ISSN 2658-5669 НАУЧНЫЕ ТРУДЫ института ран

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





INASAN SCIENCE REPORTS





МОСКВА 2022 УДК 52 ББК 22.6 H34

НЗ4 Научные труды Института астрономии РАН. Том 7(2). -

М.: Изд-во Янус-К, 2022, 84 с., илл.

ISSN 2658-5669 e-ISSN 2712-8318

Редколлегия

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

Секретарь редколлегии Вибе Е.Д.

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

> © ИНАСАН, 2022 © Коллектив авторов, 2022

INASAN Science Reports. Vol 7(2). M.: Janus-K, 2022, 84 pp.

ISSN 2658-5669 e-ISSN 2712-8318

Editorial Board

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

Staff Editor E.D. Wiebe

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

> © INASAN, 2022 © Author team, 2022

Сдано в набор 31.10.2022. Подписано в печать 31.10.2022 Формат 60х90/8. Бумага офсетная. Уч.-изд. п.л. 10,75. Физ. п.л. 10,75. Тираж 100. Заказ №4321

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

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

Научные труды Института астрономии РАН. Том 7 (2)

Научное издание



О материалах номера

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

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

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

Четыре секции конференции были посвящены следующим направлениям исследований:

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

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

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

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

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

Myor

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

Динамика и физические особенности потенциально опасного астероида 2009 XO по наблюдениям в Гиссарской астрономической обсерватории

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

Институт астрофизики Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе, Таджикистан

Представлены результаты многоцветных наблюдений потенциально опасного астероида (438908) 2009 XO, проведенных в период его сближения с Землей в мае 2020 г. в Гиссарской астрономической обсерватории Института астрофизики НАНТ. Определены экваториальные координаты, построена видимая траектория и показано, что средняя точность астрометрической обработки не хуже чем 0.063" и 0.093" для прямого восхождения α и склонения δ , соответственно. Вычислена первоначальная орбита астероида, и показана ее близкая схожесть с орбитой из базы данных МРС. Измерены видимый и абсолютный блеск астероида. Абсолютная звездная величина $H = 20.21 \pm 0.05^{\rm m}$ близка к эфемеридному значению. Показано, что в период мониторинга блеск астероида существенно не изменялся. Показатели цвета соответствуют астероидам спектрального типа Х. Измеренный диаметр оценивается как 0.35 ± 0.09 км и 0.32±0.04 км при альбедо 0.14 и 0.20, соответственно, что согласуется с имеющимися данными. Сближение с Землей не привело к значительным изменениям динамических и физических свойств астероида.

Поступила в редакцию 12.05.2022 г. Принята в печать 02.08.2022 г.

Ключевые слова: астероид, наблюдения, потенциально опасный астероид, фотометрия, кривая блеска, диаметр

Dynamics and physical peculiarities of a potentially hazardous asteroid 2009 XO from observations in the Gissar Astronomical Observatory

Kokhirova G.I., Buriev A.M., Safarov S.N., Sattorzoda A.A.

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

The paper presents the results of multicolor observations of the potentially hazardous asteroid (438908) 2009 XO carried out during its approach to the Earth in May 2020 at the Gissar Astronomical Observatory of the Institute of Astrophysics of the National Academy of Science of Tajikistan. The equatorial coordinates are determined, the apparent trajectory is constructed, and it is shown that the average accuracy of astrometric processing does not exceed 0.063" and 0.093" for right ascension α and declination δ , respectively. The initial orbit of the asteroid is calculated and its close similarity with the orbit from the MPC database is shown. The apparent and absolute brightness of the asteroid were measured, the absolute magnitude $H = 20.21 \pm 0.05^{\text{m}}$ is close to the ephemeris value. It is shown that the brightness of the asteroid did not change significantly during the monitoring period. Color indices correspond to asteroids of the X-spectral group. The measured diameter is estimated as 0.35 ± 0.09 km and 0.32 ± 0.04 km with albedo 0.14 and 0.20, respectively, which is consistent with the available data. The approach to the Earth did not lead to significant changes in the dynamic and physical properties of the asteroid.

Received 12.05.2022. Accepted 02.08.2022.

Keywords: asteroid, observations, photometry, brightness, light curve, color index, diameter

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.001

1. Введение

Новый астероид, сближающийся с Землей, был открыт 9 декабря 2009 г. в обсерватории Ла-Сагра в Испании и получил наименование (438908) 2009 XO [1]. Астероид перемещается в межпланетном пространстве со скоростью более 21.8 км/с, и период его обращения составляет 2.5 года. Абсолютный блеск астероида 2009 XO равен H = 20.65 звездных величин [1]. Достоверных сведений о размере астероида в актуальных базах данных не имеется. В работе [2] с использованием значения H и в предположении, что оптическое альбедо равно 20%, что ярче принятой средней величины альбедо 14% для АСЗ, диаметр астероида оценен как 0.24 км. Минимальное межорбитальное расстояние астероида с Землей МОІD = 0.001833 а.е. [1], следовательно, астероид может сближаться с Землей до расстояний порядка 275 тысяч км, что меньше порогового значения MOID = 0.005 а.е., принятого для классификации астероидов как потенциально опасных

Таблица 1: Элементы орбиты астероида 2009 ХО

Эпоха	a,	e	q,	Q,	i,	ω ,	Ω,	T_{j}
	a.e.		a.e.	a.e.	град.	град.	град.	
21.01.22	1.858	0.544	0.848	2.869	0.349	140.611	27.875	3.80

Дата	r,	Δ ,	ph,	$N \times \Phi$ ильтр	t c
	a.e.	a.e.	град.		ι, τ
20.05.2020	1.113	0.102	7.684	$370 \times R$	5-60
21.05.2020	1.122	0.110	7.680	$313 \times R$	5 - 10
22.05.2020	1.128	0.117	7.776	$10 \times B, 10 \times V, 258 \times R,$	5-60
				$10 \times I$	
23.05.2020	1.136	0.125	7.950	$148 \times R$	5 - 30

Таблица 2: Журнал наблюдений астероида 2009 XO в ГисАО



Рис. 1: Астероид 2009 ХО, 21 мая 2020 г., АЗТ-8 ГисАО, экспозиция 50 с.

для Земли. С учетом этого, а также размера, превышающего пороговый лимит 140 м, астероид был включен в группу потенциально опасных астероидов (ПОА) [3].

Элементы орбиты ПОА 2009 XO, принадлежащего группе Аполлона, приведены в табл. 1, где a — большая полуось, e — эксцентриситет, q и Q — перигелийное и афелийное расстояния, i — наклонение орбиты, ω — аргумент перигелия, Ω — долгота восходящего узла, T_j — критерий Тиссерана [1]. Астероид перемещается по низко наклоненной к эклиптике орбите, угол наклонения составляет всего лишь 0.46°, с малым перигелийным расстоянием 0.34 а.е., согласно значению критерия Тиссерана его орбита классифицируется как астероидная.

Согласно динамическим расчетам, в период 2000–2091 гг. астероид приближался и сблизится с Землей на различных расстояниях 11 раз [1]. 4 апреля 2020 г. астероид прошел перигелий своей орбиты, и чуть позже в мае произошел очередной близкий подход астероида к Земле. В ночь с 7 на 8 мая астероид пролетел мимо Земли на расстоянии менее 0.022 а.е. (3.3 млн. км). Отметим, что следующее сближение астероида с Землей на расстоянии 0.44 а.е. (66 млн. км) произойдет 4 июня 2025 г. [1].

2. Наблюдения и результаты

На телескопе АЗТ-8 Гиссарской астрономической обсерватории (ГисАО) ИА НАНТ с 20 по 23 мая 2020 г. выполнены наблюдения астероида 2009 ХО и получено несколько сотен его изображений. Телескоп имеет светосилу D/F = 700 мм/2820 мм и снабжен ПЗС камерой ССD FLI ProLine PL09000 со следующими характеристиками: поле зрения 44' × 44', масштаб 1.75"/пиксель. Использовались стандартные широкополосные фильтры BVRI системы Джонсона-Козинса. Для уменьшения уровня шумов ПЗС камеры аппаратура была охлаждена до температуры –20°С.

С 20 по 23 мая 2020 г. в ГисАО получено 900 снимков в фильтре R, а 22 мая получено 288 снимков в фильтрах BVRI. Журнал наблюдений и геометрические аспекты астероида приведены в табл. 2. Изображение астероида 2009 XO, полученное во время наблюдений, показано на рис. 1.

N⁰	Дата, 2020	Момент наблюдений (UT)	α	δ	т (зв. вел.)
1	20 мая	$17^{h}54^{m}43^{s}.77$	$15^{h}14^{m}46^{s}.73$	-20°09′15″.2	16.3
2	20 мая	17 55 26.97	$15\ 14\ 46.84$	$-20 \ 09 \ 16.0$	16.0
3	20 мая	17 56 10.17	$15 \ 14 \ 46.92$	$-20 \ 09 \ 16.2$	16.2
4	20 мая	17 56 54.24	15 14 47.11	$-20 \ 09 \ 16.5$	16.0
5	20 мая	17 58 20.64	$15 \ 14 \ 47.32$	$-20 \ 09 \ 17.2$	16.4
6	20 мая	17 59 03.84	15 14 47.40	$-20 \ 09 \ 17.2$	16.3
7	20 мая	18 30 08.35	$15 \ 14 \ 51.96$	-20 09 30.9	16.3
8	20 мая	18 30 51.55	$15 \ 14 \ 52.03$	$-20 \ 09 \ 31.1$	16.2
9	20 мая	18 32 18.81	$15 \ 14 \ 52.25$	-20 09 32.0	16.1
10	20 мая	18 33 02.01	$15 \ 14 \ 52.35$	$-20 \ 09 \ 32.2$	15.9
11	20 мая	18 33 45.216	15 14 52.47	$-20 \ 09 \ 32.7$	16.0
12	20 мая	19 50 11.328	$15\ 15\ 03.54$	-20 10 03.2	16.3
13	20 мая	19 50 54.528	$15\ 15\ 03.65$	-20 10 03.5	15.7
14	20 мая	$19\ 51\ 37.728$	$15 \ 15 \ 03.76$	-20 10 03.6	15.6
15	20 мая	20 22 38.784	$15\ 15\ 08.29$	-20 10 15.5	15.6
16	20 мая	$20\ 23\ 21.984$	$15\ 15\ 08.36$	-20 10 15.8	15.7
17	20 мая	$20 \ 24 \ 05.184$	$15\ 15\ 08.50$	$-20 \ 10 \ 16.0$	16.3
18	20 мая	20 24 48.384	$1\overline{5} \ 15 \ 08.55$	-20 10 15.9	15.9
19	20 мая	20 25 30.720	$15\ 15\ 08.66$	$-20\ 10\ 16.4$	16.1
20	20 мая	20 26 13.920	15 15 08.77	$-20 \ 10 \ 16.7$	16.2
21	20 мая	$20\ 57\ 57.312$	$15\ 15\ 13.45$	$-20 \ 10 \ 27.8$	16.0
22	20 мая	$20 \ 58 \ 40.512$	$15\ 15\ 13.55$	-20 10 28.6	17.7
23	20 мая	20 59 23.712	$15\ 15\ 13.63$	$-20 \ 10 \ 29.1$	16.5
24	20 мая	21 00 06.912	15 15 13.70	-20 10 29.0	16.5
25	20 мая	21 00 05.012	15 15 13.85	-20 10 29.0	16.7
26	20 мая	21 01 09.332	15 15 13.96	-20 10 29.2	15.8
27	20 мая	21 02 13.651	15 15 14.07	-20 10 29.7	16.0
28	21 мая	$16 \ 36 \ 33.984$	$15\ 18\ 22.14$	-20 18 00.1	16.3
29	21 мая	$16 \ 37 \ 26.688$	$15\ 18\ 22.16$	-20 18 01.2	16.8
30	21 мая	16 38 20.256	15 18 22.37	-20 18 00.4	17.2
31	21 мая	16 39 13.824	$15\ 18\ 22.50$	-20 18 00.6	16.0
32	21 мая	16 40 07.392	15 18 22.53	-20 18 01.5	15.9
33	21 мая	17 04 28.742	15 18 25.79	$-20 \ 18 \ 11.8$	15.6
34	21 мая	17 05 34.099	15 18 25.82	$-20 \ 18 \ 11.4$	16.4
35	21 мая	17 06 39.456	15 18 25.97	-20 18 12.6	15.9
36	21 мая	17 07 44.726	15 18 26.11	-20 18 13.0	16.6
37	21 мая	17 08 50.083	15 18 26.19	$-20 \ 18 \ 13.3$	16.5
38	21 мая	17 09 55.440	15 18 26.27	-20 18 13.5	15.9
39	21 мая	17 10 07.968	15 18 26.47	$-20\ 18\ 13.6$	15.4
40	21 мая	17 11 01.536	15 18 26.55	-20 18 13.8	16.1
41	21 мая	17 11 54.240	15 18 26.68	-20 18 14.0	16.1
42	21 мая	17 14 34.944	15 18 26.98	-20 18 15.4	16.2
43	21 мая	17 15 28.512	15 18 27.14	$-20\ 18\ 15.7$	16.0
44	21 мая	17 16 22.080	15 18 27.24	$-20\ 18\ 16.3$	16.0
45	21 мая	17 17 15.648	15 18 27.33	-20 18 16.7	15.7
46	21 мая	17 18 09.216	15 18 27.49	$-20\ 18\ 16.7$	15.8
47	21 мая	17 19 01.920	15 18 27.59	-20 18 16.9	16.0
48	21 мая	17 19 55.488	15 18 27.69	-20 18 17.3	16.0
49	21 мая	17 20 49.056	15 18 27.78	-20 18 18.1	10.1
50	21 мая	17 21 42.624	15 18 27.95	-20 18 18.1	15.7
51	21 мая	17 24 23.328	15 18 28.27	-20 18 19.3	10.4
52	21 мая	17 25 10.890	15 18 28.36	-20 18 19.4	10.2
53	21 мая	17 20 10.404	15 18 28.45	-20 18 19.7	15.0

Таблица 3: Экваториальные координаты астероида 2009 ХО по наблюдениям в ГисАО.

№	Дата, 2020	Момент наблюдений (UT)	α	δ	т (зв. вел.)
54	21 мая	$17^{h}28^{m}50^{s}.304$	$15^{\rm h}18^{\rm m}28^{\rm s}.83$	$-20^{\circ}18'21''.5$	15.6
55	21 мая	17 29 43.872	$15\ 18\ 28.94$	$-20 \ 18 \ 21.4$	15.6
56	21 мая	17 30 37.440	15 18 29.02	$-20 \ 18 \ 21.6$	16.0
57	21 мая	17 34 10.848	15 18 29.49	$-20 \ 18 \ 23.1$	16.0
58	21 мая	17 35 04.416	$15\ 18\ 29.61$	$-20 \ 18 \ 23.3$	16.1
59	21 мая	17 35 57.984	$15\ 18\ 29.74$	$-20 \ 18 \ 23.8$	15.6
60	21 мая	17 36 51.552	15 18 29.82	$-20 \ 18 \ 24.3$	16.0
61	21 мая	17 37 45.120	$15\ 18\ 29.98$	-20 18 24.4	16.0
62	21 мая	17 38 38.688	15 18 30.11	-20 18 24.7	16.2
63	21 мая	17 39 32.256	15 18 30.23	$-20 \ 18 \ 25.2$	16.1
64	21 мая	17 44 00.096	$15\ 18\ 30.76$	-20 18 26.9	16.0
65	21 мая	$17 \ 44 \ 52.800$	$15\ 18\ 30.90$	$-20 \ 18 \ 27.5$	15.6
66	21 мая	$17 \ 45 \ 46.368$	$15\ 18\ 31.02$	-20 18 27.7	15.8
67	21 мая	17 46 39.936	$15\ 18\ 31.12$	-20 18 27.7	16.0
68	21 мая	17 48 27.072	$15\ 18\ 31.35$	-20 18 28.5	16.0
69	21 мая	17 49 20.640	$15\ 18\ 31.48$	-20 18 29.0	15.8
70	21 мая	17 50 13.344	$15 \ 18 \ 31.56$	$-20\ 18\ 29.4$	16.1
71	21 мая	17 53 47.616	15 18 32.02	-20 18 30.4	15.6
72	21 мая	17 54 40.320	$1\overline{5} \ 18 \ 32.13$	-20 18 30.9	15.9
73	21 мая	17 55 33.888	15 18 32.26	$-20 \overline{18} 31.3$	16.0
74	21 мая	17 56 27.456	$1\overline{5} \ 18 \ 32.34$	$-\overline{20\ 18\ 31.7}$	16.1
75	21 мая	17 57 20.160	15 18 32.48	$-20 \overline{18} 31.9$	15.9
76	21 мая	17 58 13.728	$15 \ 18 \ 32.58$	-20 18 32.3	16.0
77	21 мая	$17 \ 59 \ 07.296$	$15\ 18\ 32.71$	-20 18 32.5	15.9
78	21 мая	$18\ 00\ 08.640$	$15\ 18\ 32.84$	-20 18 32.8	16.2
79	21 мая	$18\ 03\ 34.272$	$15\ 18\ 33.28$	-20 18 34.1	16.0
80	21 мая	18 04 26.976	$15\ 18\ 33.37$	-20 18 34.7	15.9
81	21 мая	18 05 20.544	$15\ 18\ 33.46$	-20 18 35.1	15.9
82	21 мая	18 06 14.112	15 18 33.61	-20 18 35.5	15.8
83	21 мая	18 07 07.680	15 18 33.73	-20 18 35.6	15.6
84	21 мая	18 08 38.400	15 18 33.81	-20 18 35.9	15.9
85	21 мая	18 08 53.952	15 18 33.97	-20 18 36.3	15.8
86	21 мая	18 09 47.520	15 18 34.04	-20 18 36.3	15.8
87	22 мая	16 43 45.120	15 21 42.01	$-20\ 25\ 56.1$	15.6
88	22 мая	16 45 41.760	15 21 42.21	$-20 \ 25 \ 57.0$	15.8
89	22 мая	16 46 40.512	15 21 42.34	$-20\ 25\ 56.7$	16.4
90	22 мая	16 54 28.800	15 21 43.30	$-20\ 25\ 59.5$	16.3
91	22 мая	16 55 27.552	15 21 43.38	-20 26 00.3	16.8
92	22 мая	16 57 24.192	15 21 43.59	-20 26 01.4	16.2
93	22 мая	16 58 22.080	15 21 43.69	-20 26 01.6	16.6
94	22 мая	10 59 20.832	15 21 43.79	-20 26 01.2	16.5
95	22 мая	17 12 56 064	15 21 44.84	-20 26 04.9	10.5
96	22 мая	17 13 56.064	15 21 45.46	-20 26 06.2	16.3
97	22 мая	17 16 59 200	15 21 45.53	-20 26 06.5	10.3
98	22 мая	17 10 52.320	15 21 45.75	$-20\ 26\ 07.4$	10.3
99	22 мая	17 17 50.208	15 21 45.87	$-20\ 20\ 07.5$	10.2
100	22 мая	17 18 48.900	15 21 40.03	$-20\ 20\ 07.8$	10.
101	22 мая	17 26 27 249	15 21 40.37	-20 20 09.5	10.0
102	22 мая 22 мая	17 27 25 126	15 21 40.84	$-20\ 20\ 10.5$	10.0
103	22 Mag	17 27 33.130 17 29 98 029	15 21 40.92	$-20\ 20\ 11.1$	10.4
104	22 Max	17 33 26 784	10 21 47.49	$-20\ 20\ 12.4$ $-20\ 96\ 12.7$	10.0
100	22 мая 22 мая	17 34 24 672	15 21 47.02	$-20\ 20\ 12.7$ $-20\ 26\ 12.0$	10.5
100	22 Max	17 35 93 494	15 21 41.10	-20 20 12.9	16.3
107	22 Man 22 Man	17 36 21 319	15 21 47.01	-20 20 13.0	16.1
100	22 Man	11 00 21.012	10 41 41.90	-20 20 19.9	10.1

N⁰	Дата, 2020	Момент наблюдений (UT)	α	δ	т (зв. вел.)
109	22 мая	$17^{\rm h} \ 37^{\rm m} \ 20^{\rm s}.064$	$15^{\rm h} \ 21^{\rm m} \ 48^{\rm s}.03$	$-20^{\circ} \ 26' \ 14''.9$	16.2
110	22 мая	17 42 12.096	$15\ 21\ 48.59$	$-20 \ 26 \ 15.7$	16.4
111	22 мая	17 43 09.984	15 21 48.70	$-20 \ 26 \ 16.0$	16.0
112	22 мая	17 44 07.872	15 21 48.82	$-20 \ 26 \ 16.3$	16.1
113	22 мая	17 45 06.624	$15\ 21\ 48.95$	$-20 \ 26 \ 16.8$	16.2
114	22 мая	17 46 05.376	15 21 49.00	$-20 \ 26 \ 16.9$	15.8
115	22 мая	17 47 04.128	15 21 49.14	$-20 \ 26 \ 17.6$	16.0
116	22 мая	17 48 02.016	15 21 49.28	$-20 \ 26 \ 17.5$	16.1
117	22 мая	17 51 56.160	$15\ 21\ 49.69$	$-20 \ 26 \ 18.7$	16.6
118	22 мая	17 52 54.048	$15\ 21\ 49.79$	$-20 \ 26 \ 19.1$	16.7
119	22 мая	17 53 52.800	15 21 49.91	$-20 \ 26 \ 19.5$	16.6
120	22 мая	17 54 50.688	$15\ 21\ 50.00$	$-20 \ 26 \ 20.1$	16.1
121	22 мая	17 55 49.440	$15\ 21\ 50.10$	$-20 \ 26 \ 20.0$	16.2
122	22 мая	17 56 47.328	15 21 50.21	$-20 \ 26 \ 20.7$	16.0
123	23 мая	20 34 48.000	$15\ 25\ 00.72$	$-20 \ 33 \ 39.4$	16.3
124	23 мая	20 35 51.936	$15\ 25\ 00.80$	$-20 \ 33 \ 39.4$	16.8
125	23 мая	$20 \ 39 \ 01.152$	$15\ 25\ 01.14$	$-20 \ 33 \ 40.0$	16.5
126	23 мая	$20 \ 41 \ 08.160$	$15\ 25\ 01.31$	$-20 \ 33 \ 40.9$	16.6
127	23 мая	20 42 12.096	$15\ 25\ 01.38$	$-20 \ 33 \ 40.4$	16.7
128	23 мая	20 44 18.240	$15\ 25\ 01.62$	$-20 \ 33 \ 41.3$	16.6
129	23 мая	$20 \ 46 \ 25.248$	$15\ 25\ 01.78$	$-20 \ 33 \ 40.7$	16.1
130	23 мая	20 49 35.328	$15\ 25\ 02.11$	$-20 \ 33 \ 41.7$	16.2
131	23 мая	20 51 42.336	$15\ 25\ 02.32$	$-20 \ 33 \ 43.1$	16.0
132	23 мая	20 54 52.416	$15\ 25\ 02.61$	$-20 \ 33 \ 41.7$	16.3
134	23 мая	$20\ 55\ 55.488$	$15\ 25\ 02.80$	$-20 \ 33 \ 42.0$	16.8
135	23 мая	20 56 58.560	$15\ 25\ 02.84$	$-20 \ 33 \ 43.1$	16.5
136	23 мая	20 58 01.632	$15\ 25\ 03.00$	$-20 \ 33 \ 42.1$	16.6
137	23 мая	21 01 11.712	$15\ 25\ 03.23$	$-20 \ 33 \ 44.3$	16.5
138	23 мая	21 07 31.872	$15\ 25\ 03.92$	$-20 \ 33 \ 46.4$	16.6
139	23 мая	21 13 52.032	$15\ 25\ 04.50$	$-20 \ 33 \ 47.3$	16.7

Первичная обработка кадров проведена по стандартной процедуре с использованием кадров «Dark», «Flat» и «Bias» полученных в ночи наблюдений и учитывающих темновой сигнал, выравнивание полей изображений, уровень шумов и ошибки матрицы ПЗС-камеры. Астрометрическая обработка наблюдений была выполнена с помощью программного пакета (ПП) АПЕКС-II [4]. В качестве опорного использован астрометрический каталог UCAC5, в котором астрометрическая точность координат звезд не превышает 0.05". При измерениях использована апертура радиусом, 4.5" проекция которой на небесную сферу соответствует



Рис. 2: Видимая траектория ПОА 2009 ХО по наблюдениям в ГисАО и данным других наблюдений.

 \sim 585.91 км. Экваториальные координаты 2009 XO, найденные в результате астрометрических измерений кадров, приведены в табл. 3.

В табл. 4 представлены средние значения отклонений $(O-C)''_{\alpha}$ и $(O-C)''_{\delta}$ для координат α и δ , соответственно, а также их средние квадратичные ошибки σ_{α} и σ_{δ} по наблюдениям в ГисАО. Как видно, средняя по всем кадрам ошибка астрометрической редукции не превышает 0.063" и 0.093" для прямого восхождения α и склонения δ , соответственно. Результаты определения координат астероида по наблюдениям в ГисАО приведены на рис. 2, где по оси абсцисс даны прямое восхождение α и по оси ординат — склонение δ . На этом графике (рис. 2) слева для сравнения приведены также координаты объекта по другим наблюдениям из базы данных [5].

Таблица 4: Средние разности (О-С) и их стандартные отклонения для астероида 2009 XO по наблюдениям в ГисАО

Дата	$(O-C)''_{\alpha}$	σ''_{lpha}	$(O-C)_{\delta}^{\prime\prime}$	σ_{δ}''
20.05.2020	-0.148	0.033	0.294	0.052
21.05.2020	-0.171	0.050	0.288	0.030
22.05.2020	-0.157	0.063	0.233	0.050
23.05.2020	-0.177	0.020	0.291	0.093

Для среднего момента наблюдений с использованием 150 измерений и ПП ЭПОС [6] вычислена первоначальная орбита астероида, приведенная в табл. 5. Здесь даны стандартные элементы орбиты в равноденствии 2000.0, а также n — среднее суточное движение, σ — средняя квадратичная ошибка. Для сравнения в табл. 5 приведена орбита, вычисленная на основе 693 измеренных положений астероида по наблюдениям в различных обсерваториях согласно базе данных MPC [7], и в последнем столбце приведены величины разности между вычисленной нами орбитой и орбитой MPC, обозначенные как χ . Как видно, с учетом разности моментов времени, на которые вычислена орбита, по наблюдениям в ГисАО получена орбита, близкая к орбите MPC.

Таблица 5: Орбита астероида 2009 XO, вычисленная по наблюдениям в ГисАО, и орбита MPC (J2000.0)

Элементы орбиты	ГисАО	MPC [7]	χ
	[данная работа]		
Кол-во положений,	150	693	—
использованное			
для вычисления			
орбиты			
Т	JD 2458934.940	JD2459864.467	—
Эпоха	JD 2458992.5	JD2459600.5	—
e	$0.543617{\pm}0.000021$	0.543616	1E-06
<i>a</i> , a.e.	$1.858433 {\pm} 0.000735$	1.8584107	2.23E-05
q, a.e.	$0.884805{\pm}0.000466$	0.8848115	-6.5E-06
і, град.	$0.349307 {\pm} 0.000110$	0.349631	-0.000324
ω , град.	$140.610518 {\pm} 0.000240$	140.610538	-2E-05
Ω , град.	$27.874628 {\pm} 0.000170$	27.874694	-6.6E-05
n, град./сут.	$0.389035{\pm}0.000249$	0.389036	-1E-06
σ	0".370	0".320	—

Для уточнения некоторых физических параметров астероида 2009 XO по стандартной процедуре и с использованием ПП АПЕКС-II [4] выполнена фотометрическая обработка кадров. Видимые звездные величины определены с использованием звезд сравнения из каталога APASS, для которых блеск определен с точностью 0.03^m [8].

На рис. 3 представлены кривые блеска астероида в фильтре R, здесь по оси ординат отложены видимые звездные величины m и по оси абсцисс — даты наблюдений в юлианских днях. Средние значения видимых звездных величин объекта, полученные в фильтрах BVRI, даны в табл. 6. Кривые блеска показывают отсутствие значительных изменений видимых звездных величин, небольшие колебания блеска (пределах ошибок измерений) 21 мая обусловлены погодными условиями. Можно предположить, что на поверхности астероида, соответствующей фазовому углу наблюдений, отсутствуют крупные образования.

май (UT),	В	V	R	Ι
2020 г.				
20.1909	—	—	$16.42 {\pm} 0.07$	—
21.2091	_	-	$16.45 {\pm} 0.03$	-
22.1914	$17.56 {\pm} 0.02$	$16.83 {\pm} 0.05$	$16.42 {\pm} 0.06$	$15.88 {\pm} 0.07$
23.1171	_	_	$16.42 {\pm} 0.03$	_

Таблица 6: Видимые звездные величины астероида 2009 ХО по наблюдениям в ГисАО

Таблица 7: Абсолютный блеск Н и показатели цвета астероида 2009 ХО по наблюдениям ГисАО в 2020 г.

май (UT),	В	V	R	Ι	B–V	V–R	R–I	B–R
2020 г.								
20.1909			$20.13 {\pm} 0.01$					
21.2091			$20.99 {\pm} 0.03$					
22.1914	$20.94{\pm}0.02$	20.21 ± 0.05	$19.80 {\pm} 0.06$	$19.25 {\pm} 0.07$	0.73	0.41	0.55	1.14
23.1171			$19.69 {\pm} 0.03$					

Таблица 8: Оценка диаметра астероида 2009 ХО по наблюдениям ГисАО в 2020 г.

май (UT),	<i>r</i> , a.e.	Δ , a.e.	ph, град.	H_R , зв.вел.	<i>D</i> , км	<i>D</i> , км
2020 г.					$(p_v = 0.14)$	$(p_v = 0.20)$
20.1909	1.113	0.102	7.684	$20.13 {\pm} 0.01$	$0.33 {\pm} 0.01$	$0.27 {\pm} 0.08$
21.2091	1.122	0.110	7.680	$19.99 {\pm} 0.03$	$0.34{\pm}0.03$	$0.29 {\pm} 0.01$
22.1914	1.128	0.117	7.776	$19.80 {\pm} 0.06$	$0.32{\pm}0.04$	$0.38 {\pm} 0.04$
23.1171	1.136	0.125	7.950	$19.70 {\pm} 0.03$	$0.40{\pm}0.02$	$0.34{\pm}0.04$

Абсолютная величина *H* вычислена по следующей полуэмпирической формуле, учитывающей фазовый угол астероида [9]:

$$H = m - 5 \log(r\Delta) + 2.5 \log[(1 - G)\Phi_1 + G\Phi_2], \Phi_i = \exp[-A_i tg(\frac{\beta}{2})^{B_i}], i = 1, 2,$$

где β — фазовый угол (ph) объекта, G — параметр наклона, найденный лишь для небольшого числа астероидов, для остальных принято значение G = 0.15, Φ_1 , Φ_2 — функции угла фазы, $A_1 = 3.33$, $A_2 = 1.87$, $B_1 = 0.63$ и $B_2 = 1.22$ — коэффициенты, значения которых приведены в работе [10].

