14 – неподвижное основание монтировки; 15 – вращающаяся U-образная верхняя часть монтировки 14 по азимуту вокруг вертикальной оси; 16 – средства поворота верхней части монтировки по азимуту; 17 – средства поворота трубы по высоте вокруг горизонтальной оси; 18 – опорные ноги чаши высотой по вертикали порядка 300 мм; 19 – поверхность Луны; длина выдвинутой от входного зрачка части козырька $L = \operatorname{tg} \gamma (D+a+b)$; a – расстояние от внешней верхней поверхности выдвижного козырька 7 до входного зрачка 6 телескопа; b – расстояние от нижнего края входного зрачка 6 телескопа до нижней наружной

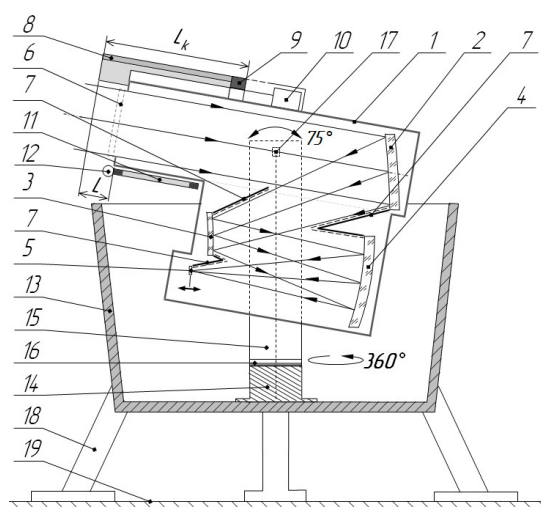


Рис. 1. СОТР-300К с откинутым матовым стеклом в пылезащитной чаше в продольном разрезе.

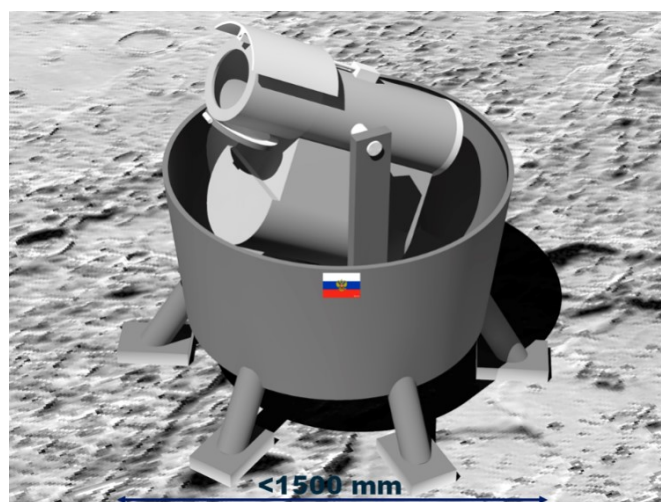


Рис. 2. Общий вид комплекса СОТР-300К на поверхности Луны без солнечных батарей и двигателей мягкой посадки.

поверхности переднего торца его трубы 1; $\gamma < 20^\circ$ – угол наклона оптической оси телескопа относительно поверхности Луны при наблюдениях Земли. Длина выдвижного козырька L_k равна максимально возможной величине L , а его ширина H существенно больше диаметра входного зрачка D телескопа. Блинецы СОТР-300К системы в спектральном диапазоне 0.2–4 мкм последовательно будут использоваться в дневное время для изучения экзопланет, когда они свободны от наблюдений Земли в ночное время.

ЛО является уникальным проектом и решаемые в ней важнейшие научно-прикладные проблемы не могут быть выполнены никакими другими альтернативными «нелунными» средствами. Градиент абсолютной величины СП в течение четырех последовательных минимумов 11-летних циклов указывает, что фаза спада квазидвухвекового цикла началась в ~ 1990 г. с наступлением глубокого минимума СП маундеровского типа в 2042 ± 11 г. Это требует реализации ЛО ориентировочно до 2028–2030 г. и дальнейшего непрерывного отслеживания колебаний ЭДЗ в течение всего XXI века. Цели и задачи, состав НА, пути и методы реализации разрабатываемой нами Лунной обсерватории целиком и полностью поддержаны и согласованы с Арктическим и Антарктическим НИИ Росгидромета, Aerospace Information Research Institute of the Chinese Academy of Sciences (CAS), Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology CAS, International Society for Digital Earth ISC, General National Space Science Center CAS. Реализацию ЛО планируется осуществить совместно: институтами РАН, Росгидромета и CAS.

Литература

1. Trenberth K.E., Fasullo J.T., Kiehl J. Earth's global energy budget // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2009. V. 90. P. 311-323.
2. Abdussamatov H.I. Comparative analysis of errors in monitoring the Earth's global energy budget by the Lunar Observatory and orbiters // Izv., Atmos. Oceanic Phys. 2018. V. 54. P. 1341.
3. Wang J., Meng X.M. et al. 18-Months operation of Lunar-based Ultraviolet Telescope: a highly stable photometric performance // Astrophys. & Space Sci. 2015. V. 360. P. 1-5.

УСРЕДНЁННАЯ ФАЗОВАЯ КРИВАЯ ДЛЯ АСЗ

Виноградова Т.А.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

tvinog@mail.ru

В настоящее время для вычислений видимой звездной величины астероидов V в визуальной полосе спектра фотометрической системы UBV применяется следующая формула [Bowell et al., 1989]:

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

Здесь H — абсолютная звездная величина астероида, r — расстояние от астероида до Солнца, d — расстояние от астероида до Земли, f — некоторая известная функция, зависящая от угла фазы α и параметра наклона G . Угол фазы определяется, как угол Земля-астероид-Солнце. Параметр наклона G определён для незначительного количества астероидов. Найденные значения для этого параметра варьируются в пределах от -0.12 до 0.60 . Для прочих астероидов значение G принимается равным 0.15 .

Под фазовой кривой блеска астероида понимается зависимость блеска астероида V от фазового угла α . При этом блеск уже должен быть освобожден от эффектов вращения астероида вокруг своей оси и изменения расстояний астероида от Солнца и Земли. При прочих равных условиях блеск астероида, естественно, уменьшается с увеличением фазы. Если абсолютная звездная величина H и параметр наклона G для астероида определены, то фазовая кривая описывается формулой $H + f(G, \alpha)$. Можно исключить из рассмотрения величину H и рассматривать в качестве фазовой кривой только функцию $f(G, \alpha)$. Для разных значений G эта кривая будет выглядеть по-разному. Но поскольку параметр G для астероидов неизвестен, используется значение $G=0.15$, и тогда вычисленная фазовая кривая $f(0.15, \alpha)$ будет одинаковой для всех астероидов.

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 Землёй (АСЗ). Поэтому эти астероиды наилучшим образом подходят для получения фазовой кривой на большом интервале фазовых углов.

В данной работе были исследованы более 800 нумерованных АСЗ, 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 наблюдаемой звездной величины независимо от того в какой полосе спектра производились наблюдения. Затем было произведено численное интегрирование уравнений движения, в процессе которого для каждого наблюдения были вычислены расстояния r , d и фазовый угол α . С использованием этих величин по общепринятой формуле [Bowell et al., 1989] была вычислена поправка к видимой звездной величине $f_c(G, \alpha)$, вызванная эффектом фазы, и сама звездная величина V_c .

Наблюдаемая звездная величина V_o включает подобную поправку за фазу в скрытом виде. Для её выявления, из V_o необходимо вычесть абсолютную звездную величину H и влияние расстояний от астероида до Солнца и Земли: $f_o(\alpha) = V_o - H - 5 \lg(rd)$. После этого становится возможным сравнение наблюденной и вычисленной фазовых кривых.

В результате проделанной работы были получены более 300 тыс. значений $f_o(\alpha)$ и разностей $(f_o(\alpha) - f_c(G, \alpha))$. Эти разности совпадают с разностями $V_o - V_c$. 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. 1), 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. Также должно каким-то образом усредниться и влияние неизвестного параметра G .

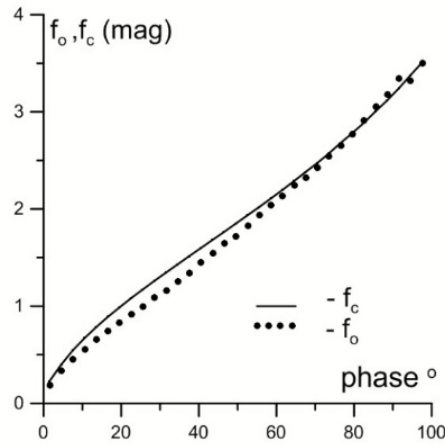


Рис. 1. Графики фазовых кривых: вычисленной $f_c(G, \alpha)$ и усреднённой $f_o(\alpha)$, полученной из наблюдений.

