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



# ISSN 2658-5669 НАУЧНЫЕ ТРУДЫ института РАН Консерство конститута РАН Консерство Керовтво









москва 2023

УДК 52 ББК 22.6 H34

## НЗ4 Научные труды Института астрономии РАН. Том 8(4). -

М.: Изд-во Янус-К, 2023, 36 с., илл.

ISSN 2658-5669 e-ISSN 2712-8318

Редколлегия

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

Ответственный редактор Исакова П.Б. 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, звёздной астрономии, физике Солнца, небесной механике, астрономическим методам и приборам, космическим исследованиям и исследованиям в области космической геодезии.

> © ИНАСАН, 2023 © Коллектив авторов, 2023

## INASAN Science Reports. Vol 8(4). M.: Janus-K, 2023, 36 pp.

ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

## **Editorial Board**

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

Managing Editor P.B. Isakova 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, 2023 © Author team, 2023

Сдано в набор 14.12.2023. Подписано в печать 18.12.2023 Формат 60х90/8. Бумага офсетная. Уч.-изд. п.л. 4,5. Физ. п.л. 4,5. Тираж 100. Заказ №7831

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

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

Научные труды Института астрономии РАН. Том 8 (4)

Научное издание



## Предварительные результаты фотометрии геостационарных КА в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах

Коробцев И.В., Еселевич М.В.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

В работе приводятся результаты применения коммерчески доступного фотоприемного устройства ближнего инфракрасного диапазона (0.9–1.7 мкм) в составе фотометрической аппаратуры телескопа АЗТ-ЗЗИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН. Определены параметры инструментальной фотометрической системы и коэффициенты перехода в стандартную систему. Сбор фотометрической информации в широком диапазоне длин волн начат по ряду геостационарных космических аппаратов с целью определения показателей цвета и поиска возможных идентификационных признаков для различных спутниковых платформ. Показаны и проанализированы результаты измерений, описаны характеристики ИК-приемника, методика наблюдений и редукции данных.

Поступила в редакцию 31.03.2023 г. Принята в печать 01.05.2023 г.

Ключевые слова: фотометрия, геостационарная орбита, инфракрасный диапазон

## Preliminary results of photometry of geostationary satellites in the optical and near infrared ranges

Korobtsev I.V., Eselevich M.V.

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

Using results of the commercially available near-IR (0.9–1.7 mkm) photodetector as a photometrical equipment of the AZT-33IK telescope in Sayan solar observatory are presented in the work. The parameters of the instrumental photometric system and coefficients for transformation to the standard system were obtained. The collection of photometric information in the wide range of wavelengths has been started for set of geostationary satellites with aim to determine color indexes and searching for possible identification features of different satellite busses. The results of measurements are presented and analyzed; parameters of the IR detector, observation and data reduction methods are described.

Received 31.03.2023. Accepted 01.05.2023.

Keywords: photometry, geostationary orbit, infrared range

**DOI:** 10.51194/INASAN.2023.8.4.001

## 1. Введение

Многополосные фотометрические измерения на наземных оптических телескопах позволяют получать дополнительные сведения о космических аппаратах (KA) и космическом мусоре (KM). По наборам кривых блеска и фазовым зависимостям можно оценить форму, размеры объекта наблюдений, параметры движения вокруг центра масс, а также отслеживать изменения этих параметров во времени [1]. Фотометрическая информация в стандартных, хорошо определенных и обеспеченных широким набором стандартных звезд фотометрических системах позволяет более детально изучить строение и состав поверхности, применяемые конструкционные материалы [2, 3, 4]. Расширение диапазона наблюдений в ИК-область дает возможность расширить набор признаков по некоординатной информации в задаче идентификации различных спутниковых платформ и изучить спектральные характеристики отражающих поверхностей КА [5, 6].

Идея использования цветовых индексов в полосах видимого диапазона исследовалась уже в ранних работах по фотометрии КА [7, 8]. В настоящее время в работах [9, 10, 11] показано как фотометрические показатели цвета используются в качестве инструмента для идентификации спутниковых платформ и определения параметров их конструкции (формы, размера, спектрального состава отражающих поверхностей). Одной из особенностей, присутствующей в наблюдениях большинства активных стабилизированных КА, является увеличенное отражение солнечного излучения в красной области спектра. Показатели цвета КА, определяемые как отношение потоков в фильтрах BVRI, на 0.1–0.5<sup>m</sup> больше солнечного. Это хорошо согласуется с результатами, приведенными в работе [12], по лабораторным измерениям спектральных свойств элементов солнечных батарей разных производителей. Хотя они имеют различный вид, детальную классификацию КА на основе только оптических показателей цвета построить достаточно сложно из-за незначительных отличий в коэффициенте отражения в диапазоне спектра 0.4–0.9 мкм, а также влияния погрешностей, вносимых сложными зависимостями блеска от условий освещения.

Откалиброванные с использованием звезд-аналогов Солнца спектры низкого разрешения двух геостационарных КА в диапазоне длин волн от 0.6 до 2.6 мкм из работы [13] показаны на рис. 1. Видно, что на длинах волн более 1 мкм происходит резкое увеличение отражательной способности этих КА, что характерно для спектров отражения материалов солнечных батарей.



Рис. 1: Нормированные спектры отражения двух геостационарных КА из работы [13].

В недавних работах [5, 6, 14] предприняты попытки охарактеризовать свойства отраженного излучения различных КА и КМ с использованием показателей цвета в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне. В этой статье приведены результаты собственных наблюдений ряда геостационарных КА в полосах оптического и ближнего инфракрасного диапазона, описаны характеристики используемой ИК-камеры, методика наблюдений и калибровки данных.

### 2. Параметры ИК-фотометра на основе камеры Xeva-1.7-320

Камера Xeva-1.7-320 фирмы Xenics (Бельгия) [15] одна из немногих коммерчески доступных камер ближнего инфракрасного диапазона. В камере установлен КМОП-приемник на основе InGaAs со спектральной чувствительностью в диапазоне 0.9–1.7 мкм. Зависимость квантовой эффективности приемника от длины волны показана на рис. 2.

Размер приемника составляет  $320 \times 256$  пикселя, размер пикселя —  $30 \times 30$  мкм. Регистрируемая область неба в фокусе телескопа АЗТ-33ИК составляет  $\approx 1.1 \times 0.9$  угл. мин. Камера снабжена трехступенчатым Пельтье-охладителем с отводом тепла с помощью обдува вентилятором и возможностью охлаждения приемника до 223 К. Разрядность АЦП — 14 разрядов, подключение к компьютеру — через интерфейс USB 2.0. Программное обеспечение управления камерой основано на библиотеках, предоставленных поставщиком ИК-камеры. Предусмотрены два режима считывания: low gain (LG) — низкое усиление, high gain (HG) — высокое усиление. Режим высокого усиления подходит для регистрации предельно слабых сигналов, а режим низкого усиления используется для ярких источников. В лабораторных условиях по сериям кадров с разным уровнем освещенности были оценены параметры:



Рис. 2: Зависимость квантовой эффективности камеры Xeva-1.7-320 от длины волны.

- коэффициент усиления  $-7 \bar{e}/ADU (HG), 50 \bar{e}/ADU (LG),$
- средний шум считывания 220 ē (HG), 1000 ē (LG),
- темновой ток при  $t=-50^{\circ}{\rm C}-36500~{\rm \bar{e}/c/n}$ икс.

На рис. 3 показана экспериментально измеренная зависимость величины темнового тока от температуры детектора. Видно, что охлаждение приемника ниже температуры –50°С не приводит к существенному снижению темнового тока. Использование камеры в условиях обсерватории показало, что имеется возможность охлаждения приемника до температуры –50.–60°С в зависимости от сезона (лето-зима), т. е. работать при минимально возможных уровнях темнового сигнала.

Отклик камеры, построенный по измерениям постоянного источника сигнала с разными экспозициями, показывает, что камера имеет существенную нелинейность и особенно сильно нелинейность проявляется в режиме LG (рис. 4). Для избегания проблем с калибровками потоков в режиме LG измерения проводились с постоянной экспозицией 2 с. В целом режим HG по шуму, чувствительности и линейности больше подходит для измерения слабых космических объектов.

Блок светофильтров был установлен непосредственно перед ИК-камерой в турели, которая приводится во вращение с помощью шагового двигателя. Окна турели содержат фильтры  $J_{MKO}H_{MKO}$  стандартной фотометрической системы [16], а также непрозрачный экран и окно без фильтра для наблюдения и калибровки. На рис. 5 показано спектральное пропускание применяемых фильтров  $J_{MKO}H_{MKO}$  и реальное пропускание с учетом чувствительности приемника.



Рис. 3: Экспериментальная зависимость темнового тока камеры Xeva-1.7-320 от температуры детектора.



Рис. 4: Измерения постоянного источника сигнала (звезды) с разными экспозициями на камере Xeva-1.7-320 в режиме LG (слева) и HG (справа). Пунктирная прямая соответствует линейному отклику камеры.



Рис. 5: Пунктирные линии — спектральное пропускание фильтров J<sub>MKO</sub>H<sub>MKO</sub>, сплошные линии — с учетом чувствительности ИК-приемника.

Количественным критерием точности измерения световых потоков от астрономических источников принимается величина отношения сигнала к шуму SNR, определяемая формулой [17]:

$$SNR = \frac{N_m t}{\sqrt{(N_m + N_{\rm S})t + n_{\rm pix}(N_{\rm D}t + N_{\rm R}^2)}},$$

где  $N_m$  — число фотонов в единицу времени от объекта звездной величины  $m, N_{\rm S}$  — число фотонов в единицу времени от фона неба, приходящихся на один пиксель, t — время экспозиции, с,  $N_{\rm R}$  — шум считывания,  $\bar{\rm e}, N_{\rm D}$  — темновой сигнал,  $\bar{\rm e}/{\rm c}/{\rm пикс.}, n_{\rm pix}$  — число пикселей приемника, которые занимает изображение объекта. Предельной звездной величиной  $m_{\rm пред}$  или проницающей способностью телескопа для заданных характеристик фотоприемной аппаратуры, оптической системы, фоновых условий и времени экспозиции считается такой блеск объекта, при котором SNR = 3. На рис. 6 показан расчет проницающей способности в ближнем ИК-диапазоне с камерой Xeva-1.7-320 (режим HG) на телескопе АЗТ-33ИК в полосах  $J_{\rm MKO}$  и  $H_{\rm MKO}$ . Предельная звездная величина при экспозиции t = 2 с составила в полосе  $J_{\rm MKO} - 13.3^{\rm m}$ , в полосе  $H_{\rm MKO} - 13^{\rm m}$ . Фон неба при расчетах в полосах  $J_{\rm MKO}$  и  $H_{\rm MKO}$  принимался равным, соответственно, 16.5<sup>m</sup>/угл. с<sup>2</sup> и 14.4<sup>m</sup>/угл. с<sup>2</sup>. Основным источником шума, определяющим проницающую способность системы, является достаточно большой шум считывания приемника Xeva-1.7-320.

### 3. Обработка изображений и калибровка данных

Наблюдения в оптическом диапазоне проводились в фильтрах BVRI производства фирмы FLI, близких к стандартной системе Джонсона-Казинса. В ближнем инфракрасном диапазоне использовались интерференционные фильтры J<sub>MKO</sub>H<sub>MKO</sub>. Время экспозиции и продолжительность серии подбирались в зависимости от яркости объекта и предполагаемого периода ее изменения.

После записи серии измерений объекта в тех же фильтрах измерялись стандартные звездные поля для последующей калибровки блеска объекта. В качестве стандартов использовались звезды из каталога APASS [18], включающего измерения звезд в полосах BV системы Джонсона и g'r'i' Слоановского обзора. Переход от звездных величин в полосах g'r'i' Слоановского обзора к RI системы Джонсона-Казинса осуществлялся по уравнениям, приведенным в [19]. В ближнем ИК-диапазоне выбирались звезды с ошибками  $\sigma_{\rm m} < 0.03^{\rm m}$  из каталога 2MASS [20].



Рис. 6: Расчетные зависимости отношения сигнала к шуму от времени экспозиции для объектов с блеском 10–13<sup>m</sup> в камере Xeva-1.7-320 на телескопе АЗТ-33ИК: слева — для полосы J<sub>MKO</sub>, справа — для полосы H<sub>MKO</sub>.



Рис. 7: Пример изображения с камеры Xeva-1.7-320 до (слева) и после (справа) учета калибровочных кадров.

Стандартные площадки подбирались из условия максимальной близости к объекту наблюдения. Обработка кадров проводилась в пакетах APEXII [21] и AstroImageJ [22] в следующей последовательности:

- Для всех кадров, содержащих изображения объектов и плоских полей, проводилась процедура вычитания среднего кадра темнового тока, полученного для такой же экспозиции и температуры, что и кадры с изображениями и плоскими полями. Сигнал смещения при нулевой экспозиции (bias) в этом случае вычитается вместе с темновым током;
- Деление кадров с изображением объектов на нормированный на среднее значение кадр плоского поля в соответствующем фильтре;
- Приведение цифровых отсчетов приемника в каждом кадре к единицам в секунду;
- Вычисление инструментальных звездных величин по формуле:

$$m_{\rm instr} = -2.5 * \lg I,$$

где I — сумма интенсивностей пикселей внутри выбранной апертуры за вычетом фона неба.

