

ISSN 2658-5669

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН

INASAN
SCIENCE
REPORTS

ТОМ
5
ВЫПУСК 2



МОСКВА
2020

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 ИССЛЕДОВАНИЯМ И ИССЛЕДОВАНИЯМ В ОБЛАСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ.



УДК 52
ББК 22.6
НЗ4

НЗ4 **Научные труды Института астрономии РАН. Том 5(2).** –
М.: Изд-во Янус-К, 2020, 44 с., илл.

ISSN 2658-5669

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.

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, 2020
© Коллектив авторов, 2020

INASAN Science Reports. Vol 5(2). М.: Janus-K, 2020, 44 pp.

ISSN 2658-5669

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

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, 2020
© Author team, 2020

Научное издание

**Научные труды
Института астрономии РАН.
Том 5 (2)**

Сдано в набор 05.06.2020. Подписано в печать 08.06.2020
Формат 60х90/16. Бумага офсетная
Уч.-изд. п.л. 5,5. Физ. п.л. 5,5. Тираж 100. Заказ №7557

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

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



Статистика падений метеоритов и болидов

Еретнова О.В., Дудоров А.Е.

Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Составлен каталог 938 падений метеоритов, зарегистрированных с 1860 по 2018 г. С помощью статистического анализа каталога показано, что распределение метеоритов по массам аппроксимируется логнормальным законом. Средний интервал между зарегистрированными падениями метеоритов, подобных метеориту Chelyabinsk, составляет ~ 25 лет. Автокорреляционным методом обнаружена 10–11-летняя периодичность у группы Н-хондритов, железных и железокаменных метеоритов с 1860 по 1960 г. Распределение болидов по годам позволяет предположить наличие 10–11-летней цикличности. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

The statistics of meteorite and bolide falls

Eretnova O.V., Dudorov A.E.

Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

A catalog of 938 meteorite falls registered from 1860 to 2018 is compiled. Using statistical analysis of the catalogue, it is shown that the mass distribution of the studied meteorites is described by a log-normal law. The average interval between registered falls of meteorites similar to Chelyabinsk one is equal to 25 years. The variation of the number of meteorite falls over years is investigated using the autocorrelation method. A 10–11-year periodicity for H-chondrites, iron and iron-stone meteorites is found over a period since 1860 to 1960. The distributions of bolides over years allows us to suggest a 10–11-year cycle. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.001

1. Введение

На поверхность Земли ежегодно выпадает несколько десятков тысяч тонн космического вещества [1]. Большую часть составляют пыль и метеороиды диаметром $d < 0.5$ м, сгорающие в атмосфере. Данные о зарегистрированных падениях метеоритов представлены на сайте Meteoritical Bulletin Database¹. Статистический анализ данных о падениях за большой промежуток времени позволяет выявить закономерности в распределении метеоритов по типам, массам, времени падения и оценить частоту падения космических тел различных размеров. Не все вошедшие в атмосферу метеороиды регистрируются как метеориты. В последние десятилетия появилась возможность регистрации болидов с помощью болидных сетей и инфразвуковых станций. Данные о болидах с 1995 г., энергия которых превышает 0.07 кт, приведены на сайте NASA².

2. Выборка метеоритов. Распределение метеоритов по массам

В работе использованы данные о 938 зарегистрированных падениях метеоритов с 1860 по 2018 г. (далее — падения метеоритов) из баз данных Meteoritical Bulletin Database и Лаборатории метеоритики Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН³. Из них 882 метеорита (около 94%) являются каменными, 45 — железными и 10 — железокаменными. Среди каменных метеоритов 85% относят к хондритам, $\sim 8\%$ — к ахондритам. Наиболее многочисленными среди хондритов являются группы L и Н-хондритов ($\sim 37\%$ и 33% , соответственно). Метеориты других групп хондритов (углистые, LL-хондриты, хондриты, не входящие в основные группы, с неопределенной группой) составляют $\sim 14\%$. Около 1% каменных метеоритов неклассифицировано.

Под массой метеорита будем понимать сумму масс найденных фрагментов, данные о которых известны. На рис. 1 приведена гистограмма распределения метеоритов по логарифму масс. Согласно рис. 1, наибольшее число метеоритов приходится на интервал $\lg M = 0.2–0.8$, что соответствует $M = (1.6–6.3)$ кг. Hughes [2] для каменных метеоритов, падения которых зарегистрированы с 1700 по 1975 г., нашел максимум в интервале $M = (2–4)$ кг. Дудоров и Еретнова [3] получили максимум в интервале $M = (2.5–4.0)$ кг на основе данных о падениях метеоритов с 1910 по 2013 г.

Построенную по наблюдательным данным гистограмму в интервале $\lg M = -1.8–2.6$ (в него попали 914 метеоритов) можно аппроксимировать логнормальным распределением [4]):

$$f(\lg M_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(\lg M_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

¹<https://www.lpi.usra.edu/meteor/>

²<https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>

³<http://www.meteorites.ru>

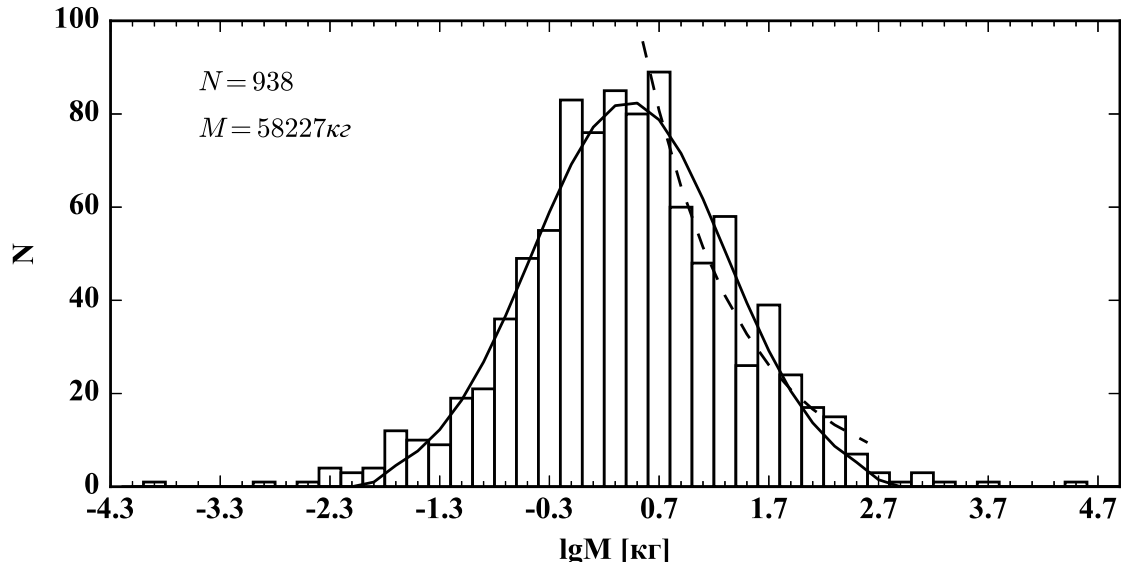


Рис. 1: Распределение по массам метеоритов, падения которых зарегистрированы с 1860 по 2018 г. Сплошная линия — аппроксимация гистограммы логнормальным распределением. Пунктирная линия — аппроксимация степенной функцией. N — число метеоритов, M — масса всех метеоритов.

где $f(\lg M_i)$ — функция масс, μ — логарифм наиболее вероятного значения массы, σ — среднеквадратичное отклонение от μ . Для нашей выборки $\mu = 0.43 \pm 0.06$, $\sigma = 0.88 \pm 0.01$, наиболее вероятное значение массы $M_B = 2.7$ кг. На рис. 1 аппроксимация гистограммы логнормальным законом изображена сплошной линией.

Метеориты образуются в результате дробления метеороидов, которые являются продуктами столкновительной эволюции и фрагментации астероидов. Распределение астероидов по массам является степенным [5, 6]. Число ударных кратеров на Луне убывает с ростом их диаметра по степенному закону [7]. Правую ветвь гистограммы в интервале $\lg M = 0.4 - 2.6$ можно аппроксимировать степенным законом $\lg N = (2.25 \pm 0.44) - (0.49 \pm 0.12) \lg M$ (пунктирная линия на рис. 1). Уменьшение числа регистрируемых падений метеоритов в области $\lg M < 0.4$ можно объяснить тем что:

- 1) метеороиды диаметром $d < 0.5$ м могут сгорать в атмосфере;
- 2) чем меньше масса метеорита, тем меньше вероятность его найти.

Логнормальный закон является наиболее подходящей аппроксимацией гистограммы распределения метеоритов по массам, построенной по наблюдательным данным.

3. Частота падений метеоритов, подобных Челябинскому

В табл. 1 приведены характеристики метеоритов, подобных Челябинскому. Для метеорита Chelyabinsk данные о начальной массе и размере метеороида получены на основе оценки энергии взрыва [8]. Для остальных метеоритов доатмосферную массу и размер оценим по известной найденной массе. Доатмосферная масса метеороида надежно определена только для 15 каменных метеоритов [8, 9, 10]. Для них доля суммарной массы найденных фрагментов, данные о которых известны, составляет $10^{-1} - 10^{-4}$ от массы метеороида. Взяв предельное значение 10^{-4} , найдем характерный размер метеороида как диаметр шара соответствующей массы и плотности ($\bar{\rho} = 3.2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ для каменных метеоритов⁴). С 1922 по 2018 г. зарегистрировано четыре падения метеоритов, подобных метеориту Chelyabinsk по типу и размерам. Следовательно, средний интервал между регистрациями падений подобных метеоритов на Землю, равен ~ 25 годам. Эта оценка близка к полученному Brown et al. [11].

4. Распределение числа падений метеоритов и болидов по годам

Дудоров и Еретнова [3] показали, что распределение числа падений метеоритов по годам неравномерное, некоторые максимумы числа падений метеоритов близки к минимумам солнечной активности. Исследуем распределение метеоритов по годам на наличие периодичности.

938 метеоритов разделены на три группы по содержанию железа в металлической фазе.

⁴<http://www.meteorites.ru>

Таблица 1: Падения метеоритов, подобных метеориту Chelyabinsk

Название, страна	Дата, тип	Найденная масса (т)	Масса метеороида (т)	Характерный размер
Tsarev Россия	06.12.1922 хондрит	1.125	11250	18.8
Norton County США	18.02.1948 ахондрит	1.080	10800	18.6
Kunya-Urgench Туркмения	20.06.1998 хондрит	1.100	11000	18.7
Chelyabinsk Россия	15.02.2013 хондрит	~1.000	12000–13000	18–20

1. Группа HIR. Н-хондриты, у которых самое большое среди каменных метеоритов содержание железа в металлической фазе (12–20%) [12], мы объединили их с железными (I) и железокосными (R) метеоритами. В эту группу вошло 367 метеоритов.
2. Группа L. Вторую большую группу (426 метеоритов) составили хондриты L и LL с содержанием железа от 5 до 12%.
3. Группа AC — ахондриты и углистые хондриты (116 метеоритов), у которых железа в металлической фазе $\lesssim 1\%$. Эту группу мы исключили из статистики, для нее среднее число падений в год $\lesssim 1$.

На рис. 2 пунктирными линиями изображены сглаженные кривые числа падений метеоритов, полученные методом скользящего среднего с интервалом усреднения 5 лет, и среднегодовые числа Вольфа⁵.

Для изучения периодичности в распределении метеоритов по годам использован автокорреляционный метод [13]. На рис. 3 приведены значения коэффициентов автокорреляции $r_{t,t-T}$ для метеоритов, упавших с 1860 по 1960 г., в зависимости от шага по времени T . Из рис. 3а следует наличие 10–11-летней периодичности у метеоритов группы HIR с $r_{t,t-T} = 0.3$. Алексеев [14] ранее находил аналогичную периодичность для Н-хондритов. У метеоритов группы L подобная периодичность отсутствует (рис. 3б), хотя распределение числа падений по годам является неравномерным (рис. 2б).

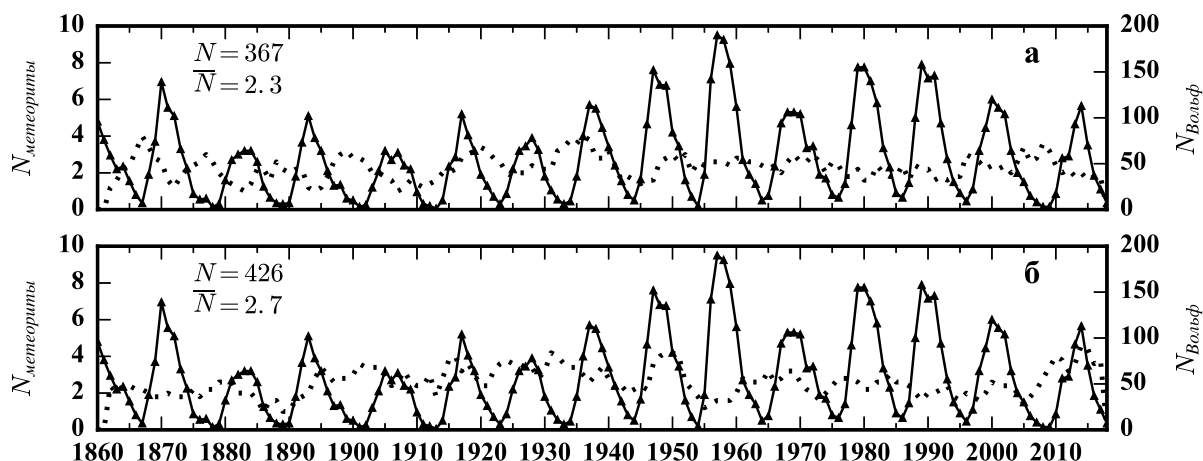


Рис. 2: Сглаженные кривые числа падений метеоритов (пунктирная линия) и среднегодовые числа Вольфа (сплошная линия), а — группа HIR, б — группа L. N — общее число метеоритных падений, $\bar{N}$ — среднее число падений в год.

11-летняя цикличность присуща солнечной активности, которая характеризуется числами Вольфа. Коэффициент корреляции между временным рядом метеоритов группы HIR и среднегодовыми числами Вольфа равен $r_{M,V} = -0.3$ на интервале с 1860 по 1920 г. и $r_{M,V} = -0.15$ с 1860 по 1960 г. Это говорит о том, что существует слабая связь между максимумами числа падений метеоритов и минимумами солнечной активности.

Исследование периодичности в распределении метеоритных падений по годам затруднено тем, что среднее число регистрируемых метеоритов ~ 6 в год. Среднее число регистрируемых болидов больше в 5 раз,

⁵<https://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml>

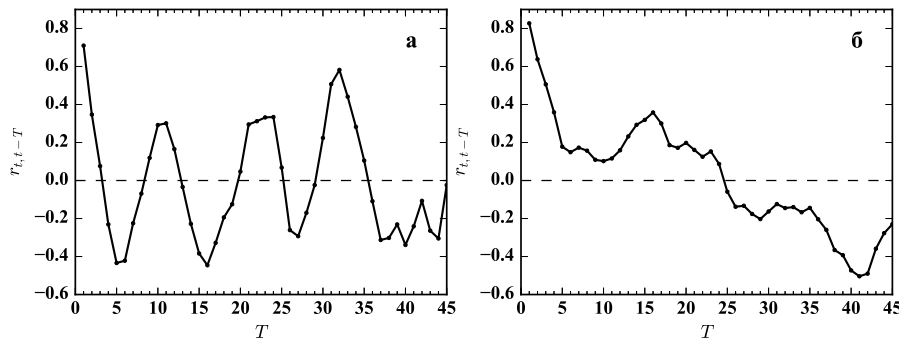


Рис. 3: Коэффициенты автокорреляции $r_{t,t-T} = f(T)$ для сглаженных распределений метеоритов, падения которых зарегистрированы с 1860 по 1960 г.: а — группа HIR, б — группа L.

с 1995 по 2018 г. зарегистрировано 753 болида⁶. На рис. 4 представлено распределение числа болидов по годам. Максимумы приходится на 2005 и 2015 г., что позволяет предположить наличие у болидов 10–11-летней цикличности. Смещение максимумов числа болидов относительно минимумов солнечной активности на ~ 3 года можно объяснить тем, что продолжительность 23-го цикла солнечной активности составила около 13 лет.

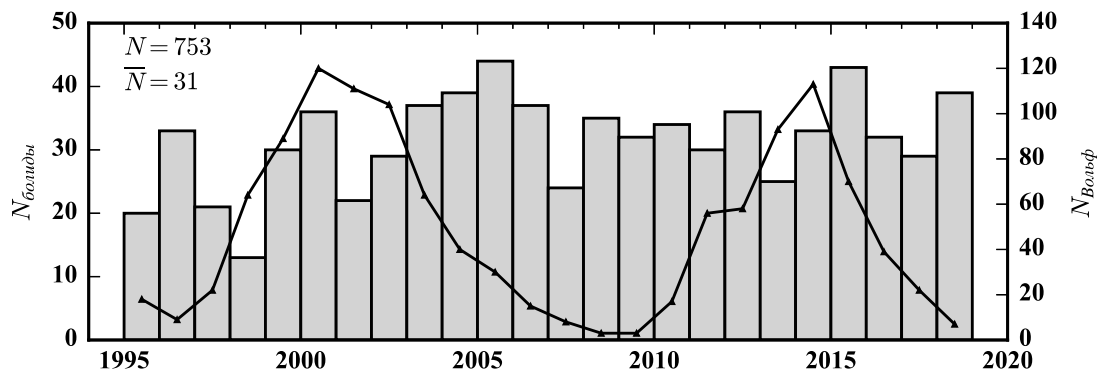


Рис. 4: Распределение числа болидов по годам (гистограмма) и среднегодовые числа Вольфа (сплошная линия). N — общее число болидов, $\bar{N}$ — среднее число болидов в год.

5. Заключение

В работе проведен статистический анализ характеристик 938 метеоритов, падения которых зарегистрированы с 1860 по 2018 г.

1. Распределение метеоритов по массам можно аппроксимировать логнормальным законом, максимум приходится на интервал масс $M = (1.6 - 6.3)$ кг.
2. Показано, что метеориты, подобные Челябинскому, регистрируются ~ 1 раз в 25 лет. Браун и др. [11] по данным о болидах оценивают частоту падения тел с $d \sim 20$ м как ~ 1 раз в 30 лет.
3. У группы HIR на интервале с 1860 по 1960 г. обнаружена 10–11-летняя периодичность в распределении числа падений метеоритов по годам, а также слабая корреляция между максимумами числа падений метеоритов и минимумами солнечной активности. Среднее число регистраций падений метеоритов ~ 6 в год, что затрудняет исследование периодичности. Среднее число регистрируемых болидов в год в 5 раз превышает число метеоритов. Несмотря на короткий срок работы болидных сетей и инфразвуковых станций, можно предположить, что максимумы числа болидов чередуются с интервалом ~ 11 лет.

Цикличность числа падений обнаруживается только у группы HIR, включающей метеориты с большим содержанием железа. На такие материалы оказывает воздействие внешнее магнитное поле. Это позволяет

⁶<https://cneos.jpl.nasa.gov/fireballs/>

предположить, что в годы максимумов солнечной активности секторное магнитное поле Солнца может оказывает более сильное влияние на движение метеороидов в межпланетном пространстве и изменять их первоначальные орбиты. Однако это предположение требует дальнейшего исследования.

Список литературы

1. B. M. Shustov and L. V. Ryhlova, ed., *Asteroidno – kometnaya opasnost': vchera, segodnya, zavtra* (2010).
2. D. W. Hughes, *Meteorities*, **16**, 269, 1981.
3. A. E. Dudorov and O. V. Eretnova, *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika*, **19**, 58, 2014.
4. T. A. Agekyan, *Teoriya veroyatnostey dlya astronomov i fizikov* (1974).
5. J. S. Dohnanyi, *JGR*, **74**, 2531, 1969.
6. D. D. Durda and S. F. Dermott, *Icarus*, **130**, 140, 1997.
7. B. A. Ivanov, *Solar System Research*, **52**, 3, 2018.
8. O. P. Popova, P. Jenniskens, V. Emel'yanenko, A. Kartashova, et al., *Meteoritics and Planetary Science*, **342**, 1069, 2013.
9. O. Popova, J. Borovicka, W. K. Hartmann, P. Spurny, E. Gnos, I. Nemtchinov, and J. M. Trigo-Rodriguez, *Meteoritics and Planetary Science*, **46**, 1525, 2011.
10. P. Jenniskens, M. D. Fries, Q.-Z. Yin, M. Zolensky, et al., *Science*, **338**, 1583, 2012.
11. P. G. Brown, J. D. Assink, L. Astiz, R. Blaauw, et al., *Nature*, **503**, 238, 2013.
12. M. I. D'yakonova, V. Y. Haritonova, and A. Yavnel', *Himicheskij sostav meteoritov* (1979).
13. G. Kramer, *Matematicheskie metody statistiki* (1975).
14. V. A. Alekseev, *Meteoritika*, **47**, 24, 1988.