На Рис. 1 приведены графики усреднённой фазовой кривой $f_o(\alpha)$, полученной из наблюдений, а также $f_c(G, \alpha)$, вычисленной по формуле при значении $G = 0.15$. Сравнение полученных кривых показывает некоторое расхождение. Выбор другого значения G для вычисления $f_c(G, \alpha)$ не может полностью компенсировать это расхождение. Более наглядно различие между построенными кривыми можно видеть на графике разностей $f_o - f_c$ на Рис. 2.

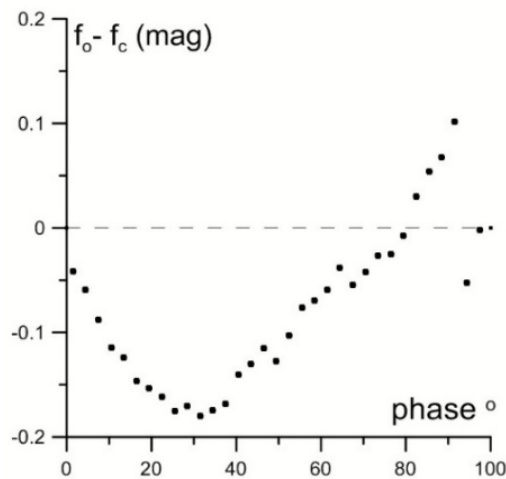


Рис.2. Разность между фазовыми кривыми $f_o - f_c$.

В итоге, можно сказать, что усреднённая суммарная фазовая кривая, полученная по наблюдениям большого количества АСЗ, отклоняется от фазовой кривой, вычисленной по формуле [Bowell et al., 1989], и варьирование параметра наклона G не может привести к совпадению этих кривых. При использовании для G общепринятого среднего значения 0.15^m максимальное отклонение составляет 0.2^m в окрестности угла фазы 30° , при этом разность $f_o - f_c$ отрицательна. Таким образом, астероиды при таких фазовых углах в среднем оказываются немного ярче, чем предсказывает формула.

Литература

1. Bowell E.G., Hapke B., Domingue D., Lumme K., Peltoniemi J., and Harris A.W. Application of photometric models to asteroids // In Asteroids II, edited by T. Gehrels, M. T. Matthews, R.P. Binzel, University of Arizona Press, 1989. P. 524–555

НАБЛЮДЕНИЯ НА РТ-22 КРАО МАЗЕРНОЙ ЛИНИИ H_2O НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1.35 CM В КОМЕТЕ C/2020 F3 (NEOWISE)

Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н., Малашевич С.В

Отдел радиоастрономии и геодинамики,

ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН», Ялта, Крым

volvach@craocrimea.ru

На 22-метровом радиотелескопе в Симеизе реализована возможность проведения исследований практически всех космических мазеров (мазеры OH , мазеры H_2O , мазеры метанола, SiO мазеры), а также спектральных наблюдений в диапазоне частот от 85 ГГц до 115 ГГц. Эти нововведения позволили начать изучение более слабых источников космического радиоизлучения, в том числе комет.

Комета была обнаружена на изображениях, сделанных 27 марта 2020 года в рамках программы изучения объектов, сближающихся с Землей, проводившейся широкоугольным инфракрасным обзором (NEOWISE).

Представлены результаты наблюдений кометы C/2020 F3 (NEOWISE) с помощью радиотелескопа РТ-22 в лаборатории радиоастрономии ФГБУН «КРАО РАН» в период прохождения кометой перигелия и минимального расстояния от Земли. Комета наблюдалась в линии H_2O на $\lambda=1.35$ см. Оценена газопроизводительность кометы по молекулам H_2O .

МИГРАЦИЯ ТЕЛ К ЗЕМЛЕ И ЛУНЕ С РАЗЛИЧНЫХ РАССТОЯНИЙ ОТ СОЛНЦА

Ипатов С.И., Маров М.Я.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

siipatov@hotmail.com, marovmail@yandex.ru

Исходные данные и алгоритмы. Проблема миграции небесных тел в Солнечной системе важна для понимания формирования и эволюции Солнечной системы [1-2]. Нами были проведены расчеты миграции тел под влиянием планет, на основании которых исследовались некоторые вопросы формирования Земли и Луны, а также доставка летучих к этим небесным объектам [3-7]. В каждом варианте расчетов начальные значения a_0 больших полуосей орбит 250 тел-планетезималей варьировались от $a_{\min}$ до $a_{\min}+d_a$, их начальные эксцентриситеты равнялись e_0 , а начальные наклонения равнялись $e_0/2$ рад. Для одинаковых пар ($a_{\min}$ и e_0) обычно проводилось несколько расчетов (каждый с 250 телами). Ниже в основном обсуждаются две серии расчетов, в которых рассматриваются: (1) тела с большими полуосями a_0 начальных орбит от 5 до 42.5 а.е. (с $a_{\min}$ от 5 до 40 а.е. и $d_a=2.5$ а.е.) и с $e_0=0.05$ или $e_0=0.3$, (2) тела с a_0 от 3 до 5 а.е. (с $a_{\min}$ от 3 до 4.9 а.е. и $d_a=0.1$ а.е.) и с $e_0=0.02$ или $e_0=0.15$. Учитывалось гравитационное влияние всех планет.

При интегрировании уравнений движения использовался пакет интегрирования SWIFT [8]. В сериях расчетов (1) и (2) вероятности столкновений тел с планетами и Луной вычислялись на основе массивов элементов орбит мигрировавших тел, так как эти вероятности малы. При рассмотрении скоростей столкновений планетезималей с Землей и Луной использовались также результаты моделирования миграции планетезималей, находившихся в зоне планет земной группы [6].

Вероятности столкновений тел-планетезималей с Землей: В [3] вероятность столкновений планетезималей с Землей оценивалась как $p_E=2 \times 10^{-6}$ для планетезималей из зон Юпитера и Сатурна. Для тел, первоначально имевших орбиты комет семейства Юпитера, p_E превышало 4×10^{-6} [9-12]. Значения p_E в среднем были меньше при больших начальных значениях a_0 больших полуосей орбит при $5 \leq a_0 \leq 40$ а.е. [4]. Значения $10^6 p_E$ для нескольких интервалов ($a_{\min}^*$, $a_{\max}^*$) значений a_0 представлены в таблице. Сначала вычислялись средние значения $10^6 p_E$ для различных пар ($a_{\min}$ и e_0). Затем на основе этих значений вычислялись значения $10^6 p_E$, которые являлись средними значениями $10^6 p_E$ для всех $a_{\min}$, для которых $a_{\min}^* \leq a_{\min}$ и $a_{\min}+d_a \leq a_{\max}^*$.

$a_{\min}^*-a_{\max}^*$	3-4	3-4	4-5	4-5	5-10	5-10	10-20	10-20	20-42	20-42
e_0	0.02	0.15	0.02	0.15	0.05	0.3	0.05	0.3	0.05	0.3
$10^6 p_E$	939	1879	24.3	8.5	4.6	3.6	257	2.3	1.4	1.0

Для некоторых значений $a_{\min}$ и e_0 значения p_E , вычисленные для 250 планетезималей могут отличаться в сотни раз для расчетов с почти одинаковыми начальными орбитами. Это отличие вызвано тем, что одна из тысяч планетезималей могла двигаться на орбите, пересекающей орбиту Земли, в течение миллионов лет. Такое отличие отмечалось ранее в [9-12] для орбит, первоначально пересекавших орбиту Юпитера. Среднее время движения объекта, первоначально пересекавшего орбиту Юпитера, по орбите, пересекавшей орбиту Земли, было около 30 тыс. лет. Большое значение p_E в таблице при $a_{\min}=10$ а.е. и $e_0=0.05$ было вызвано планетезималями, долгое время двигавшимися по орбитам, пересекавшим орбиту Земли. Большие значения $10^6 p_E$ в таблице для интервалов 3-4 а.е. вызваны большими (>2000) значениями $10^6 p_E$ при $a_{\min}=3.3$ и $a_{\min}=3.5$ а.е. для $e_0=0.02$, а также $10^6 p_E=6500$ при $a_{\min}=3.0$ а.е. и $10^6 p_E=11700$ при $a_{\min}=3.2$ а.е. для $e_0=0.15$. Если рассматривать только значения p_E для 8 других значений $a_{\min}$ для интервала 3-4 а.е., то имеем $10^6 p_E=22$ для $e_0=0.02$, и $10^6 p_E=70$ для $e_0=0.15$.