Абсолютные звездные величины астероида 2009 XO (средние значения за ночь) приведены в табл. 7, где также даны величины показателей цвета B–V, V–R, R–I, B–R. Измеренные абсолютные звездные величины астероида в полосе R находятся в диапазоне от $19.25 \pm 0.07^{\text{m}}$ до $20.94 \pm 0.02^{\text{m}}$, в фильтре V $H = 20.21 \pm 0.05^{\text{m}}$ и эта величина близка к эфемеридному значению $H = 20.65^{\text{m}}$. В период мониторинга существенных изменений абсолютного блеска в фильтре R не выявлено.

Показатель цвета наряду с альбедо и спектральным типом является важной физической величиной, позволяющей определить принадлежность астероида к какому-либо таксономическому классу и на этой основе предположить его минералогический состав. Многоцветные наблюдения астероида 2009 XO в ГисAO позволили оценить показатели его цвета, приведенные в табл. 7. В статье [11] приводится диаграмма расположения различных популяций малых тел в соответствии с показателями цвета B–V и V–R, где таксономическая классификация астероидов дана по Tholen [12]. Сопоставляя с этой диаграммой полученные в настоящей работе показатели цвета, можно отнести астероид 2009 XO к спектральному типу X.

Эффективный диаметр астероида *D* вычислен по следующему эмпирическому соотношению, принятому для оценки размеров астероидов [13]:

$$D = \frac{1329}{\sqrt{p_{\nu}} \cdot 10^{0.2H}},$$

где p_v — геометрическое альбедо астероида, H — абсолютная звездная величина в каком-либо фильтре. Альбедо 2009 XO не измерено, поэтому для p_v мы использовали два значения — 0.14 принятое в базе данных [1] для оценки размера AC3 с неизвестным альбедо и 0.20 [6]. Оценки диаметра астероида по измерениям в фильтре R приведены в табл. 8 и в среднем находятся в диапазоне 0.35 ± 0.09 км и 0.32 ± 0.04 км при альбедо



Рис. 3: Кривые блеска астероида 2009 ХО по наблюдениям в ГисАО.

0.14 и 0.20, соответственно. Как отмечено выше, доподлинно размер объекта не установлен, имеется оценка 0.24 км [2], по другим данным диаметр оценен в интервале 0.20 – 0.44 км, среднее значение 0.32 км [14]. Требуется дальнейшее уточнение альбедо и размера астероида.

3. Заключение

В результате наблюдений потенциально опасного астероида 2009 XO, выполненных в Гиссарской астрономической обсерватории ИА НАНТ в период его сближения с Землей в мае 2020 г.:

- определены положения объекта, построена видимая траектория;
- достаточная точность астрометрической обработки позволила вычислить первоначальную орбиту, которая очень близка к орбите базы данных MPC [5];
- измерен видимый блеск в фильтрах BVRI, построены кривые блеска по наблюдениям четырех ночей;
- определен абсолютный блеск, по нашим измерениям его величина в фильтре V близка к эфемеридному значению [3];
- выявлено отсутствие значительных изменений блеска в пределах ошибок измерений;
- оценены показатели цвета и сделано предположение о его принадлежности к спектральной группе X, состоящей из астероидов Е-, М- и Р-типов [12]. Мы считаем, что 2009 XO относится к М-типу, включающему астероиды металлического (железо, никель) состава со средним альбедо (свыше 10% и менее 30%).
- средняя оценка диаметра составила 0.35±0.09 км и 0.32±0.04 км при альбедо 0.14 и 0.20 соответственно, что согласуется с имеющимися данными по размеру астероида [2].

Динамические и физические данные, полученные на основе новых наблюдений, указывают, что сближение астероида с Землей не привело к их значительным изменениям. Поскольку астероид 2009 XO еще не раз сблизится с Землей, необходимы дальнейшие наблюдения с целью контроля его динамических характеристик и уточнения альбедо и диаметра.

Адрес для корреспонденции: Кохирова Гулчехра Исроиловна и Буриев Анварджон Махмадалиевич. 736063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, пр. Айни, 299/5, Институт астрофизики НАНТ. E-mail:kokhirova2004mail.ru, anvar10@mail.ru.

Список литературы

- NASA, NASA Jet Propulsion Laboratory, 2022, URL https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr =438908.
- Taylor et al., Arecibo Radar Observations of 14 High-Priority Near-Earth Asteroids in CY2020 and January 2021, URL https://www.naic.edu/ pradar/Taylor-R3037-HighPriority-2020.pdf.
- 3. CNEOS, Jet Propulsion Laboratory, CNEOS (Center of Near Earth Object Studies), URL https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr=438908.
- 4. A. V. Devyatkin, D. L. Gorshanov, V. V. Kouprianov, and I. A. Verestchagina, Solar System Research, 44, 68, 2010.
- 5. CNEOS, The International Astronomical Union Minor Planet Center, URL https://minorplanetcenter.net.
- 6. V. N. L'vov and S. D. Tsekmeister, Solar System Research, 46, 177, 2012.
- 7. A. U. Tomatic, URL https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K21/K21Y76.html.
- A. A. Henden, M. Templeton, D. Terrell, T. C. Smith, S. Levine, and D. Welch, American Astronomical Society, AAS Meeting #225, id.336.16, 2336, 815, 2016.
- 9. E. Bowell, B. Hapke, and D. Domingue, In: Asteroids. Ed. Binzel R. P., Gehrels T., Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press., 524–556, 1989.
- 10. A. Penttila, V. G. Shevchenko, O. Wilkman, and K. H. Muinonen, Planetary and Space Science, 123, 117, 1989.
- 11. D. Jewitt, The Astronomical Journal, 150, 18, 2015.
- 12. D. J. Tholen, Ph.D. Thesis, Univ. of Arizona, 1, 167, 1984.
- 13. A. W. Harris, *Icarus*, **156**, 184, 2002.
- Very small Apollo-class Asteroid, JPL Small-Body Database, https://www.spacereference.org/asteroid/438908-2009-xo.

Статистический анализ основных физических и динамических параметров астероидов семейства Фемиды

Кузнецов С.Ю.¹, Бусарев В.В.^{2,3}

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Факультет космических исследований, Москва, Россия ² Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

³Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В настоящей статье объектом исследования является предварительная теоретическая оценка происхождения астероидов семейства Фемиды. Основные динамические параметры астероидов, в отличие от оскулирующих элементов, способны оставаться постоянными в масштабах десятков миллонов лет, что позволяет использовать их в качестве анализа происхождения семейства астероидов. Физические параметры достаточно больших астероидов могут оставаться практически неизменными в течение всего времени их существования. Данный анализ представляет интерес с учетом недавнего обнаружения сублимационно-пылевой активности Фемиды вблизи перигелия и позволяет сделать заключение о дальнейшей необходимости изучения данного семейства астероидов.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 18.07.2022 г.

Ключевые слова: астероиды, семейство Фемиды

Statistical analysis of the main physical and dynamic parameters of asteroids of the Themis family

Kuznetsov S.Y.¹, Busarev V.V.^{2,3}

¹Moscow State University, Faculty of Space Research, Moscow, Russia

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

³Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

In this article, the object of research is a preliminary theoretical assessment of the origin of asteroids of the Themis family. The main dynamic parameters of asteroids, unlike osculating elements, are able to remain constant on scales of tens of millions of years, which allows them to be used as an analysis of the origin of a family of asteroids. The physical parameters of sufficiently large asteroids can remain practically unchanged throughout the entire time of their existence. This analysis represents interest in view of the recent discovery of sublimation-dust activity of Themis near the perihelion and allows us to conclude that there is a further need to study this family of asteroids.

Received 10.05.2022. Accepted 18.07.2022.

Keywords: asteroids, Themis family

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.002

1. Введение

(24) Фемида — астероид главного пояса астероидов с достаточно большим диаметром (D = 198 км [1]), который принадлежит к спектральному классу С (по классификации Толена) с низким значением геометрического альбедо (pv = 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. Такое предположение подтверждается обнаружением льда и органики на поверхности Фемиды при ее наземных наблюдениях вблизи 3 мкм [5]. При этом водяной лед 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, в первую очередь — его экскавация с большей глубины при ударных процессах.

2. Описание семейства

Семейство Фемиды — это крупное астероидное семейство, расположенное во внешней части главного пояса астероидов между орбитами Марса и Юпитера. Оно находится на среднем расстоянии 3.13 а.е. от Солнца и является одним из самых густонаселенных семейств. По современным оценкам алгоритма метода иерархической кластеризации (от англ. Hierarchical Clustering Method, сокращенно HCM), который ищет астероиды с небольшим расстоянием между собой или до основного астероида, семейство Фемиды насчитывает в своем составе 4782 астероида [6]. Семейство состоит в основном из низкоальбедных астероидов класса С (рис. 1)



Рис. 1: Распределение астероидов семейста Фемиды по спектральному типу (сверху) и распределение семейства по размерам (снизу).

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: 3.02 а.е < a < 3.270 а.е, 0.070 < e < 0.225, $0.40^{\circ} < i < 3.450^{\circ}$. Гистограммы распределения этих параметров семейства представлены на рис. 2.

3. Анализ

Величина большой полуоси (рис. 2a) (24) Фемиды с высокой точностью совпадает со средним значением этого параметра для всего семейства. Этот факт, а также наибольший размер Фемиды по сравнению с другими членами семейства и схожесть их по спектральному типу (рис. 1), 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 наклонений орбит в сторону больших значений астероидов меньших размеров, которые могли возникнуть как при катастрофическом ударе, так и вследствие (рис. 26, в) более сильного воздействия эффекта Ярковского, который за короткое время может существенно изменять орбиту астероида, а также большей чувствительности малых тел (сильной чувствительности) небольшим возмущениям со стороны планет. Распределения главных параметров астероидов, для которых определен спектральный тип (позволяет исключить случайные астероиды из общего окружающего фона) показывает такую же картину. Аналогичная картина наблюдается и для астероидов, для которых определены размеры (все они имеют диа-



Рис. 2: Распределение семейства по большой полуоси (a), эксцентриситету (б) и наклонению орбиты (в).

метр больше 2 км), чтобы исключить влияния малых астероидов, которые могли быть захвачены за время эволюции.

4. Заключение

По распределению основных параметров для разных выборок можно предполагать, что значительная часть астероидов рассматриваемого семейства близка по происхождению к (24) Фемиде и должна обладать аналогичными свойствами, в том числе иметь в недрах в составе своего вещества водяной лед и проявлять сублимационную активность вблизи перигелия.

Работа поддержана грантом РФФИ 22-12-00115.

Список литературы

- 1. JPL, Small-body database lookup, URL https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_lookup.html#/?sstr24.
- 2. D. Nesvorný, M. Broz, and V. Carruba, *Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families* (2015), URL https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch016.
- I. Houten-Groeneveld, C. Houten, and V. Zappala, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 35, 223 232 (1979), 35, 1979.
- 4. V. V. Busarev, E. V. Petrova, T. R. Irsmambetova, M. P. Shcherbina, and S. I. Barabanov, *Icarus*, **369**, 114634, 2021, URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103521002955.
- 5. A. S. Rivkin and J. P. Emery, Nature, 464, 1322, 2010.
- 6. D. Nesvorny, NASA Planetary Data System, EAR-A-VARGBDET-5-NESVORNYFAM-V3.0, 2015.

Статистика метеоров по результатам наблюдений на ММТ-9 и перспективы их исследований

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

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

9-канальная система Мини-МегаТОРТОРА (ММТ-9) позволяет исследовать метеоры с блеском вплоть до видимой звездной величины 10.5^m с временным разрешением 0.1 секунды. База данных содержит свыше 330 тысяч метеоров, зарегистрированных с 2014 по 2022 г. В базисных наблюдениях с ММТ-9 и широкоугольным телескопом FAVOR были зарегистрированы около сотни треков, для которых были получены траектории метеоров в атмосфере. Начаты спектральные наблюдения метеоров с помощью объективной призмы, которой снабжен один из каналов ММТ-9. В этом режиме будут изучаться спектры метеоров вплоть до 6 видимой звездной величины со спектральным разрешением 150 Å.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 28.07.2022 г.

Ключевые слова: метеор, метеорный поток

Statistics of meteors based on the results of observations at the MMT-9 and meteor research prospects

Lyapsina N.V., Karpov S.V., Beskin G.M., Gutaev A.G., Ivanov E.A.

Special Astrophysical Observatory of the RAS, Nizhny Arkhyz, Russia

The 9-channel Mini-MegaTORTORA (MMT-9) system makes it possible to study meteors with limiting apparent magnitude to $10.5^{\rm m}$ with a time resolution of 0.1 seconds. The MMT-9 database contains over 330 thousand meteors registered from 2014 to 2022. In double-station observations with MMT-9 and the FAVOR wide-angle telescope, about a hundred meteor tracks were recorded, for which atmospheric trajectories were obtained. Spectral observations of meteors have begun with the help of an objective prism, which is equipped with one of the MMT-9 channels. In this mode, the spectra of meteors up to apparent magnitude 6 will be studied with a spectral resolution of 150 Å.

Received 10.05.2022. Accepted 28.07.2022.

Keywords: meteor, meteor shower

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.003

1. Введение

С 2014 г. с помощью широкоугольного многоканального телескопа высокого временного разрешения Мини-МегаТОРТОРА (ММТ-9) проводятся наблюдения северного неба. Инструмент имеет два режима мониторинга — широкопольный, когда 9 каналов системы выстраиваются в квадрат 3×3 общим полем зрения примерно 30×30 градусов, и исследовательский режим с полем зрения около 10×10 градусов, когда все каналы системы ориентированы на одну область неба и наблюдения проводятся одновременно с различными экспозициями и фильтрами (каждый канал оснащен набором светофильтров BVR-Джонсона и поляризационным фильтром, которые могут быть введены при необходимости за 2–3 секунды).

Основным режимом наблюдений является широкопольный мониторинг. Площадки наблюдаются в течение 1000 секунд каждая с временным разрешением 0.1 секунды, при этом осуществляется равномерное покрытие всей доступной области неба за ночь. За время работы ММТ-9 каждая область площадью 900 квадратных градусов наблюдалась от нескольких десятков до тысячи раз. Подробнее об устройстве ММТ-9 и режимах наблюдения написано в [1, 2].

В ходе мониторинга были зарегистрированы транзиентные события различной природы и длительности — начиная с фрагментов космического мусора и кончая оптическими компаньонами гамма-всплесков.

Подсистема анализа данных в реальном времени выделяет и классифицирует быстропеременные объекты. Текущий кадр сравнивается с медианным кадром, полученным по серии предыдущих последовательных кадров. В случае обнаружения нового объекта в кадре, форма его изображения оценивается по степени вытянутости (в предположении, что фигура на изображении эллипсоидальная). Если отношение большой и малой полуосей больше 5, то объект предварительно классифицируется как метеор (по окончании наблюдений метеоры просматриваются оператором, ложные события удаляются). Определяются его растровые и экваториальные координаты, угловая скорость. По пикселям, интенсивность излучения в которых превышает порог обнаружения (на уровне 3σ), определяется интегральный блеск как на отдельных кадрах, так и по всей серии кадров с метеорным событием. Каждую ясную ночь наблюдаются до нескольких сотен метеорных треков с блеском вплоть до видимой звездной величины 10.5^m. Частицы, порождающие наблюдаемые ММТ-9 метеорные события, имеют преимущественно массы от десятков миллиграмм вплоть до 10⁻⁷ г [3]. Самые слабые регистрируемые метеоры порождаются частицами, сравнимыми с крупными космическими пылинками.



Рис. 1: Наблюдавшиеся угловые скорости (вверху слева), видимые звездные величины в минимуме и максимуме блеска (вверху справа) и длительности (внизу слева) метеорных событий в базе данных ММТ-9. Видимые звездные величины регистрируемых метеоров телескопами ММТ-9, FAVOR, и абсолютные звездные величины в метеорных сетях NFC [4], SonotaCo, Edmond [5] (внизу справа).

2. База данных метеоров ММТ-9

База данных (БД) содержит на начало марта 2022 г. более 330 тысяч метеорных событий [6], зарегистрированных на ММТ-9 в период с июня 2014 г. по апрель 2022 г. и чуть более 10 тысяч — на FAVOR за период с августа 2006 г. по март 2009 г. Для каждого метеора в БД хранится координатная и фотометрическая информация, приводятся оценки длительности событий и угловые скорости. Обнаружение транзиентных событий, в частности метеоров, и их анализ происходит в реальном времени в ходе широкоугольного мониторинга неба.

Для каждого метеора в БД сохраняется информация: координаты трека, оценки видимой звездной величины вдоль трека и изменение относительной интенсивности излучения вдоль кадра (для всех кадров с метеором), а также исходные кадры события в формате FITS.

На рис. 1 приводятся результаты статистического анализа совокупности характеристик наблюдаемых метеоров, возможности ММТ-9 для наблюдения метеоров сопоставляются с возможностями других инструментов. В ходе базисных наблюдений системами ММТ-9 и FAVOR было обнаружено, что регистрируемые метеорные события находятся на дальностях от станций в диапазоне 150–100 км. Так как абсолютная звездная величина метеоров, обнаруженных ММТ-9 и FAVOR, с абсолютными звездными величинами в других наблюдательных программах. Средний блеск регистрируемых метеорных событий на ММТ-9 на 2–3 звездные величины слабее.



Рис. 2: Изображение метеорного трека, полученное в канале без фильтров (слева) и в канале с установленной объективной призмой (справа) 28 января 2022 г., время регистрации — 22:57:17.6 UTC.

3. Спектры и базисные наблюдения

В январе 2022 г. на одном из каналов ММТ-9 была установлена объективная призма со спектральным разрешением 150 Å в диапазоне длин волн 4000–7000 Å. Были получены изображения спектров нескольких метеоров с блеском вплоть до 6 звездной величины. На рис. 2 приведен пример изображения спектра метеора 3^m. По предварительным расчетам, полученное спектральное разрешение позволит определять наиболее яркие линии в спектрах метеоров (Fe I, Mg I, Na I) [7] и оценивать их химический состав и особенности свечения вдоль трека.

В 2018 г. был введен в тестовую эксплуатацию модернизированный широкоугольный телескоп FAVOR с полем зрения 400 квадратных градусов и временным разрешением 7.5 кадров в секунду [8]. Осенью 2018 г. были проведены базисные наблюдения MMT-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 позволяют перейти в пространство орбит и исследовать динамические и кинематические параметры метеоров. В качестве примера приводится распределение индивидуальных радиантов метеоров на небе и радианты некоторых действующих на эту солнечную долготу метеорных потоков (рис. 3). Индивидуальные радианты определялись для средних траекторий наблюдаемых метеоров [9].



Рис. 3: Совмещенные изображения треков одного метеора, полученных на ММТ-9 (сверху) и FAVOR (снизу) — (слева). Распределение индивидуальных радиантов метеоров в сравнении с радиантами метеорных потоков, действовавших на указанные ночи наблюдений. Обозначения маркеров: голубой и розовый — индивидуальные радианты метеоров, зарегистрированных 11 и 19 октября 2018 г. соответственно, синий и красный — центры радиации метеорных потоков на 11 и 19 октября 2018 г. соответственно (по солнечным долготам 198° и 206°), активных в этот период в приведенной области небесной сферы. Радианты метеорных потоков указаны по данным IAU Meteor Data Center [10, 11, 12, 13, 14] (справа).

4. Заключение

С помощью систем MMT-9 и FAVOR можно проводить исследования наиболее слабых метеоров, обнаруживаемых в оптическом диапазоне.

Благодарности. Настоящая работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

Список литературы

- 1. G. M. Beskin, S. V. Karpov, A. V. Biryukov, S. F. Bondar, et al., Astrophysical Bulletin, 72, 81, 2017.
- S. Karpov, G. Beskin, A. Biryukov, S. Bondar, et al., in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica Conference* Series, 51, 30 (2019).
- Z. Ceplecha, J. Borovička, W. G. Elford, D. O. Revelle, R. L. Hawkes, V. Porubčan, and M. Šimek, Space Sci. Rev., 84, 327, 1998.
- 4. J. Koukal, J. Srba, and S. Gorková, in International Meteor Conference Mistelbach, Austria, 90 (2015).
- 5. M. Koseki, *eMeteorNews*, **4**, 220, 2019.
- 6. Mmt-9 official website = https://mmt.sonarh.ru,.
- 7. V. Vojáček, J. Borovička, P. Koten, P. Spurný, and R. Štork, Astron. and Astrophys., 580, A67, 2015.
- 8. S. Karpov, N. Orekhova, G. Beskin, A. Biryukov, et al., in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica Conference Series*, **51**, 127 (2019).
- 9. Z. Ceplecha, Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia, 38, 222, 1987.
- P. Jenniskens, T. J. Jopek, D. Janches, M. Hajduková, G. I. Kokhirova, and R. Rudawska, *Plan. and Space Sci.*, 182, 104821, 2020.
- 11. T. J. Jopek and Z. Kaňuchová, Plan. and Space Sci., 143, 3, 2017.
- T. J. Jopek and Z. Kaňuchová, in T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, and I. P. Williams, eds., *Meteoroids* 2013, 353–364 (2014).
- T. J. Jopek and P. M. Jenniskens, in W. J. Cooke, D. E. Moser, B. F. Hardin, and D. Janches, eds., *Meteoroids: The Smallest Solar System Bodies*, 7–13 (2011).
- L. Neslusan, V. Porubcan, J. Svoren, and M. Jakubik, WGN, Journal of the International Meteor Organization, 48, 168, 2020.

Задачи и результаты астероидных исследований в проекте ИСОН

Чжао Х.¹, Ли Б.^{1,2}, Круглый Ю.Н.³, Молотов И.Е.⁴, Еленин Л.В.⁴, Инасаридзе Р.Я.^{5,6}, Эгамбердиев Ш.А.⁷, Рева И.В.⁸, Айвазян В.Р.^{5,6}, Кочергин А.В.⁹

⁵ Абастуманская астрофизическая обсерватория им. Е.К. Харадзе, Государственный университет Ильи, Тбилиси, Грузия

⁶ Самцхе-Джавахетский Государственный Университет, Ахалцихе, Грузия

7 Астрономический институт имени Улугбека, УАН, Ташкент, Узбекистан

⁸ Астрофизический институт им. В.Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

⁹Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Инициативный проект ИСОН стартовал в 2004 г. при поддержке грантов. В рамках проекта была организована международная кооперация обсерваторий для наблюдений астероидов. В том числе были произведены новые телескопы апертурой 40—50 см, а также модернизированы или оснащены фотоприемной аппаратурой несколько существующих телескопов апертурой 60 см – 2.6 м. Исследования проводятся в трех основных направлениях — отработка аппаратуры и методики астероидных обзоров с малыми широкоугольными телескопами, регулярные кампании фотометрических наблюдений и сопровождение объектов, обнаруживаемых китайским астероидным обзором. Получение большого массива кривых блеска сотен АСЗ позволило принять участие в целом ряде пионерских теоретических и наблюдательных работ.

Поступила в редакцию 09.05.2022 г. Принята в печать 29.06.2022 г.

Ключевые слова: астероид, фотометрия, астрометрия, поиск АСЗ, сеть телескопов

Tasks and results of asteroid research in the ISON project

Zhao H.¹, Li B.^{1,2}, Krugly Yu.N.³, Molotov I.E.⁴, Elenin L.V.⁴, Inasaridze R.Ya.^{5,6}, Ehgamberdiev Sh.A.⁷, Reva I.V.⁸, Ayvazian V.R. ^{5,6}, Kochergin A.V.⁹

 $^{1} Purple\ Mountain\ Observatory,\ CAS,\ Nanjing,\ China$

²School of Astronomy and Space Science, USTC, Hefei, Anhui, China

³Institute of Astronomy, Karazin National university, Kharkov, Ukraine

⁴Keldysh Institute of Applied Mathematics of the RAS, Moscow, Russia

- ⁵Kharadze Abastumani Astrophysical Observatory, Ilya State University, Tbilisi, Georgia
- $\label{eq:amtskhe-Javakheti} {}^{6}Samtskhe-Javakheti\ State\ University,\ Akhaltsikhe,\ Georgia$

⁷Ulugh Beg Astronomical Institute, Tashkent, Uzbekistan

⁸Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

The initiative ISON project was started in 2004 with the support of grants. Within the framework of the project, an international cooperation of observatories for asteroid observations was arranged. In particular, new telescopes with an aperture of 40-50 cm were produced, as well as several existing telescopes with an aperture of 60 cm - 2.6 m were upgraded or equipped with CCD cameras and filter wheels. The researches are carried out in three main directions — the development of equipment and methods of asteroid surveys with small wide-angle telescopes, follow ups of objects detected by the Chinese asteroid survey CNEOST, regular campaigns of photometric observations. Obtaining a large massif of light curves for hundreds of NEA allowed us to take part in a number of pioneering theoretical and observational works.

Received 09.05.2022. Accepted 29.06.2022.

Keywords: asteroid, photometry, astrometry, NEO search, telescope network

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.004

1. Введение

Освоение и исследования околоземного космического пространства (ОКП) привело к осознанию т.н. астероидной опасности, порождаемой 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 [1], реализуемый с 2004 г. за счет грантов и хоздоговоров.

¹ Обсерватория Пурпурной горы Китайской академии наук, Нанкин, Китай

² Школа астрономии и космических наук, НТУК, Хэфэй, Аньхой, Китай

³Институт астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина

⁴Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

⁹Institute of Applied Astronomy of the RAS, St-Petersburg, Russia



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

2. Перечень обсерваторий НСОИ АФН, участвующих в наблюдениях астероидов

ИСОН — открытый проект на самофинансировании, целью которого является обеспечение независимого источника данных по объектам искусственного и естественного происхождения для научных и прикладных задач. Основные направления наблюдений: космический мусор (при координации ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и ООО МИП «ИСОН Баллистика-Сервис»), астероиды (при координации НИИ Астрономии ХНУ им. В.Н. Каразина), оптическое послесвечение гамма-всплесков (при координации ИКИ РАН) [2]. В настоящее время сеть ИСОН составляют 32 собственных телескопа в 19 пунктах наблюдений и 12 инструментов 10 обсерваторий-партнеров. Текущий состав обсерваторий, сотрудничающих с ИСОН, показан на рис. 1. Красным цветом на нем выделены пункты, участвующие в наблюдения астероидов.

В рамках проекта ИСОН с 2008 г. начата организация международной кооперации обсерваторий для фотометрических наблюдений астероидов [3]. С 2010 г. стали проводиться работы по поиску АСЗ и комет [4]. С 2018 г. создается подсистема для оперативного подхвата АСЗ. С этой целью были разработаны новые телескопы апертурой 40—50 см — Сантел-400А (Мейхилл, США), Сантел-400зон (Мульта, Алтай), ОРИ-40 (Хуралтогот, Монголия), ОРИ-50 (Андрушевка, Украина), ЧВ-400 (Ужгород, Украина; Косала, Мексика), ЧВ-500 (Уссурийск, Приморский край), а также модернизированы или оснащены фотоприемной аппаратурой несколько существующих телескопов апертурой более 60 см (Цейсс-600 в Тарихе, Боливия и на Майданаке, Узбекистан; АТ-64 и ЗТШ в Научном, Крым, АС-32 в Абастумани, Грузия; АЗТ-8 в Чугуеве, Украина, РК-800 в Маяках, Украина; Цейсс-1000 в Симеизе, Крым). Один из двух астероидных обзоров — в Сайдинг-Спринг, Австралия (2015—2018 гг.) — был реализован на основе 40-см астрографа АСА совместно с Астрономическим институтом университета Берна. Кроме того, астероидные наблюдательные программы ИСОН реализуются на 5 телескопах, время которых получается по научным заявкам (Цейсс-600 и Цейсс-2000 в Рожене, Болгария; Цейсс-1000 на Тянь-Шане, Казахстан, АЗТ-8 в Лесниках, Украина, АЗТ-22 на Майданаке, Узбекистан). С 2021 г. покупается время на 80-см телескопе АСА обсерватории Серро-Тололо в Чили.

3. Направления астероидных исследований

Работы ведутся в трех основных направлениях — поиск новых астероидов и комет, подхват новых открываемых астероидов (получение астрометрии для уточнения орбит) и фотометрия астероидов для исследований их физических свойств (определение параметров вращения — периода и направления вращения, коорди-

	т.	т7	т.	17	T
Обсорратория	Код	Количество	Количество	Количество	Точность
Оосерватория	IAU	объектов	измерений	циркуляров МРС	измерений, "
Симеиз	094	74	1246	90	$-0.11 \ / \ +0.15$
Абастумани	119	11	75	14	$+0.14 \;/\; +0.22$
Чугуев	121	29	462	39	$+0.04 \;/\; +0.18$
Китаб	186	57	672	93	$-0.03 \; / \; -0.13$
Андрушевка	A50	414	3528	421	$+0.01 \; / \; +0.08$
Нью-Мексико	H15	518	4106	899	$+0.00 \;/\; +0.02$
Ужгород	K99	3	118	3	$+0.03 \; / \; -0.11$
Тянь-Шань	N42	23	1935	38	$-0.10 \ / \ +0.08$
Мульта	N82	61	215	62	$-0.01 \ / \ +0.01$
Хуралтогот	O75	113	424	121	$+0.10 \ / \ -0.03$
Сайдинг Спринг	Q60	187	1553	304	$+0.03 \;/\; +0.00$
	\sum	1490	14334	2084	_

Таблица 1: Общая статистика по наблюдению АСЗ обсерваториями сети ИСОН

нат полюса, оси вращения астероида, построение модели его формы). Кроме того, проводятся наблюдения астероидов, выбранных целями для радиолокационных экспериментов (астрометрия для уточнения орбит и фотометрия для совместной обработки с данными радиолокации) и космических миссий.

С помощью пробных астероидных обзоров ИСОН в Мейхилл (H15, США) и Сайдинг-Спринг (Q60, Австралия) на основе 40-см телескопов с полями зрения 1.75×1.75 и 2×2 градуса разрабатывалась эффективная стратегия поиска AC3 (методика оптимального планирования обхода небесной сферы), отлаживались роботизированные наблюдения (осуществлялся подбор комплекта оборудования и программного обеспечения (ПО), разработка замкнутого комплекса собственного ПО для роботизированных обсерваторий). Переход от стороннего ПО управления телескопом к собственному ПО КДС [5] привело к увеличения покрытия небесной сферы на 25%. Проводилась отработка концепции астероидных обзоров «второй волны» — обзоров с малыми широкоугольными телескопами, обеспечивающими полное покрытие небесной сферы, чтобы обнаруживать быстрые АСЗ, пропущенные специализированными обзорами с большими телескопами.