Наблюдения КА «Спектр-Р» и «Спектр-РГ» в Кубанском государственном университете

Иванов А.Л.¹, Иванов В.А.¹, Лысенко В.Е.¹, Иванова Н.В.², Яковенко Н.А.¹, Молотов И.Е.³, Воропаев В.А.³, Захваткин М.В.³

¹Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

²DO4 ООО Национальное астрономическое агентство, Краснодар, Россия

³Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

Приводится методика наблюдений КА «Спектр-Р», а также результаты и оценка точности измерений положений КА «Спектр-РГ» за период с 13 июля 2019 г. до 28 августа 2019 г. по согласованию с данными от баллистического центра ИПМ им. М.В. Келдыша. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Observation of the spacecraft “SPECTR-R” and “SPECTR-RG” at the Kuban State University

Ivanov A.L.¹, Ivanov V.A.¹, Lysenko V.E.¹, Ivanova N.V.², Yakovenko N.A.¹, Molotov I.E.³, Voropaev V.A.³, Zakhvatkin M.V.³

¹Kuban State University, Krasnodar, Russia

²DO4, National Astronomical Agency, Krasnodar, Russia

³Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAN, Moscow, Russia

The paper discusses the methods of observations of the spacecraft “SPECTR-R”, along with the results and evaluations of measurement accuracy of the spacecraft “SPECTR-R” for the period from 13.07.2019 to 28.08.2019 by the agreement with the data from the ballistic center of the Keldysh Institute of Applied Mathematics. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.002

1. Введение

В 2012 г. в рамках договора о сотрудничестве между Кубанским государственным университетом и Институтом прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша наша обсерватория была привлечена к регулярным наблюдениям КА «Спектр-Р», выведенного на орбиту в 2011 г. Этот аппарат полностью выполнил свою программу наблюдений и получил замечательные результаты, опубликованные во многих научных источниках [1]. После выхода из строя части научного и навигационного оборудования потребовался оптический контроль состояния спутника и его орбиты для решения вопроса о продолжении его использования. Для этой цели были привлечены несколько обсерваторий, в том числе астрофизический комплекс обсерватории КубГУ и телескоп МАК 254 обсерватории DO4 ООО «Национального астрономического агентства».

Угловые оптические наблюдения являются важной составляющей траекторных измерений, необходимых для баллистико-навигационного обеспечения (БНО) полета КА, включающего выведение на квазипериодическую траекторию в окрестности точки либрации L2 системы Солнце-Земля.

Почти в это же время был запущен очередной аппарат и серии «Спектров» — «Спектр-РГ». Как обычно при запуске таких масштабных проектов разработчики и ученые, заинтересованные в получении научных результатов, просят все доступные средства наблюдений по возможности участвовать в контроле вывода на рабочую орбиту научного спутника.

Для решения позиционных задач по наблюдению «Спектр-РГ» также был использован астрофизический комплекс КубГУ в составе, описанном далее.

2. Описание астрофизического комплекса КубГУ

Астрофизический комплекс КубГУ состоит из двух телескопов. В качестве приемной оптики применен телескоп с оптической системой Ричи-Кретьена диаметром 510 мм, производитель АСТРОСИБ. Основные характеристики телескопа АСТРОСИБ:

- диаметр главного зеркала (ГЗ) 508 мм;
- диаметр вторичного зеркала 192 мм;
- относительное отверстие ГЗ F/3.

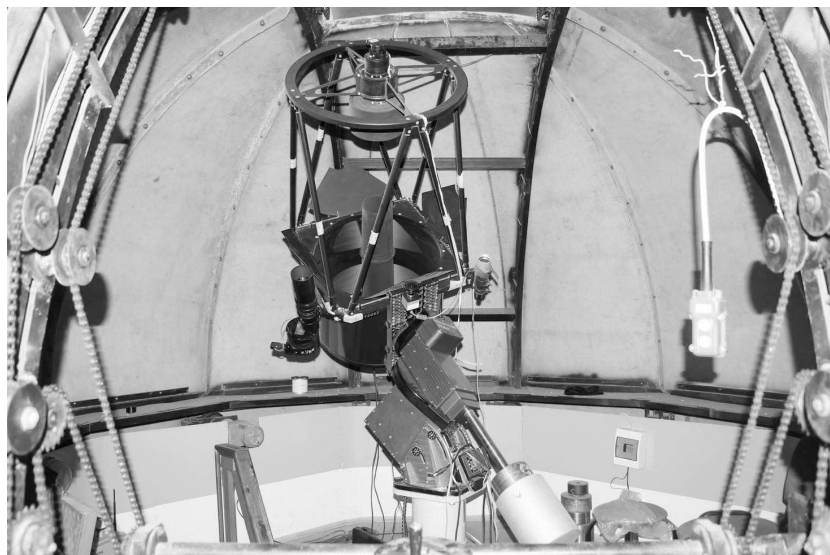


Рис. 1: Общий вид астрофизического комплекса КубГУ.

В качестве экваториальной монтировки используется PARAMOUNT ME (компания Software Bisque, США). Максимальная нагрузка навесного оборудования составляет почти 80 кг. Технические характеристики монтировки PARAMOUNT ME:

- полезная нагрузка 80 кг;
- скорость наведения до 50 с;
- точность наведения на объект 30'';
- точность ведения за 120 с 2''.

Протокол экваториальной платформы PARAMOUNT ME является закрытым и имеет только внешний протокол через ASCOM-платформу, что не позволяет программе подключаться к ключам управления во встроенной системной плате MSK-4000. Служба времени работает на модуле сигналов точного времени TSP-901 и подключается через триггер камеры. Технические характеристики службы времени астрофизической обсерватории КубГУ [2]:

- интерфейс RS-232, без гальванической изоляции;
- скорость передачи данных по интерфейсам RS-232 9600 бит/с;
- дальность связи по интерфейсу RS-232 не более 15 м;
- точность привязки PPS 100 нс;
- длительность сигнала PPS 1.5 мкс.

Для полной автоматизации данного комплекса были написаны плагины MaxComet и SatTrack — программы управления наблюдениями с подачей целеуказаний (ЦУ) из поступающих через интернет заданий и последующим управлением наведением и условиями съемки с последующим сбросом наблюдений в базу компьютера [3].

3. Технические особенности наблюдения КА «Спектр-Р»

Двигаясь с разными скоростями и пространственным смещением, подобно астероидам, опасно сближающимся с Землей (АСЗ), КА «Спектр-Р» отличается своей орбитой от низких ИСЗ. Поэтому нами была предложена классическая методика наблюдений для АСЗ, в которой изображения звезд и КА получаются точечными. После получения ЦУ от баллистиков Института прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша мы разбивали каждый участок орбиты на участки с равными скоростями, хотя в точках близких к перигею возникала сложность, т.к. за время наблюдений скорость резко менялась за проводку в 2–3 часа. Нам удалось сделать расчеты секторов для оптимальных проводок, и невязки снизились до приемлемых — не более 10'' в перигее и от 1.5'' до 0.5'' в апогее (табл. 1).

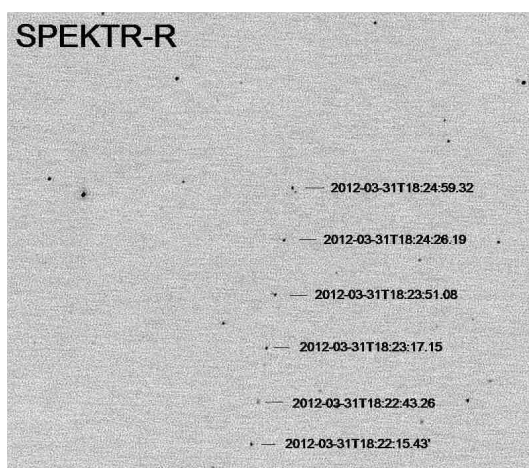


Рис. 2: Изображение, полученное с использованием методики звездного ведения, предложенной в КубГУ.

Методика наблюдения КА «Спектр-Р» включала в себя получение из баллистического центра Института прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша ЦУ в текстовом редакторе, которые содержат полную информацию о движении, угловой скорости, блеске, экваториальных и горизонтальных координатах, а также дату и время UT. Полученные ЦУ вводятся в специальную программу, которая управляет экваториальной монтировкой PARAMOUNT ME.

Наведение на точки по ЦУ производится с опережением входа объекта в рабочее поле телескопа на 2–5 мин. Телескоп находится в режиме ожидания, и когда объект появляется в поле зрения, производится автоматическая съемка небольшой серией кадров от 10 до 20 с привязкой серии к временным маркерам. Как правило, маркеры имеют точное время на отметке 0, 10, 20, 30 мин. В зависимости от угловой скорости объекта интервал задержки времени может меняться. Время экспозиции подбирается таким, чтобы объект и звезды оставались точечными и уровень насыщения изображений был в половине уровня ячейки.

В период с ноября 2018 г. по май 2019 г. обсерваторией КубГУ были получены астрометрические и фотометрические измерения КА за 32 ночи, общее число измерений пар прямого восхождения и склонения составило 342, а суммарная длительность интервалов наблюдения почти 74 часа. Эти измерения составляют значительную часть всех оптических данных, полученных за это время в мире. В Краснодаре были получены самые длительные наблюдения в мире! — 32 ночи, 342 измерения за почти 75 ч наблюдений.

4. Обработка наблюдений

Для последующей обработки наблюдений мы опробовали следующие программные продукты: Astrometrica, MaxIm DL и Izmccd. Для астрометрии использовались каталоги UCAC3, в отдельных случаях UCAC2, USNO-A2.0, GSC-1.1. Идентификация звездных полей осуществляется как автоматически, так и вручную.

В программе Astrometrica не удалось добиться достаточной точности. Программа MaxIm DL плюс PinPoint позволяет получать высокую точность наблюдений, но в ней нет обработки больших массивов

Таблица 1: Характеристики остаточных невязок астрометрических измерений КА «Спектр-Р» обсерваторией КубГУ (Пр — продольная невязка, Пп — поперечная ошибка, ср — среднее, std — стандартное отклонение).

Интервал наблюдений, UTC	Пр.ср.	Пр.std	Пп.ср.	Пп.std	Число
	сек.	сек.	сек.	сек.	изм.
2018.11.01 00:58 – 2018.11.01 01:03	0.211	0.117	0.467	0.021	5
2018.11.01 21:46 – 2018.11.02 00:39	0.401	0.276	0.494	0.246	18
2018.11.02 22:24 – 2018.11.03 01:06	0.149	0.106	0.358	0.176	9
2018.11.06 21:28 – 2018.11.07 00:28	0.631	0.342	0.329	0.152	14
2018.11.24 20:49 – 2018.11.24 22:40	0.96	0.714	0.133	0.261	13
2018.12.08 20:25 – 2018.12.08 23:30	0.366	0.128	0.841	0.14	21
2018.12.10 22:23 – 2018.12.11 00:25	1.04	0.237	0.505	0.638	10
2018.12.26 18:40 – 2018.12.26 20:03	0.346	0.994	0.434	0.145	4
2018.11.01 21:46 – 2018.11.02 00:39	0.401	0.276	0.494	0.246	18
2019.01.17 02:28 – 2019.01.17 03:28	0.23	0.34	–0.313	0.216	32

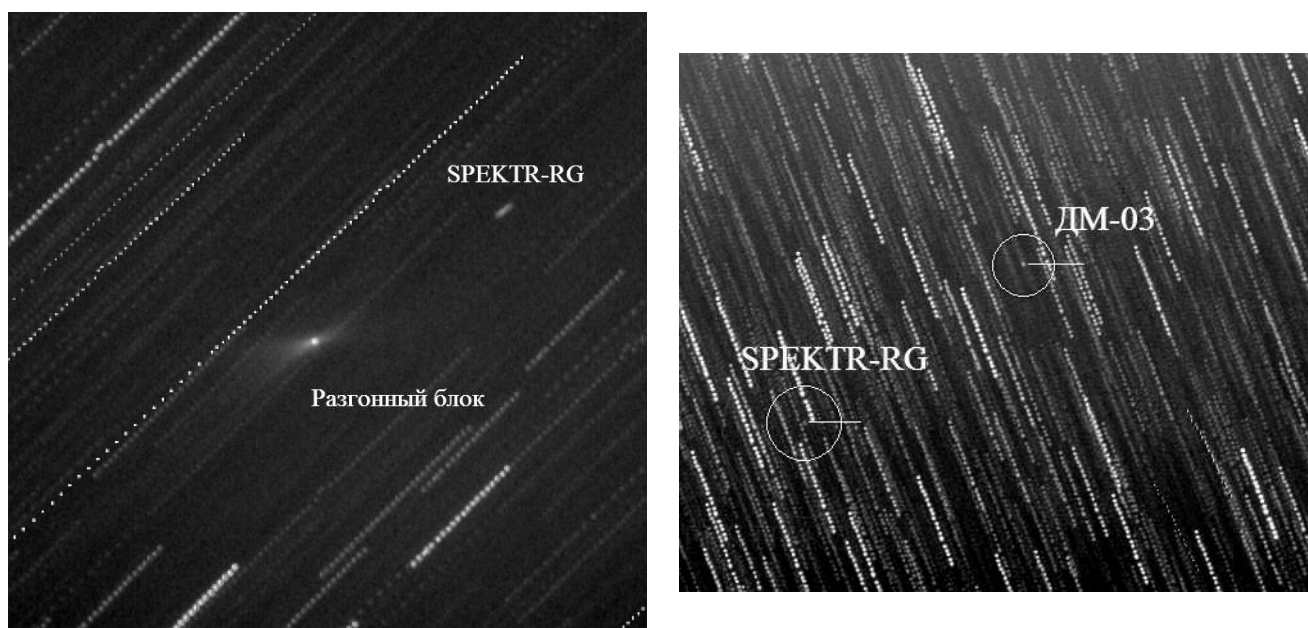


Рис. 3: Наблюдения КА «Спектр-РГ» и разгонного блока 13 и 14 июля 2019 г.

в автоматическом режиме. Использование программы Izmscd (написана Пулковским астрономом Игорем Измаиловым в соавторстве с сотрудниками ГАО РАН) дало отличные результаты, которые мы согласовали с баллистиками ИПМ. Многие алгоритмы, заложенные авторами в программу, позволяют учесть еще и невязки, возникающие от качества оптики, гнущего трубы телескопа, аберраций всей оптической системы. Одну из главных ролей в неточностях определения экваториальных координат объектов играют так называемые ошибки проекции телескопа или обобщенная дисторсия. Программа позволяет использовать пошаговые измерения, например, выборки по времени наблюдений, а также автоматическую обработку всех наблюдений данного объекта, находящегося в одной папке. Достаточно отметить объект наблюдений на первом и последнем кадре всей сессии и запустить автоматическую обработку. Удобным является и контроль в данной программе полученных измерений — имеется закладка (О – С).

5. Наблюдения КА «Спектр-РГ»

13 июля 2019 г. в 15:30:57 по московскому времени был осуществлен запуск обсерватории «Спектр-РГ». Вечером этого же дня астрофизическая обсерватория КубГУ провела первые наблюдения как самого КА «Спектр-РГ», так и его разгонного блока ДМ-03.

Уникальная ценность угловых оптических измерений для БНО полета КА «Спектр-РГ» заключается в получении информации о положении КА в плоскости, ортогональной линии визирования, в параметре, не наблюдаемом непосредственно при проведении стандартных радиотехнических измерений наклонной дальности и радиальной скорости. Благодаря этому, оптические измерения позволяют контролировать систематические ошибки штатной радиотехнической системы X-диапазона, задействованной впервые в ходе полета КА «Спектр-РГ».

Для контроля полета КА «Спектр-РГ» в разных фазах выведения объекта в заданную точку в КубГУ применялись три телескопа. На первом этапе использовался широкоугольный телескоп МАК 254 (телескоп системы Максутова-Кассегрена, диаметр 254 мм, фокусное расстояние 1200, ООО «Национальное астрономическое агентство»), на втором — Н-356 (телескоп системы Ньютона, диаметр 356 мм, фокусное расстояние 1600 мм) и на заключительном — РК-510 (телескоп системы Ричи-Кретьена, диаметр 510 мм, фокусное расстояние 4000 мм). Такой подход был связан с характеристиками движения КА «Спектр-РГ» и падением блеска в процессе удаления от Земли. На первом этапе блеск КА находился в пределах 9–14^m, на втором 15–17^m, и окончательно блеск упал до 18–19.4^m. В настоящее время 19.9–20.0^m. Измерения, выполненных участниками проекта, собраны в табл. 2. В ней приведена сводная статистика оптических наблюдений КА «Спектр-РГ» с момента запуска до 17 сентября 2019 г. За это время было получено более 7500 измерений пар прямого восхождения и склонения КА, имеющих точность от 1'' до 0.03''. Обсерваторией Кубанского университета КА наблюдался на данном интервале в течение 12 ночей. Измерения передавались в баллистический центр ИПМ им. М.В. Келдыша, где производилась обработка данных, выполнена оценка точности измерений и шумовых ошибок наблюдений астрофизической обсерватории КубГУ (табл. 3).

Таблица 2: Измерения КА «Спектр-РГ» до 17.09.19.

Телескоп	Ночей	Измерений	Продолжительность
Терскол К-800	34	1200	16:57:52
Кетаб ОРИ-40	19	389	9:58:13
КраО АЗТ-11	16	662	6:48:11
РТТ-150	14	1081	6:24:04
Краснодар	12	104	6:13:07
Монды АЗТ-33	10	1794	4:55:09
ТШАО Цейсс-1000	8	340	7:39:26
Симеиз Цейсс-1000	6	106	1:14:51
Терскол Цейсс-600	3	144	2:17:13
СаО Цейсс-1000	3	704	5:10:51
КраО ЗТШ	0.23	3267	1:26:54
Кастельгранде ОРИ-32	2	102	2:26:08

Таблица 3: Оценка шумовых ошибок по оценкам баллистического центра Института прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша для С40 (КубГУ)

Интервал наблюдений, UTC	Продольная ошибка, с	Поперечная ошибка, с	Количество измерений
2019.07.13 18:13 – 2019.07.13 21:15	0.436	0.254	15
2019.07.20 18:38 – 2019.07.20 18:59	1.575	0.24	3
2019.07.22 20:07 – 2019.07.22 20:49	0.481	0.39	4
2019.07.26 19:43 – 2019.07.26 20:27	0.055	1.439	4
2019.07.27 20:00 – 2019.07.27 21:20	0.469	0.281	4
2019.08.01 18:33 – 2019.08.01 21:07	0.204	0.18	23
2019.08.02 20:27 – 2019.08.02 22:43	0.427	0.27	11
2019.08.13 18:59 – 2019.08.13 21:56	0.364	0.185	9
2019.08.15 17:35 – 2019.08.15 18:31	0.209	0.359	8
2019.08.25 18:29 – 2019.08.25 19:35	0.108	0.168	18
2019.08.27 17:41 – 2019.08.27 19:31	0.26	0.429	6

6. Заключение

2019 г. стал завершающим в работе отечественного космического аппарата «Спектр-Р» и в активной фазе международного проекта «Радиоастрон», основным элементом которого является данный КА. На протяжении всего полета КА регулярно и активно наблюдался обсерваторией Кубанского государственного университета. После выхода из строя последнего комплекта бортовой приемно-передающей аппаратуры и потери связи с КА в начале 2019 г. оптические наблюдения стали единственным источником орбитальной информации, позволяющим уточнять орбиту КА и предпринимать попытки связи. При помощи этих данных удалось подтвердить работоспособность бортового радиоконкомплекса научной аппаратуры, а также функционирование системы ориентации и стабилизации КА после потери связи.

В результате работы астрофизической обсерваторией КубГУ было получено свыше 10 000 оптических измерений углового положения объекта «Спектр-Р» в околоземном космическом пространстве. Совокупная продолжительность наблюдений превысила 500 часов, что превышает время наблюдений КА «Спектр-Р» во всех других оптических обсерваториях мира. Точность измерений составила $0.5''$ по положению, что является лучшим результатом в сети оптических пунктов наблюдения КА «Спектр-Р». Получены акты внедрения наблюдений КА «Спектр-Р» от Института прикладной математики РАН им. М.В. Келдыша при выполнении навигационно-баллистического сопровождения программы «Радиоастрон». Таким образом, показана высокая эффективность и возможность использования методики оптических наблюдений со звездным ведением и оптико-электронного комплекса КубГУ для проведения позиционных измерений высокоорбитальных космических объектов.

Астрофизической обсерваторией КубГУ КА «Спектр-РГ» наблюдался в течение 12 ночей. В результате было получено 104 измерения пар прямого восхождения и склонения КА, имеющих точность от $1.6''$ до $0.1''$, что является хорошей точностью измерений и говорит о потенциале обсерватории для участия в других аналогичных проектах.