Общая масса земных океанов составляет около $2 \times 10^{-4} m_E$ (где m_E – масса Земли). При $p_E=4 \times 10^{-6}$ и при допущении, что суммарная масса планетезималей m_Σ на начальном

расстоянии от 5 до 10 а.е. от Солнца равнялась $100m_E$, суммарная масса $m_{\Sigma E}$ планетезималей, выпавших на Землю, составляла $4 \times 10^{-4} m_E$. Для зоны 10-40 а.е. при $p_E = 1.5 \times 10^{-6}$ и $m_{\Sigma} = 100m_E$ имеем $m_{\Sigma E} = 1.5 \times 10^{-6} m_E$. Для зоны 3-4 а.е. при $p_E = 10^{-3}$ и $m_{\Sigma} = 10m_E$ имеем $m_{\Sigma E} = 10^{-2} m_E$. Предполагаемое количество льда в кометах не превышает 33%. Однако некоторые авторы считают, что первичные планетезимали могли содержать больше льда (~50%), чем современные кометы. Приведенные выше оценки показывают, чтообщая масса льда воды, доставленного на Землю из-за орбиты Юпитера, могла быть сравнимой с массой земных океанов. Хотя тела в зоне внешнего астероидного пояса, вероятно, содержали меньше льдов (~10%), чем тела за орбитой Юпитера (возможно до 50%), из-за гораздо большей вероятности столкновений тела, пришедшие из зоны внешнего астероидного пояса, могли принести на Землю не меньше воды, чем тела из зоны планет-гигантов. Из-за уменьшения большой полуоси орбиты Юпитера, выбрасывавшего планетезимали на гиперболические орбиты, зона в астероидном поясе с большей вероятностью доставки планетезималей к Земле сдвигалась и со временем охватывала большее число планетезималей. Некоторая часть воды терялась при столкновениях планетезималей с планетами и особенно с Луной. Следовательно, количество воды, вошедшей в планеты земной группы и Луну, могло быть меньше, чем количество воды, доставленное к этим небесным объектам.

Времена, прошедшие до столкновений тел-планетезималей с Землей: В рамках рассматриваемой модели тела, первоначально находившиеся на разном расстоянии от Солнца, достигали Земли через разное время. Тела, первоначально пересекавшие орбиту Юпитера, могли приходить к орбите Земли в основном в течение первого миллиона лет. Время миграции тел из зоны питания Урана и Нептуна зависело от того, когда в этой зоне появились крупные зародыши этих планет. Согласно [13-14], основные изменения элементов орбит зародышей планет-гигантов произошли не более, чем за 10 млн лет. Большинство выпадений тел, первоначально находившихся на расстоянии от 4 до 5 а.е. от Солнца, на Землю происходило в течение первых 10 млн лет. При современных орбитах и массах планет некоторые тела из зоны Урана и Нептуна могли выпадать на Землю через время большее 20 млн. лет. С начальных расстояний от Солнца в диапазоне примерно от 3 до 3.5 а.е. отдельные тела могли выпадать на Землю и Луну через несколько миллиардов лет для модели, учитывающей только гравитационное влияние планет. Такие тела могли участвовать в «поздней тяжелой бомбардировке» (LHB) Земли и Луны.

Вероятности столкновений тел с Луной: Для планетезималей в зоне питания планет земной группы отношение r_{EM} числа планетезималей, столкнувшихся с Землей, к числу столкновений с Луной в основном варьировалось от 20 до 40 [6]. Первоначально более удаленные от земной орбиты планетезимали приходили к ней с более эксцентричных орбит, и для них отношение r_{EM} было меньше, чем у более близких орбит с малыми эксцентриситетами. В 80% вариантов расчетов миграции тел при $3 \leq a_0 \leq 5$ а.е. получено $16.4 \leq r_{EM} \leq 17.4$. В других вариантах расчетов отношение r_{EM} могло быть в интервале от 14.6 до 17.9. Отношение r_{EM} , усредненное по 2000–2500 телам, варьировалось в основном от 16.5 до 16.7 для расчетов с $5 \leq a_{min} \leq 10$ а.е. Поскольку отношение радиусов Земли и Луны равно 3.667, а квадрат отношения равен 13.45, то из-за большего, чем у Луны, гравитационного влияния Земли полученные значения r_{EM} больше 13.45.

Скорости столкновений тел с Землей и Луной: На основе отношения r_{EM} числа планетезималей, сталкивающихся с Землей и Луной, можно оценить [7] характерные скорости v_{relE} (относительно Земли) планетезималей при входе в сферу действия Земли по формуле: $(v_{relE}/v_{parE})^2 = [r_{EM}(v_{parM}/v_{parE})^2(r_M/r_E)^2 - 1]/[1 - r_{EM}(r_M/r_E)^2]$, где r_M и r_E – радиусы Земли и Луны, а v_{parM} и v_{parE} – параболические скорости у поверхности Земли и Луны соответственно. Используя значения r_{EM} , приведенные в [7], мы оценили характерные скорости столкновений тел с Землей и Луной для некоторых случаев. Для планетезималей с $0.9 \leq a_0 \leq 1.1$ а.е. скорости их столкновений с Луной составляли от 8 до 10 км/с. Для планетезималей, пришедших из других частей зоны питания планет земной группы (при $20 \leq r_{EM} \leq 40$), разброс характерных скоростей столкновений планетезималей с Землей находился в основном в диапазоне от 13 до 19 км/с, а с Луной от 8 до 16 км/с. Для

большинства тел с $a_0 \geq 3$ а.е. (при $16.4 \leq r_{EM} \leq 17.4$) аналогичный разброс скоростей столкновений составил 23–26 км/с для Земли и 20–23 км/с для Луны. Однако диапазон скоростей столкновений всех тел из этой зоны (при $14.6 \leq r_{EM} \leq 17.9$) был шире: от 22 до 39 км/с для Земли и от 19 до 38 км/с для Луны. Приведенные выше скорости больше параболических скоростей на поверхностях этих небесных тел, что позволяет выброшенным при столкновениях телам выходить на гелиоцентрические орбиты.

Результаты численного моделирования позволяют также получить оценки характерных скоростей столкновений планетезималей, первоначально находившихся относительно близко к орбите зародыша Земли, с зародышами Земли и Луны, массы которых были в десять раз меньше современных масс этих небесных тел. Показано, что скорости находились в основном в пределах 7–8 км/с для зародыша Земли и от 5 до 6 км/с для зародыша Луны. Для планетезималей, пришедших из более удаленных (от орбиты Земли) областей зоны питания планет земной группы, характерные скорости составляли от 9 до 11 км/с для столкновений с зародышем Земли и от 7 до 10 км/с для столкновений с зародышем Луны.

Выводы: Общая масса льда воды, доставленного на Землю из-за орбиты Юпитера, могла быть сравнимой с массой земных океанов. Тела, пришедшие из зоны внешнего астероидного пояса, могли принести на Землю не меньше воды, чем тела из зоны планет-гигантов.

Признательности: Исследования столкновений тел с Землей проводились в рамках государственного задания Института им. Вернадского РАН. Исследования столкновений тел с Луной выполнены при поддержке РФФ, проект 21-17-00120, <https://rscf.ru/project/21-17-00120/>.