Оперативный подхват новых открываемых объектов выполнялся на первом этапе для проекта ООН IAWN по соглашению с Европейским космическим агентством (2018–2020 гг.), а затем — по запросам китайского астероидного обзора CNEOST по соглашению с обсерваторией Пурпурной горы Китайской академии наук (2020—2022 гг.). Целью этих работ являлись — получение высокоточных позиционных наблюдений (в течение часов после обнаружения) в интересах уточнения орбит новых АСЗ, отработка наблюдений медленных объектов с блеском до 21.2^m на телескопах класса 40 см за счет сложения ПЗС-кадров, получение ПЗС-кадров с точной привязкой времени для быстрых объектов, обнаружение объектов с грубой орбитой на телескопах с большим полем зрения. В этих наблюдениях принимали участие следующие телескопы: 40-см ЧВ-400 в Ужгороде (К99), 36-см РК-360 в Китабе (186), 40-см ОРИ-40 в Хуралтоготе (О75), 40-см Сантел-400зон в Мульте (N82), 50-см ОРИ-50 в Андрушевке (А50), а также телескопы фотометрической кооперации.

Международные кампании фотометрических наблюдений организовывались в интересах изучения недавно обнаруженных AC3, в особенности потенциально опасных астероидов, с целью определения размеров, изучения параметров вращения, формы тел и оптических свойств поверхностей. Выполнялась программы исследований AC3, орбиты и свойства тел которых предполагают возможность обнаружения ЯОРПэффекта (влияние негравитационных сил на скорости вращения и наклоны осей вращения астероидов), для обнаружения двойных и кратных астероидов и определения параметров этих систем с акцентом на обнаружение Би-ЯОРП-эффекта. Также в программу наблюдений включаются небольшие AC3 диаметром менее 300 м, которые могут иметь очень быстрое вращение. В наблюдениях ежегодно принимали участие от 10 до 17 телескопов. Основу кооперации составляли телескопы: 2.6-м ЗТШ в Научном, 2-м Цейсс-2000 и 60-см Цейсс-600 в Рожене, 1-м Цейсс-1000 в Тянь-Шане и Симеизе. 80-см в Серро-Тололо, 70-см AC-32 в Абастумани, 70-см АЗТ-8 в Чугуеве и Лесниках, 1.5 м АЗТ-22 и 60 см Цейсс-600 на Майданаке.

4. Полученные результаты

Наблюдения на телескопах астероидных обзоров в Мейхилл и Сайдинг-Спринг проводилось удаленно, через Интернет, с централизованным планированием и обработкой ПЗС-кадров в Москве. Разнесение этих телескопов по долготе и широте позволяло вести почти непрерывный мониторинг неба и осуществлять оперативный взаимный подхват открываемых объектов. Оба телескопа покрывали до 900 кв. град. в сутки с предельным проницанием до 20.5. Было получено 1 230 500 позиционных измерений, открыто 14 (а всего в проекте —



Рис. 2: Кривая блеска астероида группы Амура (154244) 2002 КL6, полученная по наблюдениям на 70-см телескопе AC-32 в Абастумани. Фотометрические наблюдения астероида показали период вращения равным 4.606 ± 0.001 час и амплитуду вариаций блеска 0.62–0.98^m.

18) АСЗ, 8 комет, 20 троянцев Юпитера, 4 объекта семейства Хильда, 4 объекта семейства Центавр и 1605 астероидов Главного пояса.

Обсерваториями сети ИСОН на регулярной основе проводились астрометрические наблюдения малых тел Солнечной системы, в частности, АСЗ, причем, как подхват только что обнаруженных тел (со страницы NEOCP), так и наблюдения уже каталогизированных АСЗ, требующих уточнения орбиты. Всего наблюдалось 1490 АСЗ, при этом было получено 14334 измерения, которые вошли в 2084 циркуляра МРС. Для работы с данными был создан автоматизированный комплекс сбора и анализа оптических измерений малых тел Солнечной системы [6]. В табл. 1 представлена общая статистика проведенных астрометрических наблюдений АСЗ обсерваториями сети с оценками точности¹ полученных измерений.

Международной кооперацией сети ИСОН каждый год организуется несколько кампаний фотометрических наблюдений, в среднем ежегодно наблюдаются от 50 до 70 АСЗ на 200–250 ночах. Получение на протяжении нескольких оппозиций большого массива кривых блеска избранных АСЗ (более 600 кривых блеска для порядка 300 астероидов) позволило принять участие в целом ряде пионерских теоретических и наблюдательных работ [7, 8]. Примеры построенных кривых блеска показаны на рис. 2–4.

С вовлечением данных ИСОН ЯОРП-эффект был обнаружен для (1862) Apollo, (1620) Geographos, (3103) Eger и (1685) Toro, также впервые обнаружен би-ЯОРП-эффект для двойного АСЗ (88710) 2001 SL9 [8]. С другой стороны, ЯОРП-эффект не был зарегистрирован у (1865) Cerberus и (2100) Ra-Shalom, для которых эффект был предсказан из моделей их формы.

В 2018–2020 гг. в течение более 400 ночей проведены фотометрические наблюдения более 150 AC3. Наблюдения проводились скоординировано в тринадцати обсерваториях мира с использованием 15 телескопов. Среди наблюдавшихся AC3 — 29 вновь открытых, более 40 потенциально опасных и 10 двойных. Были найдены периоды вращения для 26 AC3 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 AC3. Наблюдались более 35 AC3 с диаметрами менее 300–500 м, среди которых 28 — это вновь открытые астероиды. Определены или сделаны оценки периодов вращения для 22 из них.

 $^{^{1}}$ По статистике MPC с 2010 по 2017 гг., для обсерваторий 186 и N82 — усредненно, по нескольким объектам.



Рис. 3: Составная кривая блеска AC3 (326683) 2002 WP по наблюдениям на 1-м телескопе Цейс-1000 на Тянь-Шаньской обсерватории, показала очень вытянутую, сигарообразную форму тела астероида. Впервые определен период вращения астероида.

Проводилась фотометрия AC3, необычных по физическим параметрам. Наблюдения охватили астероиды, которые показывают очень большие амплитуды кривых блеска (больше 0,5^m): (3552) Don Quixote, (33342) 1998 WT24, (65733) 1993 PC, (144332) 2004 DV24, и астероиды с длинными периодами вращения (более 12 час): (11500) Tomaiyowit, (13553) Masaakikoyama, (88263) 2001 KQ1, (216689) 2004 HM1, 2003 NW1. Такие данные необходимы для построения численных моделей формы этих тел.

Ряд астероидов наблюдался с целью поиска проявлений двойственности: (1943) Anteros, (15745) Yuliya, (16816) 1997 UF9, (1866) Sisyphus, (68216) 2001 CV26, (152931) 2000 EA107, (454177) 2013 GJ35. Выявлены признаки двойственности у AC3 (15745) Yuliya и (68216) 2001 CV26 (а ранее в кандидаты в двойные системы были отобраны астероиды (3122) Florence и (337866) 2001 WL15), кривые блеска которых показали наличие уклонений от периодической формы, что может быть проявлением возможных явлений затмений в двойной системе.

Проведены интенсивные наблюдения для нескольких известных двойных AC3: (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.

5. Заключение

В рамках проекта ИСОН был выполнен инициативный проект по отработке методики и аппаратуры астероидных обзоров на телескопах умеренной апертуры — получено 1 млн. 230 тыс. измерений, открыто 1646 астероидов, в том числе, 13 АСЗ и 8 комет. Планируется начать новый обзор на 40-см телескопе АСА (поле 2×2 град.) в Мексике и, кроме того, предполагается тратить часть времени на поисковые задачи будущего двойного 28 см телескопа (поле зрения 6×12 град.) в Марокко.

В рамках двух грантов был отлажен оперативный подхват новых АСЗ на телескопах класса 40-см, в том числе со сложением ПЗС-кадров объектов до 21.2^m. Проведены наблюдения 1490 АСЗ, получено 14334 астрометрических измерений, которые вошли в 2084 циркуляра МРС. Работы продолжаются в тесной кооперации с Китайской академией наук.



Рис. 4: Кривая блеска 40-метрового AC3 2016 РА40 по наблюдениям на 2.6-м телескопе ЗТШ, которая показала сверхбыстрое вращение астероида с периодом, равным 12.5 мин.

Создана международная кооперация для регулярной фотометрии астероидов, в среднем в год за 200–250 ночей наблюдаются до 80 астероидов (> 50 AC3 в год). Получены значимые научные результаты.

В части работы обсерватории Тянь-Шань исследование финансируется Аэрокосмическим комитетом Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической промышленности Республики Казахстан (программа № ВК 11265408).

С китайской стороны эта работа поддерживалась Стратегической приоритетной программой Б-типа Китайской Академии наук (грант № XDB41000000), Исследовательским проектом по защите от космического мусора и околоземных астероидов (гранты № KJSP2020020204, KJSP2020020102) и Фондом Малых планет.

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

Список литературы

- 1. I. E. Molotov, L. V. Elenin, T. Schildknecht, Y. N. Krugly, et al., INASAN Science Reports, 5 (1), 13, 2020.
- A. Volnova, A. Pozanenko, E. Mazaeva, S. Belkin, I. Molotov, L. Elenin, N. Tungalag, and D. Buckley, Anais da Academia Brasileira de Ciencias, 93 (Suppl. 1), 2021.
- N. M. Gaftonyuk, Y. N. Krugly, and I. E. Molotov, in St.-Petersburg, ed., Proceedings of the International Conference "Asteroid-Comet Hazard-2009", 49–51 (2010).
- 4. L. V. Elenin, Y. N. Krugly, I. E. Molotov, R. Y. Inasaridze, et al., *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov* Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva, **4** (3), 32, 2017.
- 5. L. Elenin and I. Molotov, Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya, 6, 83, 2020.
- 6. L. V. Elenin, V. A. Voropaev, I. E. Molotov, and G. K. Borovin, INASAN Science Reports, 5 (1), 1, 2020.
- 7. P. Pravec, P. Fatka, D. Vokrouhlicky, P. Scheirich, et al., Icarus, 333, 429, 2019.
- 8. P. Scheirich, P. Pravec, P. Kušnirák, K. Hornoch, et al., *Icarus*, 360, 114321, 2021.

Поляриметр для наблюдения комет на телескопе Цейсс-1000

Маслов И.А.¹, Николенко И.В.²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия ²Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Описывается поляриметр, разработанный для исследования протяженных объектов на телескопе Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН, и применяемая методика обработки его данных. В настоящее время основными объектами для наблюдений с этим прибором являются кометы.

Поступила в редакцию 04.05.2022 г. Принята в печать 18.07.2022 г.

Ключевые слова: Поляриметрические наблюдения, поляриметр, комета

Polarimeter for observing comets on the Zeiss-1000 telescope

Maslov I.A.¹, Nikolenko I.V.²

¹Space Research Institute of the RAS (IKI), Moscow, Russia ²Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The polarimeter developed for the study of extended objects on the Zeiss-1000 telescope of the Simeiz Observatory INASAN and the applied method of processing its data are described. Currently, the main objects for observations with this instrument are comets.

Received 04.05.2022. Accepted 18.07.2022.

Keywords: polarimetric observations, polarimeter, comet

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.005

1. Поляриметр

В статье описывается поляриметр (рис. 1), разработанный для исследования протяженных объектов на телескопе Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН (п.г.т. Голубой Залив, Республика Крым) [2], и



Рис. 1: Внешний вид поляриметра, установленного на телескоп Цейсс-1000 [1].

применяемая методика обработки его данных [1]. 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. Для достижения высокой чувствительности (по яркости) в поляриметре используется преобразователь фокуса, увеличивающий светосилу до 1:1.5. Рабочий спектральный диапазон — 400–700 нм. Измерение линейной поляризации осуществляется путем получения серии снимков при различных углах поворота поляроида-анализатора.

В настоящее время в поляриметре используется камера ST-6 с возможностью измерения в полосах RGB и трех узких полосах 642, 662 и 684 нм. Полоса 662 нм используется для выделения области спектра, соответствующей линии излучения связанной с аминогруппой NH₂, две другие — для выделения областей спектра, свободных от линий излучения, что позволяет исследовать рассеивание излучения на пыли.

Камеру ST-6 планируется заменить на камеру FLI, что позволит существенно ускорить темп снятия кадров и расширить список спектральных диапазонов. Получаемый материал не зависит от применяемой камеры, поскольку методика обработки предполагает приведение всех кадров к стандартных пикселям на небесной сфере с разрешением около 20 угловых секунд, примененный ранее в эксперименте COBE/DIRBE [3].

2. Методика обработки данных

За одну ночь мы получаем несколько десятков изображений кометы с экспозициями 30-60 с при разных положениях поляроида-анализатора. Первая часть обработки снимков традиционная — учет «плоского поля» и астрометрическая привязка по звездам. После этого проводится усреднение в стандартные пиксели на небесной сфере [3], в которые попадают, при использовании камеры ST-6, примерно 45 пикселей снимка. Далее выделяется «фоновая составляющая» — медианное среднее — и «звездная составляющая» — разность между арифметическим и медианным средними значениями. «Звездная составляющая» используется для коррекции данных за изменение пропускания атмосферы в течении съемки. Поскольку кометы существенно передвигаются за время съемки, то проводится привязка изображений по положению пикселя с максимальной яркостью в ее коме. После этого для каждого из углов поворота поляроида-анализатора вычисляются усредненные (по всем полученным за ночь данным) изображения «фоновой составляющей», в которой изображения звезд уже существенно ослаблены, а также смазаны за счет коррекции координат на смещение кометы. Окончательным результатом для анализа являются три изображения, соответствующие среднему значению и составляющим первой гармоники Фурье для удвоенного угла поворота поляроида-анализатора. Далее, используя интересующие участки изображений, мы строим зависимости амплитуд Фурье-гармоник от среднего значения яркости пикселей в исследуемых областях. Усредненные наклоны для этих зависимостей позволяют оценить величину поляризации в исследуемой области. Примеры полученных данных приведены на рис. 2–3.

3. Перспективы

В настоящее время проводятся работы по модернизации поляриметра, заключающиеся в замене камеры ST-6 на камеру FLI и установку перед поляриметром колеса на четыре положения для облегчения смены узкополосных светофильтров. Колесо в трех положениях имеет светофильтры диаметром 60 мм, а в четвертом положении пропускает весь свет, позволяя использовать набор светофильтров камеры FLI.



Рис. 2: (a) изображение кометы C/2020 F3 (NEOWISE) в спектральной полосе 570–700 нм, полученное 24 июля 2020 г., (б) ее усредненное изображение по пикселям DIRBE с вычитанием звездной составляющей. Точками отмечены пиксели, расположенные на угловых расстояниях 1' и 2' от центра яркости комы [4].



Рис. 3: (а) изображение кометы Джакобини-Циннера (21Р) в полосе 642 нм (18 сентября 2018 г.), (б) усредненное изображение фоновой составляющей (с исключением звезд), (в) зависимость поляризационного сигнала от яркостного для элементов фона в пределах 2' от ядра кометы. Наклон этой зависимости дает значение поляризации, в данном случае 18% [5].

ПЗС-камера FLI ProLine 16803, имеет следующие характеристики: формат 4096×4096, спектральный диапазон 360–800 нм, размер пикселя составляет 9 мкм, квантовый выход 55%. Турель FLI CFW 3-10, с наборами светофильтров: U, B, V, R, I системы Johnson-Cousins и G, R, I, Z системы Sloan. Поле зрения поляриметра при применении камеры FLI может быть увеличено до 30 угловых минут. С камерой ST-6 оно составляло около 15 угловых минут, а иногда, с целью увеличения скорости передачи данных, уменьшалось.

Список литературы

- 1. I.A. Maslov, S.V. Kryuchkov, I.V. Nikolenko, V.A. Munitsyn, O.S. Ugol'nikov, *Izvestiya Krymskoy astrofizicheskoy observatorii*, **111**, 34, 2015, URL https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25897247.
- S.V. Kryuchkov, I.A. Maslov, I.V. Nikolenko, O.S. Ugol'nikov, Kompleks upravleniya teleskopom ZEISS-1000 s vozmozhnost'yu provedeniya nablyudeniy v rezhime udalennogo dostupa, Nekotoryye aspekty sovremennykh problem mekhaniki i informatiki: sb. nauch. st. M.: IKI RAN, 188-192, 2018, URL http://www.iki.rssi.ru/books/2018nazirov.pdf.
- 3. M. G. Hauser, T. Kelsall, D. Leisawitz, and J. Weiland, COBE Ref. Pub. No 98-A (Greenbelt, MD: NASA/GSFC), 1998.
- 4. I.A. Maslov, Astronomicheskiy Tsirkulyar 1648, 2021, URL http://www.sai.msu.su/EAAS/AC/1601-/ac1648.pdf.
- 5. I.A. Maslov, Astronomicheskiy Tsirkulyar 1646, 2020, URL http://www.sai.msu.su/EAAS/AC/1601-/AC1646.pdf.

132

Влияние углеродосодержащего слоя поверхности реголита на светорассеивающие свойства астероидов F-типа

Петров Д.В., Жужулина Е.А.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Крым, Россия

Астероиды F-типа обладают достаточно низким альбедо, порядка нескольких процентов. В то же самое время, они обладают относительно однородной оптической микроструктурой, которая объясняется отложениями углерода на поверхности силикатных частиц. В данной работе было проведено компьютерное моделирование, исследующее влияние углеродосодержащего слоя на светорассеивающие свойства частиц. Было показано, что даже тонкий слой (порядка нескольких процентов) способен заметно снизить фактор рассеяния $Q_{\rm sca}$ покрытой углеродом силикатной частицы. Но при этом на величину максимума степени линейной поляризации $P_{\rm max}$ тонкий слой углерода влияет достаточно слабо. Следовательно, при интерпретации наблюдательных данных астероидов недостаточно использовать только поляриметрические данные, поскольку это может привести к недооценке углеродосодержащего слоя.

Поступила в редакцию 09.05.2022 г. Принята в печать 20.06.2022 г.

Ключевые слова: астероиды, рассеяние света, компьютерное моделирование

Influence of the carbon-containing regolith surface layer on the light scattering properties of F-Type asteroids

Petrov D.V., Zhuzhulina E.A.

Crimean Astrophysical Observatory of RAS, Crimea, Russia

F-type asteroids have a fairly low albedo, on the order of a few percent. At the same time, they have a relatively homogeneous optical microstructure, which is explained by carbon deposition on the surface of the silicate particles. In this work, computer simulation was carried out to study the effect of a carbon-containing layer on the light scattering properties of particles. It was shown that even a thin layer (on the order of a few percent) can significantly reduce the scattering factor $Q_{\rm sca}$ of a carbon-coated silicate particle. But at the same time, a thin carbon layer affects the value of the maximum degree of linear polarization $P_{\rm max}$ rather weakly. Therefore, when interpreting the observational data of asteroids, it is not enough to use only polarimetric data, since this can lead to an underestimation of the carbon-containing layer.

Received 09.05.2022. Accepted 20.06.2022.

Keywords: asteroids, light scattering, computer simulation

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.006





Рис. 1: Структура слоистой частицы, используемой при моделировании.

1. Введение

Астероиды F-типа обладают некоторыми характерными особенностями. Впервые F-тип был введен в работе [1] 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 [2]. Спектры астероидов F-типа отличаются от спектров астероидов других типов 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 [3]. В классификации Толена 27 астероидов относятся к F-типу, что соответствует лишь около 3% всех классифицированных объектов [4].

Помимо фотометрии и спектрометрии, в последнее время активно развивается поляриметрия астероидов. Ее суть заключается в измерении степени линейной поляризации как функции от фазового угла (угла между направлениями наблюдатель-астероид и солнце-астероид). Одним из важнейших параметров фазовой зависимости степени линейной поляризации является величина $P_{\rm max}$, представляющая собой максимальное значение степени линейной поляризации и очень сильно зависящая от типа астероида [5].

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 [6].

Степень линейной поляризации часто используется для интерпретации наблюдательных данных. Как правило, считается, что воспроизведенная при помощи компьютерного моделирования фазовая кривая степени линейной поляризации астероида способна дать однозначную информацию о фихзико-химических свойствах частиц на его поверхности. В данной работе мы исследуем, как слой углерода на поверхности силикатных частиц влияет на характеристики рассеянного света.

2. Компьютерное моделирование

Для исследования влияния углеродосодержащего слоя на рассеивающие свойства было проведено компьютерное моделирование процессов рассеяния света силикатными частицами, поверхность которых покрыта слоем углеродсодержащего органического вещества. Для этого была использована модель сопряженных случайных гауссовских частиц [7], которая обладает шероховатостями как на крупных, так и на мелких масштабах, что устраняет влияние регулярностей структуры. Частица, состоящая из силиката, была покрыта тонким слоем углеродсодержащего вещества (рис. 1). Расчет светорассеивающих свойств осуществлялся при помощи метода матриц формы для частиц слоистой структуры [8].

Была исследована такая характеристика рассеянного света, как фактор рассеяния $Q_{\rm sca}$, определяемая как отношение сечения рассеяния к площади поперечного сечения рассеивающей частицы [9]. 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 фильтрам I ($\lambda = 0.8093$ мкм) и R ($\lambda = 0.688$ мкм). Показатели преломления силиката были взяты из работы [10], показатели преломления углеродосодержащего слоя — из работы [11].

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2 показана зависимость фактора рассеяния $Q_{\rm sca}$ от относительной толщины углеродосодержащего слоя δ , выраженного в процентах от радиуса частицы. Относительная толщина углеродосодержащего слоя вычисляется по формуле:

$$\delta = \frac{R_{\text{carb}}}{R_{\text{sil}}} \times 100\%,\tag{1}$$

где $R_{\rm sil}$ — средний радиус силикатной частицы, а $R_{\rm carb}$ — толщина углеродосодержащего слоя.

Вычисления показали, что даже тонкого слоя (порядка 20%) достаточно для того, чтобы яркость объекта снизилась в несколько раз. Причем чем меньше размер рассеивающей частицы, тем уменьшение фактора рассеяния оказывается заметнее.

Также было исследовано влияние углеродосодержащего слоя на поляризационные свойства рассеивающих частиц. Для этого были вычислены фазовые кривые и определена величина максимума поляризации $P_{\rm max}$. Для этого характеристики рассеянного света были усреднены по размерам рассеивающей частицы, так что эффективный размер составил $r_{\rm eff} = 0.49$ мкм, а эффективная вариация составила $\nu_{\rm eff} = 1.39$ [12]. Рис. 3 показывает зависимость величины $P_{\rm max}$ от толщины углеродосодержащего слоя. Из рисунка видно,



Рис. 2: Зависимость фактора рассеяния $Q_{\rm sca}$ от относительной толщины углеродосодержащего слоя для фильтров R и I.

что углеродосодержащий слой оказывает заметное влияние на максимум линейной поляризации, однако существенным оно становится при весьма большой толщине углеродосодержащего слоя.

4. Заключение

В данной работе было исследовано влияние углеродосодержащего слоя на поверхности силикатных частиц на рассеивающие свойства таких чатиц при помощи компьютерного моделирования. Было показано, что даже очень тонкий слой углерода оказывает существенное влияние на фактор рассеяния, заметно его уменьшая. 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. В то же время, на степень линейной поляризации способен заметно повлиять лишь достаточно толстый слой углерода. Следовательно, при интерпретации наблюдательных данных необходимо учитывать не только поляриметрию, но и фотометрию, иначе слой углерода может оказаться неидентифицированным.

Список литературы

- 1. J. Gradie and E. Tedesco, Science, 216, 1405, 1982.
- 2. E. F. Tedesco, P. V. Noah, M. Noah, and S. D. Price, Astron. J., 123, 1056, 2002.
- M. J. Gaffey, J. F. Bell, and D. P. Cruikshank, in R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, eds., Asteroids II, 98–127 (1989).
- 4. D. J. Tholen, in R. P. Binzel, T. Gehrels, and M. S. Matthews, eds., Asteroids II, 1139–1150 (1989).



Рис. 3: Величина максимума степени линейной поляризации при различной толщине углеродосодержащего слоя для фильтров R и I.

- 5. D. V. Petrov and N. N. Kiselev, Solar System Research, 51, 271, 2017.
- 6. I. N. Belskaya, Y. G. Shkuratov, Y. S. Efimov, N. M. Shakhovskoy, et al., Icarus, 178, 213, 2005.
- 7. D. V. Petrov and N. N. Kiselev, Solar System Research, 53, 294, 2019.
- 8. D. Petrov, Y. Shkuratov, E. Zubko, and G. Videen, Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 106, 437, 2007.
- 9. D. Petrov, E. Zhuzhulina, and A. Savushkin, Acta Astrophysica Taurica, 2, 26, 2021.
- 10. A. Scott and W. W. Duley, Astrophys. J. Supp., 105, 401, 1996.
- 11. A. Li and J. M. Greenberg, Astron. and Astrophys., 323, 566, 1997.
- 12. J. E. Hansen and L. D. Travis, Space Sci. Rev., 16, 527, 1974.

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 испытатальный центр Центрального научно-исследовательского института Воздушно-космических сил Министерства обороны Российской Федерации, Москва, Россия

Весьма актуальной становится задача принудительного удаления с орбит крупных космических объектов (KO), например, с помощью специальных космических аппаратов (KA) захвата. Успешность проведения подобной операции, требующей сближения KA-захватчика и физического контакта с подлежащим удалению KO, зависит от параметров собственного движения KO относительно его центра масс, в частности, от угловой скорости его вращения. Предлагается метод оперативного определения направления и величины угловой скорости вращения KO на основе анализа изменения ширины спектра радиолокационного (РЛ) эхо-сигнала, полученного от двух смежных прохождений зон действия наземных РЛ станций на одном витке. Показаны основные ограничения использования метода. Предложенный метод может применяться в условиях отсутствия априорной информации о KO или обучающей выборки, а так же использоваться в автоматическом режиме работы РЛС для оперативной оценки параметров собственного вращения KO.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 18.07.2022 г.

Ключевые слова: собственное вращение, спектр эхо-сигнала, радиолокация

Determination of the space debris attitude rotation parameters by reflected radar signal spectrum width changing

Veniaminov S.S., Ubojenko D.Yu., Remen B.A.

Scientific Research Center "Kosmos", Moscow, Russia

The problem of forced removal of large space debris (SD) from their orbits, for example, with the help of a special capture spacecraft becomes relevant. The success of such an operation which requires the approach of the "automatic arm" to the space object (SO) to be removed also depends on the parameters of the SO. A method is proposed here for quick identification of the direction and magnitude of the angular velocity of rotation of the SO based on the analysis of the change in the spectrum width of the radar echo signal obtained from two adjacent passages of the polar patterns of ground-based radar stations. The main limitations of the method application are shown. The proposed method can be applied in the absence of a priori information on the SO to be removed or a training sample, and can also be used in the automatic mode of the radar for prompt estimation of the parameters of the SO attitude motion.

Received 10.05.2022. Accepted 18.07.2022.

Keywords: attitude rotation, echo spectrum, radar

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.007

1. Введение

Задача оценки параметров собственного движения космического объекта (KO) относительно его центра масс (ц. м.) возникает, например, при необходимости определить состояние космического аппарата (KA) в случае аварии, или внешнего воздействия другого естественного, или техногенного небесного тела с потерей функциональности KA, или недоступности телеметрии, нарушений в работе системы стабилизации и т.п. Кроме того, в связи с прогрессирующим засорением околоземного космического пространства (ОКП), все более актуальной становится задача принудительного удаления с орбит крупных отработавших KA или ракет-носителей (PH) с помощью специальных KA захвата. Такой KA типа «щупальце» [1] был недавно запущен Китаем. Успешность проведения подобной операции, требующей сближения KA-захватчика с подлежащим удалению KO, зависит от скорости собственного вращения последнего, которую необходимо определить.

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. В данной статье рассматривается возможность получения сведений о собственного вращения (СВ) КО по информации наземных РЛС. На сегодняшний день задача определения параметров вектора CB KO в полностью автоматическом режиме с высокой степенью оперативности не решена. Поэтому информация о параметрах CB KO или о признаке его наличия не каталогизируется. Сбор и систематизация подобной информации позволит оперативно отслеживать состояние как действующих KA, так и крупного космического мусора (KM), уточнить влияние внешних и внутренних сил на параметры CB KO на длительных интервалах времени.

Возрастающее качество электронных компонентов и высокая рабочая частота (длины волн от 1 мм до 1 дм), используемая в радиолокационных системах [2, 3, 4], позволяют измерять скорость КО с высокой точностью, а значит различать доплеровский частотный сдвиг с высокой дискретизацией. Все это может создать необходимую измерительную детализацию для определения параметров CB KO. Иными словами, при разработке соответствующего методического аппарата есть возможность решить поставленную задачу с минимальными экономическими затратами, что особенно актуально при высокой общей стоимости наземных РЛС.



Рис. 1: Принципиальный вид АЧХ отраженного сигнала от многоточечной радиолокационной вращающейся цели в фиксированный момент времени.



Рис. 2: Векторное представление основных рассматриваемых при вращении КО величин.

2. Связь параметров вращения КО по изменению спектра эхо-сигнала

При рассмотрении движения KO по орбите и вокруг ц.м. примем следующие допущения и ограничения: разрешающая способность РЛС по дальности и скорости идеальные; радиолокационная цель представляется совокупностью отдельных отражающих точек; потерями в мощности при отражении сигнала пренебрегаем, т.е. рассеяние отсутствует, коэффициент отражения каждой точки равен единице; KO представляется как вращающееся твердое тело в ньютоновском поле сил, плотность которого равномерная; на KO действует только центральное однородное гравитационное поле Земли; KO движется по низкой круговой орбите в установившемся режиме.

Подобная (вполне допустимая) идеализация позволяет без помех сосредоточиться на решении поставленной задачи.



Рис. 3: Подвижная и стационарная перигейные системы координат.



Рис. 4: а) Углы σ , ρ , задающие направление векторов в ППСК, б) связь ССК и ППСК.

Основной информацией о KO, получаемой от РЛС, являются наклонная дальность, угловые координаты и радиальная скорость. Последняя получается из доплеровского смещения частоты (ДСЧ), которое зависит от текущей радиальной скорости. При вращении KO, направления линейных скоростей отдельных точек KO постоянно меняются относительно центра масс KO, а значит, и их проекции на линию визирования (ЛВ) также будут постоянно меняться. А так как ДСЧ зависит от проекции скорости на ЛВ, спектр эхо-сигнала будет изменяться в зависимости от параметров CB KO (рис. 1).