Список литературы

1. Roskosmos. Novosti, *Federal Space Agency*, <https://www.roscosmos.ru/26412/>, 2019.
2. A. L. Ivanov, V. A. Ivanov, V. E. Lysenko, N. V. Ivanova, N. A. Yakovenko, I. E. Molotov, V. A. Voropaev, and M. V. Zakhvatkin, *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva*, **3-4**, 65, 2017.
3. I. E. Molotov, V. A. Voropaev, and M. V. Zakhvatkin, *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva*, **3-4**, 102, 2017.

Оценка возраста пары астероидов на близких орбитах (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39

Кузнецов Э.Д.¹, Розаев А.Е.², Плавалова Е.³, Сафронова В.С.¹

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

²Ярославский государственный университет, Ярославль, Россия

³Математический институт Словацкой академии наук, Братислава, Словакия

В последнее время значительный интерес вызывает изучение тесных пар астероидов, весьма вероятно имеющих общее происхождение. Описан общий подход, применимый при исследовании динамической эволюции и оценке возраста молодых пар астероидов. Метод основан на анализе относительных расстояний и скоростей астероидов, а также значений метрики Холшевникова. Для каждого астероида пары исследуется эволюция на основе номинальной орбиты, а также четыре варианта, различающихся скоростью дрейфа большой полуоси, обусловленного эффектом Ярковского. Оценки максимума модуля скорости дрейфа большой полуоси получены на основе соотношений между параметрами исследуемого астероида и астероида (101955) Bennu. Анализ динамической эволюции пары (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 показал, что возраст пары не превышает 150 тыс. лет и, вероятно, составляет от 37 тыс. до 68 тыс. лет. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Age estimation of asteroid pair with close orbits (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39

Kuznetsov E.D.¹, Rosaev A.E.², Plavalova E.³, Safronova V.S.¹

¹Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

²Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia

³Mathematical Institute of the Slovak Academy of Sciences, Bratislava, Slovakia

Recently, considerable interest has been the study of close pairs of asteroids, very likely having a common origin. A general approach is described that is applicable to the study of dynamic evolution and the estimation of the age of young pairs of asteroids. The method is based on the analysis of the relative distances and velocities of asteroids, as well as the values of the Kholshchevnikov metric. For each asteroid of a pair, evolution is studied on the basis of the nominal orbit, as well as four variants that differ in the drift rate of the semimajor axis, due to the Yarkovsky effect. Estimates of the maximum modulus of the drift rate of the semimajor axis are obtained based on the relations between the parameters of the studied asteroid and asteroid (101955) Bennu. Analysis of the dynamic evolution of the pair (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 showed that the age of the pair does not exceed 150 kyr and ranges from 37 to 68 kyr. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.003

1. Введение

Современная структура пояса астероидов является результатом различных процессов, действовавших в течение продолжительного времени (см., например, [1, 2]). В главном поясе астероидов существует большое количество пар астероидов с близкими орбитами, возможно, имеющих общее происхождение [3]. Статистическая значимость этих пар была доказана в [4]. Механизм формирования пар астероидов был предложен в работе [5]. При отношении масс астероидов меньше, чем $m_2/m_1 \approx 0.2$, возможно образование пары за счет распада быстро вращающегося родительского тела. Здесь m_1 — масса главного (более массивного) астероида пары, m_2 — масса второго астероида. Пара астероидов может образоваться в результате вращательного деления родительского астероида и превращения его в двойную систему, которая распадается под действием собственной внутренней динамики вскоре после образования. Современное состояние проблемы изучения молодых пар представлено в работе [6]. Новые фотометрические данные в целом подтверждают механизм образования пар, предложенный в [5].

В настоящей работе мы выполним исследование динамической эволюции пары астероидов (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 с целью уточнения ее возраста. Для повышения точности моделирования будем учитывать влияние эффекта Ярковского путем оценки скорости дрейфа большой полуоси орбиты на основе данных об орбитальных и физических параметрах исследуемого астероида и астероида (101955) Bennu [7, 8].

2. Пара астероидов (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39

Пара астероидов (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 представляет интерес с точки зрения ее потенциальной молодости, поскольку метрики Холшевникова [9] $\rho_2 = 1.384 \cdot 10^{-4}$ (а.е.)^{1/2} (в пятимерном пространстве кеплеровых орбит) и $\rho_5 = 0.533 \cdot 10^{-4}$ (а.е.)^{1/2} (в трехмерном фактор-пространстве позиционных элементов)

Таблица 1: Абсолютные звездные величины H и элементы орбит астероидов (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39

Астероид	H , зв. вел.	a , а.е.	e	i , град	ω , град	Ω , град
(21436) Chaoyichi	15.27	2.186220	0.08556	3.73649	320.3168	178.324
(334916) 2003 YK39	18.11	2.186217	0.08553	3.73646	320.3161	178.287

близки. Можно предположить, что орбиты астероидов еще не успели разойтись за счет движения узлов и перигетров. Абсолютные звездные величины H и оскулирующие элементы орбит астероидов (a , e , i , ω , Ω — большая полуось, эксцентриситет, наклон, аргумент перигетра, долгота восходящего узла, соответственно) на эпоху MJD58400 (09.10.2018) по данным сайта Asteroids Dynamic Site — AstDyS¹ приведены в табл. 1.

Численное моделирование орбитальной эволюции выполнялось с использованием программы Orbit9², входящей в программный комплекс OrbFit [10]. Учитывались возмущения от больших планет, сжатие Солнца, релятивистские эффекты и дрейф большой полуоси орбиты, обусловленный влиянием эффекта Ярковского. Максимальное по модулю значение скорости дрейфа большой полуоси $|da/dt|_{\max}$ вследствие влияния эффекта Ярковского оценивалось путем нормализации, используя параметры астероида (101955) Bennu, поскольку они известны с малыми ошибками, на основе соотношения [7, 8]:

$$\frac{da}{dt} = \left(\frac{da}{dt} \right)_B \times \frac{\sqrt{a_B}(1 - e_B^2)}{\sqrt{a}(1 - e^2)} \frac{D_B}{D} \frac{\rho_B}{\rho} \frac{\cos \phi}{\cos \phi_B} \frac{1 - A}{1 - A_B}. \quad (1)$$

где D — диаметр астероида, ρ — плотность астероида, ϕ — наклон оси вращения астероида к плоскости орбиты, $A = 1/3p_v$ — альbedo Бонда, p_v — геометрическое альbedo. Здесь нижний индекс «B» указывает на астероид (101955) Bennu, для которого значение дрейфа большой полуоси $(-18.98 \pm 0.10) \cdot 10^{-4}$ а.е./ (млн. лет). В случае, если диаметр астероида был неизвестен, для оценок использовалось выражение [11]:

$$D = 1329 \text{ км } 10^{-H/5} \frac{1}{\sqrt{p_v}}. \quad (2)$$

Используемые значения физических параметров приведены в табл. 2.

По данным табл. 2 с использованием выражения (1) были получены оценки максимальной скорости дрейфа большой полуоси для астероидов (21436) Chaoyichi $|da/dt|_{\max} = 1.4 \cdot 10^{-4}$ а.е./ (млн. лет) и (334916) 2003 YK39 $|da/dt|_{\max} = 4.5 \cdot 10^{-4}$ а.е./ (млн. лет).

Поскольку для астероидов, входящих в исследуемые пары, положение оси вращения в пространстве не известно, были рассмотрены сценарии эволюции при различных значениях скорости дрейфа большой полуоси, соответствующих различной ориентации оси вращения астероида относительно плоскости его орбиты: $da/dt = 0$ при $\phi = 90^\circ$ или 270° ; $da/dt = \pm 1/2 |da/dt|_{\max}$ при $\phi = 60^\circ$ и 240° , соответственно; $da/dt = \pm |da/dt|_{\max}$ при $\phi = 0^\circ$ и 180° , соответственно.

Момент образования пары соответствует условиям, когда расстояние между астероидами имеет тот же порядок, что и радиус сферы Хилла R_H , а относительная скорость Δv имеет значение сравнимое со второй космической скоростью V_2 . Радиус сферы Хилла оценивался по формуле [6]:

$$R_H \approx a \frac{D}{2} \left(\frac{4\pi G \rho}{9 \mu} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где G — гравитационная постоянная, μ — гравитационный параметр Солнца. Вторую космическую скорость необходимо определять относительно более массивного астероида на астероидоцентрическом расстоянии Δr , равном относительному расстоянию между центрами масс астероидов:

$$V_2 = \left(\frac{\pi G \rho D^3}{3 \Delta r} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

При оценке радиуса сферы Хилла R_H (3) и второй космической скорости V_2 (4) использовались значения физических параметров, приведенные в табл. 1 и 2.

¹<https://newton.spacedys.com/astdys/>

²<http://adams.dm.unipi.it/orbfit/>

Таблица 2: Физические параметры астероидов (101955) Bennu, (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39

Астероид	Параметр	Значение	Ссылка / примечание
Диаметр			
(101955) Bennu	D_B	(0.492 ± 0.020) км	[12]
(21436) Chaoyichi	D	1.953 км	[13]
(334916) 2003 YK39	D	0.62 км	(2)
Плотность			
(101955) Bennu	ρ_B	(1.26 ± 0.07) г/см ³	[14]
(21436) Chaoyichi	ρ	2.72 г/см ³	[13]
(334916) 2003 YK39	ρ	2.72 г/см ³	S тип
Геометрическое альbedo			
(101955) Bennu	$(p_v)_B$	0.046 ± 0.005	[14]
(21436) Chaoyichi	p_v	0.222	[13]
(334916) 2003 YK39	p_v	0.24	S тип
Наклон оси вращения			
(101955) Bennu	ϕ_B	$175^\circ \pm 4^\circ$	[12]

Таблица 3: Оценки моментов сближений астероидов (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39

$\left(\frac{da}{dt}\right)_{21436},$ а.е./млн. лет)	$\left(\frac{da}{dt}\right)_{334916},$ а.е./млн. лет)	$\Delta t,$ лет	$\Delta r,$ км	$R_H,$ км	$\Delta v,$ м/с	$V_2,$ м/с
0	0	68316	479	396	0.094	0.054
$-0.73 \cdot 10^{-4}$	0	36969	700	396	0.089	0.045

3. Оценка моментов сближений астероидов (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39

Следуя [6], считаем, что условия $\Delta r < (5-10)R_H$ и $\Delta v < (2-4)V_2$ соответствуют относительному расстоянию Δr и относительной скорости Δv вскоре после образования пары.

По результатам численного моделирования были получены оценки моментов сближений астероидов (21436) Chaoyichi и (334916) 2003 YK39 (табл. 3).

Интегрирование в прошлое показывает, что примерно 150–160 тыс. лет назад происходит сближение астероидов с Марсом, после которого при движении в прошлое орбиты начинают удаляться друг от друга. Предварительные оценки возраста пары (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 составляют от 37 тыс. до 68 тыс. лет (см. табл. 3). Полученные результаты согласуются с оценкой [6] — от 10 тыс. до 140 тыс. лет при наиболее вероятном значении 31 тыс. лет.

4. Заключение

Анализ динамической эволюции пары (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39 при использовании номинальных орбит и вариации скорости дрейфа показал, что возраст пары не превышает 150 тыс. лет и, вероятно, составляет от 37 тыс. лет до 68 тыс. лет. В дальнейшем планируется провести исследование вероятностной эволюции для данной пары.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-02-00015).

Список литературы

1. R. Deienno, R. S. Gomes, K. J. Walsh, A. Morbidelli, and D. Nesvorný, *Icarus*, **272**, 114, 2016.
2. M. Granvik, A. Morbidelli, D. Vokrouhlický, W. F. Bottke, D. Nesvorný, and R. Jedicke, *A&A*, **598**, A52, 2017.
3. D. Vokrouhlický and D. Nesvorný, *AJ*, **136**, 280, 2008.
4. P. Pravec and D. Vokrouhlický, *Icarus*, **204**, 580, 2009.
5. P. Pravec, D. Vokrouhlický, D. Polishook, D. J. Scheeres, et al., *Nature*, **466**, 1085, 2010.
6. P. Pravec, P. Fatka, D. Vokrouhlický, P. Scheirich, et al., *Icarus*, **333**, 429, 2019.
7. F. Spoto, A. Milani, and Z. Knežević, *Icarus*, **257**, 275, 2015.
8. A. Del Vigna, L. Faggioli, A. Milani, F. Spoto, D. Farnocchia, and B. Carry, *A&A*, **617**, A61, 2018.

9. K. V. Kholshchevnikov, G. I. Kokhirova, P. B. Babadzhanov, and U. H. Khamroev, *MNRAS*, **462**, 2275, 2016.
10. Orbfir Consortium, Orbfir: Software to Determine Orbits of Asteroids, 2011.
11. P. Pravec and A. W. Harris, *Icarus*, **190**, 250, 2007.
12. M. C. Nolan, C. Magri, E. S. Howell, L. A. M. Benner, et al., *Icarus*, **226**, 629, 2013.
13. A. K. Mainzer, J. M. Bauer, R. M. Cutri, T. Grav, et al., *NASA Planetary Data System*, EAR-A-COMPIL-5-NEOWISEDIA-V1.0, 2016.
14. S. R. Chesley, D. Farnocchia, M. C. Nolan, D. Vokrouhlický, et al., *Icarus*, **235**, 5, 2014.

Аппроксимационные соотношения для эффектов излучения от больших метеорных взрывов и небольших кратерообразующих импактов

Глазачев Д.О., Подобная Е.Д., Попова О.П., Светцов В.В., Шувалов В.В.

Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), Москва, Россия

Предложены соотношения подобия, позволяющие быстро оценить опасные последствия ударов крупных космических тел. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Scaling relations for the effects of radiation from large airbursts and small crater-forming impacts

Glazachev D.O., Podobnaya E.D., Popova O.P., Svetsov V.V., Shuvalov V.V.

Institute for Dynamics of Geospheres RAS, Moscow, Russia

Scaling relations are proposed that allow one to quickly assess the dangerous consequences of impacts of large space bodies. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.004

1. Введение

Земля постоянно сталкивается с космическими телами, однако размеры большинства тел слишком малы для оказания хоть какого-то эффекта. Небольшие объекты — метеороиды с размером от песчинки до 1 м, — как правило, разрушаются и сгорают в атмосфере. Фрагменты наиболее крупных из них могут достигать поверхности как метеориты, но опасности для людей они не несут. При падении большей части тел с размерами 1–10 м атмосфера Земли все еще является хорошей защитой, хотя железные объекты такого (и даже меньшего) размера, вызывают образование кратеров и кратерных полей как, например, Сихотелинский железный дождь [1, 2] или метеорит Мораско [3]. В редких случаях кратер может образоваться и при падении каменного объекта метрового размера, например как кратер Каранкас [4].

С увеличением размера космические объекты становятся гораздо более опасными. Они способны причинить значительный ущерб, что и показало падение 19-метрового Челябинского астероида [5, 6]. Челябинское событие вызвало массовые повреждения в жилых домах и общественных зданиях, за медицинской помощью обратилось более 1600 человек, финансовые затраты на восстановление разрушенной инфраструктуры были оценены в 1 млрд. рублей [7, 8]. Удары тел типа Челябинска (и крупнее) случаются не каждый год, однако такие падения невозможно предсказать заранее. Кроме этого, для оценки последствий возможного удара необходимо как можно точнее определить параметры космического тела, траекторию и скорость входа, которые в начале наблюдений имеют большую неточность. Учитывая сложность и трудоемкость оценки последствий через непосредственное моделирование взаимодействия метеороида с атмосферой и поверхностью Земли, представляется актуальной и важной возможность простой быстрой оценки поражающих факторов.

Излучение, возникающее как при полете космического объекта в атмосфере так и в результате выбросов из образующегося кратера, является одним из основных опасных последствий космических ударов. При достаточной интенсивности теплового излучения, оно может стать опасным для людей, приводить к ожогам и повреждениям сетчатки, привести к возникновению пожаров и даже к плавлению грунта [9]. Действие излучения может быть оценено на основе данных о ядерных взрывах [10, 11], но гораздо более точным является подход, опирающийся на специально разработанные модели [12, 13]. Данная работа посвящена соотношениям для быстрой оценки эффектов теплового излучения.

2. Моделирование входа и удара

Численное моделирование пролета космического объекта проводилось в рамках квазижидкостной модели (QL) [12, 13]. Данный подход позволяет последовательно учесть процессы распада разрушенного тела на фрагменты, перенос излучения, испарение фрагментов, торможение фрагментов и пара в воздухе. Сам метеороид считается квазижидким, то есть не обладающим никакой прочностью. Это обосновано тем, что заметная деформация метеороидов размерами 10 м и более начинается на высотах, где аэродинамические нагрузки значительно превышают прочность падающих тел. Как следствие, можно считать, что тело уже

полностью разрушено, то есть потеряло прочность, а его деформация под действием аэродинамических нагрузок описывается с помощью гидродинамических уравнений (уравнений Эйлера). Для расчета переноса излучения в парах метеороида и в воздухе используется приближение лучистой теплопроводности [9, 14]. После удара о землю проводилось моделирование формирования кратеров и плюмов, представляющих собой расширяющуюся вверх струю испаренного вещества астероида и породы.

Распределения температуры и плотности, полученные в результате моделирования, применялись для расчета распределения потоков излучения на поверхности Земли путем добавления уравнения переноса излучения вдоль лучей, проходящих через излучающую область [9, 14].

Для небольших космических объектов (меньших примерно 50–100 м), не приводящих к образованию ударного кратера, полет через атмосферу является единственной причиной возникновения теплового излучения. Для кратерообразующих ударов обе стадии (пролет сквозь атмосферу и выброс плюма из кратера) вызывают тепловое излучение. Плюм состоит из паров вещества мишени и ударника и нагретого воздуха, может иметь высокие температуры и излучать в различных диапазонах. Для больших ударов основным источником излучения являются выбросы из кратера. В этой работе мы сосредоточились на переходных случаях, где важны обе стадии.

Для создания методики быстрой оценки последствий были использованы результаты серийного численного моделирования разрушения и торможения метеороидов, проведенного по методике описанной выше. Рассматривались тела с размерами от 20 до 3000 м, входящие в атмосферу под углами от 15 до 90° со скоростями входа от 20 до 70 км/с. Всего было рассмотрено 52 варианта для астероидов и 65 вариантов для комет с энергиями от 0.5 Мт ТНТ до 4.2 Тт ТНТ.

3. Тип входа в атмосферу

В зависимости от размера объекта, материала импактора и угла наклона траектории к горизонту могут реализовываться различные сценарии входа в атмосферу. Для определения типа события используется эффективная высота H_{eff} (км) [12], которая соответствует высоте точечного источника, создающего такую же ударную волну как от космического тела с заданными параметрами. Эта высота примерно соответствует высоте, на которой импактор теряет большую часть энергии и замедляется:

$$H_{\text{eff}} = \left(H - 1.3 \cdot H \cdot \ln \left(D \cdot \frac{\sin \alpha}{H} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \right) / 1000, \quad (1)$$

где H — характеристическая высота атмосферы ($H = 7500$ м), D — диаметр космического тела в метрах, ρ — плотность метеороида, α — угол входа в атмосферу (на высоте 100 км), ρ_0 — плотность воздуха на уровне моря. Эффективная высота для кометных тел выше, чем для астероидов с аналогичными параметрами.

Если значение H_{eff} равно нулю, то это кратерообразующее событие, если больше 5–7 км, то это событие типа метеорного взрыва, а импакты с высотой энерговыделения от 0 до 5–7 км являются переходными случаями ($D \approx 100$ –300 м). Стоит заметить, что выражение для H_{eff} имеет точность порядка нескольких км [12]. Зависимость имеет сложный характер, например, удар астероида с энергией 83 Мт ТНТ с $D = 100$ м, скоростью $v = 20$ км/с и углом входа $\alpha = 45^\circ$ приводит к образованию кратера, а падение кометы с большей энергией в 307 Мт ТНТ с $D = 100$ м, $v = 70$ км/с и $\alpha = 30^\circ$ является метеорным взрывом. Чем меньше угол входа, тем больший диаметр импактора требуется для образования кратера.