Литература

1. Маров М.Я. Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной. М. 2017. Физматлит, 536 с.
2. Marov M. The Formation and Evolution of the Solar System. Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science (Eds. P Read et al.). 2018. Oxford: Oxford University Press, id.2.
3. Маров М.Я., Ипатов С.И. Доставка воды и летучих к планетам земной группы и к Луне // Астрон.вестник, 2018, т. 52, № 5, с. 402–410.
4. Ipatov S.I. Migration of planetesimals from beyond Mars' orbit to the Earth. 14th Europlanet Science Congress 2020, EPSC2020-71
5. Ipatov S.I. Migration of planetesimals to the Earth and the Moon from the region of the outer asteroid belt, European Planetary Science Congress 2021, EPSC2021-100
6. Ипатов С.И. Вероятности столкновений планетезималей из различных областей зоны питания планет земной группы с формирующимися планетами и Луной // Астрон. вестник, 2019, т. 53, № 5, с. 349–379.
7. Маров М.Я., Ипатов С.И. Формирование Земли и Луны: влияние малых тел // Геохимия, 2021, т. 66, N 11, с. 964–971.
8. Levison H.F., Duncan M.J. The long-term dynamical behavior of short-period comets // Icarus, 1994, vol. 108, no. 1, pp. 18–36.
9. Ipatov S.I., Mather J.C., Migration of trans-Neptunian objects to the terrestrial planets // Earth, Moon, and Planets, 2003, v. 92, p. 89–98. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0305519>
10. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of Jupiter-family comets and resonant asteroids to near-Earth space // Annals of the New York Academy of Sciences, 2004, v. 1017, p. 46–65.
11. Ipatov S.I., Mather J.C. Comet and asteroid hazard to the terrestrial planets // Advances in Space Research, 2004, v. 33, p. 1524–1533. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0212177>
12. Ipatov S.I., Mather J.C. Migration of small bodies and dust to near-Earth space // Adv. Space Research, 2006, v. 37, N 1, p. 126–137. <http://arXiv.org/format/astro-ph/0411004>
13. Ипатов С.И. Миграция тел в процессе аккумуляции планет // Астрон. вестник. 1993, т. 27, N 1, с. 83–101.
14. Ипатов С.И. Миграция небесных тел в Солнечной системе. Изд-во УРСС. 2000 г. Изд. стереотип. URSS. 2021. 320 с.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСТЕРОИДОВ СЕМЕЙСТВА ФЕМИДЫ

Кузнецов С.Ю.¹, Бусарев В.В.^{2,3}

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет космических исследований, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, Москва, Россия

³ИНАСАН, РАН, Москва, Россия

imarpus@gmail.com

(24) Фемида – астероид Главного пояса астероидов, который принадлежит к спектральному классу В с низким значением геометрического альбедо (0.067, [1]), и возглавляет семейство Фемиды [2]. Гидратированные соединения в смеси с органическими занимают, вероятно, большую часть поверхности этого астероида и распределены на ней довольно равномерно, учитывая сравнительно небольшой диапазон изменений блеска астероида при вращении [3]. С учетом недавнего обнаружения сублимационно-пылевой активности Фемиды вблизи перигелия [4], в поверхностном веществе возможно также и содержание некоторого количества водяного льда или его какое-то локальное обнажение. При этом водяной лёд не может долго находиться в стабильном состоянии на поверхности астероида, из-за регулярного повышения подсолнечных температур в перигелии и сублимации льда. Можно предположить, что существуют механизмы пополнения запасов льда на поверхности Фемиды, например, – его экскавация с большей глубины при ударных процессах [4].

Семейство Фемиды насчитывает в своём составе 873 астероида [5]. Семейство состоит в основном из низкоальбедных астероидов класса С с низкотемпературной минералогией. Структура семейства по большой полуоси орбиты и размерам дифференцирована: в центре находятся самые крупные астероиды (в том числе и 24 Фемида), а на окраине – более мелкие. Большая полуось орбиты (a), эксцентриситет (e) и наклонение орбит (i) астероидов семейства принимают следующие значения: $3.020 \text{ au} < a < 3.270 \text{ au}$, $0.070 < e < 0.225$, $0.40^\circ < i < 3.450^\circ$. Гистограммы распределения этих параметров семейства представлены на Рис. 1 («а» – распределение больших полуосей орбит, «б» – распределение эксцентриситетов и «в» – распределение наклонений орбит).

Рис. 1. (а)

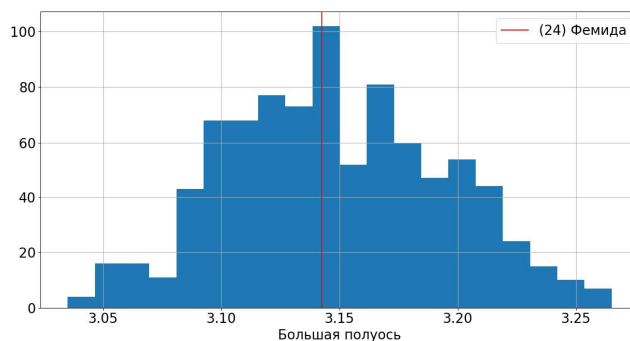


Рис. 1 (б)

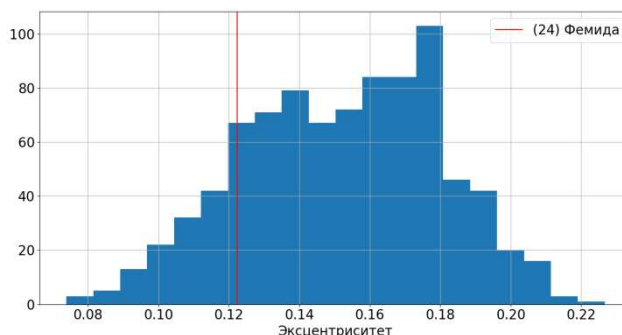
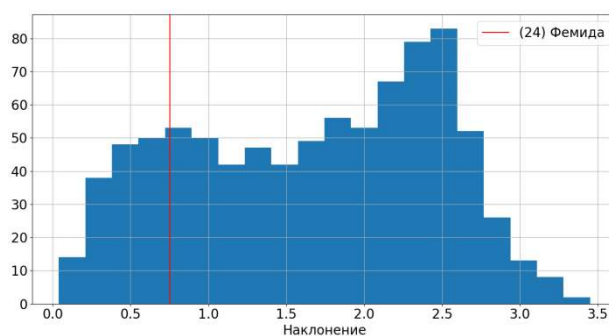


Рис. 1 (в)



Следует отметить, что величина большой полуоси (24) Фемеды с высокой точностью совпадает со средним значением этого параметра для всего семейства. Этот факт, а также наибольший размер Фемеды по сравнению с другими членами семейства, служат прямым указанием на то, что этот астероид может быть родительским телом семейства (или его сохранившейся основной частью), раздробленным при сильном ударном событии. На это указывают, вероятно, значительные смещения эксцентриситетов и наклонов орбит в сторону больших значений астероидов меньших размеров (Рис. 1, «б» и «в»). Таким образом, по распределению основных параметров видно, что значительная часть астероидов рассматриваемого семейства близки по происхождению с (24) Фемидой и должны обладать аналогичными свойствами, в том числе иметь в недрах в составе своего вещества водяной лед и проявлять сублимационную активность вблизи перигелия.

Литература

1. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=24
2. Nesvorný D., Brož M., Carruba V. Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families. In: Asteroids IV, (Michel, P., DeMeo, F. E., and Bottke, W. F., eds.), Univ. of Arizona Press, Tucson. 2015. P. 297–321.
3. <https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/LightcurveDat.html>
4. Busarev V.V., Petrova E.V., Irmambetova T.R., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Simultaneous sublimation activity of primitive asteroids including (24) Themis and (449) Hamburga: Spectral signs of an exosphere and the solar activity impact. Icarus. 2021.V. 369. 114634 (18 pp)
5. https://en.wikipedia.org/wiki/Category:Themis_asteroids

15 ЛЕТ ШИРОКОУГОЛЬНОГО ПЗС-МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ МЕТЕОРОИДОВ В МЕТЕОРНЫХ ПОТОКАХ

Муртазов А.К.

Рязанский государственный университет имени С.А. Есенина, Рязань, Россия

a.murtazov@365.rsu.edu.ru

Проблема метеороидного риска в околоземном пространстве достаточно актуальна и решается чаще всего методами метеорной астрономии. Реальная опасность для космической техники начинается с 1-мм метеороидов, что соответствует метеорам с блеском ярче 1^m . Оценки риска по данным метеорных наблюдений разбросаны в достаточно большом интервале [7-10].

Оптический мониторинг опасных метеороидов методами метеорной астрономии позволяет получить данные о содержании и распределении этих объектов в метеорных потоках.

Обсерватория Рязанского госуниверситета имени С.А. Есенина 15 лет назад включилась в программу наблюдений метеорных потоков электронно-оптическими средствами [11]. Наблюдения проводятся в двух пунктах: на площадке обсерватории в Рязани ($\lambda=2^h 39^m$, $\varphi=54^\circ 38'$) и загородном пункте наблюдений ($\lambda=2^h 39^m$, $\varphi=54^\circ 28'$).

Нами используется [4, 5] наиболее широко применяемая в мире ПЗС-камера *Wattec-902H*, позволяющая наблюдать визуальные метеоры и имеющая спектральную чувствительность в области 450-950 нм (табл. 1). Для регистрации и дальнейшего определения параметров метеорных потоков вплоть до расчета их орбит используется пакет программ SonotoCo.

