

ISSN 2658-5669

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН

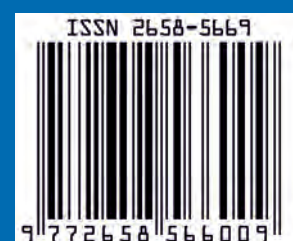
INASAN
SCIENCE
REPORTS

ТОМ
11
ВЫПУСК 3



МОСКВА
2026

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



УДК 52
ББК 22.6
Н34

Н34 **Научные труды Института астрономии РАН. Том 11(1).** –
М.: Изд-во Янус-К, 2026, 44 с., илл.

ISSN 2658-5669 e-ISSN 2712-8318

Редколлегия

Сачков М.Е. (главный редактор), Вибе Д.З. (зам. главного редактора), Барков М.В.,
Бисикало Д.В., Копылов Е.А., Кохирова Г.И., Кузнецов Э.Д., Малков О.Ю.,
Машонкина Л.И., Нароенков С.А., Шематович В.И., Шустов Б.М., Щербина М.П.
Холтыгин А.Ф. (приглашенный редактор)

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, звездной астрономии, физике Солнца, небесной
механике, астрономическим методам и приборам, космическим исследованиям и
исследованиям в области космической геодезии.

© ИНАСАН, 2026
© Коллектив авторов, 2026

INASAN Science Reports. Vol 11(1). M.: Janus-K, 2026, 44 pp.

ISSN 2658-5669 e-ISSN 2712-8318

Editorial Board

M.E. Sachkov (Editor-in-Chief), D.S. Wiebe (Deputy Editor-in-Chief), Barkov M.V., D.V. Bisikalo,
E.A. Kopylov, G.I. Kokhirova, E.D. Kuznetsov, O.Yu. Malkov, L.I. Mashonkina, S.A. Naroenkov,
V.I. Shematovich, B.M. Shustov, M.P. Shcherbina, A.F. Holtygin (guest editor)

Coordinating Editor Isakova P.B.
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, 2026
© Author team, 2026

Учредитель:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Института астрономии Российской академии наук

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-83927 от 16.09.2022)

Научное издание

**Научные труды
Института астрономии РАН.
Том 11 (3)**

Сдано в набор 29.06.2026. Подписано в печать 01.07.2026
Формат 60х90/8. Бумага офсетная.
Уч.-изд. п.л. 5,5. Физ. п.л. 5,5. Тираж 100. Заказ №2297

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

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



Статистическая оценка размеров частиц космического мусора по результатам радиолокационных наблюдений

Русаков А.И., Лагуткин В.Н.

ПАО «МАК «Вымпел», Москва, Россия

Московский физико-технический институт, Москва, Россия

При орбитальном движении частицы космического мусора неуправляемо вращаются, вследствие чего радиолокационные замеры их эффективных площадей рассеяния являются случайными значениями. По данным множества подобных замеров можно оценить характерный размер каждой отдельной частицы. В статье рассмотрена задача статистической оценки размеров частиц космического мусора по результатам их радиолокационных наблюдений в течение длительного времени. В ходе работы рассмотрены и выбраны параметры режима радиолокационного наблюдения, необходимые для оптимального наблюдения частиц космического мусора. Разработан и описан алгоритм оценки характерного размера наблюдаемых частиц по набранной статистике. Для проведения численных экспериментов разработан комплекс имитационных моделей, с использованием которого моделируется радиолокационное наблюдение частиц космического мусора и оценка их характерных размеров. Приведены результаты численного моделирования предложенного алгоритма с использованием данных, полученных с помощью комплекса имитационных моделей. Определены и исследованы характеристики точности оценки размеров частиц космического мусора.

Поступила в редакцию 28.01.2026 г. Принята в печать 29.04.2026 г.

Ключевые слова: космический мусор, радиолокационные наблюдения, эффективная площадь рассеяния, оценка размеров

Statistical estimation of sizes of space debris particles based on the results of radar observations

Rusakov A.I., Lagutkin V.N.

PJSC "Vimpel", Moscow, Russia

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

During orbital motion, space debris particles rotate uncontrollably, as a result of which radar measurements of their effective scattering areas are random values. Based on the data of many similar measurements, it is possible to estimate the characteristic size of each individual particle. The article considers the problem of statistical estimation of the size of space debris particles based on the results of their observations by radars during long time. In the course of the work, the parameters of the radar observation mode necessary for optimal observation of space debris were considered and selected. An algorithm for estimating the characteristic size of the observed particles based on the collected statistics is developed and described. To provide numerical experiments, a complex of simulation models has been developed, which is used to simulate radar observation of space debris particles and estimate their characteristic sizes. The results of testing the proposed algorithm using data obtained using complex of simulation models are presented. The characteristics of the accuracy of estimating the size of space debris particles have been determined and investigated.

Received 28.01.2026. Accepted 29.04.2026.

Keywords: space debris, radar observations, radar cross section, size estimation

DOI: 10.51194/INASAN.2026.11.3.001

1. Введение

В настоящее время мониторинг космических объектов осуществляется по результатам радиолокационных и оптических измерений. Утверждается, что уверенно отслеживаются только самые крупные объекты космического мусора размером более 10 см на низких и более 30–50 см на высоких орбитах. Оценка количества объектов размером более 10 см — 34 тыс., для объектов размером 1–10 см — 900 тыс., а для объектов размером 0.1–1 см — 130 млн [1]. На повестку дня встает тема экологической опасности, вызванной космическим мусором. Появляется необходимость создания информационного банка, содержащего данные о количестве, параметрах орбит и размерах частиц космического мусора (ЧКМ), который можно было бы использовать при планировании космической деятельности [1, 2].

Задачей данной работы является исследование возможностей оценки распределения по размерам частиц потока космического мусора по результатам радиолокационных наблюдений. Условно ее можно разделить на пять частей:

- 1) анализ и выбор параметров режима радиолокационного наблюдения,
- 2) разработка алгоритма оценки характерного размера наблюдаемых частиц по набранной статистике,
- 3) разработка комплекса имитационных моделей, с использованием которого моделируется радиолокационное наблюдение частиц космического мусора,
- 4) оценка объема и времени получения необходимой статистики,

5) расчет ошибок оценивания размеров частиц при различных объеме и времени получения статистики. Задача определения орбит ЧКМ не рассматривается, предполагается, что она решается известными методами [3].