Важным этапом редукции данных является переход к стандартным заатмосферным звездным величинам. Инструментальная система ближнего инфракрасного диапазона отличается от стандартной, используемой в каталоге 2MASS системы. Аналогично, пропускание оптического BVRI-фотометра будет немного отличаться от Джонсоновской стандартной системы. Построение системы уравнений перехода является необходимым этапом инструментальных калибровок. Для преобразования инструментальных звездных величин в стандартную систему для каждого фильтра используется следующая система уравнений [23]:

$$M = m_{\text{instr}} - k * X(z) + E * CI + NP,$$

где M — стандартная звездная величина в данном фильтре,  $m_{\text{instr}}$  — инструментальная звездная величина, CI — показатель цвета, E — коэффициент преобразования для данного фильтра, NP — нуль-пункт, k — коэффициент экстинкции, X(z) — воздушная масса для объекта на зенитном расстоянии z в момент измерения.

Коэффициенты преобразования (E и NP) вычислялись с использованием метода наименьших квадратов. Средняя точность приведенных ПЗС-наблюдений с фильтрами BVRI составила 0.01–0.03<sup>m</sup>, в фильтрах  $J_{MKO}H_{MKO}$  — до 0.04<sup>m</sup>.

Поскольку камера Xeva-1.7-320 характеризуется высоким значением пространственного шума и темнового тока, то уже на этапе визуализации кадров применялась процедура вычитания темнового кадра и деления на плоское поле. Пространственный шум создается неравномерностью чувствительности между элементами фотоприемной матрицы и является характеристикой стабильной во времени, обусловленной технологией изготовления приемника. Неравномерность чувствительности вызывает различную амплитуду сигнала между элементами, что существенно снижает возможность обнаружения слабого сигнала на кадре. На рис. 7 приведены примеры изображения слабоконтрастного объекта до и после калибровки.

### 4. Результаты фотометрических наблюдений геостационарных КА

Осенью 2022 г. были проведены сеансы многоцветной фотометрии геостационарных КА на телескопе АЗТ-33ИК Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН. Наблюдались объекты разных производителей с различными модификациями платформ. В полосах BVRI каждый объект измерялся со сменой полосы по схеме B-V-R-I сериями не менее 10 кадров. В полосах J<sub>MKO</sub>H<sub>MKO</sub> измерения выполнялись по 10 кадров



Рис. 8: Пример измерения блеска КА Ямал 402 в полосах BVRIJH на телескопе АЗТ-33ИК.

последовательно в каждом фильтре. Показатели цвета вычислялись по средним значениям блеска, определенным по сериям измерений в каждом фильтре. На рис. 8 показаны измерения КА №2012-070А (Ямал 402) в полосах BVRIJH. Результаты фотометрии и сведения о наблюдаемых объектах (название, международный номер, тип спутниковой платформы) приведены в табл. 1. Приведенные в таблице значения блеска в полосах J<sub>MKO</sub>H<sub>MKO</sub> представляют среднее значение 10 измерений, полученные последовательно в каждом фильтре. В последней строчке таблицы приведены значения показателей цвета для Солнца.

Название	N⁰	Nº	Платформа	J	Н	J–H	B–V	V–R	R–I
	NORAD	межд.							
Koreasat 5	29349	2006-034A	Spacebus-4000C1	10.575	10.014	0.561			
Intelsat 17	37238	2010-065B	FS-1300	9.230	7.524	1.706	0.655	0.283	0.314
ChinaSat 11	39157	2013-020A	DFH-4	9.486	9.162	0.325			
Chinasat 2C	41021	2015-063A	DFH-4	9.608	9.291	0.318	1.263	0.825	0.711
Koreasat 5A	42984	2017-067A	Spacebus-4000B2	10.450	8.865	1.864			
Beidou 55	45807	2020-040A	DFH-3B	9.394	8.956	0.438	1.250	0.584	0.294
Ekspress 103	45985	2020-053B	Ekspress-1000N	10.472	10.037	0.435			
ChinaSat 2E	49062	2021-071A	DFH-4	9.165	8.890	0.275			
Ekspress-AMU 3	50002	2021-123B	Ekspress-1000	10.710	9.974	0.494	0.787	0.346	0.258
YahSat 1A	37393	2011-016B	Eurostar-3000	7.606	7.172	0.435			
Yamal 402	39022	2012-070A	Spacebus-4000C3	8.383	7.876	0.507	0.688	0.583	0.528
Skynet 5D	39034	2012-075A	Eurostar-3000S	7.078	5.493	1.585			
MonacoSat	40617	2015-023A	Spacebus-4000C2	6.961	6.575	0.386			
Ekspress-AM 6	40277	2014-064A	Ekspress-2000	6.546	6.136	0.409	0.436	0.496	0.703
NSS 12	36032	2009-058A	SSL-1300	7.338	6.566	0.772			
Belintersat 1	41238	2016-001A	DFH-4	8.248	8.061	0.187			
Yamal 601	44307	2019-031A	Spacebus-4000C4	7.101	6.094	1.007			
Солнце	—	—	—	—	—	0.280	0.650	0.350	0.340

Таблица 1: Результаты фотометрии геостационарных КА на телескопе АЗТ-ЗЗИК.

Видно, что диапазон измеренных инфракрасных показателей цвета J–H для разных KA довольно больпой от  $0.2^{\rm m}$  до  $1.9^{\rm m}$ . Гистограмма распределения значений показателя J–H показана на рис. 9. В основном, инфракрасный показатель цвета J–H геостационарных KA больше солнечного, так же, как для всех показателей цвета видимого диапазона. Какой-либо корреляции с моделью спутниковой платформы или производителем солнечных батарей по нашей небольшой выборке не прослеживается. Несмотря на это, можно выделить несколько KA с аномально высоким значением показателя J–H > 1 (Intelsat 17, Koreasat 5A, Skynet 5D, Yamal 601). У некоторых спутников можно отметить большие значения показателей цвета B–V > 1 (Chinasat 2C, Beidou 55), что указывает на существенные отличия в индикатрисе рассеяния солнечного



Рис. 9: Показатели цвета J–H геостационарных КА. Вертикальной линией обозначен показатель цвета Солнца.

излучения поверхностью этих KA. Этот вопрос требует дальнейшей проработки и детального измерения цветовых характеристик для более обширной выборки геостационарных KA, при различных фазовых углах и сезонных условиях освещения.

### 5. Заключение

Представлены первые результаты многоцветных наблюдений геостационарных КА на телескопе A3T-33ИК Саянской солнечной обсерватории, начатых в 2022 г. Измерения выполнены в полосах BVRIJH близких к стандартной фотометрической системе Джонсона-Казинса. В работе использовалась камера Xeva-1.7-320, на основе которой был построен фотометр ближнего инфракрасного диапазона. Проведены работы по интеграции данного устройства в систему управления фотометрическими приборами телескопа. Определены аппаратные характеристики камеры в соответствии, с которыми выбраны оптимальные режимы наблюдения, а программное обеспечение дополнено возможностью калибровки кадров еще на этапе визуализации.

По полученному набору измерений показателей цвета отмечается присутствие объектов с аномально большими значениями J–H (> 1), в то время как оптические показатели цвета соответствовали средним значениям по выборке. Также наблюдались объекты с высоким значением показателя B–V (> 1) при средних значениях инфракрасного показателя цвета, что указывает на существенные отличия в спектральном составе отраженного солнечного излучения данных KA. Это подтверждает возможность использования спектральных особенностей отражения в широком диапазоне длин волн в качестве дополнительных идентификационных признаков. Небольшой объем полученных данных, не позволяет проследить какой-либо зависимости от модели спутниковой платформы, технологии изготовления солнечных батарей или года выпуска KA, как предпринималось в работах [5, 6, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. В будущей работе необходимо получить измерения цветовых характеристик для более обширной выборки геостационарных KA, при различных фазовых углах и сезонных условиях освещения. Также планируется в ближнем ИК-диапазоне получить кривые блеска вращающихся KA, так как изменение геометрии освещения за период вращения, позволяет исследовать различные отражающие детали спутника в отличие от стабилизированных KA.

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

- 1. I. V. Korobtsev, M. N. Mishina, and M. V. Eselevich, INASAN Science Reports, 7, 36, 2022.
- 2. M. Zigo, J. Silha, and S. Krajčovič, in S. Ryan, ed., Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 33 (2019).
- 3. D. Hall, in S. Ryan, ed., Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, E6 (2010).
- 4. X.-F. Zhao, H.-Y. Zhang, Y. Yu, and Y.-D. Mao, Advances in Space Research, 58, 2269, 2016.
- 5. E. C. Pearce, H. A. Ford, T. Schildknecht, V. Reddy, A. D. Block, and K. Rockowitz, in S. Ryan, ed., Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference, 23 (2017).
- J. Frith, P. Anz-Meador, S. Lederer, H. Cowardin, and B. Buckalew, in Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 22 (2015).
- A. N. Abramenko, E. P. Pavlenko, V. V. Prokofeva, S. A. Severnyj, and M. A. Smirnov, *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*, 9, 376, 1983.
- 8. A. V. Bagrov and M. A. Smirnov, Nauchnye Informatsii, 58, 152, 1986.

- A. Di Cecco, A. Buzzoni, M. Mochi, G. Altavilla, et al., in T. Flohrer, R. Moissl, and F. Schmitz, eds., 2nd NEO and Debris Detection Conference, 85 (2023).
- 10. T. Cardona, P. Seitzer, A. Rossi, F. Piergentili, and F. Santoni, Advances in Space Research, 58, 514, 2016.
- 11. H. R. Schmitt, Advances in Space Research, 65, 326, 2020.
- 12. S. M. Lederer, P. Seitzer, H. M. Cowardin, E. S. Barker, K. J. Abercromby, and A. Burkhardt, in Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (2012).
- 13. K. J. Abercromby, P. Abell, and E. Barker, in H. Lacoste, ed., *Fifth European Conference on Space Debris*, **672**, 42 (2009).
- 14. E. C. Pearce, H. Krantz, A. Block, B. Sease, and M. Kirshner, in Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference (2021).
- NPK Photonika, Xeva 1.7 320 TE3 USB 100, 2023, URL https://www.npk-photonica.ru/product/17519/, accessed: 2023-03-01.
- 16. A. T. Tokunaga, D. A. Simons, and W. D. Vacca, Proc. Astron. Soc. Pacif., 114, 180, 2002.
- 17. S. B. Howell, Handbook of CCD Astronomy, volume 5 (2006).
- A. A. Henden, S. Levine, D. Terrell, and D. L. Welch, in American Astronomical Society Meeting Abstracts #225, 225, 336.16 (2015).
- 19. Lupton, R., Transformations between sdss magnitudes and other systems, 2005, URL http://www.sdss3.org/dr8/algorithms/sdssUBVRITransform.php, accessed: 2023-03-01.
- 20. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, et al., Astron. J., 131, 1163, 2006.
- 21. A. V. Devyatkin, D. L. Gorshanov, V. V. Kouprianov, and I. A. Verestchagina, Solar System Research, 44, 68, 2010.
- 22. K. A. Collins, J. F. Kielkopf, K. G. Stassun, and F. V. Hessman, Astron. J., 153, 77, 2017.
- 23. G. S. Da Costa, in S. B. Howell, ed., Astronomical CCD Observing and Reduction Techniques, 23, 90 (1992).

### 177

## Новый статус проекта ИСОН

Молотов И.Е.<sup>1,2</sup>, Чжан Ч.<sup>3</sup>, Чжу Т.<sup>3</sup>, Юй Ш.<sup>3</sup>, Еленин Л.В.<sup>2</sup>, Захваткин М.В.<sup>2</sup>, Степаньянц В.А.<sup>2</sup>, Стрельцов А.И.<sup>2</sup>, Шильдкнехт Т.<sup>4</sup>, Эгамбердиев Ш.А.<sup>5</sup>, Тунгалаг Н.<sup>6</sup>, Буянхишиг Р.<sup>6</sup>, Заллес Р.<sup>7</sup>, Абдельазиз А.М.<sup>8</sup>, Тилиб С.К.<sup>8</sup>, Магомед Н.<sup>9</sup>, Перец Тижерина Э.Г.<sup>10</sup>, Русаков О.П.<sup>11</sup>

<sup>1</sup>ООО Малое инновационное предприятие «ИСОН Баллистика-Сервис», Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Обсерватория Пурпурной горы Китайской академии наук, Нанкин, Китай

<sup>4</sup>Институт астрономии Университета Берна, Берн, Швейцария

<sup>5</sup>Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

<sup>6</sup>Институт астрономии и геофизики АН Монголии, Улан-Батор, Монголия

<sup>7</sup> Национальная астрономическая обсерватория, Автономный университет Хуана Мисаэля Сарачо, Тариха, Боливия

<sup>8</sup>Национальный исследовательский институт астрономии и геофизики, Kaup, Erunem

9 Центр астрономических наблюдений, Стелленбос, ЮАР

<sup>10</sup> Физико-математический факультет Автономного университета Нуэво-Леона, Монтеррей, Мексика

<sup>11</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Международная научная оптическая сеть ИСОН — открытый международный научный проект, специализирующийся на наблюдениях околоземных космических объектов. Он начался в Пулковской обсерватории в 2004 г., затем был продолжен в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, а с 2019 г. реализуется частной компанией «Малое инновационное предприятие «ИСОН Баллистика-Сервис». Т. о. ИСОН превратился в открытый международный частный проект. Еще одной новой особенностью является укрепление сотрудничества с Китайской академией наук. Также проект постепенно превращается в международный центр обмена информацией по космическому мусору.

Поступила в редакцию 27.04.2023 г. Принята в печать 31.05.2023 г.