4. Аппроксимационные соотношения

Анализ результатов численного моделирования дает возможность предложить соотношения, которые позволяют оценить излученную энергию и получить выражение для плотности и потока энергии излучения в любой точке поверхности, используя только параметры входа самого космического тела. Как оказалось, приближение точечного источника с учетом пространственной неоднородности является подходящим подходом при описании эффектов теплового излучения ударов космических тел в рассматриваемом диапазоне. На излучение идет доля от кинетической энергии импактора η , которая называется интегральной эффективностью высвета. Аппроксимационное соотношение для максимальной плотности тепловой энергии Q (в Дж/см²), падающей на единичную площадку, ориентированную на источник, можно записать в виде:

$$Q = 4.184 \cdot 10^{12} \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\eta}{100} \cdot \frac{E_{\text{kt}}}{10^{10} (H_{\text{rad}}^2 + x^2 + el \cdot y^2)}, \quad (2)$$

где η в процентах, E_{kt} — кинетическая энергия ударника в кт ТНТ, в знаменателе стоит квадрат расстояния от центра излучения до точки наблюдения в км, состоящее из эффективной высоты источника H_{rad} и расстояния от проекции положения источника на плоскость (x, y) до точки наблюдения. Эллиптичность el позволяет учесть пространственную неоднородность поля излучения. Эффективная радиационная высота

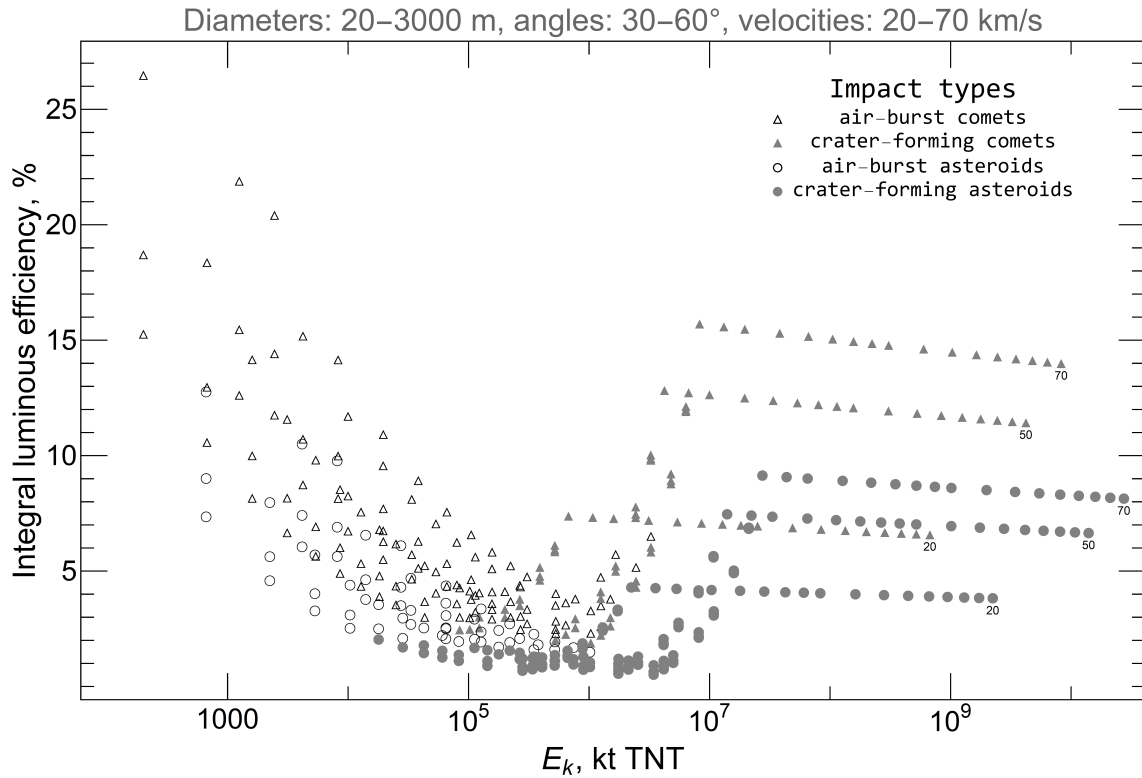


Рис. 1: Зависимость интегральной эффективности свечения от энергии импактора для астероидов и комет в случае метеорных взрывов (пустые символы) и кратерообразующих ударов (заполненные). Числами указаны скорости входа.

H_{rad} на несколько км превышает H_{eff} для метеорных взрывов. Эффективная высота излучения H_{rad} для кратерообразующих ударов является подгоночным параметром и не несет смысл высоты эффективного источника. Она оказывает влияние на распределение плотности тепловой энергии только в ближней зоне, где плотность энергии излучения имеет сложную структуру из-за сложного характера течения, распространения, взаимодействия и перемешивания выбросов из кратера с атмосферой.

Для случая разрушения космического объекта в атмосфере без образования ударного кратера (сценарий «метеорного взрыва») предлагается следующее соотношение для интегральной эффективности свечения, обеспечивающее хорошую оценку распределения плотности тепловой энергии:

$$\eta_{\text{airburst}} = \begin{cases} 100 \cdot \frac{10939 \cdot v^{0.56}}{E_{\text{kt}} \cdot \sin \alpha}, & \rho = 3320 \text{ кг/м}^3 \\ 100 \cdot \frac{1225 \cdot v^{0.39}}{E_{\text{kt}} \cdot \sin \alpha}, & \rho = 1000 \text{ кг/м}^3 \end{cases} \quad (3)$$

Для кратерообразующего события соотношение для η можно записать в виде

$$\eta_{\text{crater}} = \frac{0.021 \cdot D^{1.3} \cdot v^{1.5}}{E_{\text{kt}}^{0.45}}. \quad (4)$$

Соотношение для плотности тепловой энергии для кратерообразующего удара аналогично (2), при этом точка начала отсчета находится в центре кратера и присутствует дополнительный множитель C_{fix} , который ограничивает масштаб действия теплового излучения (т.е. характерное расстояние осязаемого эффекта), подробнее см. [15].

Соотношения (3) для эффективности η записаны отдельно для астероидов и комет, для любой промежуточной плотности импактора ρ можно воспользоваться линейной интерполяцией по плотности для оценки η_{airburst} :

$$\eta_{\text{airburst}}(\rho) = \frac{(3320 - \rho) \cdot \eta_{1000}}{3320 - 1000} + \frac{(\rho - 1000) \cdot \eta_{3320}}{3320 - 1000}, \quad (5)$$

где η_{1000} и η_{3320} интегральные эффективности свечения для кометы и астероида с интересующими нас параметрами (D, v, α).

Для переходных вариантов (от метеорных взрывов к кратерообразующим ударам) мы предлагаем аналогичную линейную интерполяцию, но уже по кинетической энергии тела. Учитывая, что граница между

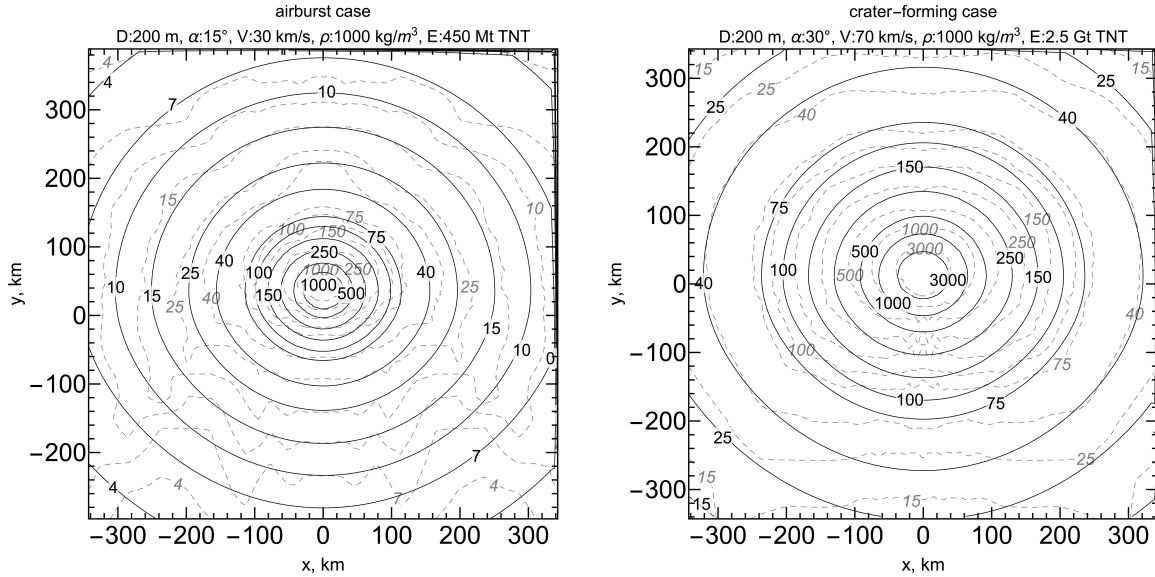


Рис. 2: Распределения плотности тепловой энергии (на единичную площадку ориентированную на источник, Дж/см²). Сплошные линии — оценка по предложенным аппроксимационным соотношениям, пунктирные линии — результаты детального численного моделирования. Начало координат расположено в точке пересечения траектории космического тела с поверхностью Земли. На правой панели представлены результаты для кратерообразующего сценария ($E_{kt} \approx 2.5$ Гт ТНТ, комета, $D = 200$ м, $\alpha = 30^\circ$, $v = 70$ км/с), на левой панели — для метеорного взрыва ($E_{kt} \approx 450$ Мт ТНТ, комета, $D = 200$ м, $\alpha = 15^\circ$, $v = 30$ км/с).

воздушными взрывами и кратерообразующими ударами по параметру H_{eff} зависит от многих параметров, и во избежание чрезмерного усложнения, мы предлагаем провести условное разделение по диаметру импактора. Если $D \leq 150$ м, то предлагается использовать соотношения для метеорных взрывов, если же $D \geq 300$ м, то будут применимы соотношения для кратерообразующих ударов. В интервале $D \approx 150 - 300$ м предлагается использовать интерполяцию по энергии

$$Q = \frac{(E_{ktD=300} - E_{kt}) \cdot Q_{D=150}}{E_{ktD=300} - E_{ktD=150}} + \frac{(E_{kt} - E_{ktD=150}) \cdot Q_{D=300}}{E_{ktD=300} - E_{ktD=150}}, \quad (6)$$

где $Q_{D=150}$ и $Q_{D=300}$ максимальные плотности тепловой энергии для импакторов с диаметрами 150 и 300 м и интересующими нас плотностью, скоростью и углом входа (v, ρ, α)

Интегральная эффективность высвета η для хондритов с энергиями $E_{kt} \approx 10^{-1} - 10^3$ кт ТНТ возрастает с ростом энергии [16]. Для более крупных объектов η убывает с энергией (рис. 1) в отличие от зависимости для мелких тел. Это же актуально для комет, хотя соответствующие кометам значения η больше. Можно предположить, что спад связан с возрастанием оптической толщины излучающей области, что приводит к потерям излучения главным образом от поверхности. В области небольших кратерообразующих импактов (кинетическая энергия $10^5 - 10^6$ кт ТНТ), увеличение эффективности η возникает из-за формирования плюма.

Эффективность излучения зависит от многих факторов, включая количество испаренного вещества, скорость расширения плюма, влияние следа и т.д. [9], поэтому реальная зависимость η от угла и скорости входа оказывается довольно сложной. Тем не менее, предлагаемые соотношения подобия позволяют оценить интегральную эффективность высвета с точностью порядка двух раз. На рис. 2 приведено сравнение распределений максимальной плотности потока энергии, полученных в результате детального численного моделирования и в результате применения соотношений подобия.

Соотношения подобия в целом позволяют воспроизвести зависимости тепловых эффектов от параметров импактора, найденные в численном моделировании, и позволяют прогнозировать области основных эффектов (возгораний, ожогов, пожаров и т.д.).

5. Заключение

Анализ результатов численного моделирования падений космических тел в широком диапазоне их свойств позволил предложить простые соотношения, которые дают возможность оценивать тепловые потоки на поверхности Земли для падающего тела с заданными свойствами и могут использоваться для прогнозирования последствий удара. Предложенные соотношения зависят только от параметров импактора (размер,

плотность, скорость и угол входа в атмосферу), не требуют длительных вычислений и представляют собой относительно простые алгебраические выражения.

Простой в использовании инструмент (аппроксимационные соотношения), который дает хорошую быструю оценку тепловых эффектов от сильных воздействий метеороидов, был получен отдельно для случаев метеорного взрыва и образования кратера. Для переходных случаев предложена интерполяция по кинетической энергии.

Все аппроксимации, описанные выше, реализованы в онлайн калькуляторе¹, который можно использовать для быстрой оценки опасных последствий. Кроме того, в калькуляторе возможен расчет других эффектов (распределение избыточного давления воздуха и скорости ветра, размер кратера, выброс, сейсмическое воздействие и ионосферные возмущения).

Список литературы

1. E. Krinov, *Meteoritics*, **6**, 127, 1971.
2. I. Nemtchinov and O. Popova, *Solar System Research*, **31**, 408, 1997.
3. M. Bronikowska, N. Artemieva, and K. Wünnemann, *Meteoritics & Planetary Science*, **52**, 1704, 2017.
4. G. Tancredi, J. Ishitsuka, P. Schultz, R. Harris, et al., *Meteoritics & Planetary Science*, **44**, 1967, 2009.
5. O. Popova, P. Jenniskens, V. Emel'yanenko, A. Kartashova, et al., *Science*, **342**, 1069, 2013.
6. P. Brown, J. Assink, L. Astiz, R. Blaauw, et al., *Nature*, **503**, 238, 2013.
7. V. Akimov, D. Glazachev, V. Emel'yanenko, A. Kramintsev, et al., *Asteroids and Comets Hazard. Strategy of counteraction* (2015).
8. A. Kartashova, O. Popova, V. Emel'yanenko, P. Jenniskens, D. Glazachev, E. Podobnaya, and A. Skripnik, *Planetary and Space Science*, **160**, 107, 2018.
9. V. Svetsov and V. Shuvalov, *Earth and Planetary Science Letters*, **503**, 10, 2018.
10. S. Glasstone and P. Dolan, *The effects of nuclear weapons* (1977).
11. G. Collins, H. Melosh, and R. A. Marcus, *Meteoritics & Planetary Science*, **40**, 817, 2005.
12. V. Shuvalov, O. Popova, V. Svetsov, I. Trubetskaya, and D. Glazachev, *Solar System Research*, **50**, 1, 2016.
13. V. Svetsov, V. Shuvalov, G. Collins, and O. Popova, in G. O. Ryabova, D. J. Asher, and M. D. Campbell-Brown, eds., *Meteoroids: Sources of Meteors on the Earth and Beyond*, Cambridge University Press, 275–298 (2019).
14. V. Svetsov, V. Shuvalov, and O. Popova, *Solar System Research*, **52**, 195, 2018.
15. E. Podobnaya, D. Glazachev, O. Popova, V. Svetsov, and V. Shuvalov, in G. Kocharyan and A. Lyakhov, eds., *Trigger Effects in Geosystems. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*, Springer, 569–577 (2019).
16. O. Popova, J. Borovička, and M. Campbell-Brown, in G. O. Ryabova, D. J. Asher, and M. D. Campbell-Brown, eds., *Meteoroids: Sources of Meteors on the Earth and Beyond*, Cambridge University Press, 9–36 (2019).

¹<http://AsteroidHazard.pro>

Комплексные исследования астероидов километрового размера, сближающихся с Землей, на 1.5 м российско-турецком телескопе РТТ-150

Хамитов И.М.^{1,2}, Гумеров Р.И.^{2,3}, Бикмаев И.Ф.^{2,3}, Мельников С.С.^{2,3}, Иртуганов Э.Н.^{2,3}, Окуян Г.¹, Окуян О.¹

¹Государственная обсерватория ТУБИТАК, Анталья, Турция

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

³Академия наук Татарстана, Казань, Россия

Актуальность исследования АСЗ связана с вопросами происхождения Солнечной системы, с потенциальной опасностью столкновения с Землей, а также с практическим интересом в ближайшем будущем использования их в качестве источника полезных минералов и металлов. С 2018 г. на телескопе РТТ-150 проводятся регулярные спектроскопические и поляриметрические наблюдения АСЗ в рамках исследовательского проекта «Исследования физических характеристик и уточнение параметров движения астероидов, сближающихся с Землей, километрового размера на 1.5-метровом российско-турецком телескопе РТТ-15». Экспериментальные исследования по возможности наиболее полной выборки АСЗ километрового размера направлены на определение следующих физических характеристик астероидов: геометрическое альbedo, блеск, таксономический класс и диаметр АСЗ. Объекты наблюдаются в период их тесного сближения с Землей при видимом блеске до 18 звездной величины и на фазовых углах более 40°. В работе представлены результаты поляриметрических наблюдений АСЗ, выполненных в 2018 г. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Complex studies of kilometer sized NEAs by the 1.5m Russian-Turkish telescope RTT-150

Khamitov I.M.^{1,2}, Gumerov R.I.^{2,3}, Bikmaev I.F.^{2,3}, Melnikov S.S.^{2,3}, Irtuganov E.N.^{2,3}, Okuyan G.¹, Okuyan O.¹

¹TÜBİTAK National Observatory, Antalya, Turkey

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

³Tatarstan Academy of Sciences, Kazan, Russia

The relevance of the study of NEAs is related to the origin of the Solar System, the potential danger of collision with the Earth, and also the practical interest in the near future of using them as sources of useful minerals and metals. Spectroscopic and polarimetric observations of NEAs are carried out on the RTT-150 regularly since 2018 in the framework of the scientific project “Studies of physical parameters and ephemeris refinement of kilometer sized NEAs by the RTT-150 telescope”. An experimental study of a sample of kilometer sized NEAs, as full as possible, involves the estimations of physical parameters of the asteroids such as geometric albedos, brightness, taxonomic classes and diameters of NEAs. The objects are observed in the period of their closest approach to the Earth with the apparent magnitudes brighter than 18 mag and phase angles more than 40°. We present results of polarimetric observations that were performed in 2018 in the framework of the project. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.005

1. Введение

Более трети астероидов главного пояса принадлежат тому или иному семейству, то есть образовались в прошлом в результате разрушения более крупных родительских тел при катастрофическом столкновении. Члены семейства и сами семейства астероидов отождествляются на основе статистической информации о невозмущенных элементах их орбит. Метод восстановления поля скоростей осколков в момент столкновения и образовании семейства эффективно применяется для астероидов Главного пояса. Также статистически известно, что все астероиды размером менее 30 км принадлежат тому или иному семейству. Таким образом образование АСЗ, ввиду малости их размеров, в большинстве случаев есть результат столкновения крупных тел.

Вероятность образования АСЗ километрового размера, полученная на основании модели разрушения большого астероида Главного пояса, хорошо описывает наблюдаемую популяцию [1, 2]. Однако вопрос об образовании АСЗ километрового размера все еще остается открытым и требует дальнейших исследований. Под заметным влиянием эффекта Ярковского и динамического воздействия планет на АСЗ, позиционная информация за короткое время настолько размывается, что невозможно определить оригинальное семейство. Следовательно, единственным способом изучения природы и образования АСЗ остается исследование их физических характеристик.

2. Основные положения проекта по комплексному исследованию АСЗ

Исследование объектов Солнечной системы — одна из научных программ, выполняемых на РТТ-150 с 2002 г. с момента ввода в эксплуатацию наблюдательных средств телескопа. Благодаря современному научному оборудованию и модернизации системы управления телескопом удалось создать эффективную и современную инструментальную базу астрономических исследований. Имеющееся научное оборудование телескопа позволяет проводить комплексные исследования этих АСЗ, в том числе высокоточные, позиционные, фотометрические и спектроскопические измерения [3]. После интеграции поляриметра в научное оборудование телескопа для измерения линейной поляризации небесных источников света, поляриметрические наблюдения астероидов стали проводиться с конца 2014 г. [4].

Список исследуемых АСЗ включает в себя 1148 объекта — все известные АСЗ ярче 18^m . Чтобы не исключить более темные АСЗ километрового размера, наблюдательный список был расширен в 2019 г. еще на 416 АСЗ, которые удовлетворяют условиям $q < 0.6$, $18.0 < H < 19.5$, где q — перигелийное расстояние в а.е. Целью данного проекта являются получение оценок таксономического класса, геометрического альбеда, блеска и диаметра отобранных АСЗ в период их наибольшего сближения, при видимом блеске до 18^m . Основные положения исследования следующие:

1. Поляриметрические наблюдения отобранных АСЗ с видимой величиной ярче 18^m и собственным движением до $10''/\text{мин}$ в период их сближения с Землей;
2. Получение отражательных спектров для АСЗ с видимой величиной до 16^m ;
3. Определение таксономического класса АСЗ на основе соотношения между степенью поляризации и фазовым углом, а для сравнительно ярких объектов — еще и по их спектральным данным;
4. Оценка геометрического альбеда АСЗ по известной эмпирической зависимости от наклона h фазовой поляриметрической кривой и максимальной степени поляризации;
5. Оценка диаметров АСЗ на основе поляриметрических и фотометрических наблюдений;
6. Астрометрия и оценка яркости АСЗ с видимой величиной ярче 18^m .