Чтобы показать характер зависимости ДСЧ от СВ КО, начнем с рассмотрения формулы расчета ДСЧ [5]:

$$f_{\text{ДСЧ}} = \frac{2V_p}{\lambda_{\text{изл}}} = \frac{2V_p}{c} f_{\text{изл}},\tag{1}$$

где c — скорость света, $\lambda_{изл}$, $f_{изл}$ — длина волны и частота излучаемого сигнала, V_p — радиальная скорость объекта, которую в свою очередь можно разложить на две составляющие: скорость движения ц.м. КО и скорость вращения вокруг центра масс [6] (точнее, их проекции на ЛВ):

$$V_{\rm p} = \Pi p_{\rm JIB} (\mathbf{V}_{\rm II,M.} + \mathbf{V}_{\rm Bp}), \tag{2}$$

Представим КО как совокупность отдельных отражающих точек. Тогда формулу (1) для каждой точки можно записать в виде:

$$V_{\mathbf{p}_i} = \Pi \mathbf{p}_{\mathcal{J}\mathbf{B}} (\mathbf{V}_{\mathbf{u}.\mathbf{m}.} + \mathbf{V}_{\mathbf{B}\mathbf{p}_i}), i = 1..N,$$
(3)

где N — количество отражающих точек. ДСЧ для каждой отражающей точки будет складываться из двух составляющих:

$$f_{\mathrm{ДCY}_{i}} = f_{\mathrm{ДCY}_{\mathrm{u.m.}}} + f_{\mathrm{ДCY}_{\mathrm{BP}_{i}}} = \frac{2}{c} f_{\mathrm{H3}\pi} \cdot \Pi p_{\mathrm{ЛB}}(\mathbf{V}_{\mathrm{u.m.}}) + \frac{2}{c} f_{\mathrm{H3}\pi} \cdot \Pi p_{\mathrm{ЛB}}(\mathbf{V}_{\mathrm{BP}_{i}}), \tag{4}$$

Первая часть зависит от движения КО по орбите вокруг Земли, вносит основной вклад в ДСЧ и никак не зависит от CB KO. А вторая часть полностью зависит от параметров CB KO. Ее может и не быть в случае стабилизированного движения по орбите (т.е. отсутствия CB).

Введем некоторые векторные величины для описания процесса вращения одной отражающей точки вокруг ц.м. КО: ω — вектор угловой скорости вращения КО, **R** — радиус-вектор отражающей точки относительно ц.м., **D** — радиус-вектор по ЛВ с наземной РЛС, проводящей наблюдение, α — угол между линейной


Рис. 5: a) δ-сфера направлений векторов локации относительно вектора вращения б) следы прохождений КО через зону действия РЛС на δ-сфере.

скоростью вращения отражающей точки и направлением на РЛС, Пр_{ЛВ}(**V**_{вр}) — проекция скорости отражающей точки на ЛВ, СХҮZ — связанная с КО система координат (ССК), β — текущий угол поворота КО в ССК (рис. 2).

Распишем расчет проекции вектора скорости вращения на направление ЛВ для одной отражающей точки:

$$\Pi \mathbf{p}_{\mathrm{JB}}(\mathbf{V}_{sp}) = |\mathbf{V}_{\mathrm{Bp}}| \cdot \cos \alpha = \frac{\mathbf{V}_{\mathrm{Bp}} \cdot \mathbf{D}}{|\mathbf{D}|}.$$
(5)

Для расчета скалярного произведения векторов необходимо выбрать систему координат, в которой будем рассматривать взаимное положение векторов скорости и направления на РЛС.

Ротационное движение является наиболее распространенным в космосе и типично для нестабилизированных и окончивших активное существование ИСЗ, РН, фрагментов запуска, осколков и деталей. В установившемся режиме такое движение является вращением вокруг оси максимального момента инерции с медленно изменяющейся скоростью и направлением оси вращения в пространстве под действием внешних возмущающих моментов (аэродинамического, гравитационного и магнитного) [7].

С учетом принятых ограничений, направление и величина вектора вращения КО неизменны при движении по орбите, а значит резонно выбрать такую СК, в которой вектор ω так же будет неизменным. Для этого подойдет подвижная перигейная система координат (ППСК), центр которой совмещен с ц.м. КО, а оси направленны параллельно соответствующим осям перигейной СК (ПСК) (рис. 3).



Рис. 6: Двумерная диаграмма представления δ-сферы.

Движение и вращение будем рассматривать в перигейной подвижной системе координат $CX'_{nep}Y'_{nep}Z'_{nep} -$ ось CZ'_{nep} направлена параллельно радиусу-вектору перигея орбиты \mathbf{R}_{nep} , ось CY'_{nep} параллельна нормали к плоскости орбиты, а ось CX'_{nep} параллельна касательной в перигее орбиты, в сторону движения КО по орбите. Начало координат С совпадает с центром масс КО. Направления векторов в ППСК задается двумя углами σ , ρ (рис. 4a). Переход из ППСК в ССК осуществляется двумя поворотами. Первым вокруг CZ'_{nep} на угол σ_{ω} , вторым вокруг оси CY'_{nep} , полученной после первого поворота, на угол $-\rho_{\omega}$ (рис. 46).

Выбрав СК, продолжим расписывать уравнение (5). Так как вращение задается в ССК (рис. 26), то вектор $\mathbf{V}_{\rm вр}$ необходимо перевести из ССК в ППСК при помощи матрицы поворота $M_{\rm CCK \to \Pi\Pi CK}$):

$$\begin{pmatrix} V_{\rm Bp}_{x} \\ V_{\rm Bp}_{y} \\ V_{\rm Bp}_{z} \end{pmatrix}_{\Pi\Pi CK} = M_{\rm CCK \to \Pi\Pi CK}(\rho_{\omega}, \sigma_{\omega}) \cdot \begin{pmatrix} R\omega \cos\beta(t) \\ R\omega \sin\beta(t) \\ 0 \end{pmatrix}_{\rm CCK}.$$
(6)

где $\beta = \beta_0 + \omega \cdot t$ — угол текущего поворота КО в ССК. Подставляя формулу (6) в формулу (4), получаем математическое выражение ДСЧ через параметры вектора вращения КО (7):

$$f_{\text{ДСЧ}_i} = f(\mathbf{D}_i, \underbrace{\rho_{\omega}, \sigma_{\omega}, \omega}_{\boldsymbol{\omega}}, R_i, \beta(t)).$$
(7)

Для анализа удобно ввести зависимость изменения ширины спектра ДСЧ:

$$\Delta S(t) = f_{\mathcal{A}CY_{max}} - f_{\mathcal{A}CY_{min}},\tag{8}$$

где $\Delta S(t)$ — ширина спектра ДСЧ, $f_{\text{ДСЧ}_{\text{max}}}$ — наибольшая частота в спектре ДСЧ на момент времени t, $f_{\text{ДСЧ}_{\text{min}}}$ — наименьшая частота в спектре ДСЧ на момент времени t.

3. Метод определения параметров вращения



Рис. 7: График зависимости изменения ширины спектра ДСЧ при изменении угла δ .

Анализируя формулы (5) и (7), учитывая свойства скалярного произведения векторов, устанавливаем, что если вектора $\boldsymbol{\omega}$ и **D** коллинеарны (т.е. $\delta = 0^{\circ}$ или $\delta = 180^{\circ}$), то $f_{\text{ДСЧ}_{i}} = f_{\text{ДСЧ}_{u.м.}}$, т.е. спектр принимаемого сигнала схлопывается в одно значение, обусловленное только движением ц.м. Если же вектора $\boldsymbol{\omega}$ и **D** перпендикулярны (т.е. $\delta = 90^{\circ}$), то $f_{\text{ДСЧ}_{\text{вр}_{i}}} \in [0; f_{\text{ДСЧ}_{\text{вр}_{\text{ява}}}]$. Учитывая эти факты, можем представить зависимость ДСЧ от угла δ в виде сферы, которую назовем δ -сферой (рис. 5а).

Также сферу можно представить в виде 2D диаграммы (рис. 6). В каждый момент времени угол δ будет меняться, т.к. будет меняться направление вектора **D**, а значит движение KO по орбите можно представить в виде следа на δ -сфере (рис. 56). При прохождении через экватор δ -сферы, значение огибающей графика $f_{\text{ДСЧ}_{ип}}(t)$ будет максимальным.

Если на одном витке будет два таких прохождения через экватор сферы, то, векторно перемножая вектора **D**, для соответствующих моментов времени получим направление оси, однонаправленное искомому вектору $\boldsymbol{\omega}$ или противоположно-направленное ему.

Период вращения KO определяется на основе семейства *D* методов выявления скрытых периодичностей [8].



Рис. 8: Блок-схема метода определения направления оси и периода вращения КО вокруг центра масс.

4. Алгоритм определения параметров вращения

Входные данные. Два наблюдения длительностью 3–4 периода вращения. Каждое наблюдение должно быть отфильтровано от шумовой составляющей и представлено в виде зависимости изменения ширины доплеровского спектра $\Delta S_i(t)$, где i = 1, 2. На интервале наблюдения каждая зависимость $\Delta S_i(t)$ должна иметь локальный максимум, который будет соответствовать прохождению через экватор δ -сферы, а значит, угол δ будет равен 90 градусам (рис. 7). Так же должны быть массивы измерений координат векторов положения по времени $R_i(t)$.

Первый шаг. Определить период вращения КО T_{KO} , путем выявления из зависимости $\Delta S_i(t)$ периода высшего порядка T_β обусловленного изменением угла поворота β для каждого наблюдения, применяя конечно-разностный вариант *D*-метода первого порядка, подробно описанного в [8]. Удвоенное значение периода T_β и усредненное по двум наблюдениям будет искомым периодом вращения КО T_{KO} .

Второй шаг. Подавить периодическую составляющую T_{β} и выявить составляющую процесса $\Delta S_{\delta_i}(t)$ обусловленного изменением угла δ . Для этого применяется любой сглаживающий фильтр по периоду T_{β} , пример такого фильтра также можно найти в [8].

Третий шаг. Определить локальные максимумы составляющих $\Delta S_{\delta_i}(t)$ и соответствующие им моменты времени t_{\max_i} на интервалах наблюдений.

Четвертый шаг. Определить вектора положения КО R_i на моменты времени t_{\max_i} из массива измерений, нормировать и перевести их в ППСК.

Пятый шаг. Определить направление оси вращения КО $\omega_{\text{ось}}$ путем векторного перемножения векторов положения R_i , полученных на четвертом шаге. Направление полученного вектора будет соответствовать направлению оси вращения КО.

Выходные данные. Период вращение $T_{\rm KO}$ и направление оси вращения КО $\omega_{\rm ocb}$. Блок-схема алгоритма приведена на (рис. 8).

5. Заключение

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 на незначительном интервале времени оценить параметры вращения нового или изменившего свою траекторию КО. К преимуществам рассмотренного метода можно отнести возможность полной автоматизации процесса, всепогодность, достаточно высокую оперативность, независимость от разрешающей способности по дальности и предварительно низкую стоимость внедрения технического решения. К недостаткам следует отнести наблюдение КО двумя РЛС на одном витке, ограничение в виде стабилизированного вращения, невозможность работы метода при определенных сочетаниях линейных размеров КО, частоты вращения и длины волны излучаемого сигнала. Дальнейшая исследовательская работа будет направлена на совершенствование метода, изучение форм и способов его применимости с существующими и перспективными РЛС, а также возможности использования РЛС космического базирования.

Список литературы

- 1. S. Veniaminov, D. Ubozhenko, and I. Gololobov, Sbornik informatsionno-spravochnykh materialov po otchetam NASA (2021).
- 2. A. Belous, M. Merdanov, and S. Shvedov, SVCH-elektronika v sistemakh radiolokatsii i svyazi. Tekhnicheskaya entsiklopediya. V 2-kh knigakh (2-ye izdaniye) (2018).
- 3. O. Yakovlev, V. Yakubov, V. Uryadov, and A. Pavel'yev, Rasprostraneniye radiovoln: uchebnoye posobiye (2016).
- 4. D. I. Popov, Izvestiya vuzov Rossii. Radioelektronika., 1, 53, 2015.
- 5. V. V. Vasin, O. V. Vlasov, V. V. Grigorin-Ryabov, P. I. Dudnik, and B. M. Stepanov, *Radiolokatsionnyye ustroystva* (teoriya i printsipy postroyeniya) (1970).
- V. I. Drong, V. V. Dubinin, M. M. Il'in, and K. S. Kolesnikov, Kurs teoreticheskoy mekhaniki: uchebnik dlya vuzov (2005).
- 7. A. I. Ladygin, Analiz Signatur. Teoriya i praktika radiolokatsionnogo raspoznavaniya kosmicheskikh ob"yektov & Kosmicheskiye tragedii glazami analitikov signatur (2008).
- 8. S. S. Veniaminov, Vyyavleniya skrytykh strukturnykh zakonomernostey v protsessakh i signalakh: Ot kosmicheskikh issledovaniy do analiza trendov rynka. Izd. 2-ye ispravlennoye i dopolnennoye (2016).

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

¹ Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия ² Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В последние годы растет число обнаруженных астероидов, проявляющих сублимационно-пылевую и пылевую активность под действием различных физических факторов. В данной статье рассматриваются результаты недавних спектрофотометрических наблюдений нескольких астероидов Главного пояса примитивных типов, находившихся вблизи перигелия в декабре 2020 г., которые могут содержать подповерхностные залежи водяного льда. При анализе их спектров отражения с целью поиска признаков вероятной сублимационно-пылевой активности под влиянием повышенных подсолнечных температур и солнечных эруптивных событий используется метод «шаблонов».

Поступила в редакцию 11.05.2022 г. Принята в печать 18.07.2022 г.

Ключевые слова: астероиды, спектрофотометрия, сублимационная активность, солнечная активность

Usage of "templates" of spectral types of asteroids for clarification of their mineralogy and detection of signs of sublimation, dust and solar activities

Savelova A.A.¹, Busarev V.V.^{1,2}, Shcherbina M.P.^{2,1}, Barabanov S.I.²

¹Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia ²Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

In recent years number of asteroids that show sublimation and dust activities under a variety of physical factors is increasing. In this article we present results of recent spectrophotometric observations of several primitive main-belt asteroids that were located near perihelion in December of 2020. These asteroids may have subsurface water ice deposits. The method of "templates" was used in analysis of their reflectance spectra in order to find signs of possible sublimation activity under increased subsolar temperatures and solar eruptive flares.

Received 11.05.2022. Accepted 18.07.2022.

Keywords: asteroids, spectrophotometry, sublimation activity, solar activity

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.008

1. Введение

Нашей группой были получены и изучены новые спектры отражения астероидов Главного пояса (ГП) преимущественно примитивных типов, находящихся вблизи перигелия. На основе анализа этих спектров отражения был сделан вывод о том, что, вероятно, во время проведения наблюдений, 7 из этих астероидов проявляли сублимационно-пылевую активность [1]. Изучение спектров отражения проводилось разными способами, в частности, методом «шаблонов».

Сублимационно-пылевая активность астероидов — интересный вопрос, потому что традиционно считалось, что любое проявление такой активности присуще только кометам. Лишь последние десятилетия принесли открытия нескольких десятков астероидов, в той или иной степени проявляющих активность, подобную кометной (например, [2, 3]). Такие обнаружения не слишком часты, однако в последних работах (например, [4, 5]) сделано предположение, что астероиды могут проявлять относительно слабую активность, которую можно обнаружить на их спектрах отражения (по необычным максимумам рассеяния света в предполагаемой разреженной пылевой экзосфере этих тел), но которая может быть незаметна на прямых изображениях. Поэтому необходимы новые методы изучения спектральных характеристик малых планетных тел, которые могут позволить быстро и с высокой точностью идентифицировать наличие в них деталей, свойственных и несвойственных для минералогии поверхностного вещества. Одним из таких методов является метод «шаблонов».

2. Суть метода и условия получения спектров отражения астероидов

Вышеупомянутый метод заключается в следующем. «Шаблоном» мы называем общие спектральные границы таксономического типа. Эти границы были рассчитаны с использованием всех нормированных спектров отражения астероидов конкретного таксономического класса из базы данных SMASSII [6]. Таким образом, если рассматривать координатную плоскость с нормированной отражательной способностью по оси Оу и длиной волны по оси Ох, «шаблон» представляет собой на ней область, в пределах которой с большой



Рис. 1: 1–2 — нормированные спектры отражения астероида 19 Фортуна, 3 — нормированный спектр отражения астероида из базы данных SMASSII, зеленая область — «шаблон» таксономического класса Ch.



Астероид 52 Европа (08.12.2020)

Рис. 2: 1–4 — нормированные спектры отражения астероида 52 Европа, 5 — нормированный спектр отражения астероида из базы данных SMASSII, зеленая область — «шаблон» таксономического класса С.

вероятностью будет находиться спектр отражения астероида, принадлежащего данному таксономическому типу. Соответствие спектров отражения рассматриваемых в этой статье астероидов и «шаблонов» проверялось только на длинах волн, меньших 0.7 мкм, так как в основном на больших длинах волн спектры изменяются, по-видимому из-за наличия у астероида разреженной пылевой экзосферы по причине сублимационной активности. Следует подчеркнуть, что в последних публикациях [1, 4, 5, 7] были обнаружены не только отдельные астероиды, проявляющие активность, но и их группы, состоящие из нескольких астероидов, проявляющих активность одновременно при прохождении ими перигелия. Важно отметить, что эти астероиды не связаны между собой, а только проходят перигелий близко по времени. В этой статье рассматриваются 7 астероидов примитивных типов (19 Фортуна, 52 Европа, 177 Ирма, 203 Помпея, 266 Алина, 379 Гуенна и 383 Янина) и 1 астероид Хк-типа (250 Беттина), проявивших, вероятно, такую одновременную сублимационно-пылевую активность. Корректность полученных спектров отражения рассматриваемых астероидов определялась путем контроля фотометрических условий по нормированным спектрам стандартных (непеременных) звезд солнечного типа, полученным до и после наблюдений астероида. Таким образом, спектральная прозрачность земной атмосферы практически не менялась за время наблюдений каждого из астероидов.



Рис. 3: 1–4 — нормированные спектры отражения астероида 177 Ирма, 5 — нормированный спектр отражения астероида из базы данных SMASSII, зеленая область — «шаблон» таксономического класса Ch.



Рис. 4: 1–3 — нормированные спектры отражения астероида 203 Помпея, зеленая область — «шаблон» таксономического класса С.

3. Результаты

Рассмотрим подробнее результаты наблюдений и анализа для каждого астероида. Астероид 19 Фортуна. На графике черным цветом обозначен спектр отражения астероида из базы SMASSII, который использовался как «эталонный». Зеленая область — «шаблон» таксономического класса Ch, к которому принадлежит астероид. Две цветные кривые — спектры отражения астероида, полученные нашей группой. Спектры отражения не согласуются с «эталонным» спектром и шаблоном соответствующего класса и достаточно сильно выходят за его пределы, но хорошо согласуются друг с другом. Результаты численного моделирования [5] показали, что подобный вид спектра астероида может быть признаком наличия у него разреженной экзосферы, в которой нет ледяных частиц, но присутствуют силикатные или силикатно-органические частицы.

52 Европа принадлежит таксономическому типу С. Спектры отражения астероида лежат в пределах шаблона. Однако спектр 3 значительно отличается от спектра SMASSII и «шаблона» в длинноволновой части. По результатам моделирования такой вид отклонения может быть признаком наличия ледяных частиц на поверхности или во временной экзосфере астероида. Но так как только один из полученных спектров сильно отклонился от «шаблона», то нельзя исключить случайный характер этой вариации.

177 Ирма принадлежит к примитивному таксономическому типу Ch. Коротковолновая часть всех четырех спектров отражения Ирмы проходит внутри «шаблона» соответствующего класса и характеризует низкотемпературную минералогию ее поверхностного вещества. Моделирование показывает [5], что наблю-



Рис. 5: 1–3 — нормированные спектры отражения астероида 250 Беттина, 4 — нормированный спектр отражения астероида из базы данных SMASSII, зеленая область — «шаблон» таксономического класса Xk.



Рис. 6: 1–2 — нормированные спектры отражения астероида 266 Алина, 3 — нормированный спектр отражения астероида из базы данных SMASSII, зеленая область — «шаблон» таксономического класса Ch.

даемый рост спектров астероида на длинных волнах может быть признаком наличия у него временной пылевой экзосферы, состоящей из силикатно-органических частиц.

Таксономический тип астероида 203 Помпея не установлен. Астероид имеет низкое альбедо и, видимо, принадлежит низкотемпературному типу. С помощью компьютерной программы этому астероиду был подобран «шаблон» класса С, согласующийся с его низкотемпературной минералогией. Но полученные спектры отражения выходят за пределы данного «шаблона». По результатам моделирования [5] состав пылевой экзосферы у Помпеи может быть смешанным, состоящим из частиц водяного льда, силикатов и органики.

250 Беттина принадлежит к таксономическому типу Xk. Хотя это не примитивный тип, но геометрическое альбедо астероида лежит вблизи нижней границы общего диапазона его значений для астероидов подобного типа. Это может являться признаком того, что либо сама поверхность имеет в среднем более низкотемпературный состав, либо она имеет включения типа гидросиликатов или водяного льда. Спектры отражения Беттины несколько отклоняются от «шаблона» типа Xk как в коротковолновой части спектра, так и более значительно — в длинноволновой. По результатам моделирования [5] такие изменения могут быть вызваны экзосферой смешанного состава, состоящей частично из ледяных частиц и в большей пропорции — из силикатных и органических частиц.

266 Алина принадлежит типу Ch. Спектр 1 находится внутри «шаблона» и согласуется со спектром из SMASSII. Это подтверждает низкотемпературную минералогию астероида. Другой спектр выходит за пре-



Рис. 7: 1–3 — нормированные спектры отражения астероида 379 Гуенна, 4 — нормированный спектр отражения астероида из базы данных SMASSII, зеленая область — «шаблон» таксономического класса С.

делы «шаблона». По результатам моделирования [5] такие вариации спектра отражения могут быть вызваны наличием пылевой экзосферы, состоящей из силикатно-органических частиц.

379 Гуенна отнесена к типу С, однако полученные спектры отражения с ним не согласуются. Можно предположить, что нехарактерная для астероида С-типа форма спектров отражения Гуенны (с отчетливым ростом к коротковолновой границе) является признаком наличия у астероида сублимационно-пылевой экзосферы, частицы которой имеют преимущественно ледяной состав.

383 Янина низкотемпературного типа В, однако форма всех трех полученных спектров отражения разительно отличается от «шаблона» соответствующего класса и спектра SMASSII, в том числе — по большому положительному градиенту. Такие значительные отклонения также можно объяснить наличием пылевой экзосферы, состоящей из частиц силикатно-органического состава.





Рис. 8: 1–3 — нормированные спектры отражения астероида 383 Янина, 4 — нормированный спектр отражения астероида из базы данных SMASSII, зеленая область — «шаблон» таксономического класса В.

4. Обсуждение

Кратко обсудим также вероятные причины сублимационно-пылевой активности рассмотренных астероидов. Во-первых, почти все рассмотренные астероиды принадлежат к примитивным типам, что предполагает возможность наличия на них подповерхностного водяного льда. Спектры всех астероидов были получены вблизи момента прохождения перигелия. Таким образом, при повышении температуры водяной лед мог сублимировать, порождая газовые потоки, увлекающие пыль. Вторая возможная причина проявления сублимационно-пылевой и пылевой активности, особенно в случае астероида 250 Беттина, принадлежащего Xk-типу, — это солнечная активность. За несколько дней до наблюдения рассматриваемых астероидов на Солнце произошла вспышка в рентгеновском диапазоне, а затем — связанный с ней корональный выброс вещества [1]. Таким образом, на астероиды, а они все находились достаточно близко друг к другу, подействовало сначала рентгеновское излучение, а затем — ударная волна в солнечном ветре, представляющем собой поток заряженных частиц (преимущественно протонов и электронов). Возможно, это оказало сильное деструктивное воздействие на поверхность астероидов и привело к образованию значительной массы пыли и ее электризации. Таким образом, изучение отклонений спектров отражения астероидов от соответствующих им спектральных «шаблонов» может оказаться полезным не только в обнаружении водяного льда в составе астероидов примитивных типов, но и в установлении характеристик ударных волн, возникающих при солнечных вспышечных и эруптивных событиях.

5. Заключение

Итогами работы является анализ новых спектров отражения 8 астероидов ГП, в том числе при помощи метода «шаблонов». По крайней мере у семи из этих астероидов были обнаружены признаки сублимационнопылевой активности. Нами сделан вывод о том, что вариации спектров отражения указывают именно на сублимационно-пылевую активность астероидов, а не на неоднородность поверхности. Этот вывод сделан на основе того, что предельно высокая неоднородность альбедо материалов на поверхности этих тел (от углистых до силикатных) не может объяснить обнаруженные большие отклонения спектров от «эталонных» (из базы SMASSII). Кроме того, была сделана оценка неизвестного таксономического класса астероида 203 Помпея.

С.А.А., Б.В.В., Щ.М.П. выражают благодарность РНФ за финансовую поддержку работы (грант РНФ 22-12-00115).

Список литературы

- 1. V. V. Busarev, A. A. Savelova, M. P. Shcherbina, and S. I. Barabanov, Astronomicheskiy vestnik, 56, 92, 2022.
- 2. M. Mommert, J. L. Hora, A. W. Harris, C. M. Walmsley, et al., Astrophys. J., 781, 25, 2014.
- 3. D. Jewitt and A. Guilbert-Lepoutre, Astrophys. J., 143, 21, 2012.
- 4. V. V. Busarev, A. B. Makalkin, F. Vilas, S. I. Barabanov, and M. P. Shcherbina, *Icarus*, **304**, 83, 2018.
- 5. V. V. Busarev, E. V. Petrova, T. R. Irsmambetova, M. P. Shcherbina, and S. I. Barabanov, *Icarus*, **369**, 18, 2021.
- S. Bus and R. P. Binzel, Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey, Phase II V1.0, 2020, URL https://doi.org/10.26033/fj1d-vb37.
- 7. V. V. Busarev, S. I. Barabanov, V. S. Rusakov, V. B. Pusin, and V. V. Kravtsov, Icarus, 262, 44, 2015.

Метод определения параметров собственного вращения крупногабаритного космического объекта по серии фотоизображений

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

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

При решении задач принудительного удаления крупного космического мусора с орбиты в околоземном пространстве необходимо оценивать параметры движения космического объекта (KO), в том числе параметры собственного вращения относительно его центра масс. Так, при использовании для этой цели специального космического аппарата типа автоматической руки необходимым условием успеха операции является отсутствие интенсивного вращения космического объекта. Аналогичная проблема возникает при определении состояния космического аппарата после внезапного отказа его системы стабилизации или любой другой аварии на борту, приведшей к нарушению его ориентации. Эта информация необходима при выполнении операции по восстановлению работоспособности аварийного космического аппарата. Основными средствами мониторинга космического пространства, позволяющими получать координатную и некоординатную информацию о космических объектах, являются оптико-электронные и радиолокационные средства. В данной статье предлагается метод определения параметров собственного вращения KO, основанный на предположении о возможности контроля на серии фотоизображений от одного наземного оптико-электронного средства положения выделенной точки на поверхности KO.

Поступила в редакцию 10.05.2022 г. Принята в печать 18.07.2022 г.

Ключевые слова: космический объект, параметры вращения, фотоизображение

Method for determining the parameters of the large space debris attitude rotation by photoimages series

Tokan M.I., Veniaminov S.S., Ubozhenko D.Yu.

Scientific Research Center "Kosmos", Ministry of Defence, Moscow, Russia

When solving the problems of forced removal of large space debris from its orbit in near-Earth space, it is necessary to estimate the parameters of the space object motion, including the parameters of the proper space object attitude motion. So, when using for this purpose a special spacecraft of the type of an automatic arm, a necessary condition for the success of the operation is the absence of the space object (SO) intensive rotation. A similar problem arises when determining the state of a spacecraft after a sudden failure of its stabilization system or any other accident on board, leading to its attitude disturbance. This information is necessary when performing an operation to restore the operability of an emergency spacecraft. The main facilities of monitoring outer space allowing to obtain metric and non-metric information on space debris are electro-optical and radar facilities. This article proposes a method for determining the parameters of the space objects attitude rotation based on the assumption that it is possible to control the position of a special selected point the SO surface on a series of photographic images from an electro-optical facility and the definite orientation of its rotation vector.

Received 10.05.2022. Accepted 18.07.2022.

Keywords: space object, rotation parameters, photographic image **DOI:** 10.51194/INASAN.2022.7.2.009

1. Введение

При решении задач принудительного удаления крупногабаритного космического мусора (KM) с его околоземной орбиты необходимо оценивать параметры его движения, в том числе параметры собственного вращения относительно его центра масс. Например, при применении с этой целью космического аппарата (KA) типа автоматической руки (такого, как разработанное в Тяньцзиньском университете KA-захвата «щупальце» [1]), необходимым условием успешности операции является отсутствие интенсивного вращения подлежащего захвату космического объекта (KO). Аналогичная задача возникает при определении состояния KA после внезапного выхода из строя его системы стабилизации, какой-либо аварии на борту или удара KM, приводящих к возникновению движения KA относительно центра масс. Крайне необходимо иметь такую информацию при проведении операции восстановления работоспособности аварийного KA. 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 оценивать внешнее состояние объектов, его габаритные характеристики, выделять и различать характерные точки на поверхности KO. В данной статье предлагается метод определения параметров собственного вращения KO, основанный на предположении о возможности контроля положения выделенной точки на поверхности KO на серии фотоизображений от одного наземного оптико-электронного средства.

2. Применение преобразования Хафа для формирования контрольных точек КО на серии оптических изображений

Предполагается, что ось вращения КО неподвижна в геоцентрической невращающейся системе координат ОХҮΖ, связанной с направлением оси ОХ на точку весеннего равноденствия. Оптические средства позволяют получить ряд изображений с фиксацией нового положения КО в пространстве. Каждое изображение получается в картинной плоскости (ХҮ), перпендикулярной вектору визирования КО, направленному от точки стояния оптического средства (координаты средства в ОХҮΖ — широта, долгота, высота над уровнем моря) на центр масс КО. Ось ОХ картинной плоскости направлена горизонтально вправо, ось OY — вертикально вверх. Предлагаемый метод определения параметров собственного вращения КО относительно его центра масс основывается на выборе и отслеживании в картинной плоскости фотоизображений координат выбранных контрольных точек на поверхности КО. Распознавание контрольных точек осуществляется с использованием преобразования Хафа. Преобразование Хафа инвариантно относительно операций сдвига, поворота, масштабирования и разработано для обнаружения аналитически определенных форм (линий, кругов, эллипсов) [2, 3, 4, 5]. Воспользуемся преобразование Хафа для получения множества прямых, описывающих контуры фрагментов КО. Пусть контурное изображение рассматривается как множество точек (x, y) в исходном пространстве. Множество прямых, проходящих через каждую точку (x, y), может быть представлено как множество точек (d, χ) :

$$d = x \cdot \sin(\chi) + y \cdot \cos(\chi). \tag{1}$$

где d — расстояние от прямой до начала координат, χ — угол между нормалью к прямой и осью абсцисс в полярной системе координат.

В основе преобразования Хафа используется тот факт, что любые две синусоиды в пространстве параметров d, χ пересекутся в точке (d^*, χ^*) только тогда, когда порождающие их точки в исходном пространстве лежат на прямой $d^* = x \cdot \sin(\chi^*) + y \cdot \cos(\chi^*)$ (рис. 1).