Ключевые слова: проект ИСОН, космический мусор

## New status of the ISON project

Molotov I.E.<sup>1,2</sup>, Zhang Ch.<sup>3</sup>, Zhu T.<sup>3</sup>, Yu Sh.<sup>3</sup>, Elenin L.V.<sup>2</sup>, Zakhvatkin M.V.<sup>2</sup>, Stepanyants V.A.<sup>2</sup>, Streltsov A.I.<sup>2</sup>, Schildknecht T.<sup>4</sup>, Ehgamberdiev Sh.A.<sup>5</sup>, Tungalag N.<sup>6</sup>, Buyankhishig R.<sup>6</sup>, Zalles R.<sup>7</sup>, Abdelaziz A.M.<sup>8</sup>, Tealib S.K.<sup>8</sup>, Mahomed N.<sup>9</sup>, Perez Tijerina E.G.<sup>10</sup>, Rusakov O.P.<sup>11</sup>

<sup>1</sup>Small Innovation Enterprise "ISON Ballistics-Service", Moscow, Russia

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics of the RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Purple Mountain Observatory, CAS, Nanjing, China

<sup>4</sup>Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland

<sup>5</sup>National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

<sup>6</sup>Research Centre of Astronomy and Geophysics of Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

<sup>7</sup> Universidad Autonoma Juan Misael Saracho, Observatorio Astronomico Nacional, Tarija, Bolivia

<sup>8</sup>National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Cairo, Egypt

- <sup>9</sup>Astronomical Observation Centre, Stellenbosch, South Africa
- <sup>10</sup> Physical Sciences-Mathematics faculty, Autonomous University of Nuevo Leon, Monterrey, Mexico

<sup>11</sup>Central Astronomical Observatory at Pulkovo of the RAS, St.-Petersburg, Russia

The International Scientific Optical Network (ISON) is an open international scientific project specializing in observations of near-Earth space objects. It began at the Pulkovo Observatory in 2004, then was continued at the Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, and since 2019 it has been implemented by the private company "Small Innovative Enterprise "ISON Ballistics-Service". So, ISON turned in an open international private project. Another new feature is the strengthening of cooperation with the Chinese Academy of Sciences. Also, the project is gradually turning into an international center for the exchange of information on space debris.

Received 27.04.2023. Accepted 31.05.2023.

Keywords: ISON project, space debris

**DOI:** 10.51194/INASAN.2023.8.4.002

## 1. Введение

Освоение и исследования околоземного космического пространства (ОКП) привело к появлению проблем, связанных с его техногенной засоренностью т. н. «космическим мусором» (КМ). Количество выработавших ресурс спутников, различных ступеней ракет и фрагментов, сопровождающих каждый запуск, достигло предела, когда оно начинает создавать серьезную угрозу не только для пилотируемых орбитальных станций и функционирующих космических аппаратов (КА), но и для экологии Земли и ОКП. Дальнейшее освоение ОКП невозможно без знания текущей обстановки, анализа источников и закономерностей эволюции популяции КМ. Данные о населенности ОКП космическими объектами (КО) необходимы для создания модели популяции КМ, разработки мер снижения засоренности, а также определения степени опасности, которую представляет тот или иной КО для КА. Основным инструментом решения этих задач является регулярно обновляемая база данных, содержащая измерительную и орбитальную информацию о КА и объектах КМ. Одним из важных способов ее наполнения астрометрическими измерениями являются наблюдения с использованием оптических телескопов. В рамках инициативного проекта ИСОН была создана глобальная сеть оптического мониторинга КО на высоких околоземных орбитах.

## 2. Создание глобальной межведомственной сети оптического мониторинга ОКП

В интересах создания сети мониторинга было исследовано текущее состояние обсерваторий стран СНГ. создана кооперация наблюдателей ИСОН [1] и получены гранты на приобретение первых в стране крупноформатных ПЗС-камер. С целью переоснащения обсерваторий, участвующих в проекте, было налажено производство нескольких типов новых оптических телескопов с апертурой от 12.5 см до 65 [2]. В целом было произведено 70 новых телескопов, из них 21 телескоп по заказу Роскосмоса [3]. Проведена модернизация или дооснащение 15 существующих телескопов с апертурой от 50 см до 2.6 м. Создан типовой набор программного обеспечения (ПО) для управления телескопами и обработки ПЗС-кадров [4], разработано единое решение (на основе GPS-приемника) для точной привязки времени измерений. Были возобновлены наблюдения на 12 имеющихся обсерваториях: Тариха (Боливия), Уссурийск, Благовещенск, Хуралтогот (Монголия), Китаб и Майданак (Узбекистан), Гиссар и Санглок (Таджикистан), Абастумани (Грузия), Ужгород и Маяки (Украина), Кастельгранде (Италия). Изучены новые места и организовано еще семь пунктов наблюдений: в Мильково (Камчатка), Артеме (Дальний Восток), в Барнауле и Мульте (Алтай), Тирасполе (Приднестровье), Косале и Нуэво-Леоне (Мексика), вовлечены три зарубежные обсерватории: Циммервальд (Швейцария), Барселона (Испания) и Урумчи (Китай). Это позволило впервые в российской истории перекрыть наблюдениями всю геостационарную орбиту (ГСО) и составить каталог ГСО-объектов. В последующем были выбраны места для размещения обсерваторий Роскосмоса [5]. Сотрудники всех обсерваторий прошли переобучение (в том числе на специальных школах-семинарах), в штат ряда обсерваторий привлечены любители астрономии. Создано ПО для планирования наблюдений. В методическом аспекте была отработана методика проведения «сплошных» обзоров геостационарной области небольшими автоматизированными телескопами с апертурой 18-25 см с обнаружением всех объектов, доступных телескопу по чувствительности (до  $15.5^{\rm m}$ ), а на следующем этапе — расширенных обзоров ГСО в интересах массового получения высокоточных орбит для увеличения достоверности прогнозов опасных сближений [6].

На конец 2016 г. благодаря этим работам российские знания о населенности высоких (геостационарной и высокоэллиптических (ВЭО)) орбит КО превзошли мировой уровень. В российской базе данных поддерживались орбиты 2094 КО на ГСО, 2635 КО на ВЭО и 338 КО на средневысоких орбитах (СВО) [7]. На рис. 1 показано географическое расположение и ведомственная принадлежность обсерваторий, участвующих в оптическом мониторинге ОКП.

В получении измерений участвовали 76 телескопов 38 обсерваторий различной ведомственной принадлежности (академий наук, университетов, Роскосмоса, коммерческих компаний, а также находящихся в частной собственности), которые были объединены в шесть основных подсистем: (а) глобальная для обзора ГСО (до 15.5<sup>m</sup>), (б) для расширенных обзоров ГСО (до 14<sup>m</sup>), (в) для сопровождения слабых (слабее 15.5<sup>m</sup>) объектов космического мусора на ГСО и геопереходных орбитах, (г) для сопровождения ярких объектов на ГСО и ВЭО, (д) для глубоких частичных обзоров ГСО (до 18<sup>m</sup>), (е) для наблюдений по целеуказаниям объектов на низких орбитах и высокоэллиптических КО в перигейной области. На рис. 2 показан рост количества измерений, получаемых межведомственной сетью по годам.

## 3. Малое инновационное предприятие «ИСОН Баллистика-Сервис» и текущий статус ИСОН

ООО Малое инновационное предприятие (МИП) «Баллистика-сервис» было создано в 2015 г. при Институте прикладной математики (ИПМ) им. М.В. Келдыша Российской академии наук (РАН) с его долевым участием для официализации (постановки на баланс) телескопов проекта ИСОН, а также формальной коммерциализации получаемых результатов научных исследований. Дополнительно планировалось максимизировать безналичные расчеты при выполнении работ проекта ИСОН, обеспечить возможность заключения договоров с зарубежными исполнителями и заказчиками, организовать дополнительные рабочие места для участников ИСОН. Всего на баланс ООО МИП «Баллистика-Сервис» было взято 32 телескопа ИСОН. Предполагалось, что ИПМ им. М.В. Келдыша РАН будет привлекать МИП «Баллистика-Сервис» в качестве контрагента при выполнении договоров, предусматривающих наблюдения КО. На эти средства МИП «Баллистика-Сервис»



Рис. 1: Географическое расположение обсерваторий межведомственной сети мониторинга ОКП по состоянию на 2016 г.



Рис. 2: Рост количества измерений, получаемых межведомственной сетью по годам.

поддерживал телескопы ИСОН в рабочем состоянии, финансировал экспедиции в обсерватории и др. командировки, приобретал или изготавливал необходимые детали, участвовал в развертывании новых пунктов наблюдений. С этой целью были подписаны договор о научно-техническом сотрудничестве (НТС) между ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и МИП «Баллистика-Сервис» от 01.09.2016 г., а также совместное Решение между ПАО Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел», АО «Астрономический научный центр», ИМП им. М.В. Келдыша РАН и МИП «Баллистика-Сервис» от 23.03.2016 г. о привлечении 15 новых оптических средств, эксплуатируемых МИП «Баллистика-Сервис» в составе кооперации АО «Астрономический научный центр».

С 2017 г. начался постепенный распад межведомственной сети. Наблюдения средств Роскосмоса и кооперации ПАО «МАК «Вымпел» стали планироваться и финансироваться независимо. С 2018 г. ИПМ

им. М.В. Келдыша РАН прекратил выделение части получаемых им средств для МИП «Баллистика-Сервис», что повлияло на поддержку работоспособности части телескопов сети ИСОН. В конце 2019 г. ИПМ им. М.В. Келдыша РАН вышел из соучредителей МИП «Баллистика-Сервис». В результате в 2020 г. не работало уже более 50% телескопов ИСОН. Попытка сохранить проект ИСОН в новых условиях была предпринята компанией ООО МИП «Баллистика-Сервис». Компания поменяла название на «ИСОН Баллистика-Сервис» и начала искать новых заказчиков наблюдений КО, а также выстраивать новую кооперацию проекта ИСОН. В МИП «ИСОН Баллистика-Сервис» были созданы свой центр планирования наблюдений, работающий на регулярной основе, и организована собственная база данных. Было поддержано развитие нового ПО для управления телескопами и оборудованием [8]. Было приобретено здание, в котором организована мастерская для ремонта астрономического оборудования и мелкосерийного производства. С целью повышения степени автоматизации телескопов ИСОН была изготовлена серия фокусировочных устройств, а также разработан проект затвора для ПЗС-камеры.

Новая кооперация проекта ИСОН была образована на основе МИП «ИСОН Баллистика-Сервис», с которым подписываются договоры о НТС с партнерами и финансовые контракты с заказчиками работ. Новыми заказчиками выступили Европейское космическое агентство (наблюдения астероидов), Китайская академия наук (КАН) (наблюдения астероидов), испанская фирма GMV (наблюдения отдельных зарубежных КА). Договоры о НТС были подписаны с обсерваторией Пурпурной горы КАН, Национальными астрономическими обсерваториями КАН, Астрономическим институтом Бернского университета (Швейцария), Мадридским университетом им. Карлоса III (Испания), Братиславским университетом Коменского (Словакия), Автономным университетом Нуэво Леона (Мексика), Центром астрономических наблюдений в Боннивале (ЮАР), университетом Кади Айяд (Марокко), Институтом астрономии и геофизики (Монголия), Абастуманской астрофизической обсерваторией (Грузия), Национальной астрономической обсерваторией в Тарихе (Боливия). В плане развития сети ИСОН были установлены два малых телескопа в Словакии (28-см Целестрон) и ЮАР (22-см СРТ-220), отремонтированы два телескопа в Монголии (19.2-см ВТ-78а и 40-см ОРИ-40), отремонтирован телескоп в Боливии (60-см Цейсс-600), налажено взаимодействие с 40-см телескопом в Корле (Китай), вводится в строй 28-см телескоп в Яоане (Китай), готовится повторный запуск 25-см телескопа ОРИ-25 в Нуэво-Леоне (Мексика). На рис. 3 показано географическое положение и-технический статус телескопов МИП «ИСОН Баллистика-Сервис» и партнеров проекта.

### 4. Заключение

С 2019 г. проект ИСОН реализуется частной компанией МИП «ИСОН Баллистика-Сервис». Т. о. ИСОН превратился в открытый международный частный проект. Системный кризис сети ИСОН был успешно преодолен с опорой на зарубежные гранты (хотя неработающих телескопов ИСОН еще много — см. рис. 3),



Рис. 3: Географическое положение и технический статус телескопов МИП «ИСОН Баллистика-Сервис» и партнеров проекта. Красным цветом отмечены телескопы, используемые ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, черным цветом — неработающие телескопы, синим цветом — телескопы, вводимые в строй, зеленым цветом — телескопы, работающие в проекте ИСОН.



Рис. 4: Распределение объектов с большим отношением площади к массе по блеску и отношению площади к массе.



Рис. 5: Распределение объектов с большим отношением площади к массе по наклонению орбиты и отношению площади к массе.

снова пошло развитие проекта, снова вводятся в строй новые телескопы. Другой важной особенностью новой фазы является укрепление сотрудничества с КАН [9]. В проекте принимают участие две обсерватории в Китае и готовится к запуску телескоп в третьей обсерватории, также были проведены пробные наблюдения в ЮАР в рамках совместной российско-китайской инициативы. Кроме того, проект ИСОН постепенно превращается в международный центр обмена информацией по космическому мусору, что позволило увеличить объем измерений, поступающих в базу данных, несмотря на уменьшение количества телескопов. В течение 2022 г. в среднем в базу данных поступало до 100 тысяч измерений в сутки, что позволило накопить к концу года 40 миллионов измерений в 5 миллионов проводок. Это позволило поддерживать орбиты 9023 KO, в том числе 3002 на ГСО, 5293 на ВЭО и 1628 КО на СВО. При этом 3188 КО имели высокое отношение площади к массе (более 1 м<sup>2</sup>/кг) [10], в том числе 861 на ГСО, 1488 на ВЭО и 839 на СВО. Распределение объектов с большим отношением площади к массе по блеску показано на рис. 4, по наклонению орбиты — на рис. 5, по орбитальному периоду — на рис. 6.