3. Используемые методы по комплексному исследованию АСЗ

Геометрическое альбеда

Наибольшее внимание в исследованиях уделяется определению альбеда АСЗ поляриметрическим методом. Поляриметрические наблюдения проводятся с использованием поляриметра TFOSC-WP [4], которые дополняются фотометрическими и спектральными наблюдениями. В основе исследования физических свойств астероидов поляриметрическим методом лежит зависимость степени поляризации p_V рассеянного на поверхности астероида солнечного света от фазового угла α , угла между Солнцем, астероидом и наблюдателем. Нами предложен оригинальный подход определения альбеда АСЗ, который основывается всего на нескольких или даже одном наблюдении. В периоды тесного сближения с Землей АСЗ наблюдаются на больших и даже экстремально больших фазовых углах. За короткий промежуток времени фазовый угол значительно изменяется. Также установлено, что с точностью до 2° средний угол инверсии для большинства астероидов равен 19° [5]. Таким образом, измеряя степень поляризации на значительных фазовых углах возможно оценить поляриметрический наклон как отношение степени поляризации к разности фазового угла, на котором выполнено измерение, и среднего угла инверсии.

Абсолютная величина

Поляриметрические зависимости получены в полосе V фотометрической системы Бесселя. Следовательно поляриметрические наблюдения могут быть использованы для оценок абсолютной звездной величины астероида H в системе HG . Для измерения абсолютной величины АСЗ по наблюдательным оценкам звездной величины астероида мы использовали базу данных AAMS фотометрических наклонов и их ошибок [6, 7], а для астероидов с неопределенным фотометрическим наклоном использовалось $G = 0.15 \pm 0.10$.

Оценка диаметра

На основе зависимости между абсолютной звездной величиной астероида H , его геометрического альбеда p_V и эффективным диаметром D_{eff} (км) в виде $\lg(D_{\text{eff}}) = 3.1235 - 0.5 \lg(p_V) - 0.2H$, оценивается эффективный диаметр АСЗ на момент наблюдения, соответствующий определенной фазе вращения [8]. Ошибки измерений диаметра в основном зависят от неопределенности фотометрического наклона при оценке абсолютной величины и составляют порядка 10–30%.

Таблица 1: Результаты комплексных исследований АСЗ на РТТ-150

АСЗ	$P(\%)$	P_{err}	α	p_V	$\delta p_V/p_V$	H	H_{err}	$D(\text{км})$	D_{err}
1627	1.51	0.3	38.2	0.31	0.2	12.86	0.1	6.33	0.8
1685	3.24	0.3	46.8	0.20	0.1	13.79	0.1	5.17	0.4
1685	2.79	0.6	40.4	0.20	0.1	14.08	0.1	4.52	0.4
2100	5.13	0.4	42.4	0.10	0.1	16.86	0.5	1.77	0.4
3752	9.05	0.6	51.6	0.08	0.1	14.98	0.3	4.82	0.8
4953	7.99	0.5	53.5	0.09	0.1	14.67	1.0	5.04	2.4
5836	3.64	0.5	41.1	0.14	0.2	14.71	0.2	4.09	0.6
8037	8.05	0.6	54.6	0.10	0.1	16.42	0.1	2.20	0.1
8037	7.90	0.6	55.0	0.10	0.1	16.42	0.1	2.20	0.1
16834	6.20	0.7	44.7	0.09	0.1	15.68	0.1	3.23	0.3
17511	2.27	0.5	59.3	0.45	0.3	17.21	0.2	0.71	0.1
66391	3.04	0.4	60.2	0.31	0.1	16.51	0.2	1.18	0.2
66391	4.50	0.4	74.4	0.31	0.1	16.51	0.3	1.18	0.2
68950	3.06	0.6	46.4	0.21	0.1	16.28	0.4	1.62	0.3
68950	4.61	0.4	59.0	0.21	0.1	16.02	0.4	1.83	0.4
87684	2.09	0.5	43.0	0.28	0.3	16.90	1.6	1.05	0.9
89830	4.56	0.7	70.4	0.27	0.2	15.31	0.3	2.20	0.3
96590	1.47	0.4	46.2	0.48	0.3	16.18	0.3	1.12	0.2
137052	1.80	0.4	47.3	0.40	0.2	16.90	0.1	0.88	0.1
137062	6.28	0.7	94.7	0.30	0.1	16.82	0.2	1.05	0.1
138847	2.24	0.6	55.2	0.41	0.3	17.18	0.2	0.76	0.1
139289	14.93	0.4	73.8	0.08	0.1	17.60	0.3	1.43	0.2
152931	2.53	0.6	47.8	0.32	0.2	16.10	0.2	1.42	0.2
152931	2.50	0.6	54.2	0.32	0.2	16.10	0.2	1.42	0.2
153957	3.24	0.7	64.4	0.24	0.2	18.02	0.3	0.68	0.1
153957	5.22	0.6	60.4	0.24	0.2	18.01	0.3	0.68	0.1
162168	10.56	0.7	47.9	0.06	0.1	16.98	0.2	2.24	0.2
162269	0.93	0.3	41.4	0.64	0.4	16.71	0.2	0.76	0.2
163132	2.01	0.8	102.2	0.38	0.8	18.65	0.3	0.40	0.2
163243	5.58	0.7	54.7	0.15	0.1	16.58	0.2	1.68	0.2
164201	27.1	0.6	74.8	0.04	0.1	15.88	0.3	4.36	0.6
164121	5.11	0.7	94.2	0.34	0.1	16.56	3.0	1.11	1.6
164121	2.63	0.5	59.1	0.34	0.1	16.56	1.3	1.11	0.7
194126	3.61	0.4	39.1	0.13	0.1	17.71	0.2	1.08	0.1
276049	8.03	0.5	38.6	0.05	0.1	15.08	0.5	5.71	1.4
285331	5.50	0.5	86.6	0.31	0.1	18.33	0.3	0.52	0.1
333578	3.58	0.6	71.0	0.36	0.2	20.19	0.3	0.20	0.03
333888	4.69	0.5	50.8	0.16	0.1	16.70	0.2	1.54	0.2
374851	5.74	0.7	80.7	0.26	0.1	16.71	0.3	1.18	0.2
452389	3.26	0.4	61.4	0.32	0.1	17.78	0.3	0.65	0.1

Таксономия

Наблюдательно определено, что астероиды с близкими альбедами имеют одинаковые характеристики фазовой поляриметрической кривой (см., например, [9]). При фазовых углах выше 40° классы астероидов хорошо разделяются, позволяя тем самым проводить таксономию данных объектов.

Наблюдательные средства РТТ-150 позволяют получать спектры низкого разрешения ($R \sim 600$), охватывающие весь видимый диапазон от 4000 до 9000 Å. Отражательные спектры строятся как отношение к спектру солнечного аналога, наблюдаемого на том же зенитном расстоянии и нормированными на поток при 5500 Å. Спектральные классы астероидов в классификации SMASSII [10] оцениваются как наилучшая подгонка спектров отражения для данного класса на основе медианных значений в 9 интервалах между 4500 и 8500 Å.

4. Результаты

Мы представляем результаты поляриметрических, спектральных и фотометрических наблюдений 32 АСЗ выполненных в фильтре V (23 объекта диаметром более 1 км и 9 размером несколько сот метров) в периоды их тесного сближения с Землей на РТТ-150 между августом 2014 г. и июнем 2018 г. Оценки альбеда и диаметров астероидов на основе поляриметрических и фотометрических данных получены методами, опи-

санными выше. Поскольку астероиды наблюдались на больших фазовых углах от 40° до 100° , измеренные степени линейной поляризации позволили дифференцировать их по таксономическим классам даже по единичным наблюдениям. Результаты приведены в табл. 1. Наблюдения были продолжены в 2019 г. Необходимо отметить, что данный проект долговременный и не ограничивается сроками 2018–2020 гг. предоставленного гранта РФФИ и его выполнение может быть продолжено при соответствующей дополнительной поддержке.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 18-02-00105А). Авторы благодарят TÜBİTAK, КФУ, АНТ и ИКИ за частичную поддержку в использовании РТТ-150 (1.5-м российско-турецкий телескоп в Анталии). Данная работа получила частичную поддержку по государственной субсидии в сфере научных исследований 3.6714.2017/8.9, выделенной Казанскому федеральному университету.

Список литературы

1. W. Bottke, A. Morbidelli, R. Jedicke, J.-M. Petit, H. Levison, P. Michel, and T. Metcalfe, *Icarus*, **156**, 399, 2002.
2. W. Bottke, D. Durda, D. Nesvorny, R. Jedicke, A. Morbidelli, D. Vokrouhlicky, and H. Levison, *Icarus*, **179**, 63, 2005.
3. R. Gumerov, I. Khamitov, and G. Пинигин, *Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series*, **155**, 164, 2013.
4. S. Helhel, I. Khamitov, G. Kahya, C. Bayar, S. Kaynar, and R. Gumerov, *Experimental Astronomy*, **39**, 595, 2015.
5. M. I. Mishchenko, V. K. Rosenbush, N. N. Kiselev, D. F. Lupishko, et al., *ArXiv e-prints*, 2010.
6. D. A. Oszkiewicz, K. Muinonen, E. Bowell, D. Trilling, A. Penttila, T. Pieniluoma, L. H. Wasserman, and M. T. Enga, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **39**, 1919, 2011.
7. K. Muinonen, I. N. Belskaya, A. Cellino, M. Delbo, A. C. Levasseur-Regourd, A. Penttila, and E. F. Tedesco, *Icarus*, **209**, 542, 2010.
8. J.-W. Fowler and J.-R. Chillemi, *In the IRAS Minor Planet Survey*, eds. Tedesco, E.F., Veeder, G.J., Fowler, J.W. and Chillemi, J.R. *Badford: Hanscom Air Force Base*, 17–43, 1992.
9. I. N. Belskaya, S. Fornasier, and Y. N. Krugly, *Icarus*, **201**, 167, 2009.
10. S. J. Bus and R. P. Binzel, *Icarus*, **158**, 146, 2002.

К вопросу о существовании семейства Сатурна: постоянные Радзиевского-Тиссерана для комет Дарре и Тутля

Усанин В.С.

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

Ранее считалось общепризнанным деление комет на семейства Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Современная классификация оставляет только семейство Юпитера, а периодические кометы с большими афелийными расстояниями относятся к галлеевскому типу. Переход от старой классификации к новой до сих пор вызывает критику. В качестве одной из характеристик динамической связи комет с планетами предлагался критерий Радзиевского-Тиссерана. Эта постоянная в рамках ограниченной задачи трех тел величина имеет смысл большой полуоси орбиты второго тела, то есть возмущающей планеты. Хотя критерий уже применялся практически, конкретная методика его использования для комет, наблюдавшихся во многих появлениях, пока отсутствовала, что ставило под сомнение полученные результаты. В данной работе критерий Радзиевского-Тиссерана рассмотрен вначале на примере кометы Дарре (6P), достоверно относящейся к семейству Юпитера. Выявлены параметры распределения количества пар появлений по значениям постоянной Радзиевского-Тиссерана, являющиеся более устойчивыми и лучше обнаруживающие присутствие Юпитера. Далее та же методика применена к комете Тутля (8P), наиболее изученной из тех, что могли бы относиться к семейству Сатурна. Показано, что с точки зрения критерия Радзиевского-Тиссерана основным возмущающим телом для кометы Тутля является Юпитер, в области большой полуоси орбиты Сатурна особенности распределения отсутствуют. Таким образом, подтверждается новая классификация. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Concerning the existence of the Saturn family: Radzievskij-Tisserand constants for comets 6P/d'Arrest and 8P/Tuttle

Usanin V.S.

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia

Earlier, the division of comets into the families of Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune was regarded as undoubted. The modern classification retains only the Jupiter family, and comets with larger aphelion distances belong to the Halley type. The transition from the old classification to the new one still raises criticism. The Radzievskij-Tisserand criterion was proposed as a measure of the dynamical relation of comets to planets. This quantity, which is constant within the framework of the restricted three-body problem, fits the orbital semimajor axis of the second body, that is, the perturbing planet. Although this criterion was already applied practically, the exact technique of its use for comets observed in multiple apparitions was not still elaborated, which made obtained results doubted. The present work starts with the application of the Radzievskij-Tisserand criterion to 6P/d'Arrest as an example of an undoubted Jupiter-family comet. The most robust and the most sensitive to the Jupiter's presence parameters of the distribution of apparition pairs in Radzievskij-Tisserand constant are revealed. Next, the same technique is applied to 8P/Tuttle which is the most studied of the presumed Saturn family comets. It is shown that, in the aspect of the Radzievskij-Tisserand criterion, Jupiter is the main perturbing body for 8P/Tuttle. Any feature of the distribution in the Saturn's semimajor axis vicinity is not present. So, the new classification is confirmed. Based on a talk presented at the XI International Conference "Near-Earth Astronomy and Space Heritage" (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.006

1. Введение

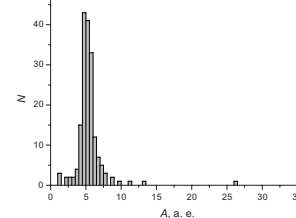
В круговой ограниченной задаче трех тел постоянная Тиссерана, выраженная через элементы орбиты третьего тела (кометы) и большую полуось орбиты второго тела (планеты) вокруг первого (Солнца), является приближительным законом сохранения. Приравняв выражения для постоянной Тиссерана в два момента времени (появления кометы), В.В. Радзиевский получил формулу, определяющую радиус A орбиты планеты, вызвавшей изменение элементов кометной орбиты [1]:

$$A = \left(\frac{2\sqrt{(1+e_1)q_1} \cos i_1 - 2\sqrt{(1+e_2)q_2} \cos i_2}{a_2^{-1} - a_1^{-1}} \right)^{2/3},$$

где q , e , i , $a = q/(1-e)$ — перигелийное расстояние, эксцентриситет, наклон и большая полуось кометной орбиты, индексы 1 и 2 относятся к двум появлениям одной и той же кометы. До сих пор постоянная Радзиевского-Тиссерана применялась мало [2, 3], поэтому оставались неясны следующие аспекты. Каково влияние на A погрешностей в элементах орбит, которое должно быть сильнее на коротких промежутках времени? Каково влияние на A негравитационных эффектов, которое накапливается на длинных промежутках времени? (В.В. Радзиевский связывал с негравитационными эффектами отрицательные значения A , но результат возведения в дробную степень не может быть отрицательным числом.) И, как следствие первых двух, какой выбор появлений 1 и 2 является предпочтительным? Поскольку семейство Юпитера есть как

Таблица 1: Значения A (в а. е.), вычисленные для пар появлений кометы Дарре по элементам орбиты из SBDB.

	1678	1851	1857	1870	1877	1890	1897	1910	1923	1943	1950	1963	1970	1976	1982	1989	1995	2002	2009
2015	—	6.60	6.48	—	4.35	4.25	4.38	11.35	4.69	4.90	4.73	4.68	5.60	5.61	5.17	5.18	4.83	4.60	4.99
2009	—	6.83	6.68	1.14	4.47	4.38	4.47	—	4.76	4.92	4.76	4.73	5.65	5.65	5.20	5.20	4.67	2.20	
2002	—	6.95	6.78	1.29	4.40	4.32	4.42	—	4.67	4.86	4.70	4.66	5.69	5.70	5.27	5.28	5.16		
1995	1.49	7.21	7.00	2.92	4.50	4.42	4.50	—	4.75	4.89	4.75	4.72	5.72	5.73	5.29	5.30			
1989	3.86	—	26.37	4.65	4.88	4.81	4.84	4.36	5.03	5.05	4.98	4.98	6.05	6.05	4.76				
1982	3.87	—	35.44	4.65	4.88	4.81	4.84	4.37	5.03	5.05	4.98	4.98	6.07	6.07					
1976	4.84	4.55	4.54	5.34	5.33	5.28	5.29	5.26	5.45	5.40	5.36	5.39	6.11						
1970	4.82	4.49	4.47	5.32	5.32	5.27	5.27	5.24	5.44	5.39	5.35	5.38							
1963	8.65	5.87	5.82	5.56	7.75	—	2.18	5.71	4.64	5.49	4.93								
1950	7.61	5.80	5.75	5.44	5.76	7.23	9.79	5.58	4.76	6.31									
1943	7.40	5.82	5.78	5.54	5.94	6.82	7.46	5.65	5.11										
1923	13.29	6.03	5.97	5.98	3.14	3.31	3.88	6.07											
1910	2.60	6.01	5.91	6.31	5.53	5.32	5.34												
1897	7.39	5.69	5.65	5.13	4.49	5.52													
1890	7.72	5.69	5.65	5.09	3.57														
1877	8.82	5.80	5.75	5.31															
1870	—	—	6.05	5.97															
1857	5.04	4.66																	
1851	5.06																		



в старой, так и в новой классификации [4], элементы орбиты кометы этого семейства, имеющей долгую историю наблюдений, могут быть применены для калибровки методики, и только после этого постоянная Радзиевского-Тиссерана станет инструментом решения вопроса о существовании семейств Сатурна, Урана и Нептуна.

2. Методика и результаты расчетов

В данной работе элементы орбит взяты из онлайн-сервиса Лаборатории реактивного движения [5]. В Small-Body Database Browser (SBDB) находятся элементы, полученные из наблюдений. Их изменения от появления к появлению кометы могут быть следствием как различных по природе возмущений, так и ошибок наблюдений. Через веб-интерфейс системы HORIZONS получены элементы, являющиеся результатом численного интегрирования с параметрами, имеющимися в системе; изменения этих элементов свободны от ошибок наблюдений, но зависят от модели негравитационных эффектов. Через telnet-интерфейс HORIZONS параметры объекта могут быть заданы пользователем (в данном случае это элементы последнего появления кометы из SBDB, но без негравитационных параметров).

Комета Дарре (6P) — представитель семейства Юпитера (афелийное расстояние $Q = 5.646$ а. е.), наблюдается с 1678 г., имеет почти постоянные негравитационные параметры. В табл. 1 приведены значения A для всех пар появлений кометы Дарре по элементам орбиты из SBDB и соответствующая гистограмма распределения количества пар появлений N . Прочерки означают отрицательные значения $A^{3/2}$, жирным шрифтом выделены рассматриваемые отдельно пары взаимно дальних (в углу) и близких (на диагонали) по времени появлений. Подобные вычисления были выполнены также по элементам из HORIZONS с негравитационными эффектами и без них. Статистические параметры распределения N по A по всем вариантам вычислений — средние и медианные значения A , а также среднеквадратические отклонения σ_A — даны в табл. 2. Лишь в трех случаях из 11 (27%) отрицательные значения $A^{3/2}$ достоверно связаны с негравитационными эффектами. В пяти случаях (45%) они сохраняются и при учете только гравитационных возмущений. В остальных трех случаях причинами могут быть как немоделируемая часть негравитационных эффектов, так и ошибки наблюдений. Разница между параметрами, вычисленными по элементам из наблюдений и из численного интегрирования с негравитационными эффектами, не носит качественного характера.

Наиболее близка к большой полуоси орбиты Юпитера ($a_{\text{Ю}} = 5.204$ а. е.) медиана A кометы Дарре без негравитационных эффектов по парам взаимно дальних появлений, однако она сильно изменяется от негравитационных эффектов и имеет большую дисперсию. По совокупности всех факторов (меньшая дисперсия, меньшие негравитационные эффекты, близость к $a_{\text{Ю}}$) наиболее устойчивыми для дальнейших вычислений можно считать среднее по парам взаимно близких появлений и медиану по всем парам появлений. Негравитационные эффекты увеличивают дисперсию.

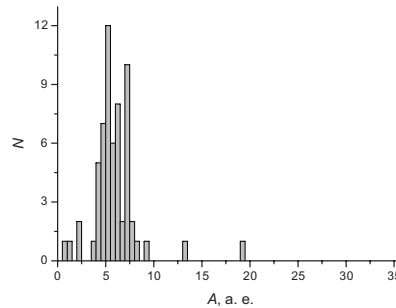
Комета Тутля (8P) по старой классификации относилась к семейству Сатурна ($Q = 10.373$ а. е.), наблюдается с 1790 г. На основании вышеизложенного, для нее получены результаты, представленные в табл. 3 и 4. Главный максимум распределения N по A находится в области орбиты Юпитера, около орбиты Сатурна ($a_{\text{С}} = 9.582$ а. е.) особенностей нет. Среднее A по всем наблюдениям близко к $a_{\text{С}}$, но, как показано на примере кометы Дарре, этот параметр не устойчив (это значение возникает от усреднения всего с одной сильно выпадающей парой появлений).

Таблица 2: Статистические параметры распределения количества пар появлений кометы Дарре по A , вычисленные по элементам орбиты из SBDB и HORIZONS.