2. Основные соотношения, необходимые для моделирования работы радиолокаторов

При выборе параметров, описывающих работу радиолокаторов по наблюдению ЧКМ, необходимо рассмотреть основные соотношения и ограничения физического характера.

Радиолокационная заметность ЧКМ определяется отношением сигнал/шум, формула для которого представляет собой уравнение радиолокации [4]:

$$SNR = \frac{P_n G^2 \lambda^2 \sigma \tau_n}{k_B T_s (4\pi)^3 R^4}, \quad (1)$$

где P_n — импульсная мощность радиолокатора, G — коэффициент направленного действия антенны, λ — длина волны, σ — эффективная площадь рассеяния (ЭПР) частицы, τ_n — длительность импульса, k_B — константа Больцмана, T_s — шумовая температура, R — расстояние между ЧКМ и радиолокатором.

Импульсная мощность связана со средней мощностью $\bar{P}$ соотношением:

$$P_n \tau_n = \bar{P} T_n = E_n, \quad (2)$$

где T_n — период повторения импульсов, E_n — энергия зондирующего импульса.

В соответствии с уравнением радиолокации для обеспечения необходимых условий наблюдения требуются достаточно высокая энергетика зондирующих сигналов, а также минимально возможная дальность наблюдения. Отсюда следует, что наиболее выгодным является наблюдение в зенит.

Естественно предположить, что большинство ЧКМ в ближнем околоземном космосе находятся на околокруговых орбитах. В этом случае при наблюдении в зенит дальность примерно равна высоте орбиты. Поэтому при исследовании возможностей наблюдения низкоорбитальных ЧКМ целесообразно разбить область низких орбит на высотные слои.

Для высотного слоя с нижним уровнем $H_{\min}$ и верхним уровнем $H_{\max}$ длительность импульса ограничена условием:

$$\tau_n \leq \frac{2H_{\min}}{c}, \quad (3)$$

а период излучения импульсов — условием:

$$T_n \geq \frac{2H_{\max}}{c} + \tau_n. \quad (4)$$

В качестве радиолокатора для наблюдения космического мусора рассматривается локатор с антенной, состоящей из линейки вибраторов, размещенных на фокусной оси параболического цилиндрического зеркала [5]. В качестве примера рассматривались параметры радиолокатора контроля космического мусора Kiwi Space Radar из работы [6]. В таком локаторе сектор обзора представляет собой угловой барьер в вертикальной плоскости, проходящей через фокусную ось зеркала, в направлениях, близких к зениту. Сканирование должно осуществляться так, чтобы за период обзора ЧКМ, пролетающие через сектор вблизи зенита, не были пропущены.

Пусть $\Delta\varphi$ — угловой размер сектора сканирования, $\Delta\varepsilon_{0.5}$ — ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности в вертикальной плоскости, перпендикулярной фокусной оси, $\Delta\psi_{0.5}$ — ширина диаграммы направленности антенны по уровню половинной мощности в вертикальной плоскости, проходящей через фокусную ось. Для исключения пропуска ЧКМ необходимо, чтобы время $t(H)$ прохождения частицей углового барьера было больше периода его обзора:

$$t(H) \geq \frac{\Delta\varepsilon_{0.5} H}{v(H)} \geq T_n \frac{\Delta\varphi}{\Delta\psi_{0.5}}, \quad (5)$$

где $v(H)$ — скорость движения частицы на высоте H . Учитывая известное соотношение $\Delta\psi_{0.5} \Delta\varepsilon_{0.5} \approx \frac{4\pi}{G}$, получаем ограничение на угловой размер сектора обзора:

$$\Delta\varphi \leq \frac{\Delta\psi_{0.5} \Delta\varepsilon_{0.5} H}{T_n v(H)} \approx \frac{4\pi}{G} \frac{H}{T_n v(H)}. \quad (6)$$

Минимальный размер сектора сканирования получается при $H = H_{\min}$:

$$\Delta\varphi(H_{\min}) \approx \frac{4\pi}{G} \frac{H_{\min}}{T_n v(H_{\min})} = \frac{2\pi}{G} \frac{c}{v(H_{\min})} \left(1 + \frac{H_{\max}}{H_{\min}}\right)^{-1}. \quad (7)$$

Можно видеть, что размер сектора сканирования зависит от отношения максимальной и минимальной высот рассматриваемого орбитального слоя. При этом, чем больше толщина орбитального слоя $\Delta H = H_{\max} - H_{\min}$ (то есть чем больше отношение $H_{\max}/H_{\min}$), тем меньше размер сектора сканирования. Для узкого слоя $H_{\max} \approx H_{\min}$:

$$\Delta\varphi \leq \frac{\pi}{G} \frac{c}{v(H_{\min})}. \quad (8)$$

Например, для параметров, указанных в [6]:

$$\Delta\varphi \approx 3.2^\circ. \quad (9)$$

Оценки для толщины высотного слоя $\Delta H \approx 100$ км и углового барьера размером $\Delta\varphi = 3.2^\circ$ показывают, что при изменении высоты орбиты ЧКМ от 400 до 2000 км соответственно варьируются длительности импульса $\tau_{\text{и}}$ от 0.0025 до 0.0125 с и периода повторения $T_{\text{п}}$ от 0.0055 до 0.0275 с.

3. Алгоритм оценки характерного размера ЧКМ

Перейдем к алгоритму оценки характерного размера ЧКМ по измерениям интенсивностей принятых сигналов. В алгоритме используются следующие обозначения:

- J — число наблюдаемых ЧКМ, j — номер наблюдаемой ЧКМ, $j = 1, \dots, J$;
- N_{jC} — число положительных проводок j -ой наблюдаемой ЧКМ, то есть проводок, в которых эта ЧКМ была обнаружена и были выполнены замеры ее сигнатур (ЭПР) C_{kj} , $k = 1, \dots, N_{jC}$;
- N_{jO} — общее число проходов j -ой наблюдаемой ЧКМ в секторах обзора радиолокаторов.