- 1. I. Molotov, V. Agapov, V. Titenko, Z. Khutorovsky, et al., Advances in Space Research, 41 (7), 1022, 2008.
- 2. I. E. Molotov, V. A. Voropaev, A. N. Yudin, D. E. Ivanov, E. A. Aistov, and G. K. Borovin, *Ecological bulletin of scientific centers of the Black Sea economic cooperation*, **4** (2), 110, 2017.



Рис. 6: Распределение объектов с большим отношением площади к массе по орбитальному периоду и отношению площади к массе.

- 3. V. D. Shilin, A. P. Lukyanov, I. E. Molotov, V. M. Agapov, and A. E. Kolessa, *Ecological bulletin of scientific centers* of the Black Sea economic cooperation, 4 (2), 171, 2013.
- 4. V. Kouprianov and I. Molotov, in T. Flohrer and F. Schmitz, eds., Proc. 7th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 475 (2017).
- I. Molotov, L. Elenin, I. Usovik, A. Krylov, A. Grib, M. Sibichenkova, and M. Kapralov, Analysis of the contribution of the ISON network in solving problems of monitoring space debris on geosynchronous orbits, KIAM Preprint, 274, 2018.
- 6. I. E. Molotov, L. V. Elenin, M. V. Zakhvatkin, V. A. Stepanyants, et al., in T. Flohrer, S. Lemmens, and F. Schmitz, eds., Proc. 8th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 187 (2021).
- 7. I. Molotov, M. Zakhvatkin, L. Elenin, L. Canals Ros, et al., in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica Conference Series*, **51**, 144 (2019).
- 8. L. Elenin and I. Molotov, Journal of computer and systems sciences international, 59 (6), 894, 2020.
- 9. T. Zhu, X. Wang, J. Zhang, S. Yu, and I. Molotov, Astronomy and Computing, 40, 100588, 2022.
- 10. V. M. Agapov, I. E. Molotov, G. K. Borovin, and A. I. Streltsov, *Engineering Journal: Science and Innovation*, **2** (98), 1, 2020.

## Наблюдение сверхновой SN2023ixf в июле 2023 г.

Николенко И.В.<sup>1</sup>, Аршинкин С.С.<sup>1</sup>, Маслов И.А.<sup>2</sup>, Шенаврин В.И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия

В июле 2023 г. были проведены наблюдения сверхновой SN2023ixf, с использованием нового поляриметра телескопа Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН и инфракрасного фотометра ГАИШ (КАС МГУ). Приводятся спектральные потоки от сверхновой в стандартных полосах UBVRI JHKLM и оценки параметров линейной поляризации для полос BVRI.

Поступила в редакцию 31.10.2023 г. Принята в печать 01.12.2023 г.

Ключевые слова: сверхновая SN2023ixf, поляризационные наблюдения, эксперимент «Спектр-УФ»

## Observation of the supernova SN2023ixf in July 2023

Nikolenko I.V.<sup>1</sup>, Arshinkin S.S.<sup>1</sup>, Maslov I.A.<sup>2</sup>, Shenavrin V.I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Space Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia

In July 2023, observations of the Supernova SN2023ixf were carried out using the new polarimeter of the Zeiss-1000 telescope of the Simeiz Observatory INASAN and the infrared photometer of the Sternberg Astronomical Institute (MSU CAS). Spectral fluxes from a supernova in standard UBVRI JHKLM bands and linear polarization estimates for BVRI bands are given.

Received 31.10.2023. Accepted 01.12.2023.

Keywords: supernova SN2023ixf, polarization observations, experiment "Spectrum-UV"

**DOI:** 10.51194/INASAN.2023.8.4.003

## 1. Наблюдения

Наблюдения в спектральных полосах UBVRI проводились в п. Симеиз (Республика Крым) на телескопе Цейсс-1000 [1] Института астрономии РАН (ИНАСАН) при помощи камеры FLI PL16803 (4096×4096 — 9 мкм пикселей) в режиме бинирования 8 × 8 с использованием нового поляриметра [2], который представляет собой узел, позволяющий вводить/выводить в световой пучок поляризационный светофильтр, поворачиваемый поочередно, в три положения через 120°. Наблюдения в полосах ЈНКLМ проводились на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ (КАС МГУ) при помощи модуляционного фотометра [3] с одноэлементным InSb-фотодиодом, охлаждаемым жидким азотом.

Таблица 1: Рабочие полосы аппаратуры Цейсс-1000 и принятые спектральные потоки калибровочной звезды (14:04:02.9 +54:18:18 J2000) для этих полос.

Полоса	U	В	V	R	Ι
Длина волны, нм	376	445	551	639	797
Эквивалентная ширина, нм	53	101	88	132	126
Спектральный поток, $\mathrm{Bt}/(\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{mkm})$	$106 \cdot 10^{-15}$	$144 \cdot 10^{-15}$	$135 \cdot 10^{-15}$	$115 \cdot 10^{-15}$	$88 \cdot 10^{-15}$

Для фотометрической калибровки снимков использовались спектральные потоки звезды [4] (из того же поля, в котором снималась сверхновая), которые интегрировались с учетом пропускания светофильтров [5] и спектральной чувствительности камеры (табл. 1). Для калибровки измерений в полосах JHKLM использовалась звезда BS5191.

## 2. Результаты

В табл. 2 представлены спектральные потоки SN2023ixf полосах JHKLM, усредненные по измерениям за период 28–31 июля 2023 г. Для полосы М чувствительность аппаратуры, ограниченная, главным образом, флуктуациями фона земной атмосферы, не позволила получить значимую величину спектрального потока.

Полоса	JD	Спектральный поток, $\mathrm{Bt}/(\mathrm{m}^2 \ \mathrm{mkm})$
J	2460155	$105 \pm 12 \cdot 10^{-15}$
Н	2460156	$41 \pm 5 \cdot 10^{-15}$
Κ	2460155	$25 \pm 3 \cdot 10^{-15}$
L	2460155	$20 \pm 9 \cdot 10^{-15}$
М	2460154	$2 \pm 19 \cdot 10^{-15}$

Таблица 2: Спектральные потоки от сверхновой SN2023ixf в инфракрасной области спектра по измерениям 28–31 июля 2023 г.

Таблица 3: Спектральные потоки (10<sup>-15</sup>·Вт·м<sup>-2</sup>·мкм<sup>-1</sup>) от сверхновой SN2023ixf в июле 2023 г.

Дата	JD	U	В	V	R	Ι
16/07/23	2460142.4		$321 \pm 1$	$405 \pm 3$	$401\pm2$	
17/07/23	2460143.3	$101\pm2$	$315 \pm 6$	$406 \pm 9$	$395\pm3$	$265 \pm 1$
18/07/23	2460144.3		$300 \pm 9$	$402 \pm 9$	$403 \pm 3$	$269 \pm 3$
19/07/23	2460145.4	$89\pm3$	$308{\pm}12$	$396{\pm}14$	$388\pm5$	$268 \pm 4$
21/07/23	2460147.4	$124 \pm 7$	$265 \pm 4$	$379 \pm 4$	$379\pm3$	$263 \pm 2$
22/07/23	2460148.4	$85 \pm 4$	$268 \pm 6$	$362 \pm 4$	$369\pm3$	$253 \pm 3$
24/07/23	2460150.4	$101 \pm 5$	$251 \pm 3$	$344 \pm 4$	$363 \pm 4$	$249 \pm 2$
25/07/23	2460151.4	$68 \pm 1$	$231 \pm 1$	$328\pm2$	$249\pm2$	$242\pm2$

В табл. 3 представлены результаты, полученные по измерениям в полосах UBVRI. Хорошо заметно падение потока от SN2023ixf за период проведения наблюдений.

В табл. 4 представлены параметры линейной поляризации Стокса [6] для SN2023ixf и галактики M101, в которой она вспыхнула, полученные усреднением данных за несколько ночей наблюдений. Параметры определялись методом корреляционной поляриметрии [7]. Этот метод позволяет определить, даже в случаях, когда объект занимает все поле зрения и нет возможности измерить «ноль», корреляцию между Q, Uи I, а фактически производные dQ/dI и dU/dI в исследуемой области. В случае постоянства поляризации и наличия переменной яркости объекта при равномерном фоне эти производные соответствуют параметрам Стокса Q/I и U/I именно объекта, исключая фоновую состовляющую. Для SN2023ixf использовалась зона 0-30'', а для галактики — кольцевая зона 30-180'' вокруг сверхновой. Поляризация сверхновой заметно слабее поляризации галактики. Исходя из того, что поляризация галактики обусловлена поляризацией звезд наблюдаемых через пыль, можно сделать вывод, что сверхновая практически не погружена в спиральный рукав.

Таблица 4: Оценки параметров линейной поляризации (%) от SN2023ixf и галактики в районе сверхновой 16–24 июля 2023 г.

Спектральная полоса		В	V	R	Ι
Число ночей наблюдений		6	7	7	5
SN2023ixf	dQ/dI	$-0.8{\pm}0.2$	$-0.6{\pm}0.6$	$-0.5\pm0.5$	$-0.6\pm0.5$
0 - 30''	$\mathrm{dU}/\mathrm{dI}$	$-0.4{\pm}0.7$	$-0.5\pm0.4$	$+0.3{\pm}0.2$	$-0.1\pm0.5$
M101	dQ/dI	$-3.2{\pm}0.7$	$-1.8{\pm}0.6$	$-1.1{\pm}0.8$	$-1.4{\pm}0.4$
30 - 180''	$\mathrm{dU}/\mathrm{dI}$	$+1.1{\pm}0.5$	$+0.9{\pm}0.4$	$+0.9{\pm}0.6$	$+0.8{\pm}0.4$

## 3. Перспективы

Результаты работы основаны на наблюдательных данных, полученных на 1-м телескопе Цейсс-1000 ЦКП ИНАСАН и 1.25-м телескопе КАС МГУ. Комплекс аппаратуры телескопа Цейсс-1000 ЦКП ИНАСАН может быть использован для наземной поддержки эксперимента «Спектр-УФ».

- 1. S. Kryuchkov, I. Maslov, I. Nikolenko, and O. Ugol'nikov, Nekotoryye aspekty sovremennykh problem mekhaniki i informatiki: sb. nauch. st. M.: IKI RAN, 188, 2018.
- 2. I. V. Nikolenko, S. S. Arshinkin, and I. A. Maslov, INASAN Science Reports, 8, 255, 2023.
- 3. A. Nadzhip, V. Shenavrin, and V. Tikhonov, Tr. Gos. Astron. Inst., MGU (1986).
- 4. http://vizier.unistra.fr/vizier/sed/.
- 5. http://ulisse.pd.astro.it/Astro/ADPS/Systems/Sys 136/index 136.html.
- 6. M. Born and E. Vol'f, Osnovy Optiki, «Nauka» (1973).
- 7. I. Maslov, S. Kryuchkov, I. Nikolenko, V. Munitsyn, and O. Ugol'nikov, Izvestiya KrAO, 111, 34, 2015.

## Метеоритообразующие тела внутри орбиты Земли

Терентьева А.К., Барабанов С.И.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

По опубликованным данным была рассмотрена популяция 39 метеоритообразующих тел. Из них были выбраны 4 объекта, орбиты которых расположены внутри орбиты Земли. Динамический параметр Тиссерана  $T_{\rm j}$  (возмущающая планета — Юпитер) указывает на их астероидное происхождение. Из астероидов NEO были отобраны те, что расположены внутри орбиты Земли. Таких оказалось 26 астероидов. Из популяции 26 астероидов, согласно критерию Саутворда-Хоккинса, найдены астероиды, которые могут быть связаны с метеоритообразующими телами. Предполагается, что эти тела могут быть осколками соответствующих астероидов. Делается вывод, что внутри орбиты Земли возможен постоянный источник образования метеоритообразующих тел.

Поступила в редакцию 16.11.2023 г. Принята в печать 01.12.2023 г.

Ключевые слова: метеоритообразующее тело, метеорит, орбита, астероид

## Meteorite producing bodies inside the Earth's orbit

Terentjeva A.K., Barabanov S.I.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

According to the published data, the population of 39 meteorite producing bodies was considered. Of these, 4 objects were selected, whose orbits are located inside the Earth's orbit. The dynamic parameter of the Tisserand  $T_j$  (perturibing planet — Jupiter) indicates their asteroid origin. From near-Earth asteroids those were selected that reside inside the Earth's orbit. There were 26 such asteroids. Of this population of 26 asteroids, according to the Southward-Hawkins criterion, asteroids have been found that may be associated with meteorite producing bodies. It is suggested that these bodies could be fragments of the corresponding asteroids. It is concluded that a constant source of formation of meteorite producing bodies is possible inside the Earth's orbit.

Received 16.11.2023. Accepted 01.12.2023.

Keywords: meteorite producing body, meteorite, orbit, asteroid

**DOI:** 10.51194/INASAN.2023.8.4.004

## 1. Введение

О том, что близлежащие к Земле астероиды могут поставлять на Землю метеориты, известно давно. Но дальше рассуждений на общие темы дело не идет ([1] и др.). Конкретных примеров совершенно недостаточно. Поэтому любая попытка продвижения в данном направлении будет шагом вперед к исследованиям в этой области.