Рис. 1: Исходное изображение в координатах (x, y) (слева) и пространство параметров (d, χ)

Соответственно, чем больше точек на отрезке исходного изображения, тем больше синусоид пересекается в точке (d^*, χ^*) , которая определяет уравнение прямой, содержащей этот отрезок. Размер изображения ограничен, соответственно можно задать границы и шаг изменения значений параметров d, χ . Конечным результатом линейного преобразования Хафа является двумерный массив (матрица), подобный аккумулятору: одно измерение этой матрицы представляет собой квантованный угол χ , а другое измерение — квантованное расстояние d. Каждой точке (d^*, χ^*) соответствует элемент матрицы аккумулятора, который равен количеству пересекающихся кривых в пространстве d, χ . Алгоритм преобразования Хафа для каждой возможной пары значений (d^*, χ^*) определяет, является ли каждый пиксель исходного изображения границей контура изображенного объекта и принадлежат ли его координаты (x, y) уравнению (1) при заданных значениях (d^*, χ^*) . Если эти условия выполняются, то соответствующий элемент матрицы аккумулятора увеличивает свое значение на 1. Таким образом, элемент с наибольшим значением соответствует прямой линии, которая имеет наибольшую длину на исходном изображении. На рис. 2b эти точки показаны белым.

По результатам анализа матрицы аккумулятора выбираются элементы с максимальным значением и соответствующие уравнения прямых, описывающих обнаруженный контур изображения КО. Контрольные точки (x, y) выбираются как точки пересечения контурных линий, полученных преобразованием Хафа. Самыми различимыми являются контрольные точки, наиболее удаленные от центра изображения.

Использование преобразования Хафа позволяет более точно определить координаты выделенных контрольных точек на каждом изображении для дальнейшего определения параметров вращения КО.



Рис. 2: Получение 6 точек в пространстве (d, χ) (справа, b), задающих аналитическое описание 6 прямых линий (слева, а).



Рис. 3: Результат применения преобразования Хафа для изображений исходного и повернутого КО.

3. Определение параметров вращения КО

В трехмерном пространстве каждая точка поверхности вращающегося объекта описывает окружность в плоскости, перпендикулярной оси вращения объекта с центром в точке пересечения оси вращения и этой плоскости. Соответственно, несколько точек на поверхности КО, при его вращении, образуют семейство окружностей в параллельных плоскостях с центрами на оси вращения. Учитывая вращение КО, целесообразно использовать несколько методов обхода обнаруженных точек, чтобы исключить точки, которые выйдут из поля зрения прямой видимости. В проекции на плоское изображение, в случае, когда ось вращения не перпендикулярна плоскости проекции (картинная плоскость, приемник сенсора), каждая окружность преобразуется в эллипс. Для случая, когда ось вращения перпендикулярна проецирующей плоскости, каждая окружность преобразуется в отрезок (эллипс с малой полуосью равной нулю).

Для изображения объемной фигуры, рассматриваются только постоянно наблюдаемые точки, в результате чего получаем семейство сегментов эллипсов или семейство отрезков. Однако в данном случае рассматривается сложное движение в пространстве. Таким образом, в последовательности изображений получаем изменения, связанные с собственным вращением объекта, поворотом топоцентрической системы координат (TПСК) вследствие вращения Земли и движением КО в неподвижной геоцентрической системе координат (ГСК), выражающимся изменением положения линии визирования картинной плоскости. В подвижной геоцентрической системе координат вращение Земли учитывается в пересчете положения КА в топоцентрической системе координат. Необходимо найти углы, определяющие положение первой картинной плоскости относительно следующей. Преобразуем координаты каждого последующего изображения к проекции на первую картинную плоскость в зависимости от изменения азимута и угла места линии визирования



Рис. 4: Вращение точек поверхности вокруг оси, проекции круга на картинную плоскость.

на картинную плоскость в ТПСК (2):

$$\begin{cases} x' = x'' \cdot \cos(\triangle az), & \triangle az - \text{изменение азимута,} \\ y' = y'' \cdot \cos(\triangle ug), & \triangle ug - \text{изменение угла места.} \end{cases}$$
(2)

Данный переход к исходной картинной плоскости позволяет компенсировать вращение Земли, изменение положения КО в пространстве и осуществить поиск вектора оси вращения в подвижной системе координат, связанной с положением картинной плоскости на момент времени t_1 получения первого фотоизображения. Предлагаемый подход позволяет получить набор точек вращающегося объекта в единой системе координат, формирующий семейство эллипсов. Возникает задача по ограниченному набору отрезков или сегментов эллипсов на плоском изображении восстановить ось вращения объекта в трехмерном пространстве. Положение оси вращения в трехмерном пространстве, связанном с картинной плоскостью, задается двумя углами: α — угол наклона оси вращения относительно картинной плоскости и θ — угол поворота проекции оси вращения на картинную плоскость относительно оси ординат картинной плоскости. Поиск искомых углов осуществляется за счет построения и анализа уравнения эллипса по выбранному набору точек.



Рис. 5: Положение оси вращения относительно картинной плоскости на основании распознанного эллипса.

Уравнение произвольного эллипса на картинной плоскости задается кривой второго порядка [6, 7] в виде:

$$A \cdot x^2 + B \cdot x \cdot y + C \cdot y^2 + D \cdot x + E \cdot y + F = 0.$$
(3)

Данная система уравнений однозначно разрешается относительно 5 точек эллипса. Соответственно, необходимо иметь как минимум пять фотоизображений с выбранной контрольной точкой на всех пяти изображениях.

Эксцентриситет эллипса [7, 8, 9, 10, 11] определяет угол α наклона оси вращения относительно картинной плоскости. При $\alpha = 90^{\circ}$ получаем e = 0, а в общем случае

$$e = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 = 1 - \cos^2(90^\circ - \alpha), \tag{4}$$

$$e = \sqrt{\frac{2\sqrt{(A-C)^2 + B^2}}{\eta(A+C) + \sqrt{(A-C)^2 + B^2}}},$$
(5)

где
$$\eta = -\text{sign} \left(\det \begin{pmatrix} A & B/2 & D/2 \\ B/2 & C & E/2 \\ D/2 & E/2 & F \end{pmatrix} \right).$$

Значения коэффициентов A, B, C определяют угол θ между осью ординат в картинной плоскости и проекцией оси вращения на эту плоскость:

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{1}{B}\left(C - A - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}\right)\right), & B \neq 0; \\ 0^{\circ}, & B = 0, A < C; \\ 90^{\circ}, & B = 0, A > C. \end{cases}$$
(6)

$$\alpha = \arccos\left(\sqrt{e}\right).\tag{7}$$

В результате получим координаты ненормированного вектора оси вращения относительно системы координат, связанной с картинной плоскостью:

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \cdot \sin(\theta) \\ b \cdot \cos(\theta) \\ b \cdot \tan(\alpha) \end{pmatrix},$$
(8)

где большая и малая полуоси эллипса определяются по формулам:

$$a, b = \frac{-\sqrt{2(AE^2 + CD^2 - BDE + (B^2 - 4AC)F)\left(A + C \pm \sqrt{(A+C)^2 + B^2}\right)}}{B^2 - 4AC}$$
(9)

Переход в другие системы координат осуществляется последовательными преобразованиями, связанными с положением станции, получающей фотоизображения. Переход от системы координат, связанной с картинной плоскостью, в топоцентрическую систему координат, в которой линия визирования направлена на картинную плоскость со значениями по углу места *ug* и азимуту *az* осуществляется по формулам:

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}_{T\Pi CK} = \begin{pmatrix} \cos(ug)\cos(az) & \sin(az) & \sin(ug)\cos(az) \\ -\cos(ug)\sin(az) & \cos(az) & -\sin(ug)\sin(az) \\ -\sin(ug) & 0 & \cos(ug) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_x - x_o \\ n_y - y_o \\ n_z - z_o \end{pmatrix},$$
(10)

где x_o, y_o, z_o — координаты КО в топоцентрической системе координат, связанной с точкой стояния оптикоэлектронного средства, получившего фотоизображения. Переход в геоцентрическую инерциальную систему координат осуществляется по формулам:

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}_{\Gamma C K} = \begin{pmatrix} -\sin(L) & -\sin(B)\cos(L) & \cos(B)\cos(L) \\ \cos(L) & -\sin(B)\sin(L) & \cos(B)\sin(L) \\ 0 & \cos(B) & \sin(B) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_x - X_o \\ n_y - Y_o \\ n_z - Z_o \end{pmatrix}_{T \Pi C K},$$
(11)

где *L*, *B* — долгота и широта стояния станции, *X_o*, *Y_o*, *Z_o* — координаты точки базирования оптико-электронного средства в геоцентрической инерциальной системе координат.

Последнее изменение координат связано с углом поворота Земли вокруг оси вращения, отвечающее звездному времени на момент получения первого фотоизображения. Оно компенсируется умножением на матрицу поворота относительно оси OZ геоцентрической системы координат на соответствующий угол поворота Земли. Переход в орбитальную систему координат [12], связанную с наблюдаемым KO, с известными наклонением i, долготой восходящего узла Ω и аргументом перигея орбиты ω_p осуществляется по формулам:

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}_{\text{op6}} = \begin{pmatrix} Q_{1,2} & Q_{1,2} & Q_{1,3} \\ Q_{2,1} & Q_{2,2} & Q_{2,3} \\ Q_{3,1} & Q_{3,2} & Q_{3,3} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}_{\text{\GammaCK}},$$
(12)

где:

$$\begin{split} &Q_{1,1} = \cos(\omega_p)\cos(\Omega) - \sin(\omega_p)\sin(\Omega)\cos(i);\\ &Q_{1,2} = \cos(\omega_p)\sin(\Omega) + \sin(\omega_p)\cos(\Omega)\cos(i);\\ &Q_{1,3} = \sin(\omega_p)\sin(L);\\ &Q_{2,1} = -\sin(\omega_p)\cos(\Omega) - \cos(\omega_p)\sin(\Omega)\cos(i);\\ &Q_{2,2} = -\sin(\omega_p)\sin(\Omega) + \cos(\omega_p)\cos(\Omega)\cos(i);\\ &Q_{2,3} = \cos(\omega_p)\sin(i);\\ &Q_{3,1} = \cos(\omega_p)\sin(i);\\ &Q_{3,2} = -\cos(\Omega)\sin(i);\\ &Q_{3,3} = \cos(i). \end{split}$$

Таким образом, получен вектор оси вращения KO относительно центра масс в орбитальной системе координат.

Для определения угловой скорости вращения КО относительно полученного вектора вращения, предлагается использовать следующий подход при анализе построенных эллипсов в картиной плоскости. Каждая последующая точка эллипса является результатом поворота КО с учетом компенсации вращения картинной плоскости (2, 6). Угловая скорость собственного вращения КО определяется из условия разности углов направлений на выбранную контрольную точку в плоскости вращения, полученных с интервалом времени τ . На рис. 6 показано, как связаны координаты точки эллипса \tilde{X} и угловое положение соответствующей координаты на окружности, по которой вращается точка поверхности КО.



Рис. 6: Связь координат окружности и эллипса.

Для этого необходимо перейти к координатам (\tilde{x}', \tilde{y}') с центром, совпадающим с центром окружности, описанной вокруг эллипса, и где большая полуось лежит на оси ОХ:

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}'\\ \tilde{y}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta)\\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x'-x_0\\ y'-y_0 \end{pmatrix},$$
(13)

где координаты центра окружности, описанной вокруг эллипса, определяются по формулам

$$x_0 = \frac{2CD - BE}{B^2 - 4AC}, y_0 = \frac{2AE - BD}{B^2 - 4AC}.$$
(14)

Тогда угловая скорость вращения KO по результатам анализа изображений KO, полученных с интервалом времени τ , определяется по формуле:

$$\dot{\omega} = \frac{t_2' - t_1'}{\tau} = \frac{\arcsin\left(\frac{\tilde{y}_2'}{b}\right) - \arcsin\left(\frac{\tilde{y}_1'}{b}\right)}{\tau}.$$
(15)

4. Оценка погрешности использования преобразования Хафа в методе определения параметров вращения КО

Преобразование Хафа является устойчивым к добавлению выбросового шума (случайные точечные искажения, равномерно распределенные по изображению), поскольку преобладающее множество точек принадлежит искомым прямым контура КО и, соответственно, поиск максимальных элементов матрицы аккумулятора отфильтровывает единичные и рассредоточенные обнаруженные точки, отрезки. Наибольшее влияние на ошибку оказывают размытие и разрешение изображения (рис. 7):

Нечеткий контур приводит к образованию нескольких прямых, описывающих соответствующую грань контура KO, что приводит к неопределенности их выбора и, следовательно, существенно влияет на точность определения координат эллипса, а впоследствии — на параметры собственного вращения KO. Аналогично слабое разрешение изображения или его малый размер не позволяют с достаточной точностью определить координаты эллипса.

Как видно из полученных результатов (рис. 8), параметры собственного вращения космического объекта оцениваются с достаточной точностью при размытии изображения до 4%. Плотность выбросового шума при таких условиях не дает существенного вклада в рост ошибки измерений и может не учитываться. Повышение уровня точности измерений параметров поворота КО можно добиться методами дополнительной обработки изображений [13, 14, 15].



Рис. 7: Ошибки определения контурных линий преобразованием Хафа при размытии изображения.



Рис. 8: Изменение СКО параметров собственного вращения КО относительно центра масс в системе координат, связанной с картинной плоскостью, в зависимости от процента размытия изображений.

5. Заключение

Несмотря на необходимость соблюдения определенных ограничений на качество изображений, точность траекторной информации о КО и конструктивно-габаритные характеристики КО, предлагаемый метод определения параметров собственного вращения КО относительно его центра масс имеет небольшую вычислительную сложность. Основными преимуществами являются возможность применения в условиях отсутствия априорной информации об объекте или обучающей выборки, которые необходимы при использовании методов на основе нейронных сетей, а также возможность работы по фрагменту изображения КО, когда в прямой видимости наблюдаются только определенные грани (фрагменты) КО. С учетом тенденций развития современных оптико-электронных средств и средств контроля космического пространства указанные требования к качеству изображений и точности траекторной информации будут естественным образом достигаться средствами самих оптико-электронных станций. Предложенный метод основан на работе с фотоизображениями, получаемыми с наземных оптико-электронных средств без учета влияния атмосферы и других факторов, снижающих качество изображений, однако основные принципы могут быть использованы в условиях космического базирования оптико-электронных средств.

Список литературы

- 1. S. Veniaminov, D. Ubozhenko, and I. Gololobov, *Sbornik informatsionno-spravochnykh materialov po otchetam NASA* (2021).
- 2. M. A. Kudrina, Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, 16, 476, 2014.
- 3. K. V. Morozovskiy, Fundamental'nyye issledovaniya (Tekhnicheskiye nauki), 9, 491, 2015.
- 4. A. A. Rozhentsov, K. V. Morozovskiy, and A. A. Bayev, Avtometriya, 49, 30, 2013.
- 5. A. A. Rozhentsov, A. S. Naumov, and A. A. Bayev, Avtometriya, 46, 57, 2010.
- 6. G. A. Korn and T. M. Korn, Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov (1977).
- 7. R. Larson and R. Hostetler, *Precalculus with Limits* (2006).
- 8. C. Young, Precalculus (2010).

- 9. J. D. Lawrence, A Catalog of Special Plane Curves (2013).
- 10. A. Ayoub, Mathematics Magazine, 66, 322, 1993.
- 11. G. B. Thomas, Calculus and Analytic Geometry (1953).
- 12. G. N. Duboshin, Spravochnoe rukovodstvo po nebesnoi mekhanike i astrodinamike (1976).
- 13. T. S. Khuang, J. O. Eklundth, B. I. Justusson, H. J. Nussbaumer, S. G. Tyan, S. Zohar, and L. P. Yaroslavskiy, *Bystryye algoritmy v tsifrovoy obrabotke izobrazheniy* (2014).
- 14. N. I. Chervyakov, P. A. Lyakhov, and A. R. Orazayev, Komp'yuternaya optika, 42, 667, 2018.
- 15. B. Yane, Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy (2007).

СУБД-центрический способ идентификации оптических измерений

Трушкова Е.А., Юрасов В.С.

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

Современные требования к обработке измерений от распределенной сети оптических измерительных средств в едином координационном центре с общей базой данных вынуждают пересмотреть весь процесс идентификации, отождествления, уточнения и обнаружения объектов космического мусора. Предложен новый подход к идентификации измерений в части расчета, хранения и использования эфемерид каталогизированных объектов космического мусора, а также в части ранжированного выбора объектов-претендентов на идентификацию. Этот подход базируется на использовании внутренних механизмов СУБД.

Поступила в редакцию 13.05.2022 г. Принята в печать 29.08.2022 г.

Ключевые слова: объекты космического мусора, идентификация оптических измерений, СУБД

DBMS-centric method for optical measurements identification

Trushkova E.A., Yurasov V.S.

Stock Company Research-and-Production Corporation "Precision Systems and Instruments", Moscow, Russia

The entire process of measurements correlation, orbits updating and determination for space debris objects should be reconsidered to satisfy the up-to-date requirements for centralized data processing from a large network of advanced optical sensors. A new approach to the correlation of angular measurements in part of calculation, storage and use of ephemeris for catalogued space debris objects, as well as in part of a ranked selection of applicant objects for correlation is proposed. This approach is based on the use of DBMS mechanisms.

Received 13.05.2022. Accepted 29.08.2022.

Keywords: space debris objects, correlation of angular measurements, DBMS

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.010

1. Введение

Идентификация новых измерений с каталогизированными объектами космического мусора (OKM) является одним из затратных с вычислительной точки зрения этапов обработки траекторных угловых измерений. Для решения этой задачи требуются трудоемкие расчеты критериев близости между измеренными параметрами движения OKM и их расчетными значениями. Расчетные значения получаются с помощью прогнозирования оценок векторов состояния OKM и характеристик погрешностей этих оценок на моменты измерений.

В настоящее время в центрах обработки информации для хранения измерительной информации и каталога OKM преимущественно стали использоваться современные СУБД. Наблюдающаяся тенденция возрастания числа каталогизированных OKM и потока оптических измерений по ним требует совершенствования применяемых способов идентификации для такого рода центров.

Разработан СУБД-центрический подход к идентификации оптических измерений от сети наблюдательных станций (HC), позволяющий сократить время расчета и записи в БД эфемерид каталогизированных ОКМ, а также проводить на стороне БД ранжированный выбор объектов-претендентов на идентификацию. Основное отличие данного метода идентификации от других [1] заключается в том, что выбор объектовпретендентов 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.

2. УЧАМ для расчета и использования эфемерид

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

Для ускорения расчета эфемерид каталогизированных ОКМ и существенного сокращения объемов хранимой информации 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.

заголовочная таблица

Тип поля	Клавиша	He Null	По у	Описание
integer		V		Номер ОКМ
double precision[]		V		Лагранжевы ОЭ расчетной орбиты: {a(км), ksi, eta, P, Q, lambda(rad)}
timestamp		V		Время (UTC) привязки расчетной орбиты
timestamp		V		Время (UTC) начала интервала расчета
serial	Перв. ключ		nextval	
boolean		V	false	"Cropen?" (true/false)

He Null Тип поля Клавиша По умолчанию Описание double precision[1 Лагранжевы ОЭ на момент jd_begin: {a(км), ksi, eta, P, Q, lambda(rad)} V Время (UTC) граница интервала расчета imestamp timestamp 1 Время (UTC) граница интервала расчета 1 double precision[] Q1 лагранжевы ОЭ: {a(км), ksi, eta, P. Q. lambda(rad)} double precision[] J Q2 лагранжевы ОЭ: {a(км), ksi, eta, P, Q, lambda(rad)} double precision[] 1 Q3 лагранжевы ОЭ: {a(км), ksi, eta, P, Q, lambda(rad)} double precision[] V Q4 лагранжевы ОЭ: {a(км), ksi, eta, P, Q, lambda(rad)} 1 double precision Длительность интервала расчета в сутках: если "> 0", то "jd_begin < jd_end", иначе "jd_begin > jd_end" 🗄 id_q_ful 💌 oe_lagrange ➡ jd_end 👻 q1 jd_begin a2 q3 q4 9 298 513 -0.421283 9 298 514 (8126.85536568558 -0.12042568740641.0.084) 24.03.2020 00:18:39.660 24.03.2020 10:24:57.731 (0.0009525395 (0.0009514E (0.00095065 (0.00094980 0.421042 9 298 514 {8126.85576614444,0.12156746113116,0.082| 24.03.2020 10:24:57.731 24.03.2020 20:31:15.802 {0.0009498019 {0.00094907} {0.00094981 {0.00094981} {0.00094971} } } } 0.421042 9 298 514 {8126.85616559533,-0.122685808760226,0.08 24.03.2020 20:31:15.802 25.03.2020 06:37:33.874 {0.0009477457 {0.00094734} 0.00094657 {0.00094635} 0.00094635 } 0.421042 9 298 515 (8321.55383786849.0.0184780400127844.-0.11 23.03.2020 22:45:57.188 24.03.2020 09:14:28.435 (0.0011149640 (0.00111605 (0.0011605 (0.000 0 436473 9 298 515 8321.55432477683,0.0207003829740868,-0.11 24.03.2020 09:14:28.435 24.03.2020 19:42:59.683 40.0011160562 40.00111695 40.00111695 40.00111665 40.0011665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.0011665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.00111665 40.001165 40.000165 40.000165 40.000165 40.000165 40.000165 40.000165 40.000165 0.436473 9 298 515 (8321.55481205169,0.0229188272524603,-0.11 24.03.2020 19:42:59.683 25.03.2020 06:11:30.930 (0.0011166445 (0.00111727 (0.0011162: (0.00111672) (0.0011162) (0.001162) 0.436473 9 298 516 (8819.37091728692.0.0296945565517328.-0.2) 23.03.2020 23:25:08 156 24.03.2020 10:51:09.426 (0.0002901656 (0.00029045 (0.0002905 (0.0002905 (0.0002905 (0.0002905 (0.0002905 (0.0002905 (0.0002905 (0.0002905)))))))))))))) 0.476404 9 298 516 (8819.37105564654,0.0319154833803861,-0.1) 24.03.2020 10:51:09 426 24.03.2020 22:17:10.696 (0.0002907102 (0.0002907102 (0.000290111 (0.00029096 (0.00029140 (0.00029140 (0.0002907102 (0.00029140 (0.0002907102 (0.00029140 (0.0002907102 (0.00029140) (0.00029140 (0.00029140 (0.00029140) (0.00029140 (0.00029140) (0.00029140 (0.00029140000000000000 0.476404 9 298 516 {8819.371194302,0.0341325345023349,0.199; 24.03.2020 22:17:10.696 25.03.2020 09:43:11.966 {0.0002914074 {0.00029145 {0.00029175 {0.00029125 {0.00029175 {0.00029125 {0.00029175 0.476404

таблица данных

Рис. 1: Организация хранения эфемерид в БД.

Предлагается эфемериды в БД хранить 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 простым интерполированием [2]. На рис. 1 представлена организация хранения эфемерид в БД. Так, ведущая — заголовочная — таблица содержит по каждому каталогизированному объекту Лагранжевы элементы расчетной орбиты и дату расчета эфемерид. Сами же эфемериды по идентификатору записи содержатся в ведомой таблице данных. Для суточного расчета по одному ОКМ в таблице данных синим цветом выделены записи для трех шагов интегрирования с соответствующими Лагранжевыми элементами в четырех узловых значениях. Когда эфемериды рассчитаны, записаны в БД и готовы к использованию, можно переходить к следующему этапу процесса идентификации.

3. Ранжированный выбор объектов-претендентов

Следующий этап СУБД-центрического подхода — задача ранжированного выбора объектов-претендентов на идентификацию — был ускорен за счет аналитических формул расчета возможных нормалей орбит по конусу наблюдения HC.

Множество точек конуса трехмерного пространства обозначим

$$C(\mathbf{v}, \mathbf{n}, \alpha, h) = \left\{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^3 | (\mathbf{x} - \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} \ge \cos \alpha \cdot ||\mathbf{x} - \mathbf{v}||, (\mathbf{x} - \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} \le h \right\},\$$

где $\mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3)^T$ — вершина конуса, $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)^T$ — направляющий единичный вектор конуса (направлен из вершины во внутреннюю часть конуса), $0 \le \alpha \le \frac{\pi}{2}$ — половина раствора конуса, h > 0 — высота конуса (расстояние от вершины до основания конуса).



Рис. 2: Объемлющий конус конуса наблюдения измерительной станции и границы допустимых положений нормалей к плоскости орбиты.

Пусть для рассматриваемого момента времени t одного наблюдения прямого восхождения α и склонения δ OKM точка O — начало отсчета системы координат (центр Земли), точка K — HC с текущим положением $k \cdot \mathbf{k} = k \cdot (k_1, k_2, k_3)^T$, где \mathbf{k} — единичный вектор направления от центра Земли на HC. Найдем единичный вектор $\mathbf{l} = (\cos \alpha \cos \delta, \sin \alpha \cos \delta, \sin \delta)^T$ направления от станции на OKM.

Назовем конус $C_{\text{view}} = C(\mathbf{k}, \mathbf{l}, \varepsilon, h)$ — конусом наблюдения станции в рассматриваемый момент времени. Задача состоит в поиске допустимых положений нормали к плоскости орбиты OKM, т. е. таких плоскостей орбит, которые в момент t имеют непустое пересечение с конусом наблюдения станции.

На рис. 2 зеленым цветом изображен конус наблюдения станции. Согласно рисунку, заметим, что если мы найдем объемлющий конус

$$C_{\text{span}} = C(0, \mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3)^T, \gamma_{\min}, \infty)$$

для конуса наблюдения, т. е. конус с вершиной в точке *О* и минимальным раствором, содержащий конус наблюдения (изображен красным цветом), то возможными направлениями нормали к плоскости орбиты будет множество направлений

$$\mathbb{R}^3 \setminus (\{0, \mathbf{q}, \frac{\pi}{2} - \gamma_{\min}, \infty\} \bigcup \{0, -\mathbf{q}, \frac{\pi}{2} - \gamma_{\min}, \infty\}).$$

+



Рис. 3: Границы допустимых положений нормалей к плоскости орбиты для различных положений конуса наблюдения измерительной станции.

Видно, что направляющий вектор конуса $C_{\rm span}$ лежит в плоскости OKL, определяемой векторами k и l. Проведем все необходимые геометрические построения в этой плоскости (см. рис. 3).

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

2.
$$|OA| = \sqrt{k^2 + \frac{h^2}{\cos^2 \varepsilon} - \frac{2kh}{\cos \varepsilon} \cos(\beta - \varepsilon)}, \ \angle AOK = \arccos\left(\frac{1}{2 \cdot |OA| \cdot k} \left(OA^2 + k^2 - \frac{h^2}{\cos^2 \varepsilon}\right)\right);$$

 $|OB| = \sqrt{k^2 + \frac{h^2}{\cos^2 \varepsilon} - \frac{2kh}{\cos \varepsilon} \cos(\beta + \varepsilon)}, \ \angle BOK = \arccos\left(\frac{1}{2 \cdot |OB| \cdot k} \left(OB^2 + k^2 - \frac{h^2}{\cos^2 \varepsilon}\right)\right).$

- 3. Если $\mathbf{l} \times \mathbf{k} = 0$, то положим $\mathbf{q} = \mathbf{k}$, $\gamma_{\min} = \angle AOK$, иначе перейдем к следующему пункту. 4. Обозначим $\mathbf{a} = \frac{OA}{|OA|} = (a_1, a_2, a_3)^T$, $\mathbf{b} = \frac{OB}{|OB|} = (b_1, b_2, b_3)^T$, $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{l} \times \mathbf{k}}{||\mathbf{l} \times \mathbf{k}||}$. Можно найти \mathbf{a} и \mathbf{b} как решение следующей задачи:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{a} = 0, \mathbf{k} \cdot \mathbf{a} = \cos(\angle AOK), ||\mathbf{a}|| = 1, (\mathbf{a} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{n} > 0;$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{b} = 0, \mathbf{k} \cdot \mathbf{b} = \cos(\angle BOK), ||\mathbf{b}|| = 1, (\mathbf{b} \times \mathbf{k}) \cdot \mathbf{n} < 0.$$

Обозначим через
$$\mathbf{\Delta} = (\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3)^T$$
, где $\Delta_1 = \begin{vmatrix} n_2 & n_3 \\ k_2 & k_3 \end{vmatrix} = n_2 k_3 - n_3 k_2, \Delta_2 = - \begin{vmatrix} n_1 & n_3 \\ k_1 & k_3 \end{vmatrix} = -n_1 k_3$

 $n_{3}k_{1}, \Delta_{3} = \begin{vmatrix} n_{1} & n_{2} \\ k_{1} & k_{2} \end{vmatrix} = n_{1}k_{2} - n_{2}k_{1}, \ j = \arg\max_{i=1,2,3} |\Delta_{i}|. \ \text{Заметим, что } |\Delta_{j}| > 0, \ \text{т. к. } \mathbf{n} \perp \mathbf{k}.$ Перепишем первые два равенства в следующем виде:

$$\Delta_j \mathbf{a} = \mathbf{\Delta} \xi + F P_j \cos\left(\angle AOK\right),$$

где неизвестная величина $\xi \in \mathbb{R}^1$, P_j — трехмерный вектор-столбец, содержащий единицу на j-ом месте и нули на оставшихся местах,

$$F = \begin{pmatrix} 0 & n_3 & -n_2 \\ -n_3 & 0 & n_1 \\ n_2 & -n_1 & 0 \end{pmatrix}$$

Для поиска ξ подставим в третье равенство (||**a**|| = 1):

$$\begin{split} \Delta_{j}^{2}\mathbf{a}^{T}\mathbf{a} &= \Delta_{j}^{2} \Leftrightarrow \left(\mathbf{\Delta}^{T}\xi + P_{j}^{T}F^{T}\cos\left(\angle AOK\right)\right)\left(\mathbf{\Delta}\xi + FP_{j}\cos\left(\angle AOK\right)\right)\Delta_{j}^{2} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \mathbf{\Delta}^{T}\mathbf{\Delta}\xi^{2} + \left(\mathbf{\Delta}^{T}FP_{j} + P_{j}^{T}F^{T}\mathbf{\Delta}\right)\cos\left(\angle AOK\right)\xi + \left(P_{j}^{T}F^{T}FP_{j}\right)\cos^{2}\left(\angle AOK\right) - \Delta_{j}^{2} = 0 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \xi^{2} - 2k_{j}\cos\left(\angle AOK\right)\xi + (1 - n_{j}^{2})\cos^{2}\left(\angle AOK\right) - \Delta_{j}^{2} = 0. \end{split}$$

Решая полученное квадратное уравнение, находим ξ. Окончательно, после решения аналогичным образом уравнений относительно b, решение запишется в виде

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

где знак «+» или «-» берется согласно выполнению соответствующего условия ($\mathbf{a} imes \mathbf{k}$) · $\mathbf{n} > 0$ или ($\mathbf{b} imes$ \mathbf{k}) · \mathbf{n} < 0.