При орбитальном движении частицы космического мусора неуправляемо вращаются. В качестве модели условной плотности вероятности сигнатур, в принципе, могут рассматриваться различные распределения $f(C/d)$, где d — характерный размер ЧКМ [4]. В данной работе используется экспоненциальная функция:

$$f(C/d) = \frac{1}{S_d} e^{-\frac{C}{S_d}}, \quad (10)$$

где S_d — среднее значение ЭПР ЧКМ, определяемое соотношением $S_d = \frac{\pi d^2}{4}$.

Условную плотность вероятности эмпирической сигнатуры C_n с учетом шума $f(C_n/C)$ получим из распределения Райса [7]:

$$f(C_n/C) = \frac{1}{2\sigma_n} \exp\left\{-\frac{C_n + C}{2\sigma_n}\right\} I_0\left(\frac{\sqrt{C_n C}}{\sigma_n}\right), \quad (11)$$

где $I_0(x)$ — модифицированная функция Бесселя:

$$I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{x \cos y} dy, \quad (12)$$

а σ_n — сигнатура, эквивалентная мощности шума, то есть:

$$\sigma_n = \frac{1}{\sqrt{m_+} q_{\max}(10^3 \text{ км}, \sigma = 1 \text{ м}^2)} \left(\frac{r}{10^3 \text{ км}}\right)^4, \quad (13)$$

где m_+ — количество положительных замеров интенсивности за одну проводку, $q_{\max}(10^3 \text{ км}, \sigma = 1 \text{ м}^2)$ — отношение сигнал/шум для объекта с ЭПР $\sigma = 1 \text{ м}^2$ на расстоянии 10^3 км от локатора, r — расстояние между ЧКМ и локатором.

Тогда вероятность получения замера сигнатуры ЧКМ размера d в одной проводке при заданном пороге по сигнатуре S :

$$\bar{D}(d, S) = \int_0^\infty D(C, S) f(C/d) dC, \quad (14)$$

где $D(C, S)$ — условная вероятность получения замера сигнатуры, асимптотическая формула для которой имеет вид:

$$D(C, S) = \int_S^\infty f(C_n/C) dC_n = \frac{1}{2} \int_S^\infty \exp\left(-\frac{C_n + C}{2\sigma_n}\right) I_0\left(\frac{\sqrt{C_n C}}{\sigma_n}\right) \frac{dC_n}{\sigma_n} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^\infty e^{-y^2/2} dy, \quad (15)$$

$$z = \sqrt{\bar{S}} - \sqrt{\bar{C}} - \eta, \quad (16)$$

$$\eta \approx \frac{1}{2\sqrt{\bar{C}}} - \frac{\sqrt{\bar{S}} - \sqrt{\bar{C}}}{(2\sqrt{\bar{C}})^2}, \quad (17)$$

$$\tilde{S} = \frac{S}{\sigma_n}, \quad (18)$$

$$\tilde{C} = \frac{C}{\sigma_n}. \quad (19)$$

Вероятность получения $N_{jc}(S_k)$ замеров сигнатур при заданном пороге S_k (k — номер сигнатуры в вариационном ряду замеров) определяется биномиальным распределением

$$P(N_{jc}/d_j, S) = C_{N_{j0}}^{N_{jc}} \bar{D}^{N_{jc}} (1 - \bar{D})^{N_{j0} - N_{jc}}, \quad (20)$$

$$C_{N_{j0}}^{N_{jc}} = \frac{N_{j0}!}{(N_{jc}!(N_{j0} - N_{jc})!)}, \quad (21)$$

из которого получаем наиболее правдоподобную оценку

$$\hat{\bar{D}}(d_j, S_k) \approx \frac{N_{jc}(S_k)}{N_{j0}}. \quad (22)$$

Для вычисления наиболее вероятного характерного размера d ЧКМ используется метод наименьших квадратов:

$$f_j(d) = \sum_{k=1}^K \left(\frac{N_{jc}(S_k)}{N_{j0}} - \bar{D}(d, S_k) \right)^2, \quad (23)$$

$$\hat{d}_j = \min_d f_j(d). \quad (24)$$

Тогда по серии оценок $\hat{\bar{D}}(d_j, S_k)$ для различных S_k , используя выражение для вероятности $\bar{D}(d, S)$, по методу наименьших квадратов получим наиболее правдоподобную оценку d_j . Таким образом, зная количества пролетов ЧКМ и положительных проводок, можно дать оценку ее характерного размера.

4. Результаты имитационного моделирования

Для проведения численных экспериментов разработан комплекс имитационных моделей, включающий модель орбитального движения ЧКМ на низких орбитах, имитатор случайных величин ЭПР ЧКМ, модель радиолокационных измерений, модель обработки собранной статистики по ЭПР ЧКМ. С его помощью моделируется радиолокационное наблюдение ЧКМ и оценка их характерных размеров.

В ходе моделирования рассматривались различные варианты расположения и количества радиолокаторов, в том числе вариант размещения двух радиолокаторов на территории Российской Федерации: на Кавказе и на Дальнем Востоке. Ниже приводятся наилучшие результаты, полученные для конфигурации из шести радиолокаторов, расположенных в экваториальной зоне и примерно равномерно расставленных по долготе.

Комплекс программ позволяет варьировать различные параметры работы радиолокатора, такие как средняя мощность, период повторения импульсов и их длительность, размер сектора сканирования (в том числе вариант без сканирования) с учетом ограничений (5)–(8), рассмотренных в п. 2.

Параметры работы радиолокатора для численного исследования были определены на основе оценок, полученных в п. 2. При увеличении высоты орбиты ЧКМ от 400 до 2000 км длительность импульса (τ_n) изменяется от 0.0025 до 0.0125 с, период повторения (T_n) — от 0.0055 до 0.0275 с при неизменном размере сектора сканирования $\Delta\varphi \approx 3.2^\circ$.