## 2. Результаты исследования

На основании фотографических наблюдений ярких болидов Прерийной и Европейской сетей [3, 4, 5] была выявлена популяция 39 метеоритообразующих тел [2]. Нас интересовали те объекты этой популяции, орбиты которых лежат внутри орбиты Земли. Таких объектов оказалось 4. Элементы их орбит и другие параметры приведены в табл. 1. Для этих четырех метеоритообразующих тел был вычислен динамический параметр Тиссерана [6]  $T_j$  (табл. 1) (возмущающая планета — Юпитер). Его значения показывают, что все данные метеоритообразующие тела имеют астероидное происхождение, и, естественно, в этой связи надо рассматривать ближайшие к Земле астероиды (near-Earth objects, NEO). Из этих астероидов<sup>1</sup> мы отобрали те, орбиты

<sup>1</sup>https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/

Таблица 1: Элементы орбит и другие параметры метеоритообразующих тел (J 1950.0)

№	Дата	Рад	иант	$V_{\infty}$	1/a	e	q	q'	i	w	Ω	$m_{\infty}$	$T_{\rm j}$
по [2]		(испр.	геоц.)	км/с	(a.e.)							КГ	
		альфа°	дельта $^{\circ}$										
5	1966 XI 5	166.4	-3.6	14.6	1.40	0.43	0.405	1.0	3.4	196.7	42	4300	7.72
14	1969 IV 7	212.2	-27.2	11.6	1.08	0.13	0.808	1.0	1.7	134.5	197	1.2	6.46
26	1971 XI 20	90.3	-6.2	13.1	1.16	0.23	0.66	1.1	6.9	138.1	57	138.1	6.82
29	$1972 \ \mathrm{IV} \ 25$	315.2	-22.9	12.8	1.35	0.36	0.469	1.0	1.4	184.6	215	6.1	7.73

Метеоритообразующие тела	Астероиды	$D_{\rm sh}$
№ по [2]		
5	1998 WT24	0.20
	2010  XC15	0.11
	$2003 \ \mathrm{UC20}$	0.16
14	2004 MN4	0.092
	2016 BC14	0.18
	2008 EV5	0.16
26	1989UQ	0.14
29	2002 JX8	
	2016 JC6	

Таблица 2: Астероиды, связанные с метеоритообразующими телами (J 2000.0).

которых находятся внутри орбиты Земли. Условием отбора было: q < 1 а. е.,  $q' \leq 1.1$ ,  $i \leq 9^{\circ}$ . Можно предположить, что рассматриваемые нами метеоритообразующие тела (табл. 1) могут являться осколками астероидов из популяции 26 астероидов, лежащих внутри земной орбиты. В табл. 2 для метеоритообразующих тел приведены соответствующие им астероиды. Значения критерия Саутвода-Хоккинса  $D_{\rm sh}$ , приведенные в этой же табл. 2, позволяют с достаточной степенью вероятности судить о наличии связи между ними.

## 3. Выводы

Итак, можно полагать, что внутри орбиты Земли возможен постоянный источник образования метеоритообразующих тел. Среди этих тел могут встречаться крупные тела с массой до нескольких тонн (см. табл. 1). Подобные объекты могут представлять потенциальную опасность при их встрече с Землей и ИСЗ, и они могут являться потенциальной причиной местных локальных разрушений. Поэтому изучение этих стратегически важных объектов должно быть постоянно в центре внимания исследователей метеоров и они должны входить в программы мониторинга опасных космических объектов.

- 1. J. Borovička, P. Spurný, and P. Brown, in Asteroids IV, 257–280 (2015).
- 2. A. K. Terentjeva, Pisma v Astronomicheskii Zhurnal, 15, 258, 1989.
- 3. R. E. McCrosky, C. Y. Shao, and A. Posen, Preprint Series No Cambridge: Center for Astrtophysics, 1, 1976.
- 4. R. E. McCrosky, C. Y. Shao, and A. Posen, Meteoritika, 37, 44, 1978.
- 5. Z. Ceplecha, Meteoritika, 37, 60, 1978.
- 6. D. Jewitt, H. Hsieh, and J. Agarwal, in Asteroids IV, 221–241 (2015).

## Исследование влияния применения модели AOD1B на точность обработки DORIS измерений

Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В работе исследовано влияние применения модели AOD1B, учитывающей неприливные атмосферные и океанические возмущения, на точность обработки DORIS измерений. Для решения указанной задачи были обработаны DORIS данные в формате RINEX для десяти миссий системы DORIS (Cryosat2, HY2A, HY2C, HY2D, Jason2, Jason3, Saral, Sentinel3a, Sentinel3b, Sentinel6a), восемь из которых являются действующими и две миссии (Jason2 и HY2A) завершили свою работу. Интервал обработки для каждой действующей миссии составляет промежуток времени от начала миссии до конца 2022 г. Для проекта Jason2 интервал обработки составлял 2008.5–2019.8 гг., для проекта HY2A — 2011.8–2020.7 гг. Результаты исследования показывают, что использование модели AOD1B для всех десяти миссий совсем незначительно (менее 1%) уменьшает среднюю остаточную погрешность DORIS измерений. Таким образом, применение модели AOD1B при обработке DORIS измерений не оказывает существенного влияния на точность получаемого решения в используемой стратегии обработки.

Поступила в редакцию 28.08.2023 г. Принята в печать 01.12.2023 г.

Ключевые слова: система DORIS, модель AOD1B, точность DORIS измерений

## Study of the impact of using the AOD1B model on the processing accuracy of DORIS measurements

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The paper investigates the effect of using the AOD1B model, which takes into account non-tidal atmospheric and oceanic disturbances, on the accuracy of processing DORIS measurements. To solve this problem, DORIS data were processed in RINEX format for ten missions of the DORIS system (Cryosat2, HY2A, HY2C, HY2D, Jason2, Jason3, Saral, Sentinel3a, Sentinel3b, Sentinel6a), eight of which are active and two missions (Jason2 and HY2A) have completed their work. The processing interval for each active mission is the time interval from the beginning of the mission to the end of 2022. For the Jason2 project, the processing interval was 2008.5–2019.8, for the HY2A project — 2011.8–2020.7. The results of the study show that using the AOD1B model for all ten missions reduces the mean residual error of DORIS measurements quite slightly (less than 1 percent). Thus, the application of the AOD1B model when processing DORIS measurements does not significantly affect on the accuracy of the resulting solution in the processing strategy used.

Received 28.08.2023. Accepted 01.12.2023.

Keywords: DORIS system, AOD1B model, DORIS measurement accuracy

**DOI:** 10.51194/INASAN.2023.8.4.005

## 1. Введение

Французская спутниковая радиотехническая доплеровская система DORIS (Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite) [1] является одной из четырех спутниковых технологий, на постояной основе доставляющей свои продукты для построения и поддержания международной земной системы отсчета ITRF (International Terrestrial Reference Frame) [2]. Для улучшения качества своих продуктов происходит непрерывное совершенствование системы DORIS как в аппаратном направлении (модификация существующих моделей приемников и передатчиков системы), так и в области использования новых моделей, учитывающих различные эффеты и явления, влияющие на точность результатов обработки измерений. Для получения последнего решения ITRF (ITRF2020) международной службой системы DORIS IDS (International DORIS Service) было рекомендовано использование модели AOD1B RL06 (Atmosphere and Ocean De-Aliasing Level-1B, the release 06 (RL06)) [3]. Данная модель учитывает неприливные изменения потенциала Земли за счет перераспределения атмосферных и океанических масс. Модель AOD1B реализована в виде сферических гармонических коэффициентов порядка и степени 180 с временным разрешением в 3 часа. Целью данной работы является исследование влияния модели AOD1B на точность обработки имерений проекта DORIS для различных спутников системы.

## 2. Методика обработки данных

Для обработки данных системы DORIS были использованы измерения, выполняемые десятью спутниковыми миссиями (Cryosat2, HY2A, HY2C, HY2D, Jason2, Jason3, Saral, Sentinel3a, Sentinel3b, Sentinel6a), восемь из которых являются действующими и две миссии (Jason2 и HY2A) завершили свою работу. Интервал обработки для каждой действующей миссии составляет промежуток времени с момента запуска соответствующего



Рис. 1: Остаточные погрешности радиальной скорости для спутника Cryosat2.

спутника до конца 2022 г. Для проекта Jason2 интервал обработки составлял 2008.5–2019.8 гг., для проекта HY2A — 2011.8–2020.7 гг. Интервалы обработки для каждого спутника различны и приведены в табл. 1. Измерения отдельных спутников проекта DORIS хранятся в виде суточных файлов формата RINEX (Receiver INdependent EXchange format) [4] и скачивались с сайта https://cddis.nasa.gov. Суточные файлы модели AOD1B загружались для обработки с сайта ftp://isdcftp.gfz-potsdam.de/grace/Level-1B/GFZ/AOD.

Обработка измерений осуществлялась с помощью программного пакета GIPSY-OASIS II (version 6.4) (JPL — Jet Propulsion Laboratory, США). Следует отметить, что программный пакет GIPSY-OASIS II не способен обрабатывать данные формата RINEX. Для осуществления возможности обработки измерений

Таблица 1: Сравнение средних остаточных погрешностей радиальной скорости, полученных с использованием модели AOD1B и без модели.

Спутник	Интервал	Остаточная погрешность,		
	обработки	MM	ı/c	
		с моделью AOD1B	без модели AOD1B	
Cryosat2	2010.4 - 2023.0	0.465164	0.465685	
HY2A	2011.8 - 2020.7	0.443554	0.443642	
HY2C	2020.7 - 2023.0	0.482860	0.482895	
HY2D	2021.6 - 2023.0	0.405610	0.405667	
Jason2	2008.5 - 2019.8	0.426865	0.426870	
Jason3	2016.0 - 2023.0	0.420131	0.420579	
Saral	2013.2 - 2023.0	0.481804	0.481844	
Sentinel3a	2016.0 - 2023.0	0.396506	0.396813	
Sentinel3b	2018.4 - 2023.0	0.389076	0.389333	
Sentinel6a	2020.9-2023.0	0.417302	0.417378	



Рис. 2: Остаточные погрешности радиальной скорости для спутника Saral.

формата RINEX был разработан отдельный модуль их обработки [5]. Методика обработки DORIS данных состояла в последовательной обработке одних и тех же суточных измерений сначала без применения модели AOD1B, а затем с использованием этой модели. Другие используемые модели и параметры обработки оставались общими для обоих вариантов получения решения. В качестве общих основных моделей (параметров) обработки использовались:

1) модель гравитационного поля Земли — goco02s.fit2.all;

2) угол отсечки измерений —  $10^{\circ}$ ;

3) учет тропосферной задержки распространения сигнала — модель GMF (Global Mapping Function);

4) использование кватернионов (только для спутников Jason2 и Jason3). Следует отметить, что кватернионы существуют не для всех спутников;

5) применение коррекций для фазовых центров спутниковых и наземных антенн;

6) ионосферная коррекция измерений;

7) априорные значения координат и скоростей станций — DPOD2014 (version 059) (Doris Precise Orbit Determination 2014).

## 3. Анализ результатов обработки

По вышеприведенной методике были обработаны измерения системы DORIS для десяти указанных спутников. На рис. 1–3 приведены вычисленные остаточные погрешности радиальной скорости между передатчиками и приемниками системы для спутников Cryosat2, Saral и Sentinel3a, соответственно, при использовании модели AOD1B и без нее. Спутники Cryosat2 и Saral являются «старыми» спутниками, то есть запущенными относительно давно (более 10 лет назад). Спутник Sentinel3a является относительно «молодым», выведенным на орбиту 7 лет назад. Как видно из всех трех рисунков, остаточные погрешности при использовании модели и без нее практически совпадают для указанных спутников. Такая же картина наблюдается и для семи оставшихся спутников. Результаты вычислений приведены в табл. 1. Сравнение результатов средних остаточных погрешностей радиальной скорости (см. табл. 1), полученных с применением модели AOD1B и без модели, показывает очень незначительное уменьшение ошибок обработки при учете модели AOD1B (менее 1%) при используемой методике обработки.



Рис. 3: Остаточные погрешности радиальной скорости для спутника Sentinel3a.

### 4. Заключение

В статье приведены результаты исследования влияния применения модели AOD1B, учитывающей неприливные атмосферные и океанические возмущения, на точность обработки DORIS измерений. Для решения поставленной задачи были обработаны DORIS данные в формате RINEX для десяти миссий системы DORIS (Cryosat2, HY2A, HY2C, HY2D, Jason2, Jason3, Saral, Sentinel3a, Sentinel3b, Sentinel6a), восемь из которых являются действующими и две миссии (Jason2 и HY2A) завершили свою работу. Интервал обработки для каждой действующей миссии составляет промежуток времени от начала миссии до конца 2022 г. Для проекта Jason2 интервал обработки составлял 2008.5–2019.8 гг., для проекта HY2A — 2011.8–2020.7 гг. Результаты исследования показывают, что использование модели AOD1B для всех десяти миссий совсем незначительно (менее 1%) уменьшает среднюю остаточную погрешность DORIS измерений. Таким образом, применение модели AOD1B при обработке DORIS измерений не оказывает существенного влияния на точность получаемого решения при используемой методике обработки.

- 1. P. Willis, F. G. Lemoine, G. Moreaux, L. Soudarin, et al., IAG 150 Years, 631-640, 2016.
- 2. Z. Altamimi, P. Rebischung, X. Collilieux, L. Métivier, and K. Chanard, Journal of Geodesy, 97, 47, 2023.
- 3. H. Dobslaw, I. Bergmann-Wolf, R. Dill, L. Poropat, et al., Geophysical Journal International, 211, 263, 2017.
- 4. W. Gurtner, GPS World, 5, 48, 1994.
- 5. S. Kuzin, INASAN Science Reports, 4, 99, 2019.