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

Найденное в аналитическом виде решение поставленной задачи реализовано в функциях СУБД, что позволяет осуществлять выбор объектов-претендентов на идентификацию на стороне БД.

На рис. 4 представлен фрагмент таблицы БД, содержащей информацию об объектах претендентах, которая заполняется при вводе измерений в БД посредством триггерных функций. 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 наблюдения.

Тип поля	Клавиша	He Null	По умолчанию	Описание
integer		V		Идентификационный номер трека
integer		V		Номер ОКМ
timestamp			nowdmv()	Время записи, ДМВ
double precision			Null	Функционал, рассчитанный по входным невязкам
smallint			0	Признак обработки трека: 0 - не обработан 1 - готов к обработке 2 - обработан 100 - находится в процессе обработки
serial	Перв. ключ	V	nextval('tracks_ident_id_set	Идентификационный номер записи
integer			0	Номер кластера, к которому относятся измерения данного трека
double precision			Null	Угловое расстояние между направлениями Пункт-Прогнзируемое положение КО и Пункт-Измеренное положение КО,
double precision			Null	Функционал, рассчитанный по остаточным невязкам МНК



Также уже при вводе измерений в БД средствами СУБД осуществляется разделение проводок по группам, полученным от одного и того же измерительного средства на одних и тех же кадрах. Эта часть существенна для дальнейшего принятия решения об идентификации измерений в области ГСКО. На рис. 5 представлено изображение обработанного кадра с измерениями, на котором видны близкорасположенные измерения, решения об идентификации по которым требуется проводить с учетом всех независимых измерений группы.



Рис. 5: Проводки от одной и той же НС на одном кадре.

4. Оценка эффективности

До реализации настоящего подхода процесс обработки измерений проводился на основе расчета эфемерид для каждой HC. Эфемериды рассчитывались в параметрах наблюдений в топоцентрической системе координат.

Разработанный СУБД-центрический подход к идентификации измерений от распределенной сети HC успешно применяется в течение двух лет. За это время в БД, реализованной на СУБД PostgreSQL, накоплено около 70 млн. записей эфемерид. За этот период было обработано более 216 млн. измерений по более, чем 13.8 млн. проводок. Среднее число обрабатываемых измерений составило более 300 тысяч в сутки, пиковые значения достигали 500 тысяч.

Для оценки эффективности предложенного подхода к идентификации оптических измерений было проведено сравнение результатов, полученных с помощью старого и нового подходов. Результаты представлены

РАНЬШЕ (для одной НС)	СЕЙЧАС (для сети НС)				
* среднее время расчета суточных эфемерид					
60 мин	8 мин				
* средний размер одной эфемеридной записи:					
245 байт	400 байт				
* среднее число суточных эфемеридных записей					
2565000 (объем — 630 Мб)	98000 (объем — 39 Мб)				
* среднее число обрабатываемых измерений в сутки					
50000	> 300000 (пик: 500000)				
* возможность обработки измерений					
непосредственно на НС	в центре обработки информации				

Таблица 1: Сравнение старого и нового подходов к идентификации оптических измерений.

в табл. 1, где приведены объем и время расчета суточных эфемерид, а также число обрабатываемых измерений в сутки.

Анализ результатов свидетельствует, что новый подход позволяет значительно, более чем в 10 раз, сократить объем записываемой и хранимой в БД информации, ускорить время расчета суточных эфемерид в 7.5 раз, на порядок повысить производительность обработки измерительной информации.

Отметим, что при старом подходе и увеличении числа HC, объем хранимых эфемерид и время обработки измерительной информации увеличатся пропорционально числу HC. Для нового же подхода в этой ситуации приведенные оценки останутся неизменными, т. к. основные узлы по расчету эфемерид и выбору объектовпретендентов не зависят от числа HC, что обеспечивает эффективную масштабируемость задачи.

5. Заключение

Реализация СУБД-центрического подхода позволила организовать масштабируемую работу центра обработки оптической измерительной информации от распределенной сети HC. Применение УЧАМ совместно с внутренними механизмами СУБД обеспечило увеличение на порядок скорости обработки измерений от оптических средств.

Список литературы

- 1. Z. N. Khutorovsky, in Proceedings of the Fourth US/Russian Space Surveillance Workshop, 97 (2000).
- 2. A. E. Tyulin, V. V. Betanov, V. S. Yurasov, and S. V. Strel'nikov, Navigatsionno-ballisticheskoe obespechenie poleta raketno-kosmicheskih sredtsv. Sistemnyj analiz NBO. Kniga 2. M.: Radiotehnika (2018).

Мониторинг и исследование энергетического дисбаланса и климата Земли, а также астероидов и комет, сближающихся с Землей, экзопланет, новых и сверхновых звезд с поверхности Луны¹

Абдусаматов Х.И.

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

Непрерывный мониторинг и исследование долговременных однородных высокоточных данных о среднегодовом энергетическом дисбалансе между Землей и космосом (ЭДЗ) на протяжении многих десятилетий необходимы для калибровки его зависимости от циклических вариаций солнечной постоянной (СП), а также для глубокого понимания физических механизмов, определения закономерностей формирования и прогнозирования изменения климата. Это непременно требует создания и использования новых долгосрочно стабильных фиксированных космических платформ для постоянного и непрерывного репрезентативного наблюдения одновременно за всей земной поверхностью. Два одинаковых специальных роботизированных оптических телескопа-близнеца, устанавливаемых на противоположных краях экваториальной зоны видимой поверхности Луны, из которых состоит Лунная обсерватория (ЛО), представляет собой систему, функционирующую в автоматическом режиме как единый телескоп. Система телескопов-близнецов, сменяя друг друга, последовательно будет обследовать всю поверхность Земли только в ночное время непрерывно в течение более 94% времени лунных суток. Защита от лунной пыли и ее наэлектризованности обеспечивается выдвижным козырьком и обеспечением стока зарядов. ЛО обеспечивает измерения вариаций абсолютных величин всех энергий, уходящих с Земли в космическое пространство: удельной мощности, отраженной планетой доли СП, в спектральном диапазоне 0.2-4 мкм и собственного теплового излучения Земли в диапазонах 4-50 и 8-13 мкм окна прозрачности атмосферы с погрешностью около 0.1%. Телескопы-близнецы в свободное от наблюдений Земли дневное время последовательно будут вести непрерывный обзор всего неба по координатно-фотометрическому мониторингу сближающихся с Землей астероидов и комет, особенно летящие со стороны Солнца, а также экзопланет, сверхновых и новых звезд в диапазоне 0.2–2 мкм.

Поступила в редакцию 07.05.2022 г. Принята в печать 29.08.2022 г.

Ключевые слова: Лунная обсерватория, энергетический дисбаланс, СП, климат, система телескопов-близнецов, альбедо Бонда, экзопланеты, астероидно-кометная опасность

Monitoring and research of the Earth's energy imbalance and climate, as well as asteroids and comets, approaching the Earth, exoplanets, novae and supernovae stars from the surface of the Moon

Abdussamatov H.I.

Pulkovo observatory of the RAS, St. Petersburg, Russia

Continuous monitoring and study of long-term homogeneous high-precision data on the average annual energy imbalance between the Earth and space (EEI) over many decades is necessary to calibrate its dependence on cyclic variations in the total solar irradiance (TSI), as well as to deeply understand the physical mechanisms, determine patterns of formation and forecast climate change. This certainly requires the creation and use of new long-term stable fixed space platforms for constant and continuous representative observation of the entire Earth's surface simultaneously. Two identical special robotic twin optical telescopes installed on opposite edges of the equatorial zone of the visible surface of the Moon, which make up the Lunar Observatory (LO), is a system that operates automatically as a single telescope. The system of twin telescopes, replacing each other, will sequentially examine the entire surface of the Earth only at night, continuously for more than 94% of the time of the lunar day. Protection against lunar dust and its electrification is provided by a retractable visor and a charge drain. The LO provides measurements of variations in the absolute values of all energies leaving the Earth into outer space: the specific powers, the TSI fraction reflected by the planet, in the spectral range of 0.2–4 μ m and the Earth's own thermal radiation in the ranges of 4–50 and 8–13 μ m of the atmospheric transparency window with an error of about 0.1%. Twin telescopes during the daytime free from Earth observations will consistently conduct a continuous survey of the entire sky by coordinate-photometric monitoring of asteroids and comets approaching the Earth, especially those flying from the direction of the Sun, as well as exoplanets, novae and supernovae stars in the range of 0.2–2 μ m.

Received 07.05.2022. Accepted 29.08.2022.

Keywords: Lunar Observatory, energy imbalance, climate, twin telescope system, Bond albedo, exoplanets, asteroid and comet danger

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.011

1. Введение

Фундаментальным показателем, определяющим изменение состояния глобальной энергетики климатической системы, является исключительно долговременная вариация глобального теплового состояния (теплосодержания) всей планеты в целом. Поэтому долговременный высокоточный непрерывный мониторинг

¹Публикуется в порядке дискуссии

однородных репрезентативных данных об энергетическом дисбалансе между Землей и космосом (ЭДЗ) является важнейшей научной проблемой в надежных исследованиях изменения климата и обуславливающих эти изменения физических механизмов [1, 2, 3]. Чрезвычайно сложная и нелинейная климатическая система зависит от совокупного влияния многочисленных физических процессов, происходящих за период порядка 30 лет и более, в подсистемах океан-суша-атмосфера, на которые, в свою очередь, влияют множество различных факторов, главным образом, квазидвухвековое изменение СП. Изучение значительных колебаний климата за последние 800 000 лет показывает, что основными фундаментальными причинами чередования потепления и похолодания являются соответствующие квазидвухвековые и тысячевековые циклические колебания СП совместно с последующими очень важными последовательными многократными воздействиями причинно-следственных эффектов обратной связи, которые являются главными факторами, управляющими климатической системой [3]. При этом СП является основным фактором, управляющим климатической системой Земли, и даже самые незначительные долговременные ее изменения могут иметь серьезные последствия для климата по аналогии с циклом Миланковича с тысячевековыми колебаниями формы земной орбиты с соответствующими незначительными изменениями СП, ведущим к Большим ледниковыммежледниковым периодам [4]. Изменение ЭДЗ, независимо от его причин, за период около 30 лет и более является основным показателем последующего соответствующего изменения климата и глобальной температуры. Однако измерения всеми существующими низкоорбитальными и геостационарными [5, 6, 7, 8] спутниками не могут обеспечить высокоточные идентификации ЭДЗ, так как наблюдают ограниченные области поверхности Земли. Для успешного исследования физических причин изменения климата и наиболее важных климатических параметров, имеющих определяющее значение для разработки и создания наиболее надежных методов прогнозирования грядущих изменений климата, необходима оперативная и долговременная непрерывная однородная информация о временных вариациях их абсолютных величин в течение многих десятилетий. Это требует создания новых долгосрочно высокостабильных стационарных космических платформ на достаточном удалении от Земли для непрерывного репрезентативного одновременного наблюдения за всей земной поверхностью в течение многих десятилетий. Для успешного решения данной проблемы единственным местом в космосе, обеспечивающим надежные и долговременные прямые прецизионные (с погрешностью ~0.1%) измерения абсолютных значений всех энергий, исходящих от Земли, является видимая поверхность Луны [2, 9]. Однако проведение наблюдений Земли с поверхности Луны только в идеальных условиях лунного ночного времени непрерывно в течение более половины времени лунных суток до последнего времени оставалось большой нерешенной проблемой. Оно стало возможным благодаря изобретенному нами новому способу исследования изменений климата Земли и системе двух роботизированных специальных оптических телескопов-близнецов для его осуществления (патент РФ № 2591263).

2. Энергетический дисбаланс между Землей и космическим пространством

ЭДЗ определяется разностью между удельными мощностями солнечного излучения, поступающими во внешние слои атмосферы, и уходящими в космическое пространство ее отраженной и рассеянной долями, определяемыми величиной альбедо Бонда Земли, а также собственного теплового излучения, т. е. разностью между поглощенной планетой доли энергии СП и излучаемой Землей в космическое пространство энергией собственного теплового излучения [1, 9]:

$$E = \frac{(S_{\odot} + \Delta S_{\odot})}{4} - \frac{(A_{\rm BE} + \Delta A_{\rm BE})(S_{\odot} + \Delta S_{\odot})}{4} - \epsilon \sigma (T_{\rm p} + \Delta T_{\rm p})^4, \tag{1}$$

где E — удельная мощность изменения теплосодержания планеты [Вт/м²], S_{\odot} — СП, ΔS_{\odot} — приращение СП, А_{ВЕ} — глобальное альбедо Земли как планеты (альбедо Бонда), $\Delta A_{\rm BE}$ — приращение альбедо Бонда, ϵ — излучательная способность (степень черноты) системы подстилающая поверхность-атмосфера, σ — постоянная Стефана-Больцмана, $T_{\rm p}$ — планетарная термодинамическая температура, $\Delta T_{\rm p}$ — ее приращение. Изменение климата Земли, очевидно, следует рассматривать как функцию долговременного отклонения ЭДЗ от равновесного состояния [1, 2, 3]. Поэтому необходим долговременный мониторинг в течение многих десятилетий теплового состояния планеты. Однако в настоящее время интегральными радиометрами измеряются интегральные мощности составляющих ЭДЗ с помощью космических аппаратов (КА) на низкоорбитальных и геостационарных спутниках, погрешность измерений которых с ошибками калибровки составляет порядка 1% [5, 6, 7, 8], поскольку они способны только к непосредственным измерениям энергии излучения, исходящего только от отдельных частей планеты. Бортовые радиометры DSCOVR в точке Лагранжа L1 системы Солнце-Земля [10] смогут обеспечить прямые измерения уходящей от Земли энергии только в одном направлении, т. е. значения геометрического альбедо Земли. Кроме того, измерения ЭДЗ на борту DSCOVR не могут быть надежно выполнены, потому что Луна, вращаясь вокруг Земли, временами закрывает собой изображение земного диска. Более того, все орбитальные космические аппараты имеют относительно небольшой срок службы из-за ограниченных энергетических возможностей и невозможности создания долговременной и весьма важной фундаментальной базы однородных данных о среднегодовом ЭДЗ. Если СП не меняется ($\Delta S_{\odot} = 0$), то приращение температуры Земли есть результат приращений альбедо Бонда ($\Delta A_{\rm BE}$) и пропускания окон прозрачности атмосферы [1]

$$\Delta T = -\frac{\Delta A_{\rm BE} S_{\odot}}{16\sigma T^3}.$$
(2)

Увеличение только альбедо Бонда на $\Delta A_{\rm BE} = +0.0003~(0.1\%)$ при неизменной СП ($\Delta S_{\odot} = 0$) приведет к понижению температуры на $\Delta T \approx -0.027$ К. Поэтому крайне важно измерять среднегодовой ЭДЗ с погрешностью 0.1%.

3. Поверхность Луны — идеальная долгосрочно высокостабильная космическая платформа особенно в ночное время

Научно обоснованные слежения за изменением климата и его исследования, а также прогноз грядущих его изменений в перспективе должны основываться на высокоточных непрерывных однородных данных об абсолютной величине среднегодового ЭДЗ, полученных на постоянной основе в течение многих десятилетий. При этом вариация ЭДЗ независимо от ее причин за период 30 ± 10 лет является непременной мерой последующего изменения климата, поскольку постоянная термической инерции t [лет]

$$t = 0.095(1 + 0.42 \cdot l) \tag{3}$$

при глубине активного слоя Океана $l = 750 \pm 250$ м [11, 12]. Поэтому долговременный высокоточный мониторинг ЭДЗ непременно требует создания и использования новых долгосрочно высокостабильных и фиксированных стабильных космических платформ на достаточном удалении от Земли для постоянного и непрерывного репрезентативного наблюдения одновременно за всей земной поверхностью в течение многих десятилетий, для непрерывного извлечения и исследования однородной информации об изменении абсолютной величины среднегодового ЭДЗ. Для достижения надежных прецизионных измерений абсолютных значений комплекса глобальных климатических параметров Земли — полной энергии, уходящей с Земли в космос, единственным и перспективным местом в космосе является видимая поверхность Луны, имеющая идеальные условия особенно в лунное ночное время. Твердая поверхность Луны и медленное незначительное ее колебание при движении вокруг Земли делают видимую поверхность Луны идеальной высокостабильной платформой в космосе для установки оптических телескопов-роботов для проведения на временных масштабах многие десятилетия непрерывных наблюдений одновременно всей поверхности Земли в идеальных условиях ее ночного времени, когда температура стабилизируется на уровне около 100 К. В результате для решения этих насущных климатических проблем, а также для непрерывного обзора всего неба по координатнофотометрическому мониторингу астероидно-кометной опасности, экзопланет, сверхновых и новых звезд разработан новый проект «Лунная обсерватория» (ЛО). Установка оптических телескопов на устойчивой стационарной платформе — твердой поверхности Луны имеет дополнительный ряд других уникальных преимуществ по сравнению с их установками на борту орбитальных космических аппаратов (КА) [2].

4. Лунная обсерватория для мониторинга и исследования энергетического дисбаланса и климата Земли

4.1. Мониторинг и исследование энергетического дисбаланса Земли и климата

Лунная обсерватория [2, 9, 13] представляет собой единую систему двух специальных оптических роботизированных телескопов-близнецов диаметром главного зеркала 300 мм с выдвижным козырьком (COTP-300K), функционирующую последовательно в автоматическом режиме как единый телескоп только в лунное ночное время, по единой научной программе наблюдений Земли (патент РФ № 2591263): с многоканальными спектрально-разделенными широко- и узкополосными спектроболометрами (взамен традиционно используемых интегральных радиометров); защита от лунной пыли и ее наэлектризованности — выдвижной козырек (патент РФ № 155044) и обеспечение стока зарядов (патенты РФ №№ 164303 и 2613048). Телескопы близнецы СОТР-300К будут располагаться вдоль экваториальной зоны на противоположных краях Луны на удалении $\pm (80.9 \pm 0.1^{\circ})$ от ее видимого центра. При таком размещении СОТР-300К на лунной поверхности полный диск изображения Земли всегда будет находиться в поле их зрения, а лучи, исходящие от нее, падают на данные лунные поверхности почти по касательной — угол наклона оптической оси телескопов к лунной поверхности составит менее 20°. За время движения Луны вокруг Земли система двух близнецов СОТР-300К последовательно будет обозревать со всех ракурсов всю земную поверхность практически при всех фазовых углах от -170.9° до 0° и от 0° до $+168.8^{\circ}$ непрерывно в течение более 94% времени лунных суток только в ночное время [2, 9, 13]. В результате, за период синодического лунного месяца будет получена практически непрерывная зависимость от угловой координаты измеряемой мощности излучения над всей поверхностью Земли во всем рабочем спектре излучений. Это позволит экспериментально надежно определять фазовый

интеграл, связывающий геометрическое альбедо и альбедо Бонда Земли. Непрерывный мониторинг исходящего от Земли полного потока излучения позволяет рассчитать среднегодовое значение альбедо Бонда и собственного теплового излучения Земли с учетом всех их вариаций, произошедших в течение всего года.

Телескопы-близнецы СОТР-300К системы последовательно, сменяя друг друга в автоматическом режиме, как единый телескоп обследуют всю поверхность и атмосферу Земли в идеальных условиях ночного времени непрерывно в течение более 94% лунных суток. ЛО используя известные значения СП обеспечит долговременный мониторинг ЭДЗ в спектре ее собственного теплового излучения в диапазоне 4-50 мкм и альбедо Бонда Земли в спектре солнечного излучения в диапазоне 0.2-4 мкм, а также в полосах 8-13 мкм окна прозрачности атмосферы (для выявления и оценки вклада парниковых газов в изменении климата) и 0.3–3 мкм с погрешностью $\approx 0.1\%$. Надежное измерение и исследование распределения энергии излучения по поверхности Земли, как исходящего только от освещенной Солнцем ее видимой части, так и от любого ее региона в ИК-диапазоне, требуют обеспечения телескопом высокого пространственного разрешения по всему получаемому изображению полного диска Земли. Такую возможность на поверхности Луны обеспечит направленный на Землю внеосевой трехзеркальный специальный оптический телескоп-робот СОТР-300К с рабочим полем зрения диаметром ~132′, оптическая схема которого представлена на рис. 1. СОТР-300К будет снабжен регистрирующим энергию потока излучения матричным микроболометрическим приемником излучения (~2048×2048 пикс), охватывающим изображение всего диска Земли, динамическим диапазоном четыре порядка, чувствительные элементы которого покрыты золотой чернью. Используемая матрица очень линейна в динамическом диапазоне спектра ЭДЗ и будет иметь стабильную во времени рабочую температуру, что обеспечит с использованием систему различных фильтров интегральные измерения энергии поступающего потока излучения, исходящего от Земли, последовательно во всем рабочем спектральном диапазоне длин волн 0.2–50 мкм и в отдельных его широких и узких полосах. Микроболометрической матрицей телескопа, в частности, будут измерены интегральный (от видимой освещенной Солнцем части Земли) поток с большой точностью (интегрируя по всем освещенным пикселям матрицы) и, практически одновременно, детальное изображение по всей поверхности. Перед матричным приемником излучения устанавливаются 12 сменных фильтров, пропускающих поочередно в этих заданных спектральных интервалах поступающее излучение в КВ-диапазоне 0.2-4 мкм и ИК-диапазоне 8-13 мкм, а также в 10 отдельных узких полосах диапазона 0.3–3 мкм. Микроболометрическая матрица вместо обычного интегрального болометра впервые используется для того, чтобы измерения производить наиболее точно и с высоким пространственным разрешением по каждому локальному участку диска Земли, что позволит также впервые измерить распределения мощности потоков энергии излучений по всем широтам и исследовать динамики изменения соотношения потоков энергии излучений между низкими и высокими широтами — важнейшего климатообразующего про-



Рис. 1: Оптическая схема COTP-300K с противозасветочными блендами. Трассируются 4 пучка лучей, соответствующие крайним точкам на изображении, заполняющие входной зрачок телескопа.

цесса, а также наиболее точно измерять мощность излучения, исходящего только от освещенной Солнцем части Земли, так как именно эта величина позволит определять надежные значения ее альбедо Бонда.

СОТР-300К снабжен сменным матовым стеклом, устанавливаемым на его входном зрачке в период полной фазы Земли во время проведения ежемесячного контроля стабильности чувствительности микроболометрического матричного приемника излучения по равномерному уровню освещенности в фокальной плоскости телескопа: а также по мощности излучения стандартных звезд, наблюдаемых на достаточном угловом удалении от направления к Земле. В результате любое изменение электрического сигнала на выходе каждого пиксела микроболометрической матрицы будет автоматически учтено введением соответствующей поправки. На рис. 2 представлены габаритные размеры СОТР-300К в продольном разрезе с откинутым матовым стеклом, а на рис. 3 — его общий вид, где 1 — герметичная труба; 2 — 1-е вогнутое зеркало; 3-2-е выпуклое зеркало; 4-3-е вогнутое зеркало; $5-\Phi\Pi Y$; 6- входной зрачок с диаметром D; 7противозасветочные 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. Защита (страховка) оптических элементов СОТР-300К в ночное время от опускающихся вертикально из верхних слоев экзосферы весьма редких частиц лунной пыли обеспечивается выдвижным козырьком, снабженным механизмом возвратно-поступательного перемещения, размещаемым параллельно оптической оси над входным зрачком (патент РФ № 155044). Система контроля фотометрических характеристик СОТР-300К дополнительно обеспечит контроль их состояния независимо от возможного проникновения весьма редких частиц лунной пыли. При транспортировке козырек задвигается в пределы корпуса трубы, доведя его продольные габариты до безкозырькового состояния. СОТР-300К для защиты его зеркал от приповерхностных частиц заряженной лунной пыли устанавливается в центральной зоне чаши, выполненной в виде перевернутого усеченного конуса (рис. 2–3). В горизонтальном положении трубы нижний край входного зрачка телескопа находится выше верхнего уровня чаши, а торцы трубы без козырька в вертикальной проекции не достигают верхней внутренней поверхности конуса чаши. Чаша выполнена с опорными ногами и возможностью расположения ее над ровной площадкой поверхности так, что ее верх-



Рис. 2: Продольный разрез COTP-300K с откинутым матовым стеклом в специальной пылезащитной чаше и его габаритные размеры.



Рис. 3: Общий вид COTP-300K с откинутым матовым стеклом в пылезащитной чаше в продольном разрезе (солнцезащитная бленда не указана). Оптическая система COTP-300K располагается в надежном герметичном корпусе.

ний уровень расположен на высоте более 1000 мм над поверхностью. Для защиты зеркал телескопа от приповерхностных заряженных частиц лунной пыли внешние поверхности чаши и входного зрачка, а также поверхность зеркал покрыты электроизолированными электропроводящими оболочками, подключенными к блоку электропитания, расположенному в чаше, имеющими электрический заряд с заданной частотой смены полярности, в частности, и в зависимости от смены дня и ночи (патенты РФ № 164303 и № 2613048).

Определяемые ЛО среднегодовые величины альбедо Бонда, собственного теплового излучения Земли и ЭДЗ будут практически на порядок точнее интегральных измерений этих параметров орбитальными КА [2]. Главная особенность разрабатываемой новейшей системы ЛО состоит также в создании и использовании высокоэффективного мультиканального гиперспектроболометра с высоким пространственным разрешением по диску Земли в качестве основного измерительного прибора взамен традиционным интегральным радиометрам. Общая конфигурация научной полезной нагрузки: масса одного комплекса НА СОТР-300К с облегченными зеркалами в защитной чаше без солнечных батарей, аккумуляторов и двигателей мягкой посадки — менее 100 кг, а его габариты — менее 1500×1500×1500 мм³; требуемая электрическая мощность менее 100 Вт. Прием и передача научной и служебной информации с каждого телескопа осуществляется в лунное дневное время. СОТР-300К устанавливается в центральной зоне специально оборудованной пылезащитной чаши на высоте более 1000 мм над поверхностью (рис. 3). Специальная пылезащитная чаша СОТР-300К будет приспособлена как посадочный модуль с двигателями мягкой посадки для установки телескопа на требуемом участке лунной поверхности. Будет использован успешный опыт установки еще в 2013 г. аналогичного по всем техническим параметрам китайского Lunar-based Ultraviolet Telescope (LUT) без посадочного аппарата и без помощи космонавтов [14]. Комплекс СОТР-300К полностью автоматизирован, не требует участия космонавтов в его установке на поверхности Луны, настройки и обслуживания. Слежение за Землей телескопом будет осуществляться не непрерывно, а ступенчато с интервалом через каждые 6-16 час, а ее изображение всегда будет несколько меньше размера площадки фоточувствительных элементов



Рис. 4: Общий вид комплекса СОТР-300К на поверхности Луны (солнечные батареи, двигатели мягкой посадки и солнцезащитная бленда не указаны).

приемника излучения. На рис. 4 представлен общий вид комплекса COTP-300K на поверхности Луны. Разрабатываемаый NASA компонент будущей системы наблюдения за климатом — обсерватория CLARREO [15, 16] — не предназначен для проведения прецизионных измерений величины полных энергий отраженного и рассеянного планетой в космическое пространство во всех направлениях поступающего солнечного излучения и собственного теплового излучения Земли и, следовательно, определения величины ЭДЗ [2].

4.2. Основные цели и задачи Лунной обсерватории

ЛО предназначена на решения следующих важнейших научно-прикладных проблем [13]:

- Долговременный мониторинг и исследование потоков энергий отраженного планетой солнечного излучения и исходящего собственного теплового излучения в спектральных диапазонах 0.2−4 и 4–50 мкм соответственно непрерывно в ночное время в течение более 94% лунных суток с погрешностью ≈0.1 %;
- Впервые изучение важнейшего климатообразующего физического процесса по долговременному мониторингу изменения распределения потока энергий излучения по широтам и динамики изменения соотношения потоков энергий излучения между низкими и высокими широтами;
- Долговременный мониторинг изменения интегрального потока собственного теплового излучения Земли в диапазоне 8–13 мкм основного окна прозрачности атмосферы для исследования и выяснения вклада парниковых газов в климатические изменения;
- Исследование вариаций альбедо Бонда планеты и физических параметров атмосферы и поверхности в зависимости от циклических изменений СП;
- Долговременный мониторинг и изучение абсолютной величины интегрального среднегодового энергетического дисбаланса между Землей и космосом — накопленного тепла или его дефицита в Океане с использованием известных значений СП, установление их зависимости от циклических вариаций СП, а также климата;
- Определение физических механизмов формирования, причины и закономерности изменения климата, направления и глубины его изменений;
- Впервые создание недостающей, крайне необходимой, наиважнейшей фундаментальной базы высокоточных данных ЭДЗ и его составляющих;
- Долговременный мониторинг и исследование облачного и снежно-ледяного покровов, растительности, концентраций аэрозолей и озона, и др. в каждом регионе и по всей планете по мониторингу в 10 отдельных узких полосах диапазона 0.3–3 мкм;
- Непрерывный обзор всего неба по координатно-фотометрическому мониторингу и исследованию сближающихся с Землей астероидов и комет, особенно летящих со стороны Солнца, а также экзопланет,

сверхновых и новых звезд в свободное от наблюдений Земли дневное время последовательно системой двух телескопов в диапазоне 0.2–2 мкм.