	Параметр	По наблюдениям	С негравитационными эффектами	Без негравитационных эффектов
По всем парам появлений	$N(A^{3/2} < 0)$	11	8	5
	Среднее A , а. е.	5.62	5.77	5.37
	Медиана A , а. е.	5.27	5.27	5.29
	σ_A , а. е.	3.06	4.21	1.76
	Среднее A , а. е.	5.95	5.65	5.58
Взаимно дальние появления	Медиана A , а. е.	4.47	4.44	5.23
	σ_A , а. е.	5.21	5.27	2.16
	Среднее A , а. е.	5.15	5.13	5.16
Взаимно близкие появления	Медиана A , а. е.	5.30	5.30	5.31
	σ_A , а. е.	0.93	0.93	0.85

Таблица 3: Значения A (в а. е.), вычисленные для пар появлений кометы Тутля по элементам орбиты из SBDB.

	1790	1858	1871	1885	1899	1912	1926	1939	1967	1980	1994
2007	7.23	7.33	6.61	7.09	19.21	1.08	—	200.16	6.35	7.14	4.96
1994	6.65	6.34	6.09	6.27	7.33	—	13.06	7.93	5.82	5.92	
1980	7.27	7.57	6.32	7.03	2.50	4.20	3.67	2.26	5.59		
1967	8.41	—	7.40	—	4.43	4.66	4.42	4.20			
1939	6.12	4.91	5.08	5.01	0.96	5.32	4.89				
1926	5.87	4.91	5.04	4.97	4.40	6.14					
1912	5.90	5.10	5.16	5.14	4.93						
1899	6.32	5.26	5.30	5.31							
1885	7.42	5.58	5.27								
1871	9.24	5.36									
1858	7.15										

Таблица 4: Статистические параметры распределения количества пар появлений кометы Тутля по A , вычисленные по элементам орбиты из SBDB и HORIZONS.

	Параметр	По наблюдениям	Без негравитационных эффектов
По всем парам появлений	Среднее A , а. е.	9.11	7.36
	Медиана A , а. е.	5.71	5.81
	σ_A , а. е.	24.59	8.74
	Среднее A , а. е.	5.43	5.44
Взаимно близкие появления	Медиана A , а. е.	5.31	5.30
	σ_A , а. е.	0.74	0.76

3. Заключение

Рассмотрены особенности практического применения постоянной Радзиевского-Тиссерана. Показано, что Юпитер является основным возмущающим телом для кометы Тутля, по старой классификации типичной кометы семейства Сатурна.

Автор благодарен заведующей научной библиотекой ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН» Елене Владимировне Костылёвой за предоставление необходимой литературы.

Работа выполнена за счет средств субсидии 3.6714.2017/8.9, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

Список литературы

1. V. P. Tomanov, *Kometnyj Tsirkulyar*, **328**, 1984.
2. V. V. Radzievskii and V. P. Tomanov, *Sov. Astron.*, **30**, 121, 1986.
3. O. A. Gorshkova and V. V. Kuzmichev, *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, **22**, 208, 2006.
4. B. G. Marsden, *P&SS*, **57**, 1098, 2009.
5. J. D. Giorgini, D. K. Yeomans, A. B. Chamberlin, P. W. Chodas, et al., in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #28*, 25.04, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts (1996).

Опыт развертывания метеорной сети на юге России

Рычков Д.А.¹, Короткий С.А.², Вида Д.³

¹ООО «Газпром Трансгаз Краснодар», Анапа, Россия

²Обсерватория Ка-Дар, Нижний Архыз, Россия

³Университет Западного Онтарио, Лондон, Канада

В статье дается обзор опыта развертывания любительской метеорной сети на юге России. Проведен обзор некоторых существующих систем регистрации метеоров, опробована новая конструкция камер и программное обеспечение. В течение 2019 г. были развернуты метеорные станции в пяти пунктах, собраны данные наблюдений по метеорам и болидам. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Experience of deployment of a meteor network in the south of Russia

Rychkov D.A.¹, Korotky S.A.², Vida D.³

¹Gazprom Transgaz Krasnodar LLC, Anapa, Russia

²Ka-Dar Observatory, Nizhny Arkhyz, Russia

³University of Western Ontario, London, Canada

This article gives an overview of deployment of an amateur video meteor network in Southern Russia. We compare several existing video meteor systems, and test new low-light cameras and software. During 2019, five meteor stations were deployed and a variety of meteor and fireball data was collected. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.007

1. Введение

Для телевизионных наблюдений метеоров используется множество вариантов оборудования. Можно назвать и видеокамеры, и гибридные системы с оптико-электронными преобразователями, и специализированные системы. До последнего времени считалось, что стоимость метеорной станции, даже любительской, должна составлять внушительную сумму. Типовой комплект [1] состоял из камеры Watec WAT-902H2 Ultimate (~300€), сверхсветосильного объектива 6 mm F0.8 Copmutar (~200€), персонального компьютера (~500€), фреймграббера Matrox Meteor II (~550€), ПО MetRec (250€) (бесплатно для непрофессионального использования) или ПО UFOCaptureV2 (155€). С учетом того, что в комплект метеорной станции также входят термокожух и кабельная продукция, можно сказать, что стоимость комплекта для телевизионных наблюдений метеоров превышает 1200€. Такой порядок затрат препятствовал развитию сети метеорных станций в среде любителей астрономии.

Неоднократно предпринимались попытки снизить стоимость метеорной станции. Так, например, было предложено использовать охранные видеокамеры с новыми чувствительными 1/3" сенсорами Sony ExView HAD CCD II вместо более дорогих камер Watec-902H2 [2]. Одним из авторов этой статьи, Д.А. Рычковым, был проведен удачный опыт сборки нескольких метеорных камер используя 1/1.8" сенсор [3]. Камеры этой конструкции сейчас применяются в метеорных станциях сети IMO[4] в Германии, Венгрии и Португалии.

В связи с непрерывным процессом усовершенствования технических средств безопасности (видеонаблюдения) и развитием интернет торговли мы имеем большое предложение доступных компонентов, которые можно использовать для сборки бюджетного варианта метеорных станций.

2. Конструкция метеорных станций сети, их размещение и особенности работы

В процессе выбора конструкции метеорной станции рассматривались широко используемые варианты, такие как UFOCapture [5], MetRec [6], и новая система, представленная Денисом Вида — RMS (RPi Meteor Station) [7]. Сравнение приведено в табл. 1.

Было принято решение брать за основу конструкцию камер, используемых в хорватской метеорной сети и программный продукт RMS [8]. Во всех метеорных станциях нашей сети используются однотипные модули камер и объективы, что способствует стандартизации оборудования и повторяемости наблюдений.

Метеорные установки состоят из IP модулей IVG-HP203Y-AE производства Hangzhou Xiongmai Technology, где применяется обратноосвещенный CMOS сенсор Sony IMX291, и светосильного F0.95 объектива Dongguan Yutong Optical Technology с высоким (2 мегапикселя) разрешением. Такая связка камеры и объектива позволяет получать проникание до 6^m по звездам и до 4.5^m по метеорам при поле зрения 88° × 47°. Характеристики камер и объективов приведены в табл. 2.

Таблица 1: Сравнение некоторых современных систем регистрации метеоров, по состоянию на октябрь 2019 г.

	UFOCaptureV2 (SonotaCo)	UFOCapture HD2 (SonotaCo)	MetRec	RMS (Croatian Meteor Network)
Стоимость программного обеспечения	~12 000 руб.	~16 000 руб.	–	–
Стоимость аппаратной части метеорной станции (без учета видеокамеры)	~7 000 руб.	~50 000 руб.	~8 000 руб.	~6 000 руб.
Возможность использования видеокамеры с разрешением выше чем D1	–	+	–	+
Автоматическая работа станции и выгрузка результатов	±	±	–	+
Открытый код, возможность модернизации ПО	–	–	–	+

Таблица 2: Характеристики камер и объективов, используемых в сети.

Сенсор модуля камеры	Sony Starvis IMX291 1/1.28" BSI CMOS	
Используемое разрешение / количество кадров	1280 × 720 / 25 кадров в сек	
Фокусное расстояние объектива	6 мм	3.6 мм
Сектор обзора	53.7° × 29.9°	88.2° × 47.0°
Угловое разрешение метеорной камеры	151 arcsec/pixel	234 arcsec/pixel
Проницание по метеорам	<5 lm	<4.5 lm

Высокое разрешение IP камер (1280 × 720) практически в два раза больше чем аналоговых PAL D1 (720 × 576). Использование высокого разрешения позволяет одной камере покрывать большее пространство неба, выполняя сравнимую по точности с аналоговой камерой астрометрию. В результате, для покрытия неба будет требоваться меньшее количество камер, то есть дальнейшее снижение стоимости метеорной сети.

В целом, затраты на самостоятельную сборку метеорной станции этой конструкции не превышают 20 тыс. рублей (в ценах на февраль 2020 г.). В эту сумму входит вся номенклатура необходимого оборудования — камера, объектив, кожух с подогревом, мини компьютер, кабель и т.д.

Для записи и обработки наблюдений используются недорогие одноплатные компьютеры Raspberry Pi 3 Model B+. Программное обеспечение RMS, разработанное Денисом Вида (Университет Западного Онтарио, Канада) выполняет широкий круг задач: захват видео — начинается в сумерках, останавливается на рассвете, сжатие блоками по 256 кадров в формате Four-frame Temporal Pixel (FTP) [9] и запись на SD-карту, обнаружение болидов в режиме реального времени. После рассвета запись видео прекращается и начинается этап автоматической обработки: обнаружение метеоров в сжатых FTP-файлах, извлечение звезд из сжатых FTP-файлов, калибровка астрометрии и фотометрии каждого обнаруженного метеора, автоматическая загрузка откалиброванных обнаружений на центральный сервер. На сервере Университета Западного Онтарио сохраняются все первичные видеозаписи обнаружений метеорных явлений и результаты обработки наблюдений. Срок хранения архивов на SD-карте емкостью 64 гигабайт зависит от количества обнаруже-

Таблица 3: Перечень метеорных станций сети по состоянию на октябрь 2019 г.

Пункты наблюдения, условное наименование	Код метеорной камеры	Координаты, высота места установки, м (WGS84)	Азимут / высота центра поля зрения, °	Используемый объектив
Анапа	RU0001	N 44.890667° E 37.315346° 23 м	22.1° / 28.8°	6 мм
Ильский	RU0002	N 44.791462° E 38.583642° 210 м	337.1° / 28.9°	3.6 мм
Н. Архыз	RU0003	N 43.649570° E 41.425374° 2020 м	348.3° / 28.8°	3.6 мм
	RU0004		251.1° / 28.3°	3.6 мм
	RU0008		80.7° / 32.7°	3.6 мм
	RU0009		169.1° / 29.4°	3.6 мм
	RU000E		201.9° / 66.7°	3.6 мм
	RU000F		352.7° / 68.4°	3.6 мм
	RU000A		обзор всего неба	1.25 мм
Черкесск	RU000B	N 44.375515° E 41.983534° 429 м	185.7° / 38.8°	3.6 мм
	RU000C		272.5° / 49.3°	3.6 мм
Азов	RU0007	N 47.099233° E 39.426292° 36 м	212.4° / 25.0°	6 мм

ний, на основании опыта эксплуатации можно сказать, что это время около 60 дней. Затем новые данные начинают затирать старые.

Первая камера сети была установлена в г. Анапа в ноябре 2018 г., тогда же начаты метеорные наблюдения в одиночном режиме. Вторая камера сети, установленная в частной обсерватории L71 Vedrus вблизи п. Ильский Краснодарского края начала работу 7 апреля 2019 г., с этого времени ведутся базисные наблюдения метеоров.

По состоянию на октябрь 2019 г. постоянно работают 4 пункта наблюдения, пункты расположены на территории Краснодарского края — г. Анапа, п. Ильский) и Карачаево-Черкесской Республики (п. Нижний Архыз — обсерватория Ка-Дар, п. Эркен-Шахар). Готовится к запуску в эксплуатацию пункт наблюдения в г. Азов Ростовской области.

Пункт наблюдения в п. Нижний Архыз имеет сплошное покрытие всего неба полем зрения камер метеорного патруля. Это достигнуто тем, что четыре камеры ориентированы по сторонам света, от горизонта и до угла возвышения 50°, две камеры перекрывают область зенита. Работы выполнены по инициативе и на средства С.А. Короткого. В его обсерватории также проходит опробование камера обзора всего неба с объективом типа «рыбий глаз».

Базис между камерами в г. Анапа и п. Ильский составляет 101 км, между пунктами наблюдения «Нижний Архыз» и «Черкесск» — 92 км. Такие расстояния между станциями обеспечивают хорошие условия базисных наблюдений. Всего в работе двенадцать камер (табл. 3).

3. Метеорные наблюдения сети

В самом начале нашей деятельности произошло событие, которое существенно повлияло на скорость развития сети. 30 января 2019 г. в 18.48 UTC камера RU0001 в г. Анапа зафиксировала очень яркий болид. Длительность события составила около 7 секунд, очевидцами отмечались несколько вспышек, фрагментация и громкие звуковые эффекты. Благодаря тому, что событие наступило в период вечернего времени, когда немалое количество людей находилось вне своих домов, явление получило широкую огласку в СМИ и социальных сетях. Восемь очевидцев отправили информацию о своих наблюдениях в ИМО, код события 504-2019 [10]. Также болид был зафиксирован камерой обзора всего неба в частной обсерватории астронома любителя Олега Милантьева, функционирующей в фоторежиме (п. Ильский Краснодарского края). Несмотря на то, что болид видело немалое количество людей, не удалось отыскать других записей пролета на технических средствах видеозаписи. То есть, падение болида зафиксировали только те камеры, которые были специально установлены для наблюдения за небом, чтошний раз подчеркивает необходимость развития болидных (метеорных) сетей на всей территории России.

Таблица 4: Орбитальные элементы болида от 30 января 2019 г.

a , а.е.	e	q , а.е.	ω	Ω	i	π
1.9142	0.605	0.754372	247.7316°	310.179°	2.8453°	197.91065°
± 0.1143	± 0.0234	± 0.0020	$\pm 0.5765^\circ$	$\pm 0.0006^\circ$	$\pm 0.0980^\circ$	$\pm 0.5759^\circ$



Рис. 1: Распределение количества спорадических метеоров по абсолютной звездной величине.

Траектория и орбита болида была рассчитана Денисом Вида с использованием программного пакета WesternMeteorPyLib [11]. Подробнее об алгоритмах этого ПО можно узнать из источников — [12, 13]. Яркость болида оценена как $-12 \dots -14^m$. Геоцентрический радиант $R.A. = 122.70946^\circ (\pm 0.4073^\circ)$, $Dec = +26.19793^\circ$. Орбитальные элементы болида (на эпоху J2000) приведены в табл. 4. Высота загорания болида определена как 86.7 км (± 825.78 м), скорость входа 19.3 км/с (± 0.38), высота затухания 28.1 (± 158.56 м) км, скорость при затухании 3.5 км/с.

Предполагаемый район рассеивания осколков рассчитан методом [14] и находится к северо-западу от г. Новороссийск, на склонах гор между ст. Раевская и п. Верхнебаканский. Но поиски фрагментов были признаны нецелесообразными по причине труднодоступной местности и предполагаемого малого количества (0.1 кг) выпавшего вещества.

Всего за 2019 г. камерами нашей сети было зарегистрированы шесть ярких болидов, по каждому были рассчитаны траектории и орбиты с использованием программного пакета WesternMeteorPyLib. Исходя из данных о скоростях входа и высотах затухания, все эти болиды были обозначены как полностью сгоревшие в атмосфере, исключая болид от 30 января 2019 г.

За девять месяцев работы сети, с апреля по декабрь 2019 г., по результатам базисных наблюдений одиннадцати камер нами было получено около 13000 орбит качества Q1. Наблюдения велись непрерывно, орбиты метеоров были рассчитаны с использованием программного продукта UFOOrbitV2 [5]. Доля спорадических метеоров составила около 30%. На рис. 1 представлено распределение по яркости числа спорадических метеоров за 2019 г. Данное распределение практически совпадает с представленным в работе «Анализ спорадического метеорного фона по наблюдениям ИНАСАН» [15], притом что камеры нашей сети в большинстве своем имеют существенно большее поле зрения.

Авторами статьи установлены контакты с администраторами европейской базы данных метеорных сетей — European viDeo MeteOr Network Database (EDMOND) [16]. Предполагается на регулярной основе выгружать данные наших наблюдений в базу EDMOND. Также данные по характеристикам орбит метеоров, рассчитанные по базисным наблюдениям, доступны на интернет-странице проекта Global Meteor Network¹. Эти данные выпущены под лицензией CC BY 4.0², общедоступны для использования, с обязательной ссылкой на источник.

4. Заключение

В результате наших наблюдений накоплен материал, который может представлять интерес для различных исследований метеорной астрономии.

¹<https://globalmeteonetwork.org/data/>

²<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Высокая производительность метеорных станций достигнута благодаря новой новому программному обеспечению, а также характеристикам астроклимата в южных регионах России, в особенности в горных районах Кавказа.

Простая и недорогая конструкция метеорных станций могла бы послужить основой для широкого распространения метеорных сетей по всей России, привлечь к наблюдениям массу любителей астрономии, популяризировать полезные с научной точки зрения исследования в среде школьников и студентов.

Предлагаем определить порядок взаимодействия между российским научным сообществом и любителями, увлекающимися метеорной астрономией, организовать какой-либо центр сбора данных о наблюдениях метеоров и болидов.

Список литературы

1. I. Yrjola, *CCD Video Camera for Meteor observing*, URL <http://www.kolumbus.fi/oh5iy/astro/ccd.html>.
2. D. Samuels, J. Wray, P. S. Gural, and P. Jenniskens, in J. L. Rault and P. Roggemans, eds., *Proceedings of the International Meteor Conference, Giron, France, 18-21 September 2014*, 66–73 (2014).
3. S. Molau, S. Crivello, R. Goncalves, C. Saraiva, E. Stomeo, J. Strunk, and J. Kac, *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, **47**, 38, 2019.
4. URL <http://www.imonet.org/>.
5. URL http://sonotaco.com/soft/e_index.html.
6. S. Molau, in *Proceedings of the International Meteor Conference, 17th IMC, Stara Lesna, Slovakia, 1998*, 9–16 (1999).
7. D. Vida, D. Zubović, D. Šegon, P. Gural, and R. Cupec, in A. Roggemans and P. Roggemans, eds., *International Meteor Conference Egmond, the Netherlands, 2-5 June 2016*, 307 (2016).
8. URL <https://github.com/CroatianMeteorNetwork/RMS>.
9. P. Jenniskens, P. S. Gural, L. Dynneson, B. J. Grigsby, K. E. Newman, M. Borden, M. Koop, and D. Holman, *Icarus*, **216**, 40, 2011.
10. URL https://fireball.amsmeteors.org/members/imo_view/event/2019 /504.
11. *Python meteor physics library*, URL <https://github.com/wmpg/Western-MeteorPyLib>.
12. D. Vida, P. S. Gural, P. G. Brown, M. Campbell-Brown, and P. Wiegert, *MNRAS*, **491**, 2688, 2020.
13. D. Vida, P. G. Brown, M. Campbell-Brown, P. Wiegert, and P. S. Gural, *MNRAS*, **491**, 3996, 2020.
14. Z. Ceplecha, J. Borovička, W. G. Elford, D. O. Revelle, R. L. Hawkes, V. Porubčan, and M. Šimek, *Space Sci. Rev.*, **84**, 327, 1998.
15. A. P. Kartashova and G. T. Bolgova, *INASAN Science Reports*, **4**, 300, 2019.
16. L. Kornoš, J. Koukal, R. Pišfil, and J. Tóth, in M. Gyssens, P. Roggemans, and P. Zoladek, eds., *Proceedings of the International Meteor Conference, Poznan, Poland, 22-25 August 2013*, 23–25 (2014).