Таблица 1 – Параметры широкоугольной ТВ-системы для мониторинга метеорных явлений [2, 6]

Объектив	Поле зрения, град	Дисторсия на краю поля зрения, град	Проницающая способность, ТВ режим/сложение кадров, m	Максимум спектральной чувствительности, нм	Цель использования
ComputarHG0 808AFCS	45X34	0,6	5,2/7,5	550-600	Базисный мониторинг
Computar T2314FICS	140X100	10	2,5/4,8	550-600	Широкоугольный мониторинг

Наиболее наблюдаемым в мире метеорном потоком являются Персеиды. Нами в течение последних 15 лет проводился широкоугольный ПЗС-мониторинг ярких (опасных) метеороидов этого потока. К ним здесь относятся метеороиды размерами более 1 мм и абсолютным блеском ярче 1^m .

На рис. 1 представлены полученные нами в 2007-2021 гг. усредненные данные об интенсивности потока ярких Персеид в сравнении с данными Международного метеорного общества по всем визуальным метеорам [3, 12]. Распределение ярких метеоров оказалось статистически близко к распределению всех метеоров визуальных метеоров.

В период максимума Персеид поток опасных частиц достигал мгновенного значения $F=(3,8\pm 1,1)\cdot 10^{-7} \text{ км}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Максимальное значение средней плотности потока ярких Персеид относительно ИМО составляет 0,076.

Общее содержание метеоров ярче 0^m в потоке Персеиды равно отношению интегралов вида $\int_{\lambda} Dd\lambda$ под кривыми, и в период 2007-2013 гг. оно составило $0,050 \pm 0,008$.

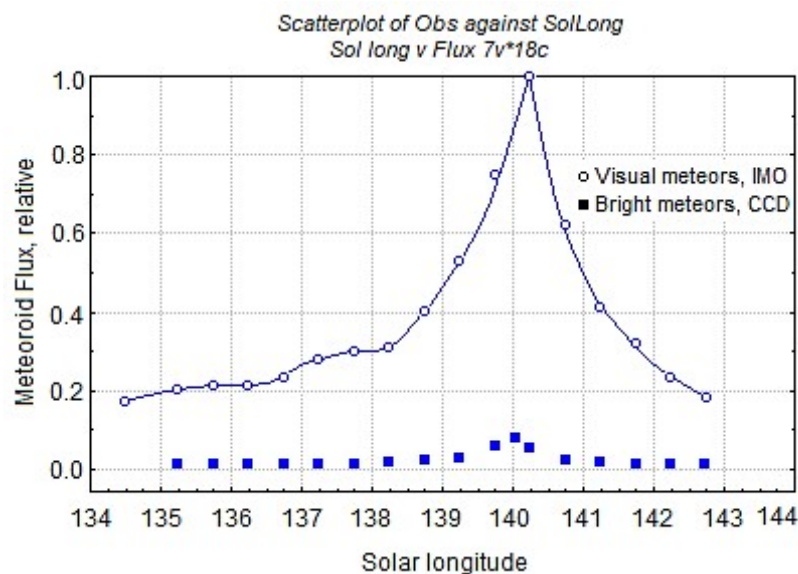


Рис. 1. Относительные средние за 15 лет потоки визуальных (сплошная линия) и ярких Персеид 2007-2021 гг.

На основе результатов мониторинга и данных по визуальным наблюдениям Международного метеорного общества нами были рассчитаны величины риска соударения опасных метеороидов основных метеорных потоков в году с поверхностью в околоземном пространстве [1, 12].

Пиковая активность основных потоков (активность выше 0,5 от максимальной) следующая: Квадрантиды – 1.3^d ; Персеиды – 1.1^d ; Геминиды – 2.1^d . Поток η -Аквариды чаще всего не имеет ярко выраженного постоянного пика активности.

Полученные результаты представлены в табл. 2. Здесь с риском ассоциируется среднее число соударений опасных метеороидов с площадкой 1 км^2 , перпендикулярной потоку, за весь период (пик) максимальной активности. Они показывают, что метеороидный риск даже для наиболее активных метеорных потоков не превышает в периоды их максимальной активности величину $5 \cdot \text{км}^{-2}$. Эти результаты достаточно хорошо согласуются с данными моделей метеорной среды или, например, с данными по метеороидному риску во время метеорных дождей [7, 9].

Таблица 1 – Средний риск в периоды пиковой активности основных метеорных потоков

Метеорный поток	Период пиковой активности, долгота Солнца, $\lambda_{\odot}$ (2000.0), град.	Среднее число соударений в период пиковой активности, км^{-2}	Вероятность
Квадрантиды	282,45 – 283,75	$0,3 \pm 0,1$	0,09
η -Аквариды	29,47 – 54,073	$2,2 \pm 1,2$	0,90
Персеиды	139,50 – 140,65	$0,4 \pm 0,2$	0,10
Геминиды	261,00 – 263,10	$0,9 \pm 0,3$	0,63

Исследования показывают, что наиболее опасными периодами для космической техники в околоземном пространстве являются периоды действия основных метеорных потоков: начало января; конец апреля — начало мая; август и середина декабря. В то же время метеороидный риск в околоземном пространстве невелик. Его величина даже для наиболее активных метеорных потоков не превышает $5 \times 10^{-6} \text{ м}^{-2}$ в периоды их пиковой

активности (исключая случаи нерегулярных метеорных дождей). Однако величина индивидуального метеороидного риска достаточно близка к значению предельного допустимого риска $R_{Lim.}=10^{-6}$. Кроме того, общая площадь околоземной популяции ИСЗ достаточно велика, что значительно увеличивает для нее коллективный метеороидный риск.

Таким образом, метеороидная опасность в околоземном пространстве требует постоянного учета.

Литература

1. Бодрова И.В., Муртазов А.К. Метеороидный риск в околоземном пространстве // Аэрокосмическое приборостроение. – 2020. № 6. – С. 14-21.
2. Муртазов А.К., Миронов В.В., Бодрова И.В., Ключников В.Ю. Физико-математическое моделирование в оптическом мониторинге космических объектов. Монография. – Рязань: Изд. BookJet (И.П. Коняхин А.В.), 2021. -218 с.
3. Миронов В.В., Муртазов А.К. Модель метеорного риска в околоземном пространстве // Космические исследования. – 2015. Т. 53, № 6. – С. 469-475.
4. Муртазов А.К. Организация системы оптического мониторинга загрязнения околоземного пространства // Экологические системы и приборы. – 2009. № 1. – С. - 28-32.
5. Муртазов А.К. Организация комплексных телевизионных метеорных наблюдений на астрономической обсерватории Рязанского госуниверситета // Вестник СибГАУ. - 2011. № 6(39). - С. 109-112.
6. Миронов В.В., Муртазов А.К. Ретроспектива проблемы космического мусора. Ч. 2. Мониторинг космического мусора естественного происхождения в околоземном пространстве методами метеорной астрономии // Космические исследования, 2021. Т.59, № 1. - С. 51-62.
7. Beech M., Brown P., Jones J., Webster A.R. The danger to satellites from meteor storm // Advances in Space Research. 1997. Vol. 20. P. 1509-1512.
8. Cooke W.J., Moser D.E., Moorhead A.V. Spacecraft risk posed by the 2016 Perseid outburst. In: International conference Meteoroids-2016. - Noordwijk, the Netherlands.
9. Foschini L. The meteoroid hazard for space navigation. In: Second National Meeting of Planetary Sciences. - Italy. 1998. 12 p.
10. Lobanov A.B., Pavlichenko E.A. Risk Factor for Spacecraft due to Meteoroid Substance Damage Effect in the Near-Earth Space//Cosmic Research, 2000. Vol. 38, No. 6, P. 616–618.
11. Murtazov A.K., Efimov A.V., Kolosov D.V. Bright Perseids in 2007 // WGN. The Journal of International Meteor Organization. 2008. Vol. 36, n 4. P. 1-2.
12. Murtazov A.K. Bright Perseids 2007-2013 and Artificial Earth Satellites Collision Risk Assessment//WGN. The Journal of International Meteor Organization. 2014. Vol. 42. P. 65-67.
13. Murtazov A. Assessing risk from dangerous meteoroids in main meteor showers. In: Proceedings of the International Meteor Conference. Mistelbach, Austria. 2015. P. 155-156.
14. Murtazov A.K. Assessing the meteoroid risk in near earth space // Open Astronomy. 2018. Vol. 27. P. 144–149.