Комплексные измерения по всему диску Земли осуществляются во всем рабочем спектральном диапазоне длин волн 0.2–50 мкм и в заданных его двух широких и десяти узких интервалах каждого СОТР-300К. Первым каналом одновременно регистрируется полная энергия излучения Земли в КВ- и ДВ-диапазонах спектра. Во втором канале для выделения энергии излучения в КВ-диапазоне спектра используется соответствующий фильтр, а именно плоскопараллельная пластина из кварца-UV, который, имея красную границу полосы пропускания на длине волны 4 мкм, отсекает излучение ДВ-диапазона спектра. Поток энергии собственного теплового излучения в спектральном диапазоне 4–50 мкм будет определен путем вычитания измеренной энергии излучения в КВ-диапазоне (второй канал) от измеренной энергии полного излучения Земли (первый канал). Третий канал с фильтром, пропускающим излучение в диапазоне 8–13 мкм, регистрирует излучаемую энергию в пределах основного окна прозрачности атмосферы. Наблюдения Земли в области терминатора не проводятся, а входной зрачок и герметичный корпус телескопа плотно закрывается герметичной крышкой, которая открывается только во время наблюдений. В течение не более 18 ч до наступления и не более 24 ч после наступления полнолуния телескопы-близнецы становятся неработоспособными (в период, когда видна только ночная и около ночная сторона Земли) из-за их освещения солнечным излучением и нагрева, а также высокого температурного фона вокруг них. Такой, менее 6%, перерыв в наблюдениях Земли возможен только в течение не более 42 ч за весь промежуток времени между двумя последовательными полнолуниями за лунные сутки, когда отраженное и рассеянное планетой солнечное излучение в период видимости ночной и около ночной стороны Земли имеет ничтожно малую долю энергии. Она может быть надежно определена посредством интерполяции и не внесет практически никакого влияния в точности измерений и последующего определения значений альбедо Бонда и собственного теплового излучения Земли. Общий вид фазовой функции Земли вблизи точки $\alpha=\pm 180^\circ$ вносит минимальный вклад в фазовый интеграл, поэтому невозможность проводить прямые наблюдения в диапазонах фазовых углов α от -170.9° до -180° и от $+168.8^{\circ}$ до $+180^{\circ}$ не внесет практически никакой ошибки. Если на этом участке кривой фазовой функции путем интерполяции продолжить линейно спадающей в ноль при $\alpha = \pm 180^{\circ}$, это приведет к отличию от интеграла исходной функции менее чем на 0.001%, что значительно меньше предполагаемой точности измерений, следовательно, этой ошибкой можно пренебречь полностью. Только ЛО, состоящая из системы двух близнецов СОТР-300К на указанных противоположных краях видимой поверхности Луны, работающих последовательно только в лунное ночное время непрерывно в течение более 94% времени лунных суток в местах их установки в автоматическом режиме как единый телескоп, позволит получать комплекс наиболее точных глобальных климатических параметров. Это позволит наиболее надежно определять величины среднегодового ЭДЗ в эпоху активного спада и грядущего наступления глубокого минимума СП. ЛО в течение значительно более 15 лет обеспечит важнейшими недостающими, крайне необходимыми надежными однородными глобальными климатическими данными с погрешностью ≈0.1%, которые не могут быть получены никакими другими космическими методами их измерений [2, 13].

4.3. Мониторинг физических и оптических характеристик земной атмосферы и поверхности

Долговременные изменения площадей облачного и снежно-ледяного покровов, растительности, концентраций аэрозолей и озона, а также других физических и оптических характеристик атмосферы и поверхности Земли весьма важны для выявления тенденций в глобальных изменениях природы, альбедо Бонда и климата. Поэтому для локального и глобального дистанционного зондирования Земли с поверхности Луны в фокальной плоскости телескопа-робота СОТР-300К дополнительно устанавливаются последовательно вводимые 10 интерференционных фильтров с различными изолированными узкими полосами пропускания в спектральном диапазоне длин волн 0.3–3 мкм. Получаемые в течение суток в этих спектральных интервалах изображения освещенной и неосвещенной (в ИК-диапазоне) Солнцем частей планеты, наряду с параллельными измерениями удельных мощностей отраженного и рассеянного солнечного излучения и собственного теплового излучения Земли, позволят осуществить детальный мониторинг состояния земной поверхности, облачности, растительности, криосферы, концентрации аэрозолей и озона во всей планете. Такой мониторинг с помощью узкополосного мультиканального спектроболометра СОТР-300К позволит дополнительно исследовать краткосрочные и долговременные вариации состояния поверхности и атмосферы как всего земного шара, так и всех отдельных регионов, а также их зависимости от совокупного воздействия квазидвухвекового и 11-летних циклических изменений СП. Другими актуальными направлениями в области климатических исследований являются анализ и определение влияния на климат Земли дополнительных выбросов и загрязнения атмосферы, вызванных использованием ранее запасенной энергии (уголь, нефть, торф). Уровень концентрации парниковых газов (главным образом водяного пара и углекислого газа) в атмосфере определяет пропускание теплового излучения земной поверхности в космос через окна прозрачности, поскольку с увеличением глобальной концентрации парниковых газов пропускание атмосферы в космос уменьшается. Наиболее значимое окно прозрачности земной атмосферы соответствует спектральному диапазону 8–13 мкм. Поэтому для исследования долговременного изменения вклада доли теплового излучения земной поверхности, уходящего непосредственно через данное окно прозрачности атмосферы в космическое пространство без промежуточного поглощения и повторного переизлучения, в общее суммарное излучение Земли в данном диапазоне длин волн в ЛО предусмотрен специальный ИК-канал для мониторинга удельной мощности суммарного собственного теплового излучения планеты в окне прозрачности атмосферы в дипазоне 8–13 мкм [2, 13]. Итак, планируемый в ЛО мониторинг вариаций энергии в спектральном диапазоне основного окна прозрачности атмосферы позволит регистрировать и контролировать временное изменение пропускания атмосферой теплового излучения поверхности в космос, а также выявить и определять относительный вклад вариации концентрации парниковых газов в атмосфере в климатические изменения.

4.4. Координатно-фотометрический мониторинг и исследование астероидов и комет, сближающихся с Землей, а также экзопланет, сверхновых и новых звезд

Сближающиеся с Землей потенциально опасные астероиды и кометы, особенно летящие к Земле со стороны Солнца, представляют наибольшую опасность, поскольку их больше, чем крупных тел, и появляются они неожиданно. Популяция астероидов и комет, приходящих с дневного неба, столь же велика, как и тех тел, которые приходят с ночного неба. Однако пока нет технических средств для массового обнаружения таких объектов, поскольку с поверхности Земли они не могут быть обнаружены в дневное время. Поэтому они пока остаются самыми неизученными небесными телами и именно они представляют наибольшую опасность. Челябинский метеорит относился к той части популяции околоземных астероидов, которые движутся к Земле со стороны Солнца. Система двух телескопов-близнецов, расположенных на экваторе Луны, в свободное от наблюдений Земли дневное время, сменяя друг друга, во всем рабочем поле зрения диаметром 132' последовательно будут вести непрерывный обзор всего неба по координатно-фотометрическому мониторингу и исследованию потенциально опасных астероидов и комет, сближающихся с Землей, и экзопланет, пригодных для жизни, а также сверхновых и новых звезд в четырех полосах широкого спектрального диапазона 0.2–2 мкм. Очень медленное вращение Луны вокруг своей оси значительно повышает точность позиционирования с помощью оптического телескопа и позволить значительно увеличить время экспозиции и количество используемых звезд. При осуществлении обзора всего неба в лунное дневное время телескопы-роботы дополнительно будут иметь автоматическую систему точного слежения с учетом вращения поля зрения и бленду из двух половинок цилиндра для защиты объектива телескопа от солнечного и земного излучений (на удалении более 15° от направления к Солнцу (Земле)), откидывающихся по горизонтальным бокам вдоль корпуса трубы при транспортировке, а также будут использовать сменную (единую или мозаичную) ПЗС матрицу (~ 8000 × 8000 пикс). Полный цикл обзора всего неба системой телескопов-близнецов СОТР-300К с экспозицией около 30 с можно осуществить при непрерывном наблюдении за не более 100 ч. Отдельный обзор площадки звездного неба вокруг Солнца будет осуществляться с периодом в 10 раз меньше. Таким образом, телескопы-роботы СОТР-300К ЛО могут обнаруживать тела диаметром более 10 метров, представляющие наибольший интерес с точки зрения астероидно-кометной опасности. Телескопы ЛО, экранируя попадание солнечного излучения на входной зрачок телескопа блендой, могут обнаруживать также и летящие к Земле со стороны Солнца астероиды и кометы, внеся очень существенный вклад в планетарную защиту. ЛО станет профессионально обзорным «Космическим патрулем» по раннему обнаружению сближающихся с Землей астероидов и комет. Проводимый непрерывный обзор всего неба также позволит одновременно вести непрерывный поиск и исследование экзопланет, пригодных для жизни, а также сверхновых и новых звезд.

5. Заключение

Система из двух телескопов-роботов-близнецов будет последовательно проводить обзор уходящей в космос энергий со всей земной поверхности и атмосферы практически во всех фазовых углах непрерывно в течение более 94% времени лунных суток только в лунное ночное время. Долговечность лунной платформы, ее неизменная температурная стабильность около 100 К в ночное время в местах установки телескопов и одновременный обзор всего диска Земли, и его практически непрерывные наблюдения разработанным нами системой НА оптических телескопов-близнецов СОТР-300К с поверхности Луны позволят проводить однородные измерения абсолютных среднегодовых значений ЭДЗ и его составляющих с точностью ≈0.1%. Среднегодовые значения альбедо Бонда и собственного теплового излучения Земли как планеты, определенные ЛО, и на их основе (точное значение СП будет получено из измерений других космических экспериментов) расчет среднегодового значения ЭДЗ будет почти на порядок точнее, чем определяемый любым орбитальным космическим аппаратом. Лунная обсерватория в течение значительно более 15 лет впервые обеспечит недостающими крайне необходимыми важнейшими однородными высокоточными, наиболее достоверными глобальными климатическими данными об изменении абсолютной величины среднегодовых значений ЭДЗ, альбедо Бонда и собственного теплового излучения Земли и накапливаемого ежегодно избытка или дефицита энергии в Океане благодаря его термической инерции. Эти данные за период значительно более 15 лет позволят откалибровать и определять зависимость абсолютной величины среднегодового ЭДЗ от циклических вариаций СП, что служит надежным индикатором для реконструкции изменений ЭДЗ за весь период ее (СП) высокоточных космических измерений с 1978 г. Это впервые позволит надежно и достоверно выявить и установить физические механизмы формирования, причины и закономерности изменений климата нашей планеты за период более чем 70 лет и разработать наиболее надежные методы его прогнозирования. Лунная обсерватория является уникальным проектом и решаемые в ней важнейшие фундаментальные научно-прикладные проблемы не могут быть выполнены никакими другими средствами, т. е. альтернативных «нелунных» решений данной важнейшей проблемы не существуют. Цели и задачи, состав научной полезной нагрузки, пути и методы реализации разработанной 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 Лунной обсерватории планируется осуществить совместно: научно-исследовательскими институтами Российской академии наук, Росгидромета и the Chinese Academy of Sciences.

Автор благодарит А.А. Гарбуля за проведенный расчет оптической системы СОТР-300К и за помощь в подготовке рисунков.

Список литературы

- 1. H. I. Abdussamatov, Therm. Sci., 19, S279, 2015.
- 2. H. I. Abdussamatov, Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics, 54, 1341, 2018.
- 3. H. I. Abdussamatov, Earth Sciences, 9, 117, 2020.
- 4. M. Milankovitch, Hardbound, Alven Global, Belgrade, 636, 1998.
- 5. J. E. Harries, J. E. Russell, J. A. Hanafin, H. Brindley, et al., Bulletin of the American Meteorological Society, 86, 945, 2005.
- 6. B. A. Wielicki, B. R. Barkstrom, E. F. Harrison, I. Lee, Robert B., G. L. Smith, and J. E. Cooper, Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 853, 1996.
- N. G. Loeb, B. A. Wielicki, D. R. Doelling, G. L. Smith, D. F. Keyes, S. Kato, N. Manalo-Smith, and T. Wong, *Journal of Climate*, 22, 748, 2009.
- 8. K. E. Trenberth, J. T. Fasullo, and J. Kiehl, Bulletin of the American Meteorological Society, 90, 311, 2009.
- 9. H. I. Abdussamatov, Issled. Zemli iz Kosmosa, 79-88, 2016.
- 10. DSCOVR, www.nasa.gov/feature/goddard/from-a-million-miles-awaynasa-camera-shows-moon-crossing-face-of-earth, 2017.
- 11. H. I. Abdussamatov, A. I. Bogoyavlenskii, S. I. Khankov, and Y. V. Lapovok, *Journal of Electromagnetic Analysis and Application*, **2**, 133, 2010.
- 12. H. I. Abdussamatov, S. I. Khankov, and Y. V. Lapovok, Proceedings of the All-Russian annual conference on solar and solar-terrestrial physics. St. Petersburg., 307–310, 2011.
- 13. H. I. Abdussamatov, Scientific and Practical Conference "Near-Earth Astronomy 2022", 155–158, 2022.
- 14. J. Wang, X. M. Meng, X. H. Han, H. B. Cai, et al., Ap&SS, 360, 10, 2015.
- 15. CLARREO, https://clarreo-pathfinder.larc.nasa.gov (CLARREO Pathfinder (nasa.gov), 2017.
- B. A. Wielicki, D. F. Young, M. G. Mlynczak, K. J. Thome, et al., Bulletin of the American Meteorological Society, 94, 1519, 2013.

Федор Бредихин и Общество итальянских спектроскопистов

Чинничи И.

Национальный институт астрофизики, Палермская астрономическая обсерватория, Палермо, Италия

В октябре 1871 г. несколько итальянских астрономов основали первое научное «Общество итальянских спектроскопистов», занимавшееся применением спектроскопии в области астрономии. Они договаривались о совместном ведении программы спектроскопических наблюдений лимба Солнца, чтобы отслеживать солнечную активность, сравнивать результаты, находить связи между фотосферными и хромосферными характеристиками и изучать взаимодействие Солнца и Земли. Позже от этой программы, в основном, отказались, а общество распространило свои интересы на популяризацию спектроскопических исследований. «Записки общества» сегодня считаются первым астрофизическим журналом: на его страницах мы находим сборники статей по астрономической спектроскопии всех пионеров астрофизики. «Записки» стали международным журналом, который в значительной степени поспособствовал преодолению того сопротивления, с которым астрофизические исследования встречались в традиционном астрономическом сообществе. Ф.А. Бредихин был членом «Общества спектроскопистов», что подтверждает его признание как одного из первых астрофизиков, а его исследования считались новаторскими в международном контексте. Он состоял в переписке с президентом общества Пьетро Таккини и опубликовал некоторые из своих работ в «Записка». В этой статье мы рассмотрим его публикации и в целом взаимоотношения Ф.А. Бредихина с «Обществом спектроскопистов».

Поступила в редакцию 01.08.2021 г. Принята в печать 01.10.2021 г.

Keywords: ранняя солнечная физика, история астрономии

Theodor Bredikhin and the Italian Spectroscopic Society

Chinnici I.

INAF-Osservatorio Astronomico di Palermo, Palermo, Italy

In October 1871, some Italian astronomers established the first scientific society explicitly devoted to the application of spectroscopy in the astronomical field. They agreed on sharing a programme of spectroscopic observations of the solar limb, in order to monitor solar activity, compare their results, find connections between the photospheric and chromospheric features and study Sun-Earth interaction. The programme was later mostly abandoned, but the interests of the Society were extended to the circulation of the spectroscopic studies. The Memoirs of the Society are today considered the first astrophysical journal: in its pages, we find collections of articles on astronomical spectroscopy by all pioneers of astrophysics. They became an international journal that greatly contributed to overcome the resistance that the astrophysical research met in the traditional astronomical community. Bredikhin was a member of this Society. This means that he was recognized as an early astrophysicist and his studies were considered innovative in an international context. He was in correspondence with its President, Pietro Tacchini, and published some of his works in the Memorie. In this paper, we shall examine these aspects and, in general, Bredikhin's relationship with the Society.

Received 01.08.2022. Accepted 01.10.2022.

Keywords: early solar physics, history of astronomy

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.012

1. Introduction

The phenomenon of the light dispersion through a glass prism was well-known in the 17th century and especially studied by Isaac Newton (1643–1727), who called "spectrum" the colors produced by dispersed light. More than two hundred years later, in 1802, physicist William Wollaston (1766–1828), for the first time observed a few dark lines in the solar spectrum, but did not pay attention to this phenomenon, which he simply interpreted as lines of separation of the different spectrum colors¹.

Who first accurately studied the spectral lines was optician Joseph von Fraunhofer (1787–1826). In 1817 he described the lines observed in the solar spectrum and named the most visible ones with alphabetic letters. He understood that the dark lines were an intrinsic feature of sunlight but, of course, he lacked a theoretical apparatus for explaining and interpreting them. This was provided, about forty years later, by Gustav Kirchhoff (1824–1887) and his collaborators, who formulated the radiation laws; it became clear that the dark lines were absorption lines revealing the presence of specific chemical elements in the solar atmosphere. Maps of the solar spectrum were produced in laboratory by Kirchhoff himself and perfectioned by other scientists².

For the first time, there was an instrument available for knowing the physical nature and the chemical composition of the celestial bodies: the spectroscope. Until then, astronomy was restricted to determining positions and orbits, and no additional knowledge was possible on stars, planets, comets and so on. The introduction of

¹On early spectroscopic observations, see [1].

 $^{^{2}}$ On early maps of the solar spectrum, see [2].

spectroscopy and photography in the astronomical field led to the development of a new astronomy, so-called astrophysics³.

In the decade 1860–1870, astronomical spectroscopy provided important scientific results, including spectral classification of stars, nebulae composition, cometary spectra, and many discoveries regarding solar physics⁴.



Figure 1: Cover page of the first volume of the *Memorie* (1872); courtesy of INAF-Palermo Astronomical Observatory Library, Historical Section.

2. The Italian Spectroscopic Society

In Italy, some astronomers decided to share a programme of solar spectroscopic observations for monitoring the sun, trying to find correlations between photospheric (sunspots, faculae) and chromospheric features (prominences). The idea was first proposed by Jesuit father Angelo Secchi $(1818-1878)^5$, a pioneer of astrophysics, who worked in Rome at the Collegio Romano Observatory. He started a collaboration with his colleague astronomer Pietro Tacchini $(1838-1905)^6$, who worked at the Palermo Observatory. Both astronomers possessed almost identical Merz equatorial telescopes and, in summer 1871, carried out simultaneous spectroscopic observations of solar prominences and compared their results.

Secchi proposed to Tacchini to invite other Italian astronomers to join them in this kind of observations. Giuseppe Lorenzoni (1843–1914) from Padua was soon involved in this research programme: his Merz refractor was smaller than those in Rome and Palermo, so that comparisons could be also made with instruments having different sizes.

In October 1871 they established the Italian Spectroscopic Society, together with other colleagues from Rome, and Naples Observatories, namely Lorenzo Respighi (1824–1889) and Arminio Nobile (1838–1897)⁷.

Its scientific programme included: monitoring (and drawing) of solar prominences; morphology of prominences, sunspots, etc.; spectroscopic studies about their chemical composition; correlation of solar activity with polar aurorae and geomagnetic perturbations.

³On the origins of astrophysics, see "The New Astronomy" by A. J. Meadows in [3].

⁴On the development of solar physics, see [4, 5].

⁵On Secchi's life and scientific activity, see [6].

 $^{^6 \}mathrm{On}$ Pietro Tacchini and his studies, see [7].

 $^{^{7}}$ For different reasons, however, Respighi and Nobile never started an effective collaboration with the other members; on the establishment of Society, see [8].
Tacchini, President of the Society, was also Editor of the *Memorie della Società degli Spettroscopisti Italiani* (fig. 1), published from 1872, which are today considered the first astrophysical journal. In the incipit of the first volume we read:

The spectroscope is undoubtedly the only instrument capable to extend our scientific knowledge with new discoveries about the physical constitution of the $Sun.^8$

This statement is a sort of manifesto of the Society and clearly shows its original aim: to improve the knowledge about the Sun through a programme of spectroscopic observations. The *Memorie* soon became an appreciated international journal, awarded at the Universal Exhibition held in Vienna in 1873.

The Society drew the attention of other spectroscopists abroad, who started a correspondence, especially with its President, Tacchini. He played an important international role in gathering those scientists who shared the same interests, creating an appropriate community for exchanging the results of their spectroscopic observations and providing a journal — the *Memorie* — for the circulation of their works.

3. Bredikhin and the Italian Spectroscopists

Theodor Bredikhin (1831–1904), in Russia, was one of the first foreign members of the Society and one of the most active. In Rome, there are 11 letters by Bredikhin to Tacchini which are preserved in the archives of the ex-Collegio Romano Observatory [10] (now a research institution for climatology, see below) and 7 letters in the archives of the Rome Astronomical Observatory [11], p. 93, 189, 228. A few letters contain drawings or scientific manuscripts annexed. Moreover, an undated letter (but datable 1876) from Bredikhin to Secchi is preserved in the archives of the Gregorian University in Rome [12]. Most of the letters by Bredikhin are in Italian, a language that he knew well. The correspondence was certainly wider but other letters, which are mentioned in these letters or in some publications, seem to have been definitely lost. Below is the list of Bredikhin's letters kept in Roman archives (APUG = Archivio della Pontificia Università Gregoriana; CREA-CMA = Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria — Unità di ricerca per la climatologia e la meteorologia applicate all'agricoltura; INAF-OAR = Istituto Nazionale di Astrofisica — Osservatorio Astronomico di Roma, located in Monte Porzio Catone, near Rome; + ms = manuscript annexed; + d = with drawings).

Recipient	Place	Date	Archive
To Tacchini	Moscow	1873, Sept. 6	CREA-CMA
To Tacchini	-	1873, Nov. 11	CREA-CMA
To Tacchini	-	1873, Dec. 12	INAF-OAR
To Tacchini	-	1874, Jan. 18	INAF-OAR
To Tacchini	-	1874, Feb. 7	INAF-OAR
To Tacchini	-	1874, Jul. $14 + d$	CREA-CMA
To Tacchini	-	1874, Jul. $21 + d$	INAF-OAR
To Tacchini	-	1876, Feb. 14	INAF-OAR
To Tacchini	-	1876, Mar. 14	CREA-CMA
To Secchi	-	[1876], Sept. 29	APUG
To Tacchini	-	1879, Oct. 25	CREA-CMA
To Tacchini	-	1881, Dec. $30 + ms$	INAF-OAR
To Tacchini	-	1883, Mar. 14	CREA-CMA
To Tacchini	-	1883, Apr. 15	INAF-OAR
To Tacchini	Kineshma	1883, Jul. 26	CREA-CMA
To Tacchini	-	1883, Aug. 3	CREA-CMA
To Tacchini	Moscow	1883, Dec. $24 + ms$	CREA-CMA
To Tacchini	Pogost	1884, Jul. 29	CREA-CMA
To Tacchini	St. Petersburg	1897, May 8	CREA-CMA

The letters by Tacchini and Secchi to Bredikhin (if any has survived) are presently missing and should be searched in Russian archives; anyway, the content of their letters can be deduced by Bredikhin's replies. In addition to the letters, there are 17 publications (two are letters to Tacchini) by Bredikhin in the *Memorie* of the Society [13]; they are mostly in French and generally deal with solar spectroscopic observations or comets, his favourite topic. These publications often contained comments by Tacchini and comparisons with the observations carried out in Italy. Below is the list of Bredikhin's publications in the *Memorie* (titles in original languages, English translation in brackets):

 $^{^{8}}$ Lo spettroscopio è senza dubbio il solo istrumento capace di arricchire la scienza di nuove scoperte sulla fisica costituzione del nostro sole [9].

Vol. II	1873	"Osservazioni spettroscopiche del Sole fatte nell'estate 1872"
-	_	(Solar spectroscopic observations made in summer 1872)
Vol. III	1874	"Osservazioni spettroscopiche del Sole fatte nell'estate ed autunno del 1873"
-	_	(Solar spectroscopic observations made in summer and autumn 1873)
Vol. III	1874	"Spettro della Cometa Coggia (lettera)" (Spectrum of Comet Coggia [letter])
Vol. III, App.	1874	"Fenomeni osservati nella Cometa Coggia (lettera)"
-	-	(Phenomena observed in Comet Coggia [letter])
Vol. IV	1875	"Osservazioni spettroscopiche del Sole fatte nel 1874 alla Specola di Mosca"
-	_	(Solar spectroscopic observations made in 1874 at Moscow Observatory)
Vol. IV	1875	"Spectre des nebuleuses" (Spectra of nebulae)
Vol. V	1876	"Osservazioni spettroscopiche del Sole fatte nel 1875 alla Specola di Mosca"
-	_	(Solar spectroscopic observations made in 1875 at Moscow Observatory)
Vol. V, App.	1876	"Sur la queue normale de la Comète 1862 II" On the normal tail of Comet 1862 II)
Vol. X	1881	"Sur la comète de 1825 IV" (On comet 1825 IV)
Vol. X	1881	"Sur la queue des comètes b et c 1881" (On the tails of comets b et c 1881)
Vol. XII	1883	"Sur la grande comète de 1882" (On the great comet of 1882)
Vol. XII	1883	"Recherches sur la grande comète de 1882, II" (Studies on the great comet of 1882, II)
Vol. XII	1883	"Note sur la queue du I type de la comète 1882, II" (Note on the type-I tail of comet 1882, II)
Vol. XII	1883	"Les ondes cosmiques dans la comète 1882, II" (On the cosmic waves in comet 1882, II)
Vol. XII	1883	"Sur quelques anomalies apparentes dans la structure des queues cométaires"
-	-	(On some apparent anomalies in the structure of cometary tails)
Vol. XIII	1884	"Les syndynames et les synchrones de la comète Pons-Brooks (1883–1884) (avec une planche)"
-	-	(Syndynames et synchrones of comet Pons-Brooks (1883–1884) (with a plate)
Vol. XXXI	1902	"Sur le rôle de Jupiter dans la formation des radiants composés"
-	-	(On the role of Jupiter in the formation of composite radiants)

All papers are interesting and show that Bredikhin was up-to-date with the astrophysical questions that were debated in those years, as well as with instruments and publications, and actively contributed to the international discussion on these topics.

4. Bredikhin's solar studies and the correspondence with Tacchini

Bredikhin was basically a volunteer member of the Society, from its establishment. He started his solar spectroscopic observations in summer 1872, in a property at Kineshma, near the Volga river. At that time, he was working at the astronomical observatory of the University of Moscow (fig. 2), and became director of this observatory one year later, in 1873. He published his first results in the Bulletin of the Imperial Society of Naturalists of Moscow, which he was member of. Bredikhin described the instruments he used (fig. 3) — namely a Merz⁹ equatorial telescope and a direct vision spectroscope, also by Merz — and explained the method he adopted. It consisted in observing solar prominences, measuring their position and height with a micrometer, and drawing them (fig. 4); to draft sunspots and mark their positions; in the evening, to check the appearance of polar aurorae. The Russian astronomer hence explicitly stated to have adopted the same programme of the Italian Spectroscopic Society:

From what I have just said, you see that, as far as my instrumentation allows, I've tried to follow the rules of the programme adopted by the Italian Spectroscopic Society.¹⁰

Bredikhin probably sent his observations to Secchi and Tacchini; the Jesuit was happy that the Russian astronomer confirmed his results on sunspots activity and solar prominences. Bredikhin too, in fact, considered that sunspots had two phases — quiet and active (the latter showing metallic eruptions) and proposed a classification of the solar prominences into two classes (hydrogenic — also containing helium — and metallic, depending on their chemical composition)¹¹. Secchi wrote to Tacchini:

I have received a writing by a certain Bredikhin from Moscow [...] he confirms our ideas and I see that there is advancement.¹²

For his part, Tacchini compared their drawings of solar prominences with those made by Bredikhin in the very same days of 1872 and decided to publish an excerpt of Bredikhin's work in the *Memorie*:

I have read the paper by Bredikhin, I have compared his drawings with ours and they fit very well: I will publish an excerpt in the Memorie.¹³

⁹On Merz, see note 21, [14].

 $^{^{10}}$ On voit d'après tout ce que je viens de dire, que je tâchais, en tant qu'il m'était permis par mes moyens instrumentaux, d'avoir pour norme le programme adopté par la Société des Spectroscopistes italiens [15], p. 64.

¹¹Secchi's (and Tacchini's) classification of solar prominences was based on their morphology; of course, Bredikhin could not observe the prominences' details, as Tacchini and Secchi did, as his telescope was smaller than theirs — he hence used a spectral classification, which was however in agreement with their results. On Secchi's solar theories, see [18].

 $^{^{12}}$ Ho ricevuto uno scritto di certo Bredichin di Mosca in cui esso comprova le nostre idee e vedo che si fa progresso. (Secchi to Tacchini, 14 June 1873, in [19], p. 300).

¹³Ho letto l'articolo di Bredichin, ho confrontato le figure colle nostre e vanno molto bene: ne metteró un estratto nelle Memorie. (Tacchini to Secchi, 21 June 1873, in [19], p. 301).



Figure 2: The Observatory of Moscow University (from [16], plate facing p. III); source: Google Books).

Tacchini published Bredikhin's observations in the second volume of the *Memorie*, together with some interesting comments. Particularly, the comparison of Bredikhin's drawings of solar prominences with his own drawings as well as with those of Secchi and Lorenzoni (fig. 5) showed that the shape of the same prominences was perfectly comparable, especially in the observations by Bredikhin and Lorenzoni, who used instruments of similar sizes. Tacchini praised the work of the "diligent and dutiful" Russian astronomer and concluded that the general shape of each prominence was confirmed by this comparison. In September 1873, Tacchini wrote to Bredikhin an encouraging letter that the Russian astronomer enjoyed very much. In fact, he replied:

I am very grateful for your kindest letter [...]: these words of appreciation — that from Italy, so loved by me, reached me here, where few scientists are interested in the new and important branch of physical astronomy — really make me happy.¹⁴

This statement by Bredikhin confirms that, in Russia, astronomers who practiced spectral analysis met the same disinterest as almost everywhere. In general, traditional astronomers were skeptical about spectroscopic observations and kept the distance from them.

One of the main opponents to astronomical spectroscopy was Otto Wilhelm von Struve (1819–1905), influential director of Pulkovo Observatory, who still stated in 1886:

As yet, astrophysical investigations are far from the standard of scientific accuracy possessed by classical astronomy [...] God forbid that astronomy should be carried away by fascination with novelty and diverge from [its] essential basis, which has been sanctified for centuries...¹⁵

This kind of prejudice against astrophysics was quite widespread throughout Europe but, actually, it was soon overcome with the creation of new establishments. In the decade 1870–1880, astrophysical observatories — apart from astronomical observatories — were built in Meudon (France), Potsdam (Germany), South Kensington

¹⁴La Sua gentilissima del 3 sett[embre] mi riuscì molto grata: una parola d'approvazione, — che d'Italia, tanto amata da me, pervenne qui, ove pochissimi s'interessano del nuovo ed importante ramo d'astronomia fisica, — mi rende proprio felice. (Bredikhin to Tacchini, 6 Sept. 1873; CREA-CMA Archives, Rome.)

¹⁵Struve, 1886, quoted in Meadows (note 3, [3]), p. 61.



Figure 3: Page illustrating the instruments used by Bredikhin for his solar spectroscopic observations: a refractor telescope combined with a direct vision spectroscope, both made by Merz in Germany (from [17], p. 60).

(England), Catania (Italy). Inexorably, astrophysics was recognized as a new scientific discipline, apart from astronomy¹⁶.

Tacchini probably invited the Russian astronomer to continue to send his solar spectroscopic observations for publication in the *Memorie*, as Bredikhin wrote him:

I feel honoured from your kind invitation to send you my notes, I cannot be proud enough of it and I consider myself obliged to be, in my Eastern astronomical station, a servant of Your honorable society.¹⁷

Bredikhin intended to play an active role in the society and offered his collaboration; he wrote to Tacchini:

If you like to assign me any task, for instance, carrying out any simultaneous observation or other - all will be exactly done.¹⁸

In spirit of collaboration, Bredikhin sent reports on his solar spectroscopic observations from 1872 to 1875, and wide excerpts were published in the *Memorie*. The complete series of observations was published in the *Annals of the Observatory of Moscow* (fig. 6), whose publication was started by Bredikhin in 1874, once he became director of the University Observatory. He was by then in a condition to freely decide his work programme and to include solar studies.