Численные эксперименты проводились методом Монте-Карло для высот круговых орбит 400, 800, 1200, 1600 и 2000 км. Для каждой высоты задавались соответствующие значения параметров зондирования, указанные выше. Моделировались 100 реализаций полета ЧКМ со случайными орбитальными параметрами (наклонением и долготой восходящего узла) заданного характерного размера. По завершении моделирования выполнялась статистическая обработка результатов: вычислялись средние значения:

$$\bar{d}(H) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i, \quad (25)$$

смещения от истинного значения:

$$\Delta(H) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - d_{\text{ист}}), \quad (26)$$

и среднеквадратические отклонения:

$$\sigma(H) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}. \quad (27)$$

где d_i — оценка характерного размера ЧКМ, $d_{\text{ист}}$ — ее истинный размер, n — размер статистики, H — высота орбиты частиц в данном эксперименте.

Примеры обработанных данных при $d = 2$ см приведены в табл. 1, 2 и 3: каждой строке соответствует высота орбит, в столбцах представлены расчетные значения смещения, среднеквадратического отклонения (СКО), суммарной ошибки, равной квадратному корню из суммы квадратов смещения и среднеквадратического отклонения (в процентах к истинному характерному размеру), среднего числа пролетов ЧКМ в секторах сканирования, среднего числа успешных проводок, когда ЧКМ была обнаружена, и отношения количества успешных проводок к количеству пролетов (некоторые пролеты оказываются безуспешными из-за уровня сигнала, меньше порогового).

Таблица 1: Результаты оценок при длительности наблюдения 30 дней.

Высота, км	Смещение, см	СКО, см	Ошибка, %	Среднее число пролетов	Среднее число успешных проводок	Отношение числа проводок к пролетам, %
400	1.08	0.86	70	2.57	2.54	99
800	0.58	0.76	48	4.29	4.24	99
1200	0.38	0.61	36	5.91	5.82	98
1600	0.36	0.52	32	5.95	5.80	97
2000	0.48	0.63	39	6.81	6.60	97

Таблица 2: Результаты оценок при длительности наблюдения 60 дней.

Высота, км	Смещение, см	СКО, см	Ошибка, %	Среднее число пролетов	Среднее число успешных проводок	Отношение числа проводок к пролетам, %
400	0.43	0.67	40	4.75	4.68	99
800	0.22	0.46	25	8.21	8.09	99
1200	0.23	0.38	22	11.75	11.58	99
1600	0.26	0.43	25	12.16	11.86	98
2000	0.28	0.36	23	14.75	14.28	97

Таблица 3: Результаты оценок при длительности наблюдения 90 дней.

Высота, км	Смещение, см	СКО, см	Ошибка, %	Среднее число пролетов	Среднее число успешных проводок	Отношение числа проводок к пролетам, %
400	0.23	0.55	30	7.09	7.02	99
800	0.20	0.39	22	12.11	11.92	98
1200	0.13	0.38	20	16.01	15.79	99
1600	0.13	0.32	17	18.54	18.17	98
2000	0.20	0.36	21	22.18	21.48	97

На основании анализа результатов моделирования однозначно можно сказать о том, что при увеличении высоты орбиты ЧКМ, объем статистики возрастает, так как увеличивается продольный линейный размер сектора сканирования в силу сохранения его углового размера. С другой стороны, при росте высоты орбиты происходит естественное уменьшение отношения сигнал/шум на входе приемника. В результате этого сигнал реже превышает пороговое значение, что приводит к закономерному сокращению доли зафиксированных проводок. Тем не менее, ошибка с ростом высоты орбиты вплоть до 1600 км уменьшается, что говорит о важности наращивания объема статистики.

Отметим отдельно, что в данных таблицах отношение числа проводок к пролетам близко к единице, что говорит о возможности ослабления требований к энергетике радиолокаторов. Поэтому было проведено

моделирование при уменьшенной в 10 раз импульсной мощности и длительности импульса, равной 2 мс для всех высот. В результате отношение числа проводок к пролетам на малых высотах не изменилось, а на больших — значительно уменьшилось. Результаты оценок для этого случая приводятся в табл. 4, аналогичной предыдущим.

Таблица 4: Результаты оценок при уменьшенном потенциале (длительность наблюдения 30 дней).

Высота, км	Смещение, см	СКО, см	Ошибка, %	Среднее число пролетов	Среднее число успешных проводок	Отношение числа проводок к пролетам, %
400	1.17	0.77	70	2.42	2.37	98
800	0.65	0.74	49	4.33	4.14	96
1200	0.70	0.64	47	5.93	5.04	85
1600	0.73	0.59	47	6.24	3.90	63
2000	1.07	0.64	62	7.21	3.58	50

Для сравнения построены графики зависимости величины ошибки от высоты и длительности наблюдения для размера ЧКМ $d = 2$ см при высоком потенциале и при уменьшенном потенциале, соответственно на рис. 1 и 2. Небольшие осцилляции в окрестностях минимумов обусловлены статистической природой проведенного моделирования, так как каждая точка получена путем усреднения по 100 реализациям.

Предложенный в работе алгоритм осуществляет оценку характерного размера частицы, наблюдаемой в течение некоторого длительного времени системой радиолокаторов. Объем получаемых радиолокационной системой с заданной конфигурацией данных зависит от параметров орбиты частицы: высоты орбиты в большей степени, наклонения и долготы восходящего узла — в меньшей степени. Приведенные точностные характеристики оценки характерного размера частицы (с истинным характерным размером 2 см) в зависимости от высоты орбиты определены путем усреднения по наклонениям и долготам восходящего узла, что достигается благодаря применению метода Монте-Карло. Для частиц с большим характерным размером увеличивается количество и улучшается качество получаемой информации, и, как следствие, улучшаются точностные характеристики оценок их характерных размеров. При наличии данных об оценках характер-