## Использование кватернионов при обработке DORIS данных

## Кузин С.П.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

В работе выполнено исследование применения кватернионов при обработке DORIS измерений формата RINEX и проведена оценка влияния использования кватернионов на точность результатов обработки. Обработка данных с использованием кватернионов применялась для измерений спутников Jason2 и Jason3. Для проекта Jason2 интервал обработки составлял 2008.5–2019.8 гг., для проекта Jason3 — 2016.0–2023.0 гг. Результаты вычисления радиальной скорости между передатчиками и приемниками указанных миссий показывают незначительное уменьшение средней остаточной погрешности радиальной скорости при использовании кватернионов (менее 1%). Таким образом, при используемой стратегии обработки DORIS измерений, использование кватернионов не оказывает существенного влияния на точность получаемого решения.

Поступила в редакцию 04.09.2023 г. Принята в печать 01.12.2023 г.

Ключевые слова: система DORIS, кватернионы, точность DORIS измерений

## Using quaternions in DORIS data processing

Kuzin S.P.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

The paper investigates the use of quaternions in processing DORIS measurements of RINEX format and evaluates the impact of using quaternions on the accuracy of processing results. Data processing using quaternions was used for measurements of the Jason2 and Jason3 satellites. For the Jason2 project, the processing interval was 2008.5-2019.8, for the Jason3 project — 2016.0-2023.0. The results of the radial velocity calculation between the transmitters and receivers of these missions show a slight decrease in the average residual radial velocity error when using quaternions (less than 1 percent). Thus, with the DORIS measurement processing strategy used, the use of quaternions does not significantly affect on the accuracy of the resulting solution.

Received 04.09.2023. Accepted 01.12.2023.

Keywords: DORIS system, quaternions, DORIS measurement accuracy

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.4.006

## 1. Введение

Для достижения большего вклада системы DORIS в получение последнего решения международной земной системы отсчета ITRF (International Terrestrial Reference Frame) ITRF (ITRF2020) [1] международной службой системы DORIS IDS (International DORIS Service) [2] было рекомендовано использование кватернионов<sup>1</sup>, которые должны улучшить точность орбитальных спутниковых определений, что, в свою очередь, приведет к увеличению точности оценки других определяемых параметров, в частности, координат станций и параметров вращения Земли. Кватернионы используются для описания ориентации космического объекта в пространстве и представляют собой матрицу вращения из одной (опорной) системы координат, в другую, необходимую для работы, систему координат. Обычно кватернионы получаются с помощью звездных датчиков, установленных на космических аппаратах. Файлы кватернионов существуют не для каждого спутника миссии DORIS. Спутники, выведенные на орбиту на начальном этапе эксплуатации (спутники серии SPOT, Saral), не имели файлы кватернионов. Спутники, запущенные относительно недавно (спутники серии Sentinel, HY2, Jason2, Jason3), формируют файлы кватернионов, которые доступны для пользователей. До появления кватернионов, пространственная ориентация спутников описывалась с помощью так называемых аттитюдных файлов (attitude files). Так как ориентация спутников описывается довольно сложным законом, то аттитюдные файлы предоставляют пользователям данные об углах только в моменты времени, для которых ориентация спутников резко меняет свой характер. Файлы кватернионов дают информацию об ориентации спутника на орбите для любого момента времени, включая маневры. Целью проведенного исследования является сравнение точности DORIS определений при использовании кватернионов и при применении аттитюдного закона ориентации аппаратов для спутников Jason2 и Jason3.

## 2. Методика обработки данных

Для обработки данных системы DORIS были использованы измерения, выполняемые двумя спутниковыми миссиями (Jason2 и Jason3). Спутник Jason3 является действующим, проект Jason2 завершил свою работу. Для проекта Jason2 интервал обработки составлял 2008.5–2019.8 гг., для проекта Jason3 — 2016.0–2023.0

 $<sup>^{1} \</sup>rm https://ids-doris.org/analysis-coordination/itrf2020.html$ 



Рис. 1: Остаточные погрешности радиальной скорости для спутника Jason2.

гг. Измерения обрабатываемых спутников хранятся в виде суточных файлов формата RINEX (Receiver INdependent EXchange format) [3] и скачивались с сайта https://cddis.nasa.gov. Суточные файлы кватернионов и аттитюдный файл (непрерывный файл с начала момента измерений конкретного спутника) загружались для обработки с этого же сайта. Файл кватерниона имеет формат:

$$Q = Q(T, Q1, Q2, Q3, Q4), \tag{1}$$

где T — эпоха измерения, Q1 — скалярная величина, Q2, Q3, Q4 — мнимые компоненты кватерниона.

В данном исследовании кватернион представляет матрицу преобразования из инерциальной системы координат в систему координат, фиксированную с корпусом спутника, на эпоху J2000. Следует отметить, что для исследуемых спутников помимо кватернионов, описывающих ориентацию корпуса спутника (формула (1)), существуют кватернионы, описывающие ориентацию солнечной панели аппарата. Плоскость солнечной панели должна быть ориентирована, насколько это возможно, перпендикулярно к направлению на Солнце. Формат кватерниона солнечной панели имеет вид:

$$P = P(T, P1, P2), \tag{2}$$

где T — эпоха измерения, P1 — угловое положение левой солнечной панели относительно выбранной оси вращения, P2 — угловое положение правой солнечной панели относительно выбранной оси вращения.

Обработка измерений осуществлялась с помощью программного пакета GIPSY-OASIS II (version 6.4) (JPL — Jet Propulsion Laboratory, США). Для осуществления возможности обработки измерений формата RINEX был разработан отдельный модуль их обработки [4]. Методика обработки DORIS данных состояла в последовательной обработке одних и тех же суточных измерений сначала с файлами аттитюды, а затем с файлами кватернионов корпуса и солнечной панели. Другие используемые модели и параметры обработки оставались общими для обоих вариантов получения решения. В качестве общих основных моделей (параметров) обработки использовались:

1) модель гравитационного поля Земли — goco02s.fit2.all;

- 2) угол отсечки измерений по высоте  $-10^{\circ}$ ;
- 3) учет тропосферной задержки распространения сигнала модель GMF (Global Mapping Function);
- 4) модель AOD1B, учитывающая неприливные атмосферные и океанические возмущения [5];

5) применение коррекций для фазовых центров спутниковых и наземных антенн;

6) ионосферная коррекция измерений;

7) априорные значения координат и скоростей станций — DPOD2014 (version 059) (Doris Precise Orbit Determination 2014).

### 3. Анализ результатов обработки

По вышеприведенной методике были обработаны измерения системы DORIS для спутников Jason2 и Jason3. На рис. 1 и 2 приведены вычисленные остаточные погрешности радиальной скорости между передатчиками



Рис. 2: Остаточные погрешности радиальной скорости для спутника Jason3.

и приемниками системы для данных спутников при использовании файлов аттитюды и данных кватернионов. Как видно из приведенных рисунков, остаточные погрешности при использовании кватернионов и файлов аттитюды практически совпадают для указанных спутников. Результаты вычислений приведены в табл. 1. Сравнение результатов средних остаточных погрешностей радиальной скорости (см. табл. 1), полученных с применением кватернионов и файлов аттитюды, показывает очень незначительное уменьшение ошибок обработки при использовании кватернионов (менее 1%) при используемой методике обработки.

Таблица 1: Сравнение средних остаточных погрешностей радиальной скорости, полученных с использованием кватернионов и файлов аттитюды.

Спутник	Интервал	Остаточная погрешность,				
	обработки	${ m MM}/{ m c}$				
		с кватернионами	с файлами аттитюды			
Jason2	2008.5 - 2019.8	0.408500	0.408597			
Jason3	2016.0 - 2023.0	0.398219	0.400276			

## 4. Заключение

В статье приведены результаты исследования влияния применения кватернионов на точность обработки DORIS измерений. Для решения поставленной задачи были обработаны DORIS данные в формате RINEX для миссий системы DORIS Jason2 и Jason3. Для проекта Jason2 интервал обработки составлял 2008.5– 2019.8 гг., для проекта Jason3 — 2016.0–2023.0 гг. Результаты исследования показывают, что использование кватернионов для указанных спутников незначительно (менее 1%) уменьшает среднюю остаточную погрешность DORIS измерений по сравнению с использованием файлов аттитюды. Таким образом, применение файлов кватернионов корпуса и солнечной панели для исследуемых спутников при обработке DORIS измерений, не оказывает существенного влияния на точность получаемого решения по сравнению с результатами использования файлов аттитюды при используемой методике обработки.

- 1. Z. Altamimi, P. Rebischung, X. Collilieux, L. Métivier, and K. Chanard, Journal of Geodesy, 97, 47, 2023.
- 2. P. Willis, F. G. Lemoine, G. Moreaux, L. Soudarin, et al., IAG 150 Years, 631–640, 2016.
- 3. W. Gurtner, GPS World, 5, 48, 1994.
- 4. S. Kuzin, INASAN Science Reports, 4, 99, 2019.
- 5. H. Dobslaw, I. Bergmann-Wolf, R. Dill, L. Poropat, et al., Geophysical Journal International, 211, 263, 2017.

## Четырехканальный российско-узбекский кластер для задач всенебесного обзора и многоцветной фотометрии

Ибрагимов М.А.<sup>1</sup>, Наливкин М.А.<sup>1</sup>, Шугаров А.С.<sup>1</sup>, Бисикало Д.В.<sup>1</sup>, Эгамбердиев Ш.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Астрономический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Описан новый широкоугольный оптический инструмент ИНАСАН, который создается в рамках двустороннего российско-узбекского сотрудничества по астрономии в 2023–2024 гг. Инструмент представляет собой кластер из четырех идентичных широкоугольных 28 см телескопов на единой монтировке и предназначен для всенебесных обзоров и фотометрического мониторинга. За одну экспозицию кластер просматривает небесную площадку 7 кв. гр. одновременно в четырех фотометрических полосах с масштабом пикселя 1.26". Приведены и обсуждены технические и оптико-электронные характеристики кластера. Кластер планируется установить на Майданакской астрономической обсерватории АИ АН РУз, которая характеризуется большим количеством ясного ночного времени (около 2500 часов в год) с устойчивым и высоким медианным качеством изображения (лучше 0.7"). Кластер ИНАСАН станет одним из наиболее информативных позиционно-фотометрических комплексов в РФ и будет востребован в мировой сети многоцветных широкоугольных оптических телескопов, включая астрономические сети БРИКС.

Поступила в редакцию 30.11.2023 г. Принята в печать 15.12.2023 г.

Ключевые слова: широкоугольный телескоп, охлаждаемая КМОП камера, оптические транзиенты, многоцветная фотометрия

## Russian-Uzbek 4-channel cluster telescope for all-sky survey and multicolor photometry

Ibrahimov M.A.<sup>1</sup>, Nalivkin M.A.<sup>1</sup>, Shugarov A.S.<sup>1</sup>, Bisikalo D.V.<sup>1</sup>, Ehgamberdiev Sh.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Ulugh Beg Astronomical Institute of the UzAS, Tashkent, Uzbekistan

A new INASAN wide field optical instrument is described. It has been created in frame of bilateral Russian-Uzbek collaboration on astronomy in 2023–2024. The instrument is a cluster of 4 identical wide field 28 cm telescopes on a common mount designed for the all-sky surveys and photometric monitor. For a single exposure, the cluster gets an image of 7 square degree field simultaneously in 4 photometric bands with 1.26 arcsec pixel scale. Technical and optoelectronic characteristics of the cluster are presented and discussed. It's planned to install the cluster at the Maidanak Astronomical Observatory of UBAI which has a large amount of clear night time (about 2500 hours per year) with a stable and high median seeing of 0.7 arcsec. The INASAN cluster will become one of the most informative positional photometric multi-band observation systems in the Russian Federation. It will also be useful in a global network of multi-band wide field optical instruments including BRICS astronomical networks.

Received 30.11.2023. Accepted 15.12.2023.

Keywords: wide field telescope, cooled CMOS camera, optical transients, multi-band photometry

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.4.007

## 1. Введение

С начала 2010 г. Институт астрономии РАН (ИНАСАН) активно разрабатывает и продвигает масштабный проект по созданию собственной распределенной глобальной сети оптических телескопов. Сеть ИНАСАН создается как объединение собственных инструментов, расположенных в российских филиалах ИНАСАН — Звенигородская, Терскольская, Симеизская и новая Кисловодская обсерватории ИНАСАН, с привлечением зарубежных наблюдательных центров ИНАСАН — российско-кубинской обсерватории, российско-узбекской и других создаваемых за рубежом обсерваторий ИНАСАН. Сеть включает уже существующие и вновь создаваемые телескопы различных типов для решения широкого круга наблюдательных задач. Задачи сети в ближнем космосе включают космический мусор, его фрагменты, АКО, ПОА, АСЗ, метеорные потоки и др., задачи в дальнем космосе — переменные и транзиентные объекты различной природы, экзопланеты, внегалактические объекты и т. п. Имеющиеся в настоящее время технические средства сети предназначены, в основном, для проведения позиционных и фотометрических исследований. Они включают узкопольные телескопы с апертурами от 0.5 м до 2 м для прецизионных исследований и широкоугольные (как правило, роботизированные) телескопы с апертурами от 0.2 м до 1 м для обзорных и мониторинговых задач.

В рамках сети ИНАСАН используются и планомерно модернизируются 1-м и 2-м телескопы Центра коллективного пользования ИНАСАН [1, 2, 3], расположенные в Симеизской и Терскольской обсерваториях. В состав сети войдет новая Кисловодская обсерватория ИНАСАН, где уже установлено два, а к концу 2024 г. будет установлено три оптических телескопа с апертурами 0.5 м. В ноябре 2021 г. был введен в строй первый зарубежный филиал ИНАСАН — российско-кубинская обсерватория с широкоугольным 20 см роботтелескопом, установленным в Гаване, Республика Куба [4, 5].