ПОЛЯРИМЕТР ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ КОМЕТ НА ТЕЛЕСКОПЕ ЦЕЙСС-1000

Николенко И.В.¹, Маслов И.А.²

¹*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

²*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

nikolenko@inasan.ru, imaslov@iki.rssi.ru

В докладе описывается поляриметр, разработанный для исследования протяженных объектов на телескопе Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН (п.г.т. Голубой Залив, Республика Крым) [1] и применяемая методика обработки его данных [2]. В настоящее время основными объектами для наблюдений с этим прибором являются кометы. Распределение поляризации вокруг ядра кометы позволяет делать выводы о размере и ориентации частиц в ее коме и хвосте. Приводятся перспективы модернизации поляриметра.

Литература

1. Крючков С.В., Маслов И.А., Николенко И.В., Угольников О.С. Комплекс управления телескопом ZEISS-1000 с возможностью проведения наблюдений в режиме удаленного доступа. // Некоторые аспекты современных проблем механики и информатики: сб. науч. ст. М.: ИКИ РАН, с. 188, (2018). www.iki.rssi.ru/books/2018nazirov.pdf
2. Маслов И.А., Крючков С.В., Николенко И.В., Муницын В.А., Угольников О.С. Дифференциальная поляриметрия протяженных астрономических объектов. // Известия Крымской астрофизической обсерватории Т. 111. № 1. С. 34-40. (2015).
3. Ed. by Hauser M.G., Kelsall T., Leisawitz D., and Weiland J.) // COBE Ref. Pub. No 98-A (Greenbelt, MD: NASA/GSFC). 1998. available in electronic form from the NSSDC.
4. Маслов И.А. Поляризация кометы C/2020F3 (NEOWISE) в красной области спектра. // Астрономический Циркуляр №1648 (2021). [AC1648.pdf \(msu.su\)](#)
5. Маслов И.А. Распределение поляризации в коме кометы 21P/Джакобини-Циннера. // Астрономический Циркуляр № 1646, 2020 19 октября. [AC1646.pdf \(msu.su\)](#)

ТРАЕКТОРИИ ОБЪЕКТОВ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА В СИСТЕМЕ СОЛНЦЕ–ЗЕМЛЯ

Перов Н.И.^{1,2}, Хван М.З.-Д.²

¹Государственное автономное учреждение культуры Ярославской области
«Культурно-просветительский центр имени В.В. Терешковой», Ярославль, Россия
²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Ярославский государственный педагогический университет имени

К.Д. Ушинского, Ярославль, Россия

perov@yarplaneta.ru

Введение

Космический мусор на орбите – это совокупность нефункционирующих искусственных объектов и их фрагментов на околоземной орбите [1]. Известны «экзотические» траектории космических объектов, например астероид (419624) 2010 SO16 движется по подковообразной траектории вблизи орбиты Земли [2]. Важно найти все опасные малые тела, периодические орбиты которых трансформируются из гелиоцентрических (планетных) орбит в спутниковые (геоцентрические) орбиты и наоборот [3]. Ниже рассматриваются области движений частиц с ничтожно малой массой в рамках плоской круговой ограниченной задачи трёх тел [4], [5]. Обозначим через m_1 и m_2 массы основных тел, r_{12} – расстояние между основными телами, G – гравитационная постоянная. Установим область движения точки с массой m_3 , – расстояние r_3 , ($\mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_3(x_3, y_3) = \mathbf{r}_3(X, Y)$) относительно центра масс системы, – и определим время миграции этой частицы, движущейся вблизи орбиты Земли (орбита частицы может быть как планетной, так и спутниковой). При интегрировании используем метод Рунге-Кутты. N – число точек на рисунке. Таким образом, рассматриваем временный захват Землёй объектов космического мусора.

Основные уравнения

В соответствии с монографиями [4] и [5], дифференциальное уравнение движения частицы с массой m_3 , записанное в векторной форме, в равномерно вращающейся системе координат примет вид

$$d^2\mathbf{r}_3/dt^2 + Gm_1(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1)/(|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1|)^3 + Gm_2(\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2)/(|\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2|)^3 - 2[d\mathbf{r}_3/dt, \boldsymbol{\Omega}] - \Omega^2\mathbf{r}_3 = 0. \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{r}_3$ – радиус-вектор частицы, определяющий её положение относительно центра масс системы. $\mathbf{r}_1$ и $\mathbf{r}_2$ – радиусы векторы, определяющие положения основных тел с массами m_1 и m_2 , соответственно. Ω – угловая скорость обращения по орбитам основных тел.

$$\mathbf{r}_1 = -(m_2/(m_1+m_2))\mathbf{r}_{12}, \quad \mathbf{r}_2 = (m_1/(m_1+m_2))\mathbf{r}_{12}, \quad (2)$$

$$\Omega = \sqrt{\frac{G(m_1+m_2)}{r_{12}^3}}.$$

Положения точек либрации определяются из уравнения (1) и следующих условий

$$d^2\mathbf{r}_3/dt^2 = 0, \quad d\mathbf{r}_3/dt = 0.$$

Вблизи этих точек либрации в начальный момент времени располагаются тела с массами m_3 .

Примеры

Для проведения численных экспериментов примем $G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{с}^2 \cdot \text{кг})$, $m_1 = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$ – масса Солнца, $m_2 = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ – масса Земли. При решении уравнения (1) использовались следующие единицы: m_1 – единица массы, r_{12} – единица длины, единица времени t выбиралась таким образом, чтобы $G=1$. В рассматриваемых примерах, в синодической системе координат, начальные условия для тел принимали следующие значения: $x_{10} \neq 0$, $dx_{10}/dt = 0$, $y_{10} = 0$, $dy_{10}/dt = 0$, $x_{20} \neq 0$, $dx_{20}/dt = 0$, $y_{20} = 0$, $dy_{20}/dt = 0$, $x_{30} \neq 0$, $V_{x0} = dx_{30}/dt \approx 0$, $y_{30} = 0$, $V_{y0} = dy_{30}/dt \approx 0$.

Результаты численных экспериментов на интервалах времени от 2 до 1500 оборотов Земли вокруг Солнца при $V_{x0}=0.0009$, $V_{y0}=-0.01$ (единиц длины)/(единица времени). $X_0=1.009$, $Y_0=0$ единиц длины (вблизи точки либрации L_3) представлены на рисунках (1) – (5) ($x_3=X$, $y_3=Y$).

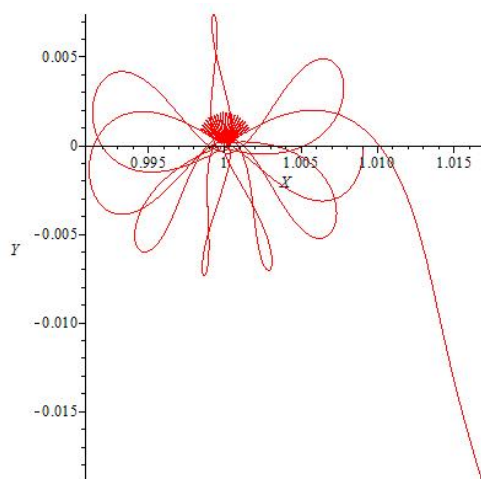


Рис.1. 1-я спутниковая траектория объекта $Y=Y(X)$. Переход на 1-ю планетную орбиту. $t=0-13$ единиц времени (2 года). $N=5000$.

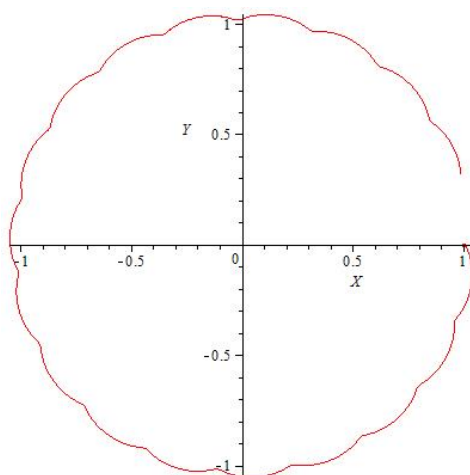


Рис.2. 1-я планетная орбита объекта. $t=13-130$ единиц времени (2-20.7 года). $N=10000$.

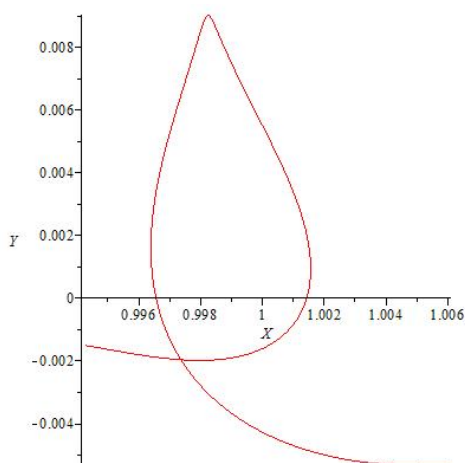


Рис.3. Переход объекта в момент 5979 единиц времени на 2-ю спутниковую орбиту с последующим переходом на 2-ю планетную орбиту при $t=5981$ единиц времени ($t=951.9$ лет). $Y=Y(X)$. $N=60000$.