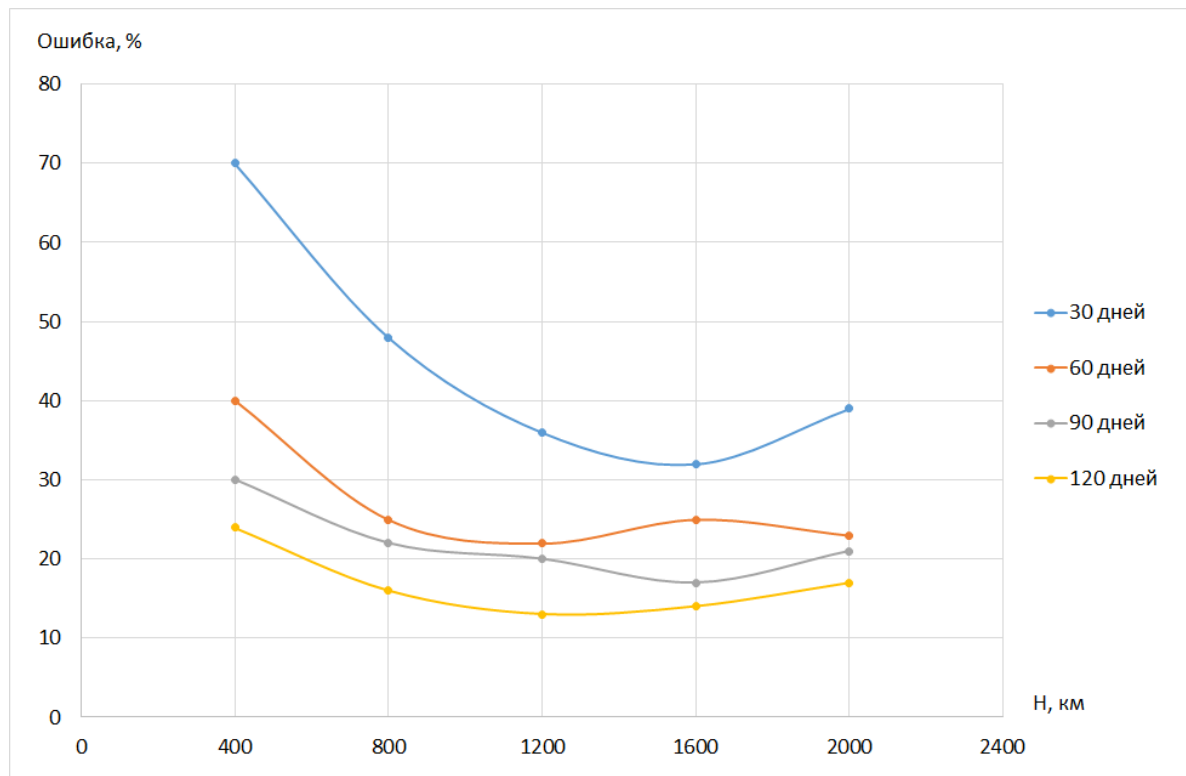


Рис. 1: График зависимости величины ошибки от высоты и длительности наблюдения ($d = 2$ см).

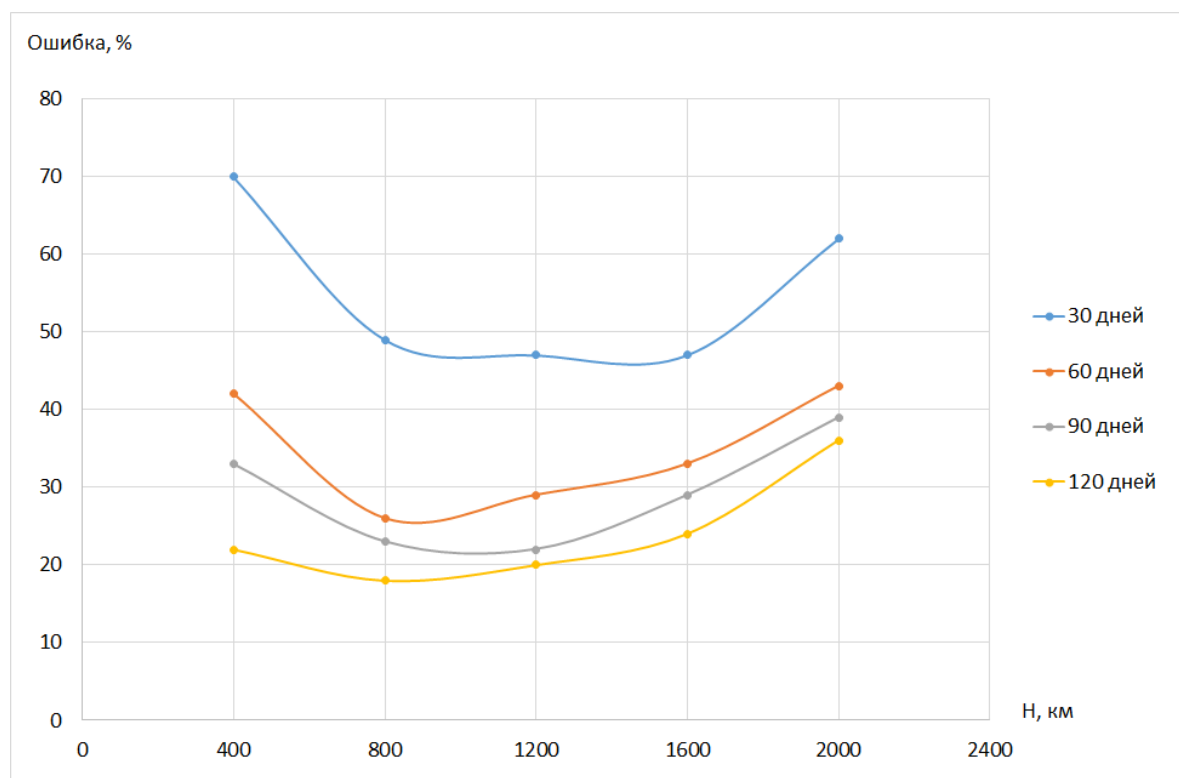


Рис. 2: График зависимости величины ошибки от высоты и длительности наблюдения при уменьшенном потенциале ($d = 2$ см).