В настоящей работе дано описание нового инструмента, который в 2023–2024 гг. создается для российскоузбекского филиала ИНАСАН. Инструмент представляет из себя кластер из четырех одинаковых телескопов (4-канальный кластер), соосно установленных на общей монтировке и предназначенных для проведения всенебесных многоцветных обзоров и фотометрического мониторинга. За одну экспозицию кластер осуществляет обзор одной небесной площадки одновременно в четырех фотометрических полосах. 4-канальный кластер будет обеспечивать:

- фотометрические измерения объектов ярче 16<sup>m</sup> на поле 3.3° × 2.2° с точностью до 0.005<sup>m</sup> СКО одновременно в спектральных полосах UBVR или BVRI;
- астрометрические измерения для объектов ярче 19<sup>m</sup> с точностью 0.15 0.20";
- обнаружение околоземных объектов ярче 19<sup>m</sup> с экспозицией 30 с и отношением SNR = 3 (данные будут уточнены).

Ниже приводятся основные технические характеристики инструмента, обсуждаются цели и задачи проекта и описываются отличительные характеристики места установки нового инструмента.

## 2. 4-канальный кластер для российско-узбекского филиала ИНАСАН

#### 2.1. Кластерная концепция: телескопы

В настоящее время все большее распространение получает концепция построения обзорных телескопов, согласно которой вместо одного крупного широкоугольного телескопа с мозаичным детектором используется несколько более мелких телескопов, установленных на общей монтировке. В качестве примера можно привести второе поколение телескопов системы ATLAS [6], DDOTI [7], предложения ИНАСАН по созданию мультиапертурного телескопа INF [8]. Зачастую такой подход оказывается более экономичным и быстрым в реализации, поскольку стоимость телескопа растет в степенной зависимости от его апертуры, а телескопы более мелких апертур и детекторы меньших форматов часто доступны в виде серийных коммерческих продуктов.

Имеется два варианта использования мультиканальных систем с малыми апертурами: первый, когда несколько телескопов на общей монтировке направлены на одно поле (оптические оси параллельны); второй, когда оптические оси разведены с целью наблюдения мозаичной площадки большей площади. Для реализации описанных вариантов каждый телескоп должен иметь привод отклонения оптической оси от номинального положения. Такой подход позволяет быстро переключаться между двумя режимами обзора:

- быстрый обзор с меньшим проницанием;
- глубокий обзор, но с меньшей производительностью.

Нужно отметить, что одиночный крупный телескоп тоже может реализовать быстрый режим при наличии детектора с быстрым считыванием и быстрой монтировки. Однако в таком случае увеличивается потеря времени на очень частые перенаведения и считывания детектора. В случае мультиапертурного телескопа (кластера) потери времени в быстром режиме уменьшаются пропорционально количеству труб на одной монтировке. Другое преимущество мультиапертурного телескопа — возможность установки на каждый телескоп различных фильтров. Это позволяет в соосном режиме проводить наблюдения одновременно в нескольких спектральных полосах.

В числе недостатков мультиапертурных систем перед одиночным телескопом можно отметить:

- потенциально больший вклад шума считывания нескольких детекторов при работе в соосном режиме;
  сложность «склейки» изображений с нескольких детекторов, учитывая, что все телескопы и детекторы имеют небольшой разброс параметров;
- потенциально худшее угловое разрешение и семплинг у телескопов меньших апертур.

Наличие большего количества подвижных и функциональных элементов у мультиапертурного телескопа имеет как плюсы, так и минусы. С одной стороны, это снижает надежность, с другой стороны, отказ одного телескопа в мультиапертурной системе не приводит к отказу всего наблюдательного узла. Надежность мультиапертурного телескопа по критерию отказа наблюдательного узла в итоге более высокая, чем у одиночного телескопа.

### 2.2. Кластерная концепция: приемники излучения

В настоящее время шум считывания современных КМОП камер не превосходит нескольких электронов. При типовых экспозициях 10–60 с вклад шума от фона неба превосходит шум считывания детектора. Таким образом, условно можно считать, что цифровое сложение нескольких (2–4) кадров, полученных на нескольких камерах, не приводит к уменьшению чувствительности системы.

Долгое время размер фоточувствительного элемента КМОП или ПЗС не мог быть уменьшен ниже порога порядка 10 мкм без существенных потерь в емкости ячейки. В последние пять лет, благодаря бурному

197



Рис. 1: Компоновка четырех телескопов Celestron RASA11 на экваториальной монтировке вилочного типа.

развитию КМОП технологии, стало возможным изготовление пикселя размером 3–5 мкм, обладающего достаточной емкостью ячейки (десятки тысяч электрон), низкими шумами, высоким коэффициентом полезной фоточувствительной площади. Из-за очень низкого шума считывания КМОП (вплоть до 1 e<sup>-</sup> CKO), динамический диапазон таких мелких пикселей может составлять более 10000:1, что приближается к классическим ПЗС научного уровня.

До недавнего времени единственным способом перешагнуть 50 Мпкс рубеж для обзорного телескона было создание мозаичного детектора, что автоматически поднимало стоимость как самой камеры, так и фокального узла на порядок. Кроме того, такие фокальные узлы всегда проектируется на заказ, изготавливаются как опытно-экспериментальные образцы в одном или нескольких экземплярах, что делает затруднительным их тиражирование.

Стоимость КМОП чипа в основном пропорциональна площади чипа, а не размеру пикселя. Таким образом, КМОП с мелким пикселем характеризуются в разы меньшей удельной стоимостью одного пикселя. Это привело к появлению условно «нового» класса пригодных для научного применения крупноформатных КМОП с мелким пикселем, количество пикселей которых перешагнуло рубеж 50 Мпкс.

Применение таких КМОП позволяет создавать широкоугольные телескопы с апертурами 0.2–0.5 м с информационной емкостью 50–100 Мпкс, оставаясь в рамках бюджета обычных камер с Пельтье охлаждением. В качестве примера приведем КМОП фирмы SONY IMX455 размером 36×24 мм, с обратной засветкой и особо мелким пикселем 3.76 мкм. Сенсор имеет 61 мегапикселей, что в сочетании с максимальным квантовым выходом 91% и минимальным уровнем шума 1.5 e<sup>-</sup> СКО позволяет получить систему с высокой информационной емкостью при очень компактных размерах камеры и невысокой стоимости.

### 2.3. Российско-узбекский кластер

Для российско-узбекского филиала ИНАСАН создается кластер из четырех одинаковых широкоугольных телескопов Celestron RASA11 на общей монтировке (рис. 1). Четыре 11-дюймовых телескопов Celestron RASA11, направленные соосно, эквивалентны одному телескопу с эффективной апертурой 56 см. В состав наблюдательного пункта будут входить:

- вилочная экваториальная монтировка с прямым приводом и абсолютными энкодерами Astrosib FMDD-700, обеспечивающая быстрое наведение на объект со скоростью 10°/с, и точное звездное ведение без необходимости гидирования;
- широкоугольный телескоп Celestron RASA11 с блендой и управляемой крышкой (4 шт.);
- камера ZWO ASI6200MM Pro (4 шт.);

- фокусер ZWO 5V-EAF (4 шт.);
- адаптер Baader UFC для установки фильтра 50×50 мм (4 шт.);
- комплект фотометрических светофильтров UBVR или BVRI;
- управляющий компьютер;
- сервер-вычислитель с графическим ускорителем и система хранения данных;
- программный комплекс, обеспечивающий получение, обработку и хранение информации;
- павильон с автоматизированной откатной крышей.

Кластер построен преимущественно на коммерчески доступных компонентах (COTS, commercial on the shelf). Кластер будет изготавливаться и тестироваться в ИНАСАН на территории РФ, после отладки он будет установлен на Майданакской астрономической обсерватории АИ АН РУз на территории Узбекистана. Основные инструменты кластера — широкоугольный телескоп Celestron RASA11 и KMOII камера ZWO ASI6200MM Pro. Технические характеристики телескопа и камеры приведены в табл. 1.

Телескоп Celestron RASA11 (Rowe-Ackermann Schmidt Astrograph, RASA) с 11-дюймовой апертурой (279 мм) с фокальным отношением F/D = 2.22 состоит из пластины-корректора Шмидта (рис. 2), главного зеркала и четырехэлементной линзы-корректора [9]. Размер области оптимального качества изображения (рис. 3) при небольшом виньетировании на краях составляет 44 мм, что согласовано с типовым форматом КМОП сенсора  $36 \times 24$  мм (рис. 4). В проекте используется камера ZWO ASI6200M Pro данного формата.

При желании, можно установить камеру с более крупным сенсором, например с чипом Sony IMX461 размером 44×33 мм формата 100 Мріх. Это позволит увеличить поле зрения на 60% до 12 кв. гр., из них около 10 кв. гр. будут иметь номинальное качество изображения, а на краях сенсора (общая площадь около

Таблица 1: Основные параметры телескопа RASA11 и камеры ASI 6200MM Pro на КМОП-сенсоре IMX455 для 4-канального кластера.

Параметр	Значение
Апертура телескопа, мм	279
Светосила	F:2.22
Фокусное расстояние, мм	620
Спектральный диапазон, нм	430-700
Поле зрения (виньетирование на краю 23%), гр.	3.94
Поле зрения (виньетирование на краю 23%), мм	43
Поле зрения на детекторе 36×24 мм (IMX455), гр.	$3.3 \times 2.2$
Поле зрения на детекторе 36×24 мм (IMX455), кв. гр.	7.38
Поле зрения расширенное (виньетирование на краю 40%), гр.	4.77
Поле зрения расширенное (виньетирование на краю 40%), мм	52
Поле зрения расширенное на детекторе 44×33 мм (IMX461), гр.	$4.03 \times 3.02$
Поле зрения расширенное на детекторе 44×33 мм (IMX461), кв. гр.	12*
Масштаб, "/пиксель (пиксель 3.76 мкм)	1.26
D <sub>80</sub> (среднее), мкм	4.5
Охват (Etendue), $cm^2$ гр. <sup>2</sup>	4779
Задний отрезок, мм	55
Масса телескопа без научной аппаратуры, кг	15.9
Монтировка	вилочная, экваториальная, прямой
	привод
Параметры камеры ASI 6200MM Pro	
Формат сенсора (IMX455), пиксель	$9576 \times 6388$
Размер пикселя, мкм	3.76
Квантовая эффективность, %	до 91
Шум считывания, е СКО, низкое усиление	3.5
Емкость пикселя при низком усилении, е	51400
Шум считывания, е СКО, среднее усиление	1.5
Емкость пикселя при среднем усилении, е	10000
Шум считывания, е <sup>-</sup> СКО, высокое усиление	1.3
Емкость пикселя при высоком усилении, е <sup>-</sup>	500
Разрядность АЦП, бит	16
Охлаждение, °С	35
Темновой ток при –20°C, $e^-/c/$ пиксель	0.0006
Максимальная скорость съемки, к/с	2

(\*) На краях детектора будет виньетирование и ухудшение качества изображения



Рис. 2: Оптическая схема телескопа Celestron RASA11 [9].



Рис. 3: Расчетное качество изображения Celestron RASA11, размер квадрата 9 мкм [9].

2 кв. гр.) будет ухудшение качества изображения, виньетирование достигнет 40%. Возможность применения данного более крупного КМОП позволит осуществить апгрейд системы в будущем.

Также можно установить камеру с еще более крупным сенсором, например с чипом Sony IMX411 размером 54×40 мм формата 150 Мріх, которая почти полностью покрывает область наилучших изображений телескопа RASA11. Это позволит увеличить поле зрения до 16 кв. гр., из них около 12 кв. гр. будут иметь номинальное качество изображения. Однако данная камера имеет большие габариты, что приведет к увеличению центрального экранирования. Больший вес камеры приведет к увеличению искажений из-за изгибов пластины Шмидта. Целесообразность установки данной камеры зависит от приоритетов в списке решаемых научных задач.

ASI 6200MM Pro — это монохромная охлаждаемая полноформатная камера последнего поколения на чипе SONY IMX455, пригодная для использования в астрономии. В КМОП SONY IMX455 реализована технология sHCG (super High Conversion Gain), которая разбивает рабочий диапазон усилений на две области. При усилении до 10 дБ шум считывания составляет около 3.4 e<sup>-</sup> CKO, при этом достигается емкость ячейки 51 ke<sup>-</sup>. При усилении 10 дБ шум считывания ступенчато уменьшается до 1.5 e<sup>-</sup> CKO, емкость ячейки уменьшается до 10 ke<sup>-</sup>. При использовании максимального коэффициента усиления шум считывания уменьшается до 1.3 e<sup>-</sup> CKO, но емкость ячейки падает до 500 e<sup>-</sup>. Для широкоугольного телескопа, работающего с экспозициями около 1 минуты, из-за наличия фона неба, оптимальными являются низкий и средний коэффициенты усиления.

Двухступенчатая система охлаждения КМОП позволяет понизить рабочую температуру сенсора на 35°C относительно температуры окружающей среды. При 0°C темновой ток составляет 0.003 e<sup>-</sup>/c/пиксель, что является пренебрежимо малой величиной для обзорного телескопа. В камеру встроен нагревательный элемент из полиамида, предохраняющий защитное стекло камеры от запотевания. Подключение к компьютеру осуществляется через порт USB 3.0.



Рис. 4: Сравнение полей зрения телескопа Celestron RASA11 и КМОП камеры ZWO ASI6200MM Pro на чипе Sony IMX455 с полями зрения более крупных чипов.