Спекл-интерферометрия астероида 3200 Фаэтон

Алешин В.П.¹, Балега Ю.Ю.², Бескакетов А.С.², Дьяченко С.В.², Максимов А.Ф.²

¹Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Москва, Россия

²САО РАН пос. Нижний Архыз, Россия

После выступления Т. Галушиной на предыдущей конференции «Околоземная астрономия 2017» нас заинтересовал астероид 3200 Фаэтон с точки зрения использования возможностей спекл-интерферометрии. 16 декабря 2017 г. удалось провести сеанс его наблюдений спекл-интерферометром видимого диапазона. Работа продолжает исследования САО РАН по астероидной тематике, начатые в 1990-х гг. (Балега, Максимов, Плужник, Дудинов, Дьяченко и др.). Была проведена спектральная обработка полученных короткоэкспозиционных изображений, анализ результатов и сравнение с априорной информацией. Оценены размеры астероида и асимметрия изображений. Рассмотрены возможности радиолокационных наблюдений астероидов и использования радиоизображений радара Аресибо. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Speckle interferometry of asteroid 3200 Phaeton

Aleshin V.P.¹, Balega Yu.Yu.², Beskakotov A.S.², Dyachenko V.V.², Maximov A.F.²

¹Stock Company Research-and-Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Moscow, Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Zelenchukskaya, Nizhniy Arkhyz, Karachai-Cherkessia 369167, Russia

After T. Galushina's talk at the previous conference “Near-Earth Astronomy 2017”, we were interested in the asteroid 3200 Phaeton in terms of using the capabilities of speckle interferometry. On December 16, 2017, it was possible to conduct a speckle observation session with an visible range interferometer. The work continues the research of the SAO RAS on asteroid topics, begun in the 1990s (Balega, Maximov, Pluzhnik, Dudinov, Dyachenko et al.). Spectral processing of the obtained short-exposure images, analysis of the results, and comparison with a priori information were carried out. Asteroid sizes and image asymmetry are estimated. The possibilities of radar observations of asteroids and observations of the Arecibo radar are considered. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.008

1. Введение

Одним из классических методов получения изображений на дифракционном пределе разрешения в оптической астрономии является спекл-интерферометрия. Данный метод восходит к работам Лабейри, Нокса, Томсона, Вайгельта и др. [1]. Методы спекл-интерферометрии впервые в России были реализованы САО РАН [2]. Показано, что в астрономических наблюдениях (в первую очередь, двойных и кратных звезд) достигнут дифракционный предел инструмента (апертура 6 м) — 0.02'' при минимальной яркости астрономического объекта 13^m. В случае ПЗС матрицы с электронным усилением заряда проникающая способность может быть доведена до 15^m [3]. Принципы спекл-интерферометрии и особенности биспектральной обработки приведены в [4, 5].

2. Наблюдения

Наблюдения астероида 3200 Фаэтон проводились на 6-метровом телескопе САО РАН в ночь 16–17 декабря 2017 г. на спекл-интерферометре БТА (Максимов и др., 2009 [3]). Было накоплено 13 серий объекта с экспозициями 50 мс и 100 мс в фильтрах 450/50, 550/20, 700/50 и 800/100 нм. Количество кадров в серии составляло от 2000 до 4000. Примеры полученных спекл-интерферометрических изображений астероида 3200 Фаэтон (слева) и опорной звезды *hpr2565* (справа) в фильтре 700/50 нм приведены на рис. 1.

Размер изображения 512 × 512 пикселей, масштаб 8.9 мсд на пиксел. Траектория прохождения астероида приведена на рис. 2, а параметры прохождений — на рис. 3.

3. Результаты обработки

Угловой размер астероида находится по классическому методу, использованному, например, при определении углового размера Бетельгейзе (см. [6]).

При анализе использовались усредненные спектры мощности (см. рис. 4). В соответствии с указанным методом оценка линейного размера астероида с учетом дальности составила порядка 5 км. Принципы оценки асимметрии изображений и конкретные результаты наблюдений на примере звезды *Mira* R Leo изложены в [7]. В качестве анализируемой информации используются усредненные спектры мощности в полярных

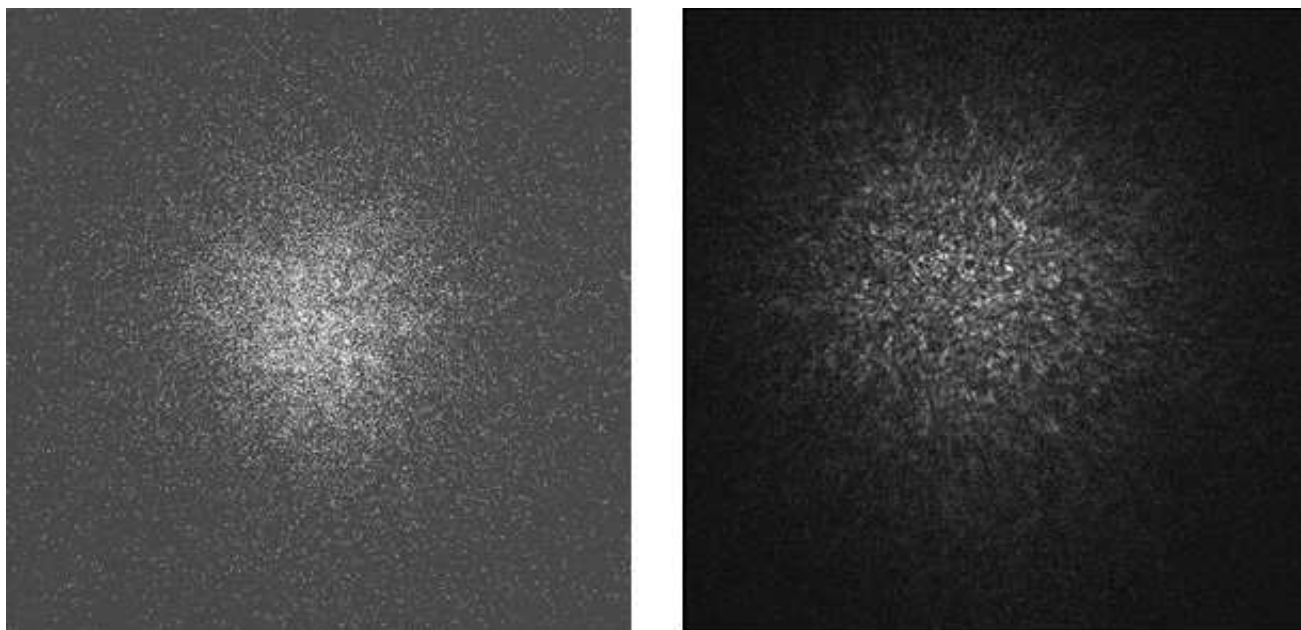


Рис. 1: Спекл интерферограммы астероида 3200 Фазтон (слева) и опорной звезды hip2565 (справа)

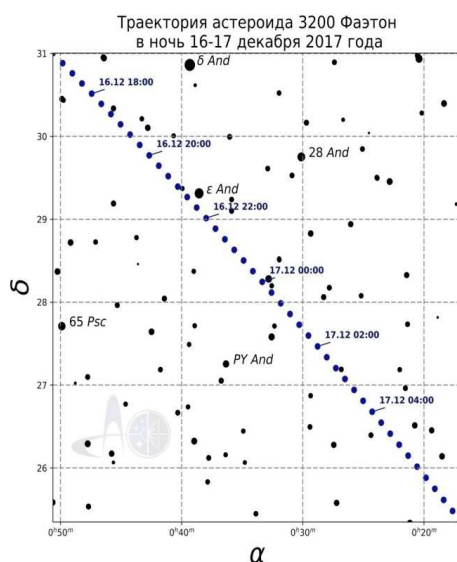


Рис. 2: Траектория прохождения астероида

координатах (рис. 5). Признаком асимметрии является неоднородная (отличная от прямой линии) граница спектра мощности. Асимметрия изображений вызвана наличием заметного фазового угла освещенности Солнцем (элонгация на рис. 3). Традиционный фазовый угол равен 180° — элонгация — угол между радиус-векторами астероида и Земли. В данном сеансе наблюдений фазовый угол Фазтона составлял $52\text{--}66^\circ$. Большинство звезд обычно имеют осесимметричное распределение яркости и обладают менее асимметричными относительно центра усреднения мощностями. Увеличенная асимметрия является признаком астероида.

4. Радиолокационные наблюдения

По уровню развития теории и техники радиолокации СССР был в числе мировых лидеров. Одними из первых радиолокационных наблюдений астероидов были наблюдения в ИРЕ РАН под руководством А.Л. Зайцева [8]. При достижении порогового уровня сигнал — шум метод показал высокую эффективность. Радиолокация астероидов активно развивается в США. На рис. 6 изображено двумерное изображение рассматриваемого астероида Фазтон в координатах доплеровская частота-радиальная дальность. Наблюдения выполнены

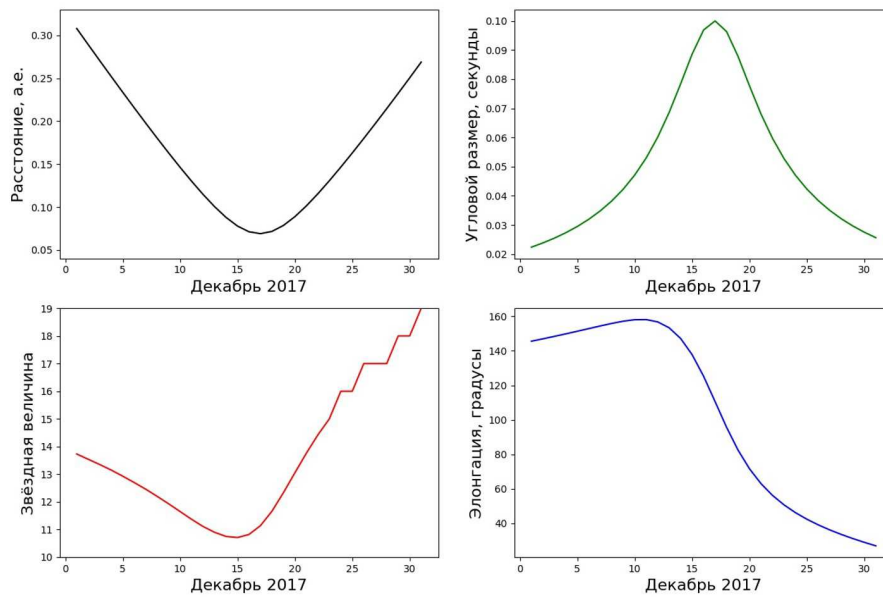


Рис. 3: Параметры прохождения астероида

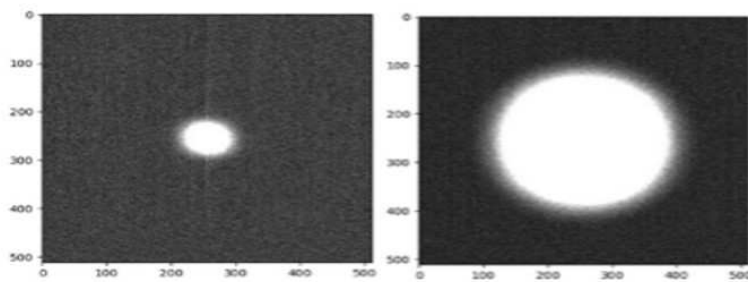


Рис. 4: Мощность спектра астероида (слева) и звезды (справа)

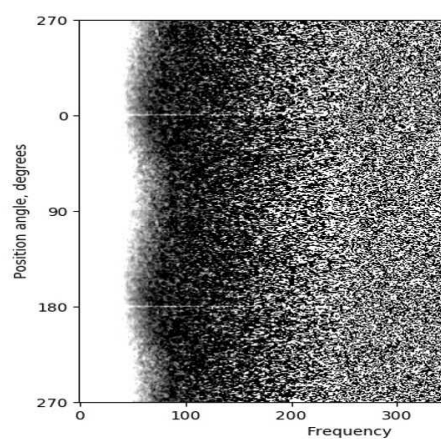


Рис. 5: Мощность в полярных координатах

на радиолокаторе Аресибо. Проводились и совместные двухпозиционные эксперименты Россия-США с использованием радара Голдстейн и пункта в Евпатории. В 1970–80 гг. в СССР интенсивно исследовались вопросы построения радиоизображений, включая низкие спутники. Были исследованы алгоритмы синтеза радиоизображений и разработаны программы решения фазовой проблемы. Проводились экспе-



Рис. 6: Радиоизображение астероида

риментальные работы в ИРЕ-Фрязино, Рязанском радиотехническом институте, РТИ, НИИДАР. Исследования завершились НИР (НИИДАР). В 1992 г. на основе сделанного задела была сформирована программа НИОКР «Портрет», посвященная проблемам радиоизображений. Ведущей организацией была выбрана МАК «Вымпел». В роли исполнителей планировались основные радиолокационные отраслевые и научные предприятия СССР. Основные усилия предполагалось направить на получение радиоизображений низкоорбитальных космических объектов. Рассматривались также и астероиды, которые являются довольно медленными объектами, что упрощает синтезирование апертуры. Наиболее подходящими для поставленных задач являются параболические антенны. Например, в качестве антенн можно было использовать антенны в Евпатории, Медвежьих Озерах. Применение фазированных решеток в данной задаче ограничивается направлениями близкими к нормали апертуры из-за возникающих фазовых проблем. К сожалению, из-за политических проблем программа «Портрет» не получила развития. За истекший период многие страны продвинулись в области радиоизображений. Так КНР разработала радиотелескоп (FAST) по схеме, аналогичной Аресибо с размером апертуры 500 м.

5. Заключение

1. Спекл-интерферометрия позволяет наряду с решением задач по физике звезд проводить анализ геометрии и характеристик движения астероидов.
2. Как показали эксперименты, весьма актуально продолжить исследования по получению радиоизображений объектов в околоземном пространстве, как астероидов, так и ИСЗ с использованием имеющегося задела.

Список литературы

1. A. Labeyrie, *Astronomy and Astrophysics*, **6**, 85, 1970.
2. Y. Balega and N. Tikhonov, *Pis'ma Astron.*, **3**, 497, 1977.
3. A. Maksimov, Y. Balega, and V. Dyachenko, *Astrophysical Bulletin*, **64**, 296, 2009.
4. V. P. Aleshin, Y. Y. Balega, A. F. Maksimov, S. L. Komarinsky, and D. D. Novgorodtsev, *Vestnik of SibSAU*, **39**, 154, 2011.
5. V. P. Aleshin, Y. Y. Balega, E. A. Grishin, A. F. Maksimov, E. V. Malogolovets, S. L. Komarinsky, D. D. Novgorodtsev, and V. D. Shargorodsky, *Electromagnetic waves and electronic systems*, **16**, 9, 2011.
6. Y. Balega, A. Blazit, D. Bonneau, L. Koechlin, R. Foy, and A. Labeyrie, *Astron. Astrophys.*, **115**, 253, 1982.
7. V. Dyachenko, Y. Balega, A. Beskakotov, A. Maksimov, and D. Rastegaev, *Astrophysical Bulletin*, **39**, 154, 2016.
8. A. L. Zaitsev, *Phd thesis IRE*, **1**, 1, 1997.

Исследование точности оптических телескопов с использованием данных международной лазерной сети

Соколов И.С.^{1,2}

¹ПАО МАК «Вымпел», Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

В работе представлен алгоритм оценивания орбит по измерениям лазерных дальнометров, учитывающий различные факторы. Точность прогноза на одни сутки достигает единиц метров. Затем, по оцененной орбите вычисляются продольные и поперечные ошибки для угловых наблюдений оптических телескопов. Влияние различных поправок рассмотрено на примере орбиты спутника Ajisai. По материалам доклада на XI международной конференции «Околоземная астрономия и космическое наследие» (30 сентября – 4 октября 2019 г., Казань).

Research of the accuracy of optical telescopes according to the data of International Laser Ranging Service

Sokolov I.S.^{1,2}

¹OJSC “Vimpel”, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

The article presents an algorithm for estimating orbits by measurements from laser rangefinders that takes into account various physical factors. The accuracy of prediction for one day reaches few meters. Then, along position and transversal errors for angular measurements by optical telescopes are calculated based on the estimated orbit. The influence of various corrections is considered on the orbit of the Ajisai satellite. Based on a talk presented at the XI International Conference “Near-Earth Astronomy and Space Heritage” (Sep 30 – Oct 4, 2019, Kazan, Russia).

DOI: 10.26087/INASAN.2020.5.2.009

1. Введение

Высокоточные измерения движения космических объектов необходимы для решения многих научных и прикладных задач: исследование моделей влияния атмосферы на торможение спутников и их совершенствование, повышение точности работы навигационных спутниковых систем, предупреждение с высокой точностью опасных сближений космических объектов и других.

Оптические телескопы обладают принципиальной возможностью получать угловые измерения положений космических объектов с высокой точностью, однако иногда возникают систематические и аномальные ошибки. Для повышения достоверности оптических измерений необходим регулярный контроль их качества. Контроль случайной составляющей ошибки и выявление аномальных измерений можно проводить автономно, а систематическая составляющая ошибок не может контролироваться без привлечения внешних данных. Такими данными являются лазерные измерения дальности международной лазерной сети, имеющие сантиметровую точность.

2. Поправки для лазерных измерений

Лазерные данные берутся из двух источников: EDC (EUROLAS Data Center)¹ и ILRS (International Laser Ranging Service)². Следует отметить, что данные из этих двух источников могут иметь достаточно сильное пересечение, нужно учитывать этот факт, чтобы в расчетах не использовались одни и те же данные повторно.

В данной работе используются данные формата `npt_crd`, с полным описанием которого можно ознакомиться на сайте ILRS³. Формат имеет блочную структуру, где каждый блок представляет собой рабочую сессию лазерной станции наблюдения и содержит данные о начале сессии, рабочей станции, периоде наблюдения объекта, конфигурации системы, характеристиках лазера, метеорологических условиях, самих измерениях (момент излучения сигнала и задержку) и другие.

Для каждой сессии записывается трек, включающий отметки времени момента излучения, задержки сигнала, метеорологические данные, характеристики лазера и положение станции (положение станции берется с сайта ILRS⁴). На основе этих измерений вычисляется дальность

$$D = c \frac{\tau}{2},$$

¹ftp://edc.dgfi.tum.de/pub/slr/data/npt_crd

²ftp://cdsis.gsfc.nasa.gov/slr/data/npt_crd

³https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/data_and_products/formats/crd.html

⁴<https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/network/stations/active/index.html>

где D — дальность, $c = 299792458$ м/с — скорость света, τ — задержка сигнала лазерного дальномера.

Первая рассматриваемая поправка — поправка времени, возникающая из-за перемещения объекта наблюдения за время распространения сигнала. Вычисленная дальность на самом деле относится к моменту отражения сигнала от объекта, а не к моменту излучения сигнала лазером, поэтому поправка времени выглядит следующим образом:

$$T_{\text{refl}} = T_{\text{emit}} + \frac{\tau}{2},$$

где T_{refl} — момент отражения сигнала, T_{emit} — момент излучения сигнала.

Вторая рассматриваемая поправка — коррекция точки отражения. Из-за того, что спутник имеет свои геометрические характеристики, а не является точкой, то следует учитывать его размер. Для объектов сложной формы эту поправку невозможно ввести, потому что нет данных об ориентации спутника в пространстве на каждый момент времени, но для некоторых сферических спутников эта поправка известна из работ [1, 2] и указана на сайте ILRS⁵. Для сферических объектов, чья поправка не известна, введем ее как радиус сферы. Таким образом:

$$D_{\text{CoM}} = D + \Delta_{\text{CoM}},$$

где D_{CoM} — исправленная дальность на размер спутника, Δ_{CoM} — коррекция точки отражения.

Третья рассматриваемая поправка — рефракционная поправка дальности, возникающая при прохождении сигнала через атмосферу. В данной работе используется модель Мендеса-Павлиса, с подробным описанием, которой можно ознакомиться в работах [3, 4]. Сначала вычисляется зенитная поправка к дальности

$$d_z = d_h + d_{nh},$$

где d_z — зенитная поправка к дальности, d_h — гидростатическая (hydrostatic) компонента зенитной поправки, d_{nh} — негидростатическая (non-hydrostatic) компонента. Гидростатическая компонента является функцией длины волны, широты, высоты станции над уровнем моря, давления у поверхности Земли. Негидростатическая компонента является функцией длины волны, широты, высоты над уровнем моря, температуры и относительной влажности. Затем вычисляется поправка к дальности путем умножения зенитной поправки на функцию пересчета (mapping function)

$$\Delta_{\text{refr}} = M d_z,$$

$$M = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin(\gamma) + \frac{a}{\sin(\gamma) + \frac{b}{\sin(\gamma) + c}}},$$

где Δ_{refr} — рефракционная поправка, M — функция распределения (mapping function), a, b, c — вычисляемые коэффициенты, γ — угол места.

Таким образом:

$$D_{\text{refr}} = D - \Delta_{\text{refr}},$$

где D_{refr} — исправленная на рефракцию дальность. Или

$$D_{\text{cor}} = D + \Delta_{\text{CoM}} - \Delta_{\text{refr}},$$

где D_{cor} — полностью исправленная дальность.