ных размеров наблюдаемых радиолокационной системой различных ЧКМ на различных высотах может быть сформировано эмпирическое (дискретное) распределение потока частиц по размерам и высотам.

5. Заключение

Разработан имитационный комплекс моделей, позволяющий проводить численные эксперименты по радиолокационному наблюдению частиц космического мусора и обработке получаемых данных. Программно реализован алгоритм оценки размеров частиц космического мусора по результатам радиолокационных наблюдений. Определены и исследованы характеристики собранной в ходе моделирования статистики по точности оценки характерных размеров частиц космического мусора. Было выявлено, что при использованных при моделировании параметрах радиолокаторов с увеличением времени сбора статистики относительные ошибки оценивания уменьшаются с 32–70 % при 30 днях наблюдения до 13–24 % при 90 днях.

Анализ показал, что есть возможность уменьшения потенциалов радиолокаторов относительно изначально выбранных параметров с сохранением уровня величин ошибок оценивания.

Список литературы

1. B. M. Shustov, *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*, **89**, 777, 2019.
2. G. G. Rajkunov, *Kosmicheskij musor. T. 1, Metody nablyudeniya i modeli kosmicheskogo musora* (2014), in Russian.
3. A. G. Tartakovsky, A. E. Kolessa, A. I. Ivanov, A. P. Lukyanov, and V. A. Radchenko, in *1st NEO and Debris Detection Conference_ESA2019*, 53 (2019).
4. M. I. Skolnik, *Spravochnik po radiolokatsii. T. 1, Osnovy radiolokatsii* (1976), in Russian.
5. M. I. Skolnik, *Spravochnik po radiolokatsii. T. 2, Radiolokatsionnyye antennnyye ustroystva* (1977), in Russian.
6. M. A. Stevenson, M. J. Nicolls, I. Park, and C. Rosner, in *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference* (2020), URL <https://amotech.com/TechnicalPapers/2020/Optical-Systems-Instrumentation/Stevenson.pdf>.
7. V. I. Tikhonov, *Optimum signal reception* (Moscow, Izdatel'stvo Radio i Sviaz', 1983, 320 p. In Russian.).

Потенциал малых обсерваторий в решении задачи обнаружения и мониторинга МНТ на примере обсерватории Кубанского госуниверситета

Иванов В.А., Иванов А.Л., Курбатов Г.А.

Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Астрофизическая обсерватория Кубанского государственного университета (КубГУ) в 2020–2025 гг. активно проводила наблюдения астероидов, опасно сближающихся с Землей (АСЗ), а с 2022 г. стала активно применять в работе методику синтетического слежения. Обнаружение и подхват таких объектов являются основными задачами большого числа обсерваторий, ведущих исследование малых тел Солнечной системы. В настоящее время особенно важны наблюдения объектов, открываемых на орбитах сближения с нашей планетой. Еще три года назад большинство открываемых объектов согласно различным обзорам (например, Catalina Sky Survey, LINEAR, Spacewatch, NEAT, LONEOS) находилось в пределах значений абсолютной звездной величины 19–20.5^m, а это тела с размерами от сотен метров до километра. Проведен анализ возможностей малых обсерваторий при решении задач поиска и подхвата АСЗ на примере астрофизической обсерватории КубГУ.

Поступила в редакцию 09.01.2026 г. Принята в печать 29.04.2026 г.

Ключевые слова: малые обсерватории, астероид, синтетическое слежение, АСЗ, слепой поиск

Potential of small observatories in solving the problem of detection and monitoring of MNT on the example of the observatory of the Kuban State University

Ivanov V.A., Ivanov A.L., Kurbatov G.A.

Kuban State University, Krasnodar, Russia

In 2020–2025, the Astrophysical Observatory of the Kuban State University (KubSU) has actively observed asteroids approaching Earth (NEOs) and since 2022 it has been actively using the synthetic addition technique in its work. Detection and capture of such objects is the main task of a large number of observatories studying small bodies of the Solar System. Currently, observations of objects discovered in orbits approaching our planet with certain parameters are especially important. Three years ago, most of the discovered objects, according to various surveys (for example, Catalina Sky Survey, LINEAR, Spacewatch, NEAT, LONEOS) were within the absolute magnitude of 19–20.5^m, and these are bodies with sizes from hundreds of meters to 1 km. An analysis of the capabilities of small observatories in solving the problems of searching for and capturing objects approaching Earth is carried out using an example of the KubSU Astrophysical Observatory.

Received 09.01.2026. Accepted 29.04.2026.

Keywords: small observatories, asteroid, synthetic tracking, NEO, blind search

DOI: 10.51194/INASAN.2026.11.3.002

1. Введение

Концепция совмещения изображений, полученных интервальной съемкой, используется в астрономии давно. Если известно движение астероида — его угловая скорость и вектор, — то большинство специализированных астрономических программ может суммировать экспозиции в соответствии с этим движением. В результате астероид выглядит на изображении как неподвижный объект, а звезды — как полосы. Ограничение этой техники состоит в том, что отношения сигнал/шум (SNR) для выявления объекта на фоне неба должно быть высоким ($SNR > 30$) и (или) «доступно глазу» наблюдателя на мониторе. При наблюдениях АСЗ в черте города возникают проблемы с выделением объекта на фоне неба 18.7^m/кв. сек. Этот фактор значительно снижал наблюдательный порог для городской обсерватории КубГУ до объектов, перемещающихся с угловой скоростью не более 2–3 угловых секунд в минуту и не слабее 16.5 звездной величины [1]. Большинство же АСЗ имеют угловые скорости 10–15 угловых секунд в минуту и блеск не слабее 15.5 звездной величины. Независимо от типа программного обеспечения, используемого для облегчения такого обнаружения, применяемый метод обычно один и тот же: получение трех-четырех экспозиций с регулярным интервалом. Такой подход называется «классическим» или «традиционным». Однако есть ограничения этого метода, заключающиеся в том, что для получения изображений, особенно очень быстро движущихся объектов, таких как АСЗ, время экспозиции обычно должно не превышать нескольких секунд, иначе изображение объекта начнет вытягиваться в виде полосы без последующего улучшения SNR . Другими словами, отношение SNR обычного метода ограничено отношением SNR однократной экспозиции. За три последних года нами проведены исследования эффективности использования классических телескопов в сравнении со светосильными системами типа «Аккерман-Шмидта», серийно производимых и доступных на российском рынке в совокупности со специальным программным обеспечением Tycho Tracker¹.