В системе не будет электромеханического затвора камеры, будет использоваться электронный затвор КМОП сенсора. Корпус камеры представляет собой цилиндр диаметром 90 мм и длиной 170 мм, который специально разработан для минимизации виньетирования при установке на телескопе во входном пучке. В кластере установлены дополнительные бленды телескопов с диафрагмами, снижающими засветку от фона неба, что критично для светосильных обзорных телескопов. Также телескопы кластера оснащены автоматическими крышками, откидывающимися на 270 градусов, что предохраняет оптику и позволяет получать калибровочные кадры (bias, dark).

Масштаб изображения на детекторе составляет 1.26"/пиксель. Согласно испытаниям [6], качество оптики телескопа Celestron RASA11 обеспечивает FWHM около 2 пикселей на аналогичной камере без использования светофильтра. В создаваемом кластере предполагается использование светофильтров, поэтому в более узких полосах ожидается немного лучшее качество изображений на уровне 1.5".

В Звенигородской обсерватории с 2021 г. успешно эксплуатируется робот-телескоп на основе Celestron RASA11 в сочетании с приемником излучения ZWO ASI6200MM Pro на монтировке с прямым приводом ASA DDM85 (рис. 5). Наблюдения проводятся в полосе V, среднее качество звездных изображений, ограниченное атмосферой, по всему полю составляет 1.7", а величина проницания, в свою очередь, ограничена засветкой. Тем не менее, точность фотометрических измерений составляет до 0.005<sup>m</sup> СКО. Опыт, полученный ИНАСАН в ходе создания и эксплуатации данного телескопа, положен в основу текущего проекта создания 4-канального кластера.

Нами выполнена предварительная оценка предельной величины проницания для каждого телескопа кластера и соответсвующей фотометрической полосы, по методике [10]. Коэффициенты атмосферной экстинкции для Майданакской обсерватории были взяты из работы [11], кривые спектрального пропускания интерференционных фотометрических фильтров Baader UBVRI, кривая спектральной чувствительности и прочие характеристики приемника излучения ZWO ASI6200MM Pro были взяты из данных производителей. Для идеальных условий (зенит, безлунная ночь, фон неба  $21.5^{\rm m}$ /кв. угл. с (V)) получены следующие оценки предельной проницающей величины для SNR = 3 при экспозиции 30 с:  $20.13^{\rm m}$  (С или без фильтра),  $18.1^{\rm m}$  (U),  $18.6^{\rm m}$  (B),  $19.35^{\rm m}$  (V),  $19.32^{\rm m}$  (R),  $18.07^{\rm m}$  (I). Это согласуется с экспериментальной оценкой величины проницающей величины кластера будут уточнены.

Подводя итог, можно сказать, что несмотря на компактные размеры телескопа и камеры, угловое разрешение кластера, установленного на Майданакской обсерватории, ожидается на уровне 1.5" на всем поле 7 кв. гр., что является хорошим показателем для широкоугольной системы. Ожидается, что кластер позволит эффективно наблюдать объекты до 20<sup>m</sup> при одиночных экспозициях и до 21<sup>m</sup> при сложении кадров.

## 3. Проект BITDN и задачи 4-канального кластера

ИНАСАН в числе нескольких других астрономических организаций из  $P\Phi$  входит в состав Астрономической рабочей группы стран БРИКС (BAWG или BRICS Astronomy Working Group). Эта группа с 2018 г. занимается разработкой международного флагманского проекта BITDN (Flagman Project "BRICS Intelligent



Рис. 5: Прототип 4-канального кластера — робот-телескоп Звенигородской обсерватории ИНАСАН на основе телескопа Celestron RASA11 и камеры ZWO ASI6200MM Pro.

Telescope and Data Network", Флагманский проект «Интеллектуальный телескоп и база данных БРИКС»). Основные цели проекта BITDN [12]:

- создание международной наземной сети телескопов стран БРИКС, работающих в различных диапазонах электромагнитного спектра;
- создание базы данных стран БРИКС для мониторинга и исследований всего разнообразия наблюдаемых астрофизических транзиентов.

В рамках проекта BITDN будут проводиться координированные наземные и космические многоволновые наблюдения (гамма-, оптический, инфракрасный и радиодиапазоны) таких астрофизических транзиентов, как космические гамма-всплески (GRB, Gamma Ray Burst), события приливного разрушения (TDE, Tidal Distraction Event), быстрые радиовсплески (FRB, Fast Radio Burst), электромагнитные компоненты нейтринных событий, электромагнитные компоненты гравитационно-волновых явлений (килоновая), регистрируемых гравитационно-волновыми детекторами LIGO-Virgo-KAGRA.

Реализации амбициозного проекта BITDN в оптическом диапазоне требует, наряду с так называемыми «синоптическими системами» — широкоугольными оптическими телескопами с большими апертурами (от 1–2 м и более), также наличия «систем высокого временного разрешения» — широкоугольных телескопов малых апертур (менее 1 м). Разработка систем высокого временного разрешения является одной из приоритетных задач ИНАСАН (см., например, [13]). Именно такой системой является обсуждаемый фотометрический комплекс на базе российско-узбекского 4-канального кластера. Одной из целей создания кластера является повышение роли ИНАСАН в международных координированных наземных и космических многоволновых наблюдениях, в т. ч. в рамках БРИКС-проекта BITDN.

Широкоугольный кластер, способный осуществлять небесные обзоры одновременно в четырех фотометрических полосах и установленный в пункте с отличным астроклиматом (см. ниже), несомненно, будет представлять собой высокопроизводительный, скоростной и эффективный инструмент для детектирования оптических компонентов (послесвечений, самих свечений и возможно даже предсвечений) от различных астрофизических транзиентов в гамма-, рентгеновском, радио диапазонах спектра и нейтринных событий. Заметим, что создаваемый 4-канальный кластер является первым подобным инструментом для астрономии в РФ. В известных российских проектах ММТ-9 и МАСТЕР реализована одновременная 2-полосная система наблюдений, в создаваемом кластере она будет 4-полосная. Кроме того, проект MACTEP уступает создаваемому кластеру в поле зрения (4 кв. гр. против 7 кв. гр.).

### 4. Место установки, особенности, астроклимат, наблюдательный потенциал

Как известно, эффективная работа астрономического инструмента определяется не только его оптикотехническими показателями, но во многом астроклиматом места установки. Также известно, что на территории РФ мало мест с благоприятным астроклиматом (см., например, [14, 15]). Исходя из этого, 4-канальный кластер предполагается установить на Майданакской астрономической обсерватории Астрономического института им. Улугбека АН РУз (МАО АИ АН РУз) [16].

МАО АИ АН РУз выбрано местом установки потому, что это одно из лучших мест в мировом астроклиматическом рейтинге. Майданакская обсерватория входит в пятерку мест с так называемым «отличным астроклиматом». Имеющиеся многолетние исследования, прокалиброванные с такими лучшими местами мира, как Чили, Гавайи и Канарские острова, подтверждают, что МАО была и остается местом с отличным астроклиматом [17, 18]. Количество ясного ночного времени на МАО достигает 2500 часов в год, а медианное значение качества изображения на протяжении последней четверти века исследований сохраняется на уровне лучше 0.7'' [19]. Для сравнения заметим, что лучшие обсерватории РФ на Кавказе и в Крыму показывают не более 1500 часов ясного ночного времени в год и примерно вдвое худшее среднее качество изображения около 1.5'' [14, 15].

Серьезный (примерно в 1000 часов в год) выигрыш по ясному времени, почти двойной выигрыш по качеству изображения и низкий уровень фоновой засветки (особо важно при широкоугольных обзорах) существенно увеличат наблюдательный потенциал создаваемого кластера. Ожидается, что в перспективе ближайших 5–10 лет кластер ИНАСАН, установленный в МАО АИ АН РУз, станет одним из самых информативных комплексов среди многоцветных позиционно-фотометрических систем РФ. Также он будет востребован в международной сети ВІТDN (БРИКС) широкоугольных оптических инструментов.

## 5. Выводы

В работе приведено описание нового мощного инструмента — 4-канального кластера ИНАСАН. Кластер создается в рамках двустороннего российско-узбекского сотрудничества по астрономии. Кластер представляет собой 4 идентичных широкоугольных 28 см телескопа, установленных на единой монтировке и предназначенных для всенебесных обзоров и фотометрического мониторинга. За одну экспозицию кластер будет просматривать небесную площадку с полем зрения 7 кв. гр. одновременно в четырех фотометрических полосах, при этом эквивалентная апертура кластера составит 56 см.

Местом установки кластера выбрана Майданакская астрономическая обсерватория Астрономического института им. Улугбека АН РУз. Большое количество ясного ночного времени (около 2500 часов в год), а также устойчивое и высокое (или, как говорят, «отличное») медианное качество изображения (лучше 0.7" на протяжении последней четверти века) определяют высокий наблюдательный потенциал и большую научную продуктивность проекта в целом. Кластер ИНАСАН станет одним из самых информативных многоцветных позиционно-фотометрических комплексов в РФ. Кластер ИНАСАН будет востребованным инструментом в мировой сети многоцветных широкоугольных оптических инструментов БРИКС.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России, грант 075-15-2022-1221 (2022-BRICS-8847-2335).

- 1. I. V. Nikolenko, S. V. Kryuchkov, S. I. Barabanov, and I. M. Volkov, INASAN Science Reports, 4, 85, 2019.
- S. I. Barabanov, S. A. Potanin, A. D. Savvin, I. M. Volkov, A. S. Kravtsova, and I. V. Nikolenko, *INASAN Science Reports*, 6, 92, 2021.
- 3. S. V. Kryuchkov, I. V. Nikolenko, M. S. Kryuchkov, and S. S. Arshinkin, INASAN Science Reports, 6, 114, 2021.
- 4. A. Alonso Diaz, M. Rodriguez Uratsuka, O. Pons Rodriguez, Z. Barcenas Fonseca, et al., *Rev. Cubana Fis.*, **37**, 162, 2020.
- 5. D. V. Bisikalo, M. E. Sachkov, M. A. Ibrahimov, I. S. Savanov, et al., Astronomy Reports, 66, 38, 2022.
- 6. J. Licandro, J. Tonry, M. R. Alarcon, M. Serra-Ricart, and L. Denneau, arXiv e-prints, arXiv:2302.07954, 2023.
- A. M. Watson, W. H. Lee, E. Troja, C. G. Román-Zúñiga, et al., in A. B. Peck, R. L. Seaman, and C. R. Benn, eds., Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VI, 9910, 99100G (2016).
- A. Shugarov, M. Nalivkin, S. Naroenkov, and I. Savanov, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso, 49, 293, 2019.
- 9. B. Richard, Celestron RASA11 White paper, 2016.
- 10. M. V. Newberry, Proc. Astron. Soc. Pacif., 103, 122, 1991.
- 11. Y. Jeon, M. Im, M. Ibrahimov, H. M. Lee, I. Lee, and M. G. Lee, Astrophys. J. Supp., 190, 166, 2010.

- M. A. Nalivkin and A. S. Shugarov, in B. M. Shustov and D. S. Wiebe, eds., Stars and Satellites, Proceedings of the Memorial Conference Devoted to A.G. Masevich 100th Anniversary, 320–326 (2018).
- 14. V. E. Panchuk and V. L. Afanas'ev, Astrophysical Bulletin, 66, 233, 2011.
- 15. V. E. Panchuk, INASAN Science Reports, 5, 344, 2020.
- 16. S. Ehgamberdiev, Nature Astronomy, 2, 349, 2018.
- Sh. A. Ehgamberdiev, A. K. Baijumanov, S. P. Ilyasov, M. Sarazin, Y. A. Tillayev, A. A. Tokovinin, and A. Ziad, Astron. and Astrophys. Supp., 145, 293, 2000.
- 18. B. P. Artamonov, V. V. Bruevich, A. S. Gusev, O. V. Ezhkova, et al., Astronomy Reports, 54, 1019, 2010.
- 19. S. B. Tursunkulov, A. M. Azimov, Y. A. Tillayev, and S. A. Ehgamberdiev, INASAN Science Reports, 8, 138, 2023.

## Содержание

Коробцев И.В., Еселевич М.В. Предварительные результаты фотометрии геостационарных КА в оп-	
тическом и ближнем инфракрасном диапазонах	169
Молотов И.Е., Чжан Ч., Чжу Т., Юй Ш. и др. Новый статус проекта ИСОН	177
Николенко И.В., Аршинкин С.С., Маслов И.А., Шенаврин В.И. Наблюдение сверхновой SN2023ixf в	
июле 2023 г	183
Терентьева А.К., Барабанов С.И. Метеоритообразующие тела внутри орбиты Земли	186
Кузин С.П. Исследование влияния применения модели AOD1B на точность обработки DORIS из-	
мерений	188
Кузин С.П. Использование кватернионов при обработке DORIS данных	192
Ибрагимов М.А., Наливкин М.А, Шугаров А.С., Бисикало Д.В., Эгамбердиев Ш.А. Четырехка-	
нальный российско-узбекский кластер	195

## Contents

Korobtsev I.V., Eselevich M.V. Preliminary results of photometry of geostationary satellites in the optical	
and near infrared ranges	169
Molotov I.E., Zhang Ch., Zhu T., Yu Sh. et al New status of the ISON project	177
Nikolenko I.V., Arshinkin S.S., Maslov I.A., Shenavrin V.I. Observation of the supernova SN2023ixfin	
July 2023	183
Terentjeva A.K., Barabanov S.I. Meteorite producing bodies inside the Earth's orbit	186
Kuzin S.P. Study of the impact of using the AOD1B model on the processing accuracy of DORIS	
measurements	188
Kuzin S.P. Using quaternions in DORIS data processing	192
Ibrahimov M.A., Nalivkin M.A., Shugarov A.S., Bisikalo D.V., Ehgamberdiev Sh.A. Russian-Uzbek 4-	
channel telescope	195