3. Оценивание орбиты по лазерным измерениям

Ниже рассматривается постановка задачи оценивания. Пусть траектория однозначно определяется вектором состояния X , соответствующим некоторому моменту времени. Обозначим $D_t = \phi_t(X)$ функциональную связь соответствующих моменту времени τ_t , $t = 0, \dots, n-1$ дальностей ИСЗ с вектором состояния X . Под треком объекта будем иметь в виду вектор

$$y = (\hat{D}_0, \dots, \hat{D}_{n-1})^T$$

измерений дальностей $Y = (D_0, \dots, D_{n-1})^T$. Вектор Y связан с оцениваемым вектором состояния X уравнением

$$Y = h(X) + \epsilon,$$

где $\epsilon = (\epsilon_0, \dots, \epsilon_{n-1})$ — вектор ошибок измерений. В общем случае функция $h(X)$ нелинейная, поэтому рассматривается разложение этой функции в ряд Тейлора в некоторой опорной точке $\hat{x}_0$ с точностью до линейного члена

$$h(x) = h(\hat{x}_0) + \frac{\partial h(\hat{x}_0)}{\partial x}(x - \hat{x}_0) = Ax + a,$$

⁵https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/missions/spacecraft_parameters/center_of_mass.html

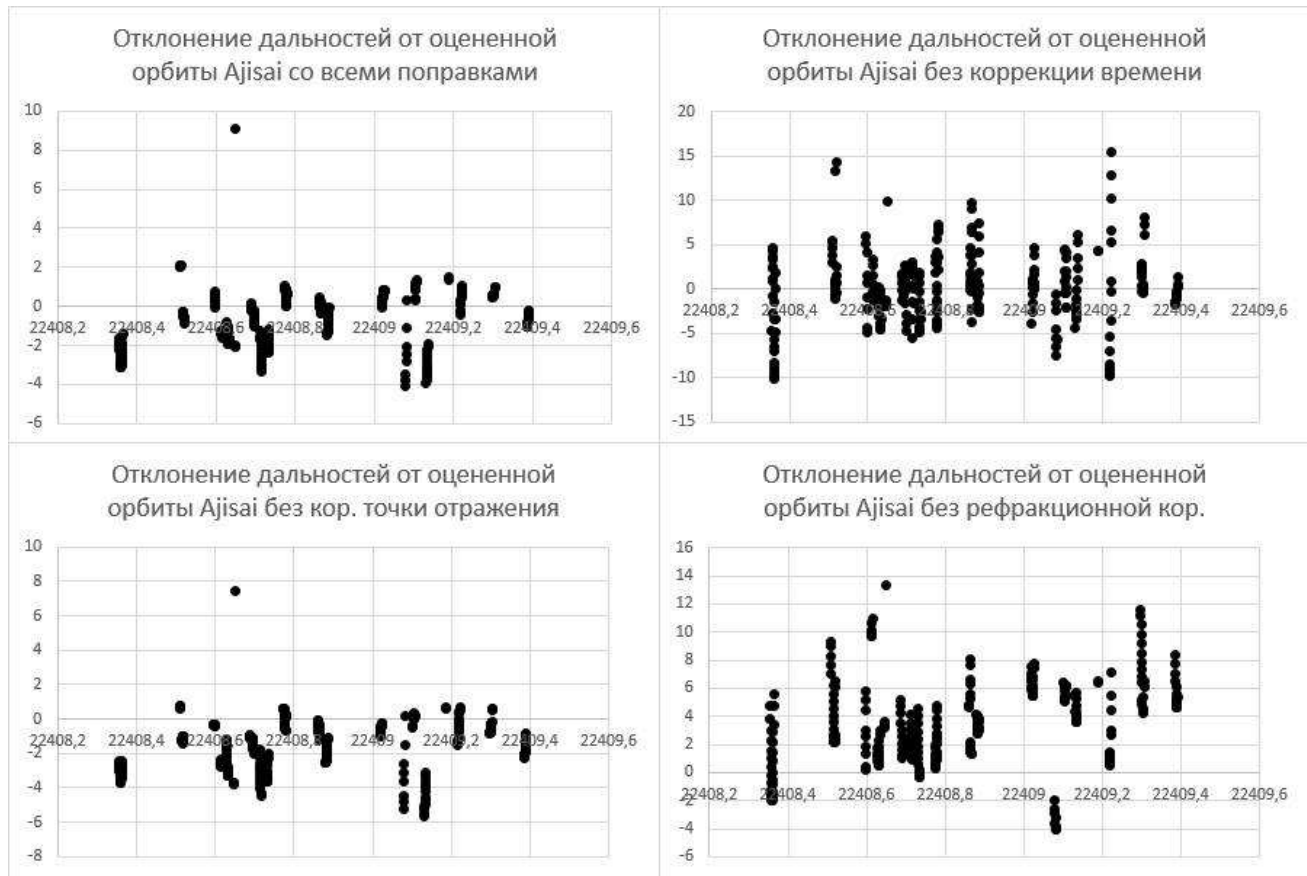


Рис. 1: Разница дальностей между оцененной орбитой и лазерными измерениями. По вертикали отложено отклонение в метрах, по горизонтали отложена юлианская дата в днях от 0 часов 31.12.1957.

$$A = A(\hat{x}_0) = \frac{\partial h(\hat{x}_0)}{\partial x},$$

где матрица A имеет размер $[1 \times k]$. Тогда

$$Y = \frac{\partial h(\hat{x}_0)}{\partial x} x + h(\hat{x}_0) - \frac{\partial h(\hat{x}_0)}{\partial x} \hat{x}_0 + \epsilon$$

или в матричном виде

$$Y = Ax + a + \epsilon.$$

Задача в такой постановке может решаться классическим методом — методом наименьших квадратов (МНК).

На рис. 1 рассматривается влияние поправок на точность оценивания орбит на примере орбиты спутника Ajisai. Номер в каталоге NORAD — 16908; наклонение — 50° ; эксцентриситет — 0.001; перигей — 1490 км; форма и размер спутника — сфера 214 см в диаметре.

Также видно, что каждая поправка вносит существенный вклад в точность оценивания орбиты. Рассматривался достаточно крупный спутник, поэтому коррекция точки отражения вносила существенный вклад, если будут рассматриваться спутники меньшего размера (десятки сантиметров), то вклад в точность оценивания будет небольшим, практически неопределимым. Понятно, что ошибка по времени будет вносить вклад пропорционально высоте орбиты, чем выше спутник — тем больше ошибка по времени.

4. Поправки для угловых измерений оптических телескопов

При оптических наблюдениях за космическими объектами на измерения оказывает влияние множество факторов. В данной работе рассматривается три наиболее важных из них: вращение Земли вокруг Солнца, конечность скорости света и атмосферная рефракция.

Первая рассматриваемая коррекция — годовая абберация. Абберация — явление, возникающее из-за конечности скорости света и относительности движения объекта наблюдения и наблюдателя; выражается в кажущемся смещении объекта наблюдения. Выделяют 3 составляющие абберации: суточная (связанная с суточным вращением Земли вокруг Солнца), годовая (связанная с движением Земли вокруг Солнца), вековая (связанная с движением Солнца). Вековая абберация учитывается во время первичной обработки,

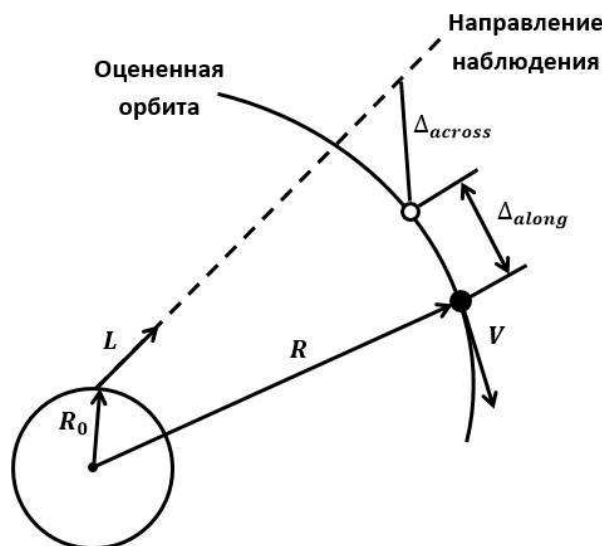


Рис. 2: Физика продольной и поперечной ошибок.

когда кадры привязываются к звездам из каталога. Суточная абберрация составляет десятые доли угловых секунд. Поэтому в данной работе рассматривается только годичная абберрация, вносящая большую ошибку. Для вычисления данной поправки используется реализация библиотеки NOVAS (Naval Observatory Vector Astrometry Software) версии 3.1C. С описанием библиотеки можно ознакомиться в документации по ссылке [5].

Вторая рассматриваемая коррекция — рефракционная поправка. Свет, отраженный от ИСЗ, а затем принятый телескопом, подвергается искажению атмосферой, но с другой стороны, свет от звезд точно так же искажается в атмосфере Земли, однако можно считать, что звезды находятся на бесконечном расстоянии, что нельзя сказать про спутники, которые находятся на небольшом расстоянии от Земли. Для вычисления этой поправки также используется библиотека NOVAS.

Третья вводимая поправка — коррекция времени. Следует отметить, что телескоп фиксирует не реальное положение объекта на момент снимка, а положение объекта, когда свет отражался от спутника. Для вычисления данной поправки требуется расстояние от телескопа до спутника на момент измерения.

$$r = \sqrt{(x_{\text{tel}} - x_{\text{sat}})^2 + (y_{\text{tel}} - y_{\text{sat}})^2 + (z_{\text{tel}} - z_{\text{sat}})^2},$$

где r — расстояние от телескопа до спутника, $x_{\text{tel}}, y_{\text{tel}}, z_{\text{tel}}$ — координаты телескопа, $x_{\text{sat}}, y_{\text{sat}}, z_{\text{sat}}$ — координаты спутника (используется прогнозируемое положение спутника на момент измерения по орбите, оцененной по лазерным данным). Тогда время измерения изменяется следующим образом:

$$T_{\text{cor}} = T - \frac{r}{c},$$

где T_{cor} — исправленный момент времени, T — момент привязки кадра ко времени, c — скорость света.

5. Вычисление продольных и поперечных ошибок измерений оптических телескопов

Для наглядности лучше сравнивать не разницу наблюдаемых угловых величин и угловых величин, полученных из прогнозируемого положения КО, которое вычисляется из орбиты оцененной по лазерным измерениям, а вычислять продольные и поперечные ошибки. На рис. 2 показано определение вычисляемых ошибок. Продольная ошибка — сдвиг вдоль орбиты до максимального сближения с направлением наблюдения; поперечная ошибка — минимальное расстояние от оцененной орбиты до направления наблюдения.

Введем следующие обозначения:

$\mathbf{R}$ — вектор положения КО по прогнозу на момент измерения,

$\mathbf{V}$ — вектор скорости КО по прогнозу на момент измерения,

$\mathbf{R}_0$ — вектор положения наблюдателя,

$\mathbf{L}$ — единичный вектор направления наблюдения,

Δ_{along} — продольная ошибка,

Δ_{across} — поперечная ошибка,

Ω — скорость вращения Земли.

Тогда формульно продольные и поперечные ошибки будут вычисляться следующим образом:

$$\mathbf{V}' = \mathbf{V} + \begin{bmatrix} \Omega \\ -\Omega \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{R}_0,$$

$$\mathbf{E}_1 = \frac{\mathbf{R} - \mathbf{R}_0}{|\mathbf{R} - \mathbf{R}_0|},$$

$$\mathbf{E}_2 = \frac{\mathbf{V}' - (\mathbf{V}', \mathbf{E}_1) \mathbf{E}_1}{|\mathbf{V}' - (\mathbf{V}', \mathbf{E}_1) \mathbf{E}_1|},$$

$$\mathbf{E}_3 = [\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2],$$

$$\Delta_{\text{along}} = (\mathbf{L}, \mathbf{E}_2),$$

$$\Delta_{\text{across}} = (\mathbf{L}, \mathbf{E}_3).$$

6. Исследование точности телескопа

Спутник Ajisai наблюдался телескопом ПАО МАК «Вымпел» в Чистополе 15 мая 2019 г. В табл. 1 представлены угловые измерения прямого восхождения и склонения в радианах (Ra, Dec), где Jd — полная юлианская дата. В табл. 2 представлены продольные и поперечные ошибки в угловых секундах без применения поправок (Along, Acr), с коррекцией абберации (Along1, Acr1), с коррекцией абберации и времени (Along2, Acr2), со всеми коррекциями (Along3, Acr3).

На рис. 3 представлены поперечные и продольные ошибки в угловых секундах для телескопа в Чистополе по орбите спутника Ajisai, наблюдаемого этим телескопом 15 мая 2019 г.

Из рис. 3 видно, что большее влияние на точность измерений оказывает абберация. На продольную ошибку заметно влияет поправка времени, которая на поперечную ошибку практически не оказывает влияния, что понятно, потому что коррекция времени является сдвигом вдоль орбиты на время распространения света от спутника до телескопа. Самой незначительной (доли угловых секунд) является рефракционная

Таблица 1: Угловые измерения спутника Ajisai, наблюдаемого телескопом ПАО МАК «Вымпел» в Чистополе 15 мая 2019 г.

№	JD	Ra	Dec
1	2458619.42990248	4.61711294486869	0.394272574874866
2	2458619.43001683	4.65958648459757	0.401789394168421
3	2458619.43013059	4.70214382545902	0.408453095021175
4	2458619.43024516	4.74524737723545	0.41433760535799
5	2458619.43035923	4.78822407570077	0.419317339729863
6	2458619.43047396	4.83136662098179	0.423450838367362
7	2458619.43058821	4.87424356907811	0.426696377303755

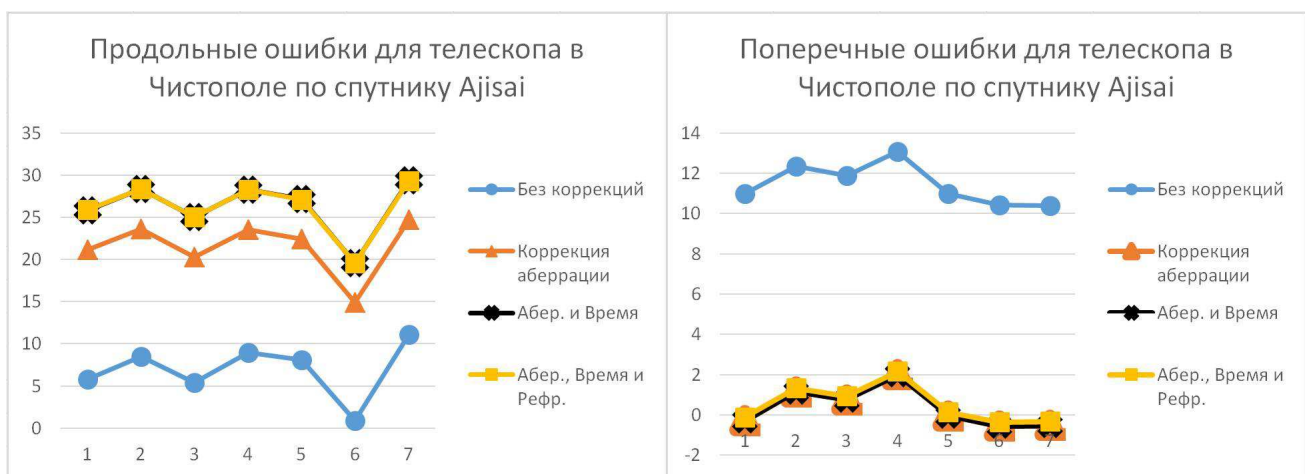


Рис. 3: Продольные и поперечные ошибки телескопа в Чистополе по орбите спутника Ajisai. По вертикали отложена ошибка в угловых секундах, по горизонтали отложен номер измерения в треке.

Таблица 2: Продольные и поперечные ошибки для угловых измерений спутника Ajisai, наблюдаемого телескопом ПАО МАК «Вымпел» в Чистополе 15 мая 2019 г.

№	Along	Acr	Along1	Acr1	Along2	Acr2	Along3	Acr3
1	5.76	10.98	21.15	-0.29	25.86	-0.29	25.88	-0.11
2	8.49	12.35	23.64	1.15	28.37	1.15	28.37	1.33
3	5.42	11.89	20.31	0.75	25.03	0.75	25.02	0.93
4	8.96	13.07	23.56	1.99	28.27	1.99	28.25	2.17
5	8.12	10.99	22.42	-0.04	27.14	-0.04	27.11	0.14
6	0.91	10.42	14.87	-0.55	19.57	-0.55	19.53	-0.36
7	11.07	10.39	24.69	-0.52	29.37	-0.52	29.32	-0.33

поправка. График продольной ошибки со всеми коррекциями (желтый) сильно смещен в положительную область (в среднем больше 25 угловых секунд), что может свидетельствовать о незначительной ошибке в привязке ко времени измерений из-за, например, сбоя GPS-приемника.

7. Заключение

Разработанные алгоритмы позволяют поддерживать высокую точность оценивания орбит спутников, которые наблюдаются международной лазерной сетью, т.к. по большинству спутников данные поступают после каждой ночи. Высокоточные орбиты помогают отслеживать точность телескопов, проверять работоспособность новых компонентов или алгоритмов, оперативно реагировать на сбои.

Список литературы

1. T. Otsubo and G. M. Appleby, *Journal of Geophysical Research*, **108**, 2003.
2. T. Otsubo, R. A. Sherwood, G. M. Appleby, and R. Neubert, *Journal of Geodesy*, **89**, 2015.
3. V. B. Mendes and E. C. Pavlis, *Geophysical Research Letters*, **31**, 2004.
4. V. B. Mendes, G. Prates, E. C. Pavlis, D. E. Pavlis, and R. B. Langley, *Geophysical Research Letters*, **29**, 2002.
5. G. H. Kaplan, J. A. Bangert, E. G. Barron, J. L. Bartlett, W. Puatua, W. Harris, and P. Barrett, in *IAU Joint Discussion*, P24, IAU Joint Discussion (2012).

Содержание

<i>Еретнова О.В., Дудоров А.Е.</i> Статистика падений метеоритов и болидов	41
<i>Иванов А.Л., Иванов В.А., Лысенко В.Е., Антипин С.В., Иванова Н.В., Яковенко Н.А., Молотов И.Е., Воропаев В.А., Захваткин М.В.</i> Наблюдения КА «Спектр-Р» и «Спектр-РГ» в Кубанском государственном университете	46
<i>Кузнецов Э.Д., Розаев А.Е., Плавалова Е., Сафронова В.С.</i> Оценка возраста пары астероидов на близких орбитах (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39	52
<i>Глазачев Д.О., Подобная Е.Д., Попова О.П., Светцов В.В., Шувалов В.В.</i> Аппроксимационные соотношения для эффектов излучения от больших метеорных взрывов и небольших кратеро- образующих импактов	56
<i>Хамитов И.М., Гумеров Р.И., Бикмаев И.Ф., Мельников С.С., Иртуганов Э.Н., Окуян Г., Окуян О.</i> Комплексные исследования астероидов километрового размера, сближающихся с Землей, на 1.5 м российско-турецком телескопе РТТ-150	61
<i>Усанин В.С.</i> К вопросу о существовании семейства Сатурна: постоянные Радзиевского-Тиссерана для комет Дарре и Туттля	65
<i>Рычков Д.А., Короткий С.А., Vida D.</i> Опыт развертывания метеорной сети на юге России	69
<i>Алешин В.П., Балега Ю.Ю., Бескакотов А.С., Дьяченко С.В., Максимов А.Ф.</i> Спекл-интерферо- метрия астероида 3200 Фаэтон	74
<i>Соколов И.С.</i> Исследование точности оптических телескопов с использованием данных междуна- родной лазерной сети	78

Contents

<i>Eretnova O.V., Dudorov A.E.</i> The statistics of meteorite and bolide falls	41
<i>Ivanov A.L., Ivanov V.A., Lysenko V.E., Ivanova N.V., Yakovenko N.A., Molotov I.E., Voropaev V.A., Zakhvatkin M.V.</i> Observation of the spacecraft “SPECTR-R” and “SPECTR-RG” at the Kuban State University	46
<i>Kuznetsov E.D., Rosaev A.E., Plavalova E.³, Safronova V.S.</i> Age estimation of asteroid pair with close orbits (21436) Chaoyichi — (334916) 2003 YK39	52
<i>Glazachev D.O., Podobnaya E.D., Popova O.P., Svetsov V.V., Shuvalov V.V.</i> Scaling relations for the effects of radiation from large airbursts and small crater-forming impacts	56
<i>Khamitov I.M., Gumerov R.I., Bikmaev I.F., Melnikov S.S., Irtuganov E.N., Okuyan G., Okuyan O.</i> Complex studies of kilometer sized NEAs by the 1.5m Russian-Turkish telescope RTT-150 telescope	61
<i>Usanin V.S.</i> Concerning the existence of the Saturn family: Radzievskij-Tisserand constants for comets 6P/d’Arrest and 8P/Tuttle	65
<i>Rychkov D.A., Korotky S.A., Vida D.</i> Experience of deployment of a meteor network in the south of Russia	69
<i>Aleshin V.P., Balega Yu.Yu., Beskakotov A.S., Dyachenko V.V., Maximov A.F.</i> Speckle interferometry of asteroid 3200 Phaeton	74
<i>Sokolov I.S.</i> Research of the accuracy of optical telescopes according to the data of International Laser Ranging Service	78