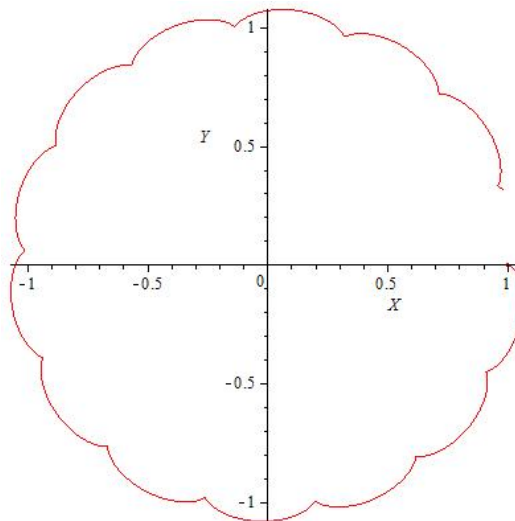


Рис.4. 2-я планетная орбита объекта. $t=5981-6070$ единиц времени (951.9-961.1 лет). $N=100000$.

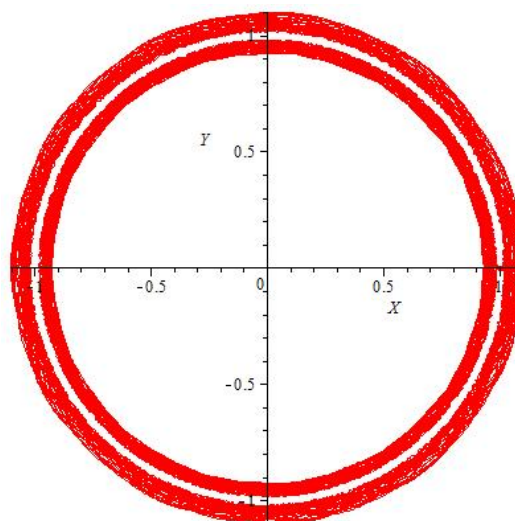


Рис.5. 1-я и 2-я планетные орбиты объекта. $Y=Y(X)$. $t=0-10000$ единиц времени. (1591.55 лет). $N=100000$.

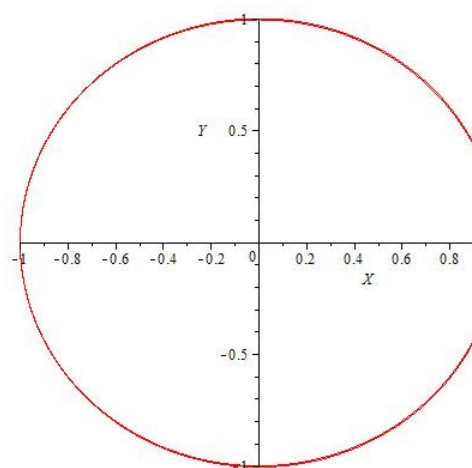


Рис.6. Движение объекта по подковообразной траектории с периодом $P=1443.69$ лет. $N=100000$. $V_{x0}=0$. $V_{y0}=0$ (единиц длины)/ (единиц времени). $X_0=-x_2$, $Y_0=0$ единиц длины (в системе Солнце-Земля) – вблизи точки либрации L_1 . $t=0-10000$ единиц времени (1591.55 лет).

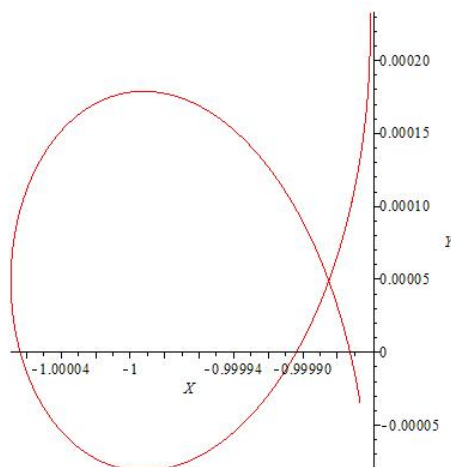


Рис.7. Возвращение объекта к начальной точке. $t=9065-9071$ единиц времени (1143.69 лет). $N=100000$. $V_{x0}=0$. $V_{y0}=0$ (единиц длины)/(единиц времени). $X_0=-x_2$, $Y_0=0$ единиц длины (система Солнце–Земля) – вблизи точки либрации L_1 .

Заключение

На основании рассмотренной модели движения объектов космического мусора сделаем следующие выводы.

- А) Существует множество источников объектов космического мусора.
- В) Объекты могут удаляться от Земли на большие расстояния.
- С) Начальные положения и скорости опасных объектов находятся в узких пределах [3].
- Д) В данной модели объекты сближаются с Землёй и после десятков оборотов на спутниковой орбите они выходят из сферы действия Земли и переходят на планетную орбиту и наоборот.

Литература

1. Космический мусор: причины появления и возможные последствия, методы его уничтожения и защиты космических аппаратов. <https://cleanbin.ru/waste/cosmos-waste>.
2. Small-Body Database Lookup. https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=419624%202010%20SO16.
3. Chodas P.W. Orbit uncertainties, keyholes, and collision probabilities. // Bulletin of the American Astronomical Society - Physics. Published 10, October 1999. Corpus ID 117770074.
4. Szebehely V. (1967) Theory of Orbits. The Restricted Problem of Three Bodies. Yale University. New Haven Connecticut. Academic Press New York and London. 1967.
4. Murray C.D. and Dermott S.F. Solar System Dynamics. Cambridge University Press. 2009.

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩЕГО СЛОЯ ПОВЕРХНОСТИ РЕГОЛИТА НА СВЕТОРАССЕИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА АСТЕРОИДОВ F-ТИПА

Петров Д.В., Жужулина Е.А.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Россия

dv@cracrimia.ru

Астероиды F-типа обладают некоторыми характерными особенностями. Впервые F-тип был введен Gradie and Tedesco (1982) для выделения астероидов с низким альбедо и плоским (flat, благодаря чему тип и получил название F) спектром в диапазоне длин волн 0.3–1.1 мкм. Типичный диапазон альбедо астероидов F-типа составляет 0.03–0.07 (Tedesco et al., 2002). Спектры астероидов F-типа отличаются от остальных астероидов тем, что в них слабо проявляются (или вовсе отсутствуют) полосы поглощения, характерные для силикатов. Считается, что астероиды F-типа состоят из смеси силикатов и органических соединений (Gaffey et al., 1989). В классификации Толена 27 астероидов относятся к F-типу, что соответствует лишь около 3% всех классифицированных объектов (Tholen, 1989).

Как оказалось, многие астероиды F-типа обладают необычными поляризационными особенностями, выбиваясь из ряда низкоальбедных астероидов других типов. Возможное объяснение состоит в том, что поверхности астероидов F-типа имеют относительно однородную оптическую микроструктуру, отличную от других тел с низким альбедо. Одним из возможных механизмов, который может способствовать оптической однородности поверхности, являются отложения углерода на частицах верхнего слоя реголита астероида. Отложения могут образоваться в результате пиролиза углеродсодержащего (органического) вещества, подвергшегося процессу космического выветривания (Belskaya et al., 2005).

Для проверки этого предположения было проведено компьютерное моделирование процессов рассеяния света силикатными частицами, поверхность которых покрыта слоем углеродсодержащего органического вещества. Для этого была использована модель сопряжённых случайных гауссовских частиц (Петров и Киселев, 2019). Частица, состоящая из силиката, была покрыта тонким слоем углеродсодержащего вещества (Рис. 1). Расчёт светорассеивающих свойств осуществлялся при помощи метода матриц формы для частиц слоистой структуры (Petrov et al., 2007).



Рис.1. Структура слоистой частицы, используемой при моделировании.

Была исследована такая характеристика рассеянного света, как фактор рассеяния Q_{sca} , определяемая как отношение сечения рассеяния к площади поперечного сечения рассеивающей частицы (Петров и др., 2021). Фактор рассеяния определяет, насколько эффективно перерассеивает свет единица площади рассеивающего объекта. Чем выше эта

величина, тем объект заметнее. Для вычислений использовались три размера рассеивающих частиц – 0.5 мкм, 1.0 мкм и 1.5 мкм. Длина волны падающего излучения была выбрана соответствующей фильтру I ($\lambda = 0.8093$ мкм). Показатель преломления силиката был взят из работы (Scott & Duley, 1996), показатель преломления углеродосодержащего слоя – из работы (Li & Greenberg, 1997).