¹<https://www.tycho-tracker.com/> (дата обращения 01 июля 2025 г.)

2. Оборудование

Астрофизическая обсерватория КубГУ, международный код MPC C40, использует в наблюдениях телескоп «Астросиб»² системы Ричи-Кретьен, 510/4000 мм на экваториальном штативе PARAMOUNT ME³. Телескоп управляется специализированным программным обеспечением MaxIm DL v5.24⁴ и The Sky X через специальную платформу ASCOM. Для увеличения рабочего поля зрения телескопа был установлен редуктор фокуса $F/6.5$; фокусное расстояние, которое реализуется при этом, составляет 3320 мм. С 2022 г. на телескоп была установлена камера QHY-168M⁵ (линейное поле 16.1×24.2 мм; цифровое разрешение 3346×5040 пикселей; размер одного пикселя 4.8×4.8 микрон; с редуктором фокуса рабочее поле зрения составляет 17.2×25.9 угловых минут).

3. Методика наблюдений и предпосылки

Основной телескоп обсерватории [2] нацелен на подхват новых объектов, открытых в реальном времени, информация о которых оперативно поступает на сотовый телефон с организованной ИПМ им. Келдыша горячей линией telegram «asteroidkiam» для наблюдателей сети, а также отраженные в отчетах MPC и получаемые российскими наблюдателями, работающими на удаленных обсерваториях коллаборации (например, в Египте MPC 088, Монголии MPC 075 и др.). Такое взаимодействие повышает эффективность наблюдений в подхвате.

Эффективность подхвата зависит от угловой скорости объекта, его звездной величины, а также состояния атмосферы. Обязательно нужно учитывать данные о движении объекта, который нужно обнаружить. Если это очень быстро движущийся объект, используются короткие выдержки 10 секунд и короче. В случае, если объект движется медленно, применяем более длительные выдержки, например, 20–30 секунд. Главное, чтобы общее время выдержки было достаточно велико, чтобы объект продемонстрировал достаточное движение, для уверенного обнаружения он должен сместиться на 5 пикселей. Предпочтительно получать 30–60 изображений (в отдельных случаях 120–180). С камерой CMOS QHY-168M с низким уровнем шума считывания обычно можно обойтись более короткими выдержками и просто сделать их больше, чтобы достичь желаемого количества экспозиций. Для определения, какое время экспозиции использовать для данного объекта, в программе Tucho Tracker достаточно перейти в «Калькуляторы» → «Оптимальное время экспозиции» в главном меню. Кроме этого нужно помнить о размерах поля зрения, чтобы объект за время съемки не вышел за границы.

После получения алерта об открытии объекта, телескоп в автоматическом режиме наводится на объект по координатам, полученным от робота, и начинает снимать за несколько минут до прохождения объектом центра кадра. Все кадры автоматически сохраняются в папку, которая транслируется на специальный компьютер для обработки. После получения одной проводки (от 100 до 180 кадров) изображения калибруются с учетом темнового кадра, плоского поля и шумов считывания. Далее в программе Tucho Tracker проводится обработка серии снимков, при этом выравнивая их и делая покадровый расчет с привязкой центра кадра. Учитывая, что нам известны предварительные значения скорости движения объекта и его позиционного угла, мы обычно используем «Track From Current Position», задавая небольшие границы данных, чтобы сократить время обработки. В качестве опорного каталога обычно применяется Gaia EDR3.

Как отмечено в работе «An Early Warning System for Asteroid Impact» John L. Tonry [3], проницание телескопов малого диаметра, не более 50 сантиметров, дает ориентировочные значения времени предупреждения (см. рис. 1). Чувствительность системы позволяет обнаруживать астероиды размером 140 м за три недели до столкновения и астероиды размером 50 м за неделю до прибытия⁶.

4. Эксперимент по проницанию

Фирма Celestron освоила линейку телескопов системы модифицированного Шмидта Роу-Аккерман RASA 8, 11 и 14 дюймов⁷. Для эксперимента в качестве телескопа сравнения был выбран Celestron RASA 11⁸, как серийно производимый и имеющийся в свободном доступе на рынке РФ. Телескоп был установлен на экваториальном штативе EQ-8 PRO. Камера SBIG STF 8300M (3326×2504 pix, 17.96×13.52 мм, размер пикселя 5.4×5.4 мкм), рабочее поле зрения системы $97' \times 72'$. Во время эксперимента выбирались ночи с минимальным значением фона неба, не ярче 20.7^m / кв. сек. дуги. Угловая скорость наблюдаемых АСЗ была заключена в диапазоне от $10''$ до $80''$ в минуту. В табл. 1 указаны значения скорости АСЗ и предельная звездная

²http://www.astrosib.ru/rc_500_rus.html (дата обращения 01 июля 2025 г.)

³<https://www.bisque.com/product-category/mounts/> (дата обращения 01 июля 2025 г.)

⁴<https://diffractionlimited.com/maxim-dl/> (дата обращения 01 июля 2025 г.)

⁵<https://www.qhyccd.com> (дата обращения 01 июля 2025 г.)

⁶<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011PASP...123...58T/abstract> (дата обращения 01 июля 2025 г.)

⁷<https://www.celestron.com> (дата обращения 01 июля 2025 г.)

⁸<https://www.celestron.com/products/11-rowe-ackermann-schmidt-astrograph-rasa-11-v2-optical-tube-assembly-cge-dovetail> (дата обращения 01 июля 2025 г.)