In the same year 1874 the astronomical community was waiting for an important and infrequent phenomenon, the transit of Venus above the Sun. The observations of this phenomenon were crucial to obtain accurate determinations of the solar parallax and required to be made from many astronomical stations, as much as possible

¹⁶It is emblematic what French astronomer Hervé Faye (1814–1902) wrote in 1874 about the creation of a new observatory for astrophysical studies:... this new branch of the old astronomy has a completely anew distinctive character. Here, Geometry and Mechanics are replaced by Physics and Chemistry. [...] This new branch has taken root and is developing very quickly. For us, old-fashioned astronomers, it is very difficult to recognize, for its ideas, its methods, its goals, and even the spirit which reigns, are very different from ours. [...] It is the case of applying an important law [...] that of division of work. [...] The two sciences [physical astronomy and classical astronomy] will develop in parallel, without getting in each other's way, but using different aptitudes. (Faye, 1874, quoted in Chinnici (note 5, [6]), p. 4); on this topic, see also note 3.

¹⁷ Il Suo gentile invito d'inviarle le mie note mi fa onore, di cui non posso abbastanza vantarmi e mi reputo obbligato d'essere sul mio posto astronomico tanto orientale un servitore fido della Vostra società onoratissima. (Bredikhin to Tacchini, 6 Sept. 1873; CREA-CMA Archives, Rome.)

 $^{^{18}}$ Se ella crederà opportuno di darmi qualche carica, per esempio da fare qualche osservazione simultanea, od altro, — tutto sarà eseguito esattamente. (Bredikhin to Tacchini, *ibid.*)

Figure 4: Drawings of solar prominences observed by Bredikhin in 1872 (from [17], pl. A).

distant among them. All the most advanced nations of that time organized official scientific expeditions. Bredikhin was involved in one of the Russian expeditions and, in December 1873, wrote to Tacchini inviting him (or other Italian spectroscopists) to join an expedition to Egypt, which was planned by the Moscow Society of Amateurs of Natural Sciences. They also offered a grant of 1,000 roubles, on the only condition to have the exclusive about the first communication of the observations. Tacchini, however, declined the generous invitation, explaining that he was organizing an Italian expedition for making spectroscopic observations of the transit¹⁹ — an initiative that Bredikhin appreciated:

I am very glad [to learn] that the Italian expedition has been organized, at last. It is well understandable that you are obliged to decline [our invitation].²⁰

In July 1874, he wrote to Tacchini that he too intended to make spectroscopic observations of the phenomenon. It is unclear if he changed his mind at Tacchini's suggestion. Anyway, bad weather prevented the observation of the phenomenon almost everywhere.

In the meantime, Bredikhin had tried to extend his spectroscopic observations — until then being basically solar observations — to other celestial objects. In January 1874, he announced to have attempted to observe star spectra, without success:

I have tried to observe the spectra of the fixed stars with our large refractor (10.5 English inches), but unsuccessfully until now; I have already complained about it to my friend Merz.²¹

He did not explain the reasons of his failure, but probably abandoned this kind of studies, due to this disappointment. This aspect would deserve further investigations.

In July of the same year, Bredikhin communicated to Tacchini his successful spectroscopic observations of the comet Coggia, and sent a drawing of the comet. One week later, he described a phenomenon that he interpreted as a detachment of matter from the nucleus of the comet, and sent another drawing. Tacchini published both letters in the *Memorie* (see list in section 3, here) as requested by Bredikhin, together with a reproduction of the second drawing. As usual, the complete series of drawings was instead published by Bredikhin in the Annals of the Observatory of Moscow (fig. 7).

¹⁹On the Italian expedition for the transit of Venus, see [22].

²⁰ Sono contentissimo, che la spedizione italiana si è finalmente organizzata. Si capisce benone, che voi siete obbligato di darci la risposta negativa. (Bredikhin to Tacchini, 18 Jan 1874, INAF-OAR)

²¹ Provai d'osservare i spettri delle stelle fisse col nostro gran rifrattore (10.5 poll[ici] Ingl[esi]), ma questo non mi riesce finora; ne feci già un rimprovero al mio amico Merz. (Bredikhin to Tacchini, 18 Jan 1874, INAF-OAR.) Sigmund Merz (1824–1908) was a well-known maker of optical instruments (especially refractors and spectroscopes) in Munich; see "The Merz Company: A Global Player of 19th century" by G. Wolfschmidt and J. Kost in [14], pp. 19–38.



Figure 5: Plate showing the comparison of solar prominences observed in 1872 by Bredikhin and the Italian spectroscopists; the drawings marked with "B", "T", "S", and "L" are respectively made by Bredikhin, Tacchini, Secchi and Lorenzoni (from [20], pl. XXVI; courtesy of INAF-Palermo Astronomical Observatory Library, Historical Section).

In the years, Bredikhin and Tacchini established a friendly relationship, with expressions of mutual cordiality. They exchanged their photographic portraits²² and Tacchini described Bredikhin as "a dear person" in a letter to Secchi²³. It is still unclear if they ever met in person, but it is highly possible that this happened on the occasion of Bredikhin's visit to Italy, announced in a letter to Tacchini dated 1884²⁴.

6. From solar observations to cometary studies

In 1873 Tacchini had suggested to Bredikhin to use the same scale of the Italian Spectroscopic Society for making his drawings of the solar limb, in order to render easier their comparison. However, for Bredikhin, copying his drawings in another scale would have implied a more time-consuming work and, in spite of his sincere desire to collaborate with the Society, he could not continue this demanding work, because of his many duties: "I have been very busy during all last months of the past year. Moreover, I am not only the director of the observatory, but also professor, dean of the mathematics faculty and so on"²⁵ he wrote to Tacchini, apologizing for the delay in sending the drawings.

Actually, after 1875, there is no mention of Bredikhin's solar observations in the *Memorie*, though they were continued at least in the following two years [24, 25]. In the meantime, Bredikhin considered that statistical studies on sunspots and other solar features were facilitated by replacing visual observations with photographs. He

²²See Bredikhin to Tacchini, 18 Jan 1874, INAF-OAR.

 $^{^{23}\}mathrm{See}$ Tacchini to Secchi, 28 Mar 1876, in [19], p. 413.

²⁴See Bredikhin to Tacchini, 29 July 1884, CREA-CMA.

²⁵... [sono stato] affaccendato tutti gli ultimi mesi dell'anno scorso. Debbo aggiungere ancora, ch'io non sono solamente il direttore della specola, ma professore, decano della facoltà matematica e via discorrendo. (Bredikhin to Tacchini, 14 Feb 1876, INAF-OAR.)



Figure 6: Drawings of solar limb observed by Bredikhin in 1875 (from [21], pl. A; source: Google Books).

therefore wanted a programme of photoheliographic observations, which was entrusted in 1876 to Witold Ceraski (1849–1925) [26] and then continued by Aristarkh Belopolsky $(1854–1934)^{26}$.

Tacchini was not the only member of the Society who was in correspondence with Bredikhin. Father Secchi was too, even if to a lesser extent. In the archives of the Gregorian University, there is a letter by Bredikhin to Secchi, in which the Russian astronomer mentions to have received a letter from Secchi. The content of the letter probably regarded Secchi's cometary studies, as we may infer from what he wrote:

I regret that my memoir on the tail of comet 1862 II is now in press and I cannot enrich it with your beautiful observations [...] Your drawings and measurements of the [comet's] jets are extremely important and appropriate to shed light on the motions of the matter ejected from the nucleus. Next winter I intend to make special investigations on this subject, whose results will form a huge supplement to my memoir. Since I intend to make calculations, little by little, on all comet tails, I beg you to send me your valuable observations which are printed in Italian...²⁷

The letter is datable 1876, because Bredikhin mentions the visit of Emperor of Brazil, Pedro II (1825–1891), to his Observatory, which took place in that year. By then, Bredikhin's investigations mainly regarded cometary studies. Secchi was an expert observer of comets²⁸, and Bredikhin was of course interested in his works.

At present, no other letter by Bredikhin to Secchi has been found; their correspondence was probably sporadic and obviously interrupted by the death of the Jesuit astronomer in February 1878. However, it is remarkable that Secchi mentions Bredikhin's solar observations in his famous book [18] (vol. 2, pp. 128 and 158), one of the most important treatises of solar physics of that time.

 $^{^{26}}$ See [27]. Both Ceraski and Belopolsky also published papers in the *Memorie* of the Italian Spectroscopic Society; they can be considered pioneers of astronomical photography in Russia.

²⁷ Mi rincresce che la mia memoria sulla coda della cometa del 1862 II adesso si trova già sotto torchi e ch'io non posso per conseguenza adornarla colle vostre bellissime osservazioni. [...] I vostri disegni e misure dei zampilli sono altamente importanti e propri a darci lume sui movimenti della materia emessa dal nucleo. Questo inverno io mi propongo di farne uno studio particolare, i cui risultati formeranno un supplemento assai grave alla mia memoria. Avendo io l'intenzione di sottomettere al calcolo poco a poco tutte le code delle comete, [...] mi rivolgo a voi colla preghiera d'inviarmi le vostre preziose osservazioni, che sono stampate in italiano ... (Bredikhin to Secchi, 29 Sept (1876), APUG).

 $^{^{28} {\}rm See}$ [6], pp. 67–69; 164–165.



Figure 7: Visual and spectroscopic observations of comet Coggia by Bredikhin in 1874 (from [23], pp. 80–93, plate unnumbered; source: Google Books).

7. Final issues

After the death of Secchi, the scientific programme of the society was definitely compromised and solar observations were slowly abandoned. Tacchini left Palermo for Rome, to replace Secchi as director of the Collegio Romano Observatory in 1879, and his duties as Director prevented him to carry out regular solar observations, as in the original intentions of the Society.

From 1880 on, Bredikhin only sent articles on comets, that had become his main research topic, and they were published in the *Memorie* (see list in section 3, here)²⁹. After his move to Pulkovo Observatory in St. Petersburg, in about 1892, he still was in correspondence with Tacchini (fig. 8), even if less frequently.

In 1890, an official list of members of the Italian Spectroscopic Society was published for the first time, and we find the name of Bredikhin, together with those of the main astrophysicists of his time. He was member of the Society until his death: the last publication by Bredikhin in the *Memorie*, dated 1902, regarded meteor showers.

Tacchini died in 1905, one year after Bredikhin, quite deceived from the trend of the Italian astronomy, which was coming back to traditional astronomical studies, basically abandoning spectroscopic research. The golden age of the Italian Spectroscopic Society was slowly fading away³⁰.

At the beginning of the 20th century, Italy (and Europe) had definitely lost their leadership in the astrophysical research, which developed fast in the United States, thanks also to many private investments.

8. Concluding remarks

Theodor Bredikhin was among the protagonists of the rise of astrophysics in Europe and contributed to build a network of open-minded astronomers who understood the importance of using spectroscopic means to enlarge the horizons of the astronomical research.

His connection with the Italian Spectroscopic Society encouraged him to carry out spectroscopic observations and allowed him to have international exchanges in this field, in spite of the general disinterest or, even more, opposition, from a large part of the traditional astronomical community.

 $^{^{29}}$ As a whole, in the years 1874–1888, more than forty articles on cometary spectra were published by many authors (Bredikhin was one of them) in the *Memorie*: the journal of the Society, therefore, largely contributed to the development and circulation of cometary theories.

 $^{^{30}}$ As a consequence of this inner crisis and the post-war effort of restarting anew, in 1920, the Society decided to renew itself and to change his name into Italian Astronomical Society, a name that still preserves today.

St. Petersbourg, 1897, 8 mail. Morficur et cher Collègue, Je vous prie beaucoup D'avoz l'obligeance de ne Alus assidiers à Moscou les, Memorie vella Inciela que vous aviez en l'amabilite de m'envoyer toujoury mail se les adresser ainsi: Russia, Odessa. Parco Alessandro, Osservatorio All'Academico Th. Bredichim. Veuillez agreer, cher Collègne, l'expression collème, l'étérisi-ce ma parfaite consi-résation. T. Brédichim

Figure 8: Letter by Bredichin to Tacchini, dated 1897; courtesy of CREA-CMA (source: project TROMOS-INGV).

For his early spectroscopic studies, Bredikhin can be rightfully considered the founder of Russian astrophysics; his scientific heritage was taken over by Bernhard Hasselberg (1848–1922), in St. Petersburg, and Belopolski (previously mentioned), in Moscow.

Definitely, he can be numbered among those far-sighted astronomers that, with other members of the Italian Spectroscopic Society, paved the way to modern astrophysical research.

References

- 1. J. B. Hearnshaw, The Analysis of Starlight: Two Centuries of Astronomical Spectroscopy (2014).
- 2. K. Hentschel, Mapping the Spectrum: Techniques of Visual Representation in Research and Teaching (2002), URL https://books.google.ru/books?id=WceRw3sr-rQC.
- 3. O. Gingerich, ed., The General History of Astronomy, volume 4 (1984).
- 4. A. J. Meadows, Early solar physics (1970).
- 5. K. Hufbauer, Exploring the sun: solar science since Galileo (1991).
- I. Chinnici, Decoding the Stars: A Biography of Angelo Secchi, Jesuit and Scientist, Jesuit studies (2019), URL https://books.google.ru/books?id=A6jbugEACAAJ.
- 7. I. Chinnici, Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 9, 28, 2006.
- 8. I. Chinnici, Annals of Science, 65, 393, 2008.
- 9. P. Tacchini, Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi, I, 1, 1872.
- 10. I. Chinnici, Quaderni P.RI.ST.EM., 7, 22, 1994.
- 11. M. Grossi, S. Trani, and F. Perrotta, L'Osservatorio Astronomico di Roma Inventario (2016).
- 12. I. Chinnici and W. Gramatowski, Nuncius, 16, 571, 2001.
- 13. A. Riccó, ed., Memorie della Societa degli Spettroscopisti Italiani. Indice Generale 1872-1911 (1912).
- 14. I. Chinnici, Merz Telescopes; A global heritage worth preserving (2017).
- 15. T. Bredikhin, Bulletin de la Société Impériale des naturalistes de Moscou, 46, 59, 1873, URL www.biodiversitylibrary.org.
- 16. in Imprimerie de l'Universite Imperiale, I (1874), URL https://books.google.ru/books?id=yC42AQAAIAAJ.
- 17. in Moscou, Societe imperiale des naturalistes de Moscou, 1829-1917, **46** (1873), URL https://www.biodiversitylibrary.org/item/107118, https://www.biodiversitylibrary.org/bibliography/4951.
- 18. A. Secchi, Le Soleil, volume I-II (1875-1877).
- 19. I. Chinnici and A. Gasperini, Alle origini dell'astrofisica italiana: il carteggio Secchi-Tacchini 1861–1877 (2013).
- 20. T. Bredikhin, Memorie della Società degli Spettroscopisti Italiani, II, 1873.

- 21. T. Bredikhin, Annales de l'Observatoire de Moscou, II-2, 1, 1875.
- 22. L. Pigatto and V. Zanini, Journal of Astronomical History and Heritage, 4, 43, 2001.
- 23. T. Bredikhin, Annales de l'Observatoire de Moscou, II-1, 80, 1875.
- 24. T. Bredikhin, Annales de l'Observatoire de Moscou, III-1, 110, 1877, URL https://books.google.ru/books? id=yC42AQAAIAAJ.
- 25. T. Bredikhin, Annales de l'Observatoire de Moscou, IV-2, 89, 1878, URL https://books.google.ru/books? id=PS82AQAAIAAJ.
- 26. W. Ceraski, Annales de l'Observatoire de Moscou, II-2, 51, 1876.
- 27. A. Belopolsky, Annales de l'Observatoire de Moscou, IV-2, 102, 1878.

Итальянская научная экспедиция в Россию $(1887)^1$

Чинничи И.

Национальный институт астрофизики, Палермская астрономическая обсерватория, Палермо, Италия

Полоса полной фазы солнечного затмения 19 августа 1887 г. проходила по территории России. Каждый раз в район полосы полной фазы выезжают многочисленные экспедиции с большими сложными инструментами. Затрачивается много сил и средств для того, чтобы в течение нескольких минут иметь возможность наблюдать полное солнечное затмение. Детальное изучение атмосферы и короны Солнца в XIX веке возможно было только во время полного затмения. Коронограф, позволяющий проводить такие исследования вне фазы затмения был изобретен только в начале XX века. В 1887 г. для наблюдения за этим феноменом было организовано множество международных научных экспедиций. Итальянский астроном Пьетро Таккини (1838–1905), директор обсерватории Коллегио Романо в Риме, обратился к национальному правительству с просьбой профинансировать небольшую научную экспедицию в Россию, которая и была поддержана. Статья посвящена описанию этой экспедиции.

Поступила в редакцию 01.08.2021 г. Принята в печать 01.10.2021 г.

Ключевые слова: ранняя солнечная физика, история астрономии

An Italian scientific expedition to Russia (1887)

Chinnici I.

INAF-Osservatorio Astronomico di Palermo, Palermo, Italy

The zone of the total phase of the solar eclipse of August 19, 1887 passed through the territory of Russia. Every time numerous expeditions with large complex instruments go to the area of the full phase zone. It takes a lot of effort and money to be able to observe a total solar eclipse for a few minutes. A detailed study of the atmosphere and the corona of the Sun in the XIX century was possible only during a total eclipse. The coronograph, which allows such studies to be carried out outside the eclipse phase, was invented only at the beginning of the XX century. In 1887, many international scientific expeditions were organized to observe this phenomenon. Italian astronomer Pietro Tacchini (1838–1905), director of the Collegio Romano Observatory in Rome, appealed to the national government with a request to finance a small scientific expedition to Russia, which was supported. The article is devoted to the description of this expedition.

Received 01.08.2022. Accepted 01.10.2022.

Keywords: early solar physics, history of astronomy

DOI: 10.51194/INASAN.2022.7.2.013

A total eclipse of the Sun occurred on August 19th, 1887 and it was visible from Russia. Many international scientific expeditions were organized to observe the phenomenon. The importance of observing the eclipses was mainly due to the opportunity to observe the solar corona, a feature which could be observed only when the sun is eclipsed until the coronograph was invented at the beginnings of the XXth century.

The study of the corona was very puzzling for the astronomers of that time because of the discrepancies in the results of both the spectroscopic and polariscopic observations. In 1869, during a total eclipse, a bright emission line was observed in the spectrum of the corona. It opened a long debate on its position and, as a consequence, on its identification, a debate which was still active in 1887. Moreover, the measurements of the polarization of the coronal light seemed to reveale the presence of reflected light, a result which was clearly in opposition to the spectroscopic observations.

The Italian astronomer Pietro Tacchini (1838–1905) asked to the national Government to finance a little scientific expedition in Russia. The financial situation of the Kingdom of Italy was not very flourishing and the Minister gave the permission to send only two scientists.

At that time Tacchini was Director of the Collegio Romano Observatory in Rome; he was an eminent personality, very renowned over the international community thanks to his studies in solar physics, carried out since 1865 when he was astronomer at the Palermo Observatory. He was also the co-founder, with Angelo Secchi (1818– 1878), of the Società degli Spettroscopisti Italiani, the first international scientific society especially devoted to astrophysics and the editor of the Memorie, the official journal of the society which can be considered as the first astrophysical journal.

Tacchini chose as fellow traveller his friend Annibale Riccò (1844–1919). Riccò was, at that time, astronomer at the Palermo Observatory; there, he has taken the place of Tacchini and shared with him the same interests in the solar spectroscopic research.

 $^{^{1}}$ Статья основана на материалах, представленных на VII Бредихинских чтениях/This paper is based on a talk presented at VII Bredikhin conference.

The President of the Russian Society of Physics and Chemistry in St. Petersburg, Nikolaj Grigorievitch Egoroff (1849–1919) was informed of the intention of the Italian Government to send Tacchini and Riccò in Russia; he contacted Tacchini to give him information and placed a translator at the Italians' disposal.

Tacchini intended to reach one of the most oriental stations; Egoroff indicated a place near the Urals as the most appropriate for observations; in fact, it was located at the intersection between the path of totality and the river Viatka and, according to the russian meteorologists, it presented the greatest probability to have good weather in the period of the eclipse.

Prof. G. Kleiber, member of the Society, was charged by Egoroff to accompany the little Italian scientific expedition.

A month before the date of the eclipse, Tacchini and Riccò left Italy. They travelled to Vienna, where they visited the Observatory, then to Warsaw, where they visited the University and the Observatory. A week after the departure from Italy they reached St. Petersburg, where they stayed three days, just the time to visit the University and other scientific establishments, such as the Pawlowsk Magnetic Institute and the Poulkova Observatory, directed respectively by Heinrich von Wild (1833–1902) and Otto W. Struve (1819–1905). As it will be expected, at Poulkova, the Italian astronomers were strongly impressed by the great 86 cm refractor. At that time, the greatest refractor in Italy was the 50 cm telescope by Merz at the Milan Observatory, bought in 1878 and installed in 1886, which appeared as a minor instrument in front of the giant telescopes constructed in that period in the rest of Europe and in the United States. At the Poulkova Observatory, Tacchini and Riccò met Klaus Bernhard Hasselberg (1848–1922), an active member of the Società degli Spettroscopisti and visited the spectroscopical and photographical laboratory which Struve wanted to be built for him. Struve and Hasselberg made a present of some photographs on glass and paper to Tacchini and Riccò; these photographs were later given by Tacchini to the Museo Astronomico Copernicano, which was annexed to the Collegio Romano Observatory and which he directed at the same time.

On August, 1st the little expedition left St. Petersburg and, three days after, they arrived in Nijny Novgorod, at the terminal of the railway. Two days later they shipped on a steamboat and sailed the Volga and the Kama; they had to wait two days for another steamboat to sail up the river Viatka and, the day after, they arrived in a little station, Miedvietka, where they met another scientific expedition coming from Kazan and consisting of the Director of the Kazan Observatory, prof. Dubiago, an astronomer, Parietski and two more persons. They were directed to the north of the path of totality, to Mediany, near the town of Viatka; three other members have gone on the south, to Tsepotkino.

The Italian expedition sailed up the Viatka with a smaller steamboat and arrived on August 11th to the little village of Surwiskaja. They were welcomed by the local authorities, quartered in the public school and handled with all kindness.

The first work to do was the construction of three wooden buildings for the instruments on a hill nearby. The instruments carried by Tacchini and Riccò were two little equatorial telescopes; the first one belonged to the Collegio Romano Observatory and was a legacy of the private Italian astronomer Ercole Dembowski; the second one was lent by prof. Giuseppe Lorenzoni of the Padua Observatory. Both instruments were equipped with finders for the direct visual observations.

For the spectroscopic observations, prof. Riccò had designed a kind of spectroscope which he called a "recording spetroscope" (spettroscopio registratore); it was made by the French maker Duboscq and payed with the funds of the Società degli Spettroscopisti Italiani. The novelty in the design of this spectroscope is a simple device for recording the position of the spectral lines. In fact, the second prism could rotate through an axis which is connected to a lever by a cog-wheel; by moving the lever, the prism rotates and it is possible to adjust the instrument in such a way that a spectral line falls exactly on the intersection of the cross-wires. By pushing the button put on the lever, the position of the line was registered on a strip of paper, and repeating the registration with known lines, a comparison could be made among their positions.

It is obvious that this system is fast but not very accurate — photographic means permitted to obtain more exact results; this is probably the reason for which this device was never applied to the standard spectroscopes. Another spectroscope, direct-vision type, made by Duboscq, was used by Tacchini. This instrument is probably kept today at the Institute of Physics of the Rome University.

The main aim of the expedition was the observation of the "white prominences", a feature which Tacchini had observed on the occasion of an eclipse in 1882. Tacchini and Riccò would carried out spectroscopic observations while Kleiber had to execute polariscopic observations in both the directions of the solar axis and the solar equator. The instrument used by Kleiber was made in the physics laboratory of the St. Petersburg University and was a modification of the polarimeter used by A. Wright in 1878 (see Publications of the U. S. Naval Observatory).

Unfortunately, a week before the day of the eclipse, the weather changed and became cloudy and rainy. The instruments were set all the same and on the 14th everything was ready. In spite of a little improvement of the weather on the eve, the night before the 19th, it rained. The astronomers were at the stations at 5 a.m. but the sky was cloudy and rainy. A strong wind flapped the Italian and the Russian flags hoisted beside the camp. At

about 7 a.m. the sky cleared up and it was possible to observe the sun partially eclipsed. Suddenly the clouds covered the sun and the totality was completely lost; its beginning and its end were only revealed by a change in the intensity of the daylight. It is easy to imagine the great disappointment of the astronomers as well as of all the people gathered nearby the camp to observe the phenomenon.

Immediately after, the instruments were unset and boxed and, the day after, the little expedition sailed to Kokarka, where they met prof. Dubiago, whose expedition suffered the same fate. The Italians accepted the invitation to visit the Kazan Observatory and University on the return from Ekaterinenburg, beyond the Urals, where they intend to go to visit the magnetic station established by Wild on the Monte Calvo. Finally, they arrived in Nijny Novgorod on September, 2nd and they visited the laboratory of the photographer Karelin, who had been member of the expedition headed by the German astrophysicist H. C. Vogel (1842–1907) in Iuriewitz. This expedition too had not been successful. Karelin had obtained some photographs of solar prominences and presented Tacchini with a copy of them. During the visit to his laboratory, Karelin showed to Tacchini, Riccò and Kleiber a new chemical process to increase the sensitivity of the plates.

On September 4th, Tacchini, Riccó and Kleiber arrived in Moscow and visited the Observatory, where they were welcomed by prof. Ceraski. They stayed in Moscow four days, then they took Kleiber's leave: Kleiber left to St. Petersburg, Tacchini and Riccò left for Venise.

All scientific expeditions whose stations were located on the west of the Urals were unsuccessful because of bad weather conditions. On the contrary, the russian Handrikov, professor of astronomy at the Kiev University, who went beyond the Urals, on the mount Blagodat, to observe the eclipse was quite successful and he reported the results of his observations in a memoir. Handrikov had recorded five great prominences and a great red arc on the solar limb during the eclipse. Tacchini immediately contacted Handrikov to know the exact positions of the solar prominences in order to compare their positions with those observed the same day in Rome and Palermo by two assistants, respectively, Ciro Chistoni (1852–1927) and Antonio Mascari (1862–1906). He found a good agreement in the comparison of the results. These ones were compared also with some photographs obtained in Japan by the photographer Sugiyama, reproducing the inner corona and showing the same agreement.

A report of the scientific expedition to Russia was published by Tacchini in 1888 in a book collecting all the observations of eclipses made by Tacchini in his scientific career, "Eclissi totali di sole del 1870, 1882, 1886 e 1887", not containing therefore the observations of the transit of Venus on the Sun of 1874, which he had observed in India. Tacchini will observe another eclipse in 1900 in Algeria and that was the last one. He was preparing to leave for observing another eclipse when he died in 1905.

Содержание

Кохирова Г.И., Буриев А.М., Сафаров С.Н., Сатторзода А.А. Динамика и физические особенности	
потенциально опасного астероида 2009 хо по наолюдениям в гиссарской астрономической	100
обсерватории	106
Кузнецов С.Ю., Бусарев В.В. Статистический анализ основных физических и динамических пара-	
метров астероидов семейства Фемиды	115
Ляпсина Н.В., Карпов С.В., Бескин Г.М., Гутаев А.Г., Иванов Е.А. Статистика метеоров по ре-	
зультатам наблюдений на ММТ-9 и перспективы их исследований	119
<i>Чжао Х. и др.</i> Задачи и результаты астероидных исследований в проекте ИСОН	123
Маслов И.А., Николенко И.В. Поляриметр для наблюдения комет на телескопе Цейсс-1000	129
Петров Д.В., Жужулина Е.А. Влияние углеродосодержащего слоя поверхности реголита на све-	
торассеивающие свойства астероидов F-типа	132
Вениаминов С.С., Убоженко Д.Ю., Ремень Б.А. Метод определения параметров собственного вра-	
щения крупногабаритного космического объекта по амплитудно-частотным характеристикам	
отраженного радиолокационного сигнала	136
Савелова А.А., Бусарев В.В., Щербина М.П., Барабанов С.И. Использование «шаблонов» спек-	
тральных типов астероидов для уточнения минералогии этих тел и обнаружения признаков	
сублимационно-пылевой и солнечной активности	143
Токан М.И., Вениаминов С.С., Убоженко Д.Ю. Метод определения параметров собственного вра-	
щения крупногабаритного космического объекта по серии фотоизображений	149
Трушкова Е.А., Юрасов В.С. СУБД-центрический способ идентификации измерений	157
Абдусаматов Х.И. Мониторинг и исследование энергетического дисбаланса и климата Земли, а	
также астероидов и комет, сближающихся с Землей, экзопланет, новых и сверхновых звезд с	
поверхности Луны	163
Чинничи И Фелор Брелихин и Общество итальянских спектроскопистов	173
Чинничи И Итальянская научная экспетиния в Россию (1887)	185
	100

Contents

Kokhirova G.I., Buriev A.M., Safarov S.N., Sattorzoda A.A. Dynamics and physical peculiarities of a	
potentially hazardous asteroid 2009 XO from observations in the Gissar Astronomical Observatory	106
Kuznetsov S.Y., Busarev V.V. Statistical analysis of the main physical and dynamic parameters of as-	
teroids of the Themis family	115
Lyapsina N.V., Karpov S.V., Beskin G.M., Gutaev A.G., Ivanov E.A. Statistics of meteors based on the	
results of observations at the MMT-9 and meteor research prospects	119
Zhao H. et al. Tasks and results of asteroid research in the ISON project	123
Maslov I.A., Nikolenko I.V. Polarimeter for observing comets on the Zeiss-1000 telescope	129
Petrov D.V., Zhuzhulina E.A. Influence of the carbon-containing regolith surface layer on the light scat-	
tering properties of F-Type asteroids	132
Veniaminov S.S., Ubojenko D.Yu., Remen B.A. Molecular emission lines in prestellar cores	136
Savelova A.A., Busarev V.V., Shcherbina M.P., Barabanov S.I. Usage of "templates" of spectral types	
of asteroids for clarification of their mineralogy and detection of signs of sublimation, dust and solar	
activities	143
Tokan M.I., Veniaminov S.S., Ubozhenko D.Yu. Method for determining the parameters of the large	
space debris attitude rotation by photoimages series	149
Trushkova E.A., Yurasov V.S. DBMS-centric method for optical measurements identification	157
Abdussamatov H. I. Monitoring and research of the Earth's energy imbalance and climate, as well as	
near-Earth asteroids and comets, exoplanets, new and supernovae stars from the surface of the Moor	n163
Chinnici I. Theodor Bredikhin and the Italian Spectroscopic Society	173
Chinnici I. An Italian scientific expedition to Russia (1887)	185