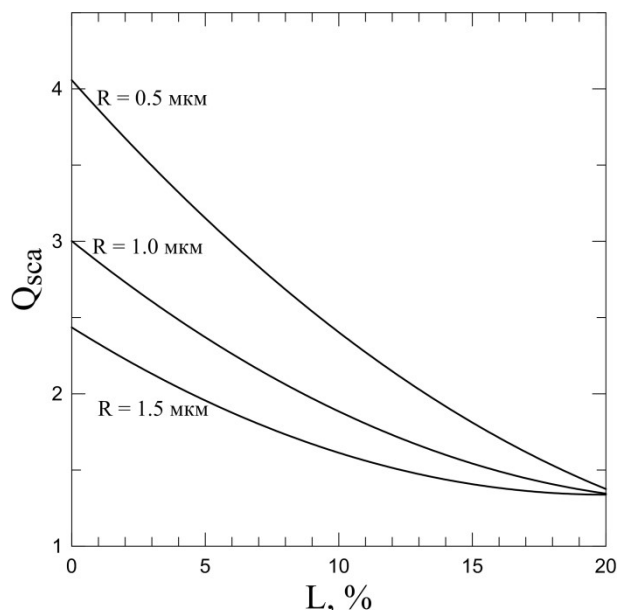


Рис.2. Зависимость фактора рассеяния Q_{sca} от относительной толщины углеродосодержащего слоя.

На Рис. 2 показана зависимость фактора рассеяния Q_{sca} от относительной толщины углеродосодержащего слоя L , выраженного в процентах от радиуса частицы. Вычисления показали, что даже тонкого слоя (порядка 20%) достаточно для того, чтобы яркость объекта снизилась в несколько раз. Причём чем меньше размер рассеивающей частицы, тем уменьшение фактора рассеяния оказывается заметнее. При этом столь тонкий углеродосодержащий слой не оказывает кардинального влияния на степень линейной поляризации рассеянного света. Таким образом, низкое альбедо астероидов F-типа и однородность оптических свойств поверхности могут быть объяснены небольшим количеством (до 20% толщины частиц реголита) отложений углерода на частицах верхнего слоя реголита.

Литература

1. Петров Д.В., Киселев Н.Н., 2019, *Астрономический Вестник*, том 53, № 4, с. 309–320.
2. Петров Д., Жужулина Е., Савушкин А., 2020, *Изв. Крым. астрофиз. общ.*, Т.116, № 2. С. 41–48.
3. Belskaya I.N., Shkuratov Yu.G., Efimov Yu.S. et.al., 2005, *Icarus*, 178, 213–221.
4. Gaffey, M.J., Bell, J.F., Cruikshank, D.P., 1989. Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy. In: Binzel, R.P., Gehrels, T., Matthews, M.S. (Eds.), *Asteroids II*. Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 98–127.
5. Gradie, J., Tedesco, E.F., 1982, *Science* 216, 1405–1407.
6. Li A., Greenberg J. M., 1997, *A&A*, 323, 566
7. Scott A., Duley W. W., 1996, *ApJS*, 105, 401
8. Petrov D., Shkuratov Yu., Zubko E., Videen G., 2007, *JQSRT*, 106, 437–454.
9. Tedesco, E.F., Noah, P.V., Noah, M., Price, S.D., 2002. . *Astron. J.* 123, 1056–1085.
10. Tholen, D.J., 1989. Asteroid taxonomic classifications. In: Binzel, R.P., Gehrels, T., Matthews, M.S. (Eds.), *Asteroids II*. Univ. of Arizona Press, Tucson, pp. 1139–1150.

ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА КОСМИЧЕСКИМ МУСОРОМ В АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ТАРИХА, БОЛИВИЯ В РАМКАХ ПРОГРАММЫ НСОИ АФН

Сальес Р.^{1,2}, Архаров А.А.³

¹*Национальная астрономическая обсерватория, Тариха, Боливия*

²*Автономный университет Хуана Мисаэля Сарачо, Тариха, Боливия*

³*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия*
rozalles@hotmail.com, arkadi@arharov.ru

В 1982 г. между Академией наук СССР и Национальной академией наук Боливии было заключено соглашение о развитии астрономии, в соответствии с которым Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория АН СССР организовала астрономическую экспедицию АН СССР в г. Тариха, где были размещены астрономические инструменты. За период 1982-1989 гг. в обсерватории был выполнен большой объем астрометрических и астрофизических работ. Но в 1990 г. сотрудничество было прервано из-за отсутствия финансирования.

В 2004 г. сотрудничество с Боливийской обсерваторией было возобновлено, но уже в рамках проекта ПулКОН (Пулковская кооперация оптических наблюдателей). В октябре 2005 г. в Тарихе стартовали пробные наблюдения космического мусора на экспедиционном астрографе 23-см и с ПЗС-матрицей FLI IMG1001E. В октябре 2009 года установлен новый телескоп Sigma Ori 25 с ПЗС-матрицей FLI ML9000, позже к нему присоединился телескоп Zeiss 600 AA. С этого момента Боливийская астрономическая обсерватория участвует в глобальной сети оптических телескопов НСОИ АФН, созданной в 2004-2008 гг. и перекрывающей все долготы вокруг земного шара.

Полученные измерения обрабатываются в баллистическом центре Института прикладной математики Российской академии наук (ИПМ РАН) и затем они используются в научных и прикладных целях, в том числе для анализа космической ситуации, включая анализ рисков столкновений. Кроме наблюдений, полученных в обсерватории, используются данные с боливийского спутника TKSAT-1.

МЕТЕОРИТ KRIŽEVCI (ХОРВАТИЯ) И МЕТЕОРОИДНЫЙ РОЙ КАНКРИД

Терентьева А.К., Барабанов С.И.
Институт астрономии РАН, Москва, Россия
ater@inasan.ru , sbarabanov@inasan.ru

На основании анализа более 500 орбит метеороидных и болидных роев по опубликованным каталогам нами была установлена связь метеорита Križevci, порожденного болидом 4 февраля 2011 г. над Хорватией (Borovička et al., 2015) с метеороидным роем Канкрид (№ 166 (a) Terentjeva, 1968). Известный критерий Саутворта–Хокинса дает величину $D_{sh} = 0.128$, которая является вполне приемлемой для достаточно хорошего согласия орбит метеорита и роя. Динамический параметр Тиссерана указывает на астероидное происхождение роя и метеорита. Таким образом, выявлен еще один метеоритообразующий рой, который дополняет список 14 метеоритообразующих роев, найденных нами ранее. Эти рои имеют важное значение с точки зрения потенциальной опасности при их встрече с Землей.

В работе приводится краткая информация о таком редком явлении, которое названо А. Брезиной (Астапович, 1958) «цепным падением» метеоритов. Связано это с падением метеорита Пултуск (Польша, 1868, январь, 30; число собранных метеоритов – 3000). «А. Брезина сообщает, -, пишет И.С. Астапович, -, что в тот же час упал метеорит такого же состава вблизи Леричи (Италия). Леричи лежит на обратном продолжении траектории метеорита Пултуск, но на 1600 км южнее ее. Таким образом, оба метеорита могли двигаться по параллельным путям до встречи с Землей. Возможно, им же принадлежит еще один такой же метеорит из Носи-Бе (Мадагаскар)». В приведенном списке метеоритных дождей (Астапович, 1958) с наибольшим числом отдельных экземпляров с 1803 г. (Л’Эгль, Франция) по 1947 г. (Сихотэ-Алинский, СССР), явление «цепного падения» было замечено всего лишь один раз (почти за полторы сотни лет!) в связи с падением метеорита Пултуск. Мы думаем, что современные наблюдения с космических аппаратов могли бы помочь выявить такого рода уникальные явления.

Литература

1. Астапович И.С. Метеорные явления в атмосфере Земли. Москва. Изд-во Физматгиз, 1958. 640 стр.
2. Borovička J., Spurný P., Šegon D. et al. The instrumentally recorded fall of the Križevci meteorite, Croatia, February 4, 2011 // Meteoritics and Planetary Science. 2015. V. 50. No. 7. P. 1244–1259.
3. Terentjeva A.K. Investigation of minor meteor streams // Proc. Symp. No. 33 IAU «Physics and dynamics of meteors». Eds Kresák L, Millman P.M. Dordrecht-Holland, 1968. P. 408-427.
4. Астрон. Циркуляр АН СССР. Москва, 1967. № 415. С. 1–7.