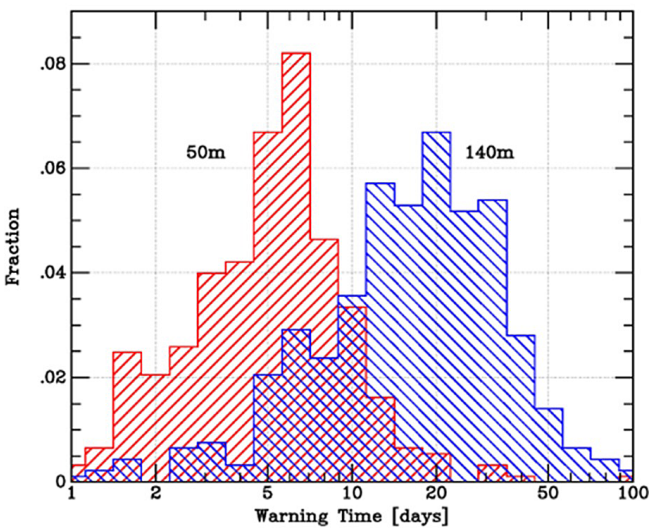


Рис. 1: Диапазон времени предупреждения для астероидов разного размера, достижимого с телескопом 50 см $F/2$ («An Early Warning System for Asteroid Impact» John L. Tonry) [3].

Таблица 1: Предельная звездная величина объекта в зависимости от его угловой скорости.

Угловая скорость объекта	Предельная звездная величина
12.8"/мин.	20.2 ^m
13.5"/мин.	19.9 ^m
15.8"/мин.	19.1 ^m
21.3"/мин.	20.9 ^m
79.3"/мин.	18.4 ^m
79.1"/мин.	18.8 ^m

величина синтетического слежения (синтетическое отслеживание использует серию экспозиций), которая достигнута при этой скорости для объекта во время подхвата.

5. Результаты исследований

Результаты подхватов астероидов, сближающихся с Землей, полученных в астрофизической обсерватории КубГУ в 2024–2025 на телескопе «Астросиб 510», выполнены по методике синтетического слежения и показаны в табл. 2.

Таблица 2: Список астероидов, сближающихся с Землей, наблюдавшихся в астрофизической обсерватории КубГУ в 2024–2025 гг.

Обозначение АСЗ по классификации MPC	Абсолютная звездная величина, H	Диаметр, м		
		Альбедо 0.5	Альбедо 0.25	Альбедо 0.05
2024 BD	25.38	16	22	50
2024 CZ3	24.91	20	28	62
2024 EV3	24.54	23	33	73
2024 EH3	25.51	15	21	47
2024 EQ1	25.12	18	25	56
2024 EZ	24.32	26	36	81
2024 FO3	27.77	5.2	7.4	17
2024 GL	24.91	20	28	62

Обозначение АСЗ по классификации MPC	Абсолютная звездная величина, H	Диаметр, м		
		Альбедо 0.5	Альбедо 0.25	Альбедо 0.05
2024 GP1	22.83	32	46	100
2024 JH2	24.68	22	31	69
2024 JL3	26.42	9.8	14	31
2024 JO10	25.08	18	26	57
2024 KC1	20.24	170	240	530
2024 LJ1	25.7	14	19	43
2024 LS4	25.98	12	17	38
2024 NE	23.89	31	44	99
2024 NO5	20.81	130	180	410
2024 OF	23.69	34	49	110
2024 OS1	24.44	24	34	77
2024 PN1	25.54	15	21	46
2024 PX3	25.98	12	17	38
2024 QA	25.7	14	19	43
2024 QA2	25.04	18	26	58
2024 QG	24.75	21	30	67
2024 QS	24.64	22	31	70
2024 RA14	24.96	19	27	61
2024 RB22	24.55	23	33	73
2024 RE	23.38	40	56	130
2024 RG10	23.8	33	46	100
2024 RH32	27.43	6.1	8.7	19
2024 RH45	24.95	19	27	61
2024 RJ29	25.87	13	18	40
2024 RM16	26.16	11	16	35
2024 RR1	25.66	14	20	44
2024 RT12	25.97	12	17	38
2024 RW12	22.9	49	70	160
2024 RW8	26.4	9.9	14	31
2024 SA	22.88	50	71	160
2024 SA1	23.1	45	64	140
2024 SE	24.46	24	34	76
2024 SH	24.73	21	30	67
2024 SN1	27.42	6.2	8.7	20
2024 SU3	26.1	11	16	36
2024 SV3	26.56	9.2	13	29
2024 SW4	21.93	77	110	240
2024 SY6	25.02	19	26	59
2024 TK1	25.81	13	18	41
2024 TN1	19.41	250	350	780
2024 TR4	26.88	7.9	11	25
2024 TS2	26.97	7.6	11	24
2024 TV8	26.34	10	14	32
2024 TZ11	23.54	37	52	120
2024 UO4	30.22	1.7	2.4	5.4
2024 US	27.96	4.8	6.8	15
2024 UX9	22.85	51	72	160
2024 UY3	20.18	170	240	550
2024 VA4	25.17	17	25	55
2024 VB2	25.87	13	18	40
2024 VC1	22.81	52	73	160
2024 VC2	25.69	14	19	43
2024 VX3	28.26	4.2	5.9	13
2024 VY3	27.79	5.2	7.4	16
2024 WB	21.12	110	160	350
2024 WC	27.37	6.3	8.9	20

2024 WG	26.67	8.7	12	28
2024 WJ	29.75	2.1	3.0	6.7
2024 WL	25.82	13	18	41
2024 WV51	25.14	18	25	56
2024 YA	26.67	8.7	12	28
2024 YC	27.26	6.6	9.4	21
2024 YR	21.67	87	120	280
2025 AN	24.91	20	28	62
2025 AX1	26.85	8	11	25
2025 AU3	25.43	15	22	49

В табл. 3 представлена выборка показателей российских и зарубежных обсерваторий из 1858 станций, зарегистрированных в Центре малых планет⁹, работающих в коллаборации, данные от которой получают российские научные организации. Обсерватории расставлены по рангу от объема измерений АСЗ.

⁹<https://mpec.jostjahn.de/MPECS-STAT-CODES-OBS.html> (дата обращения 01 июля 2025 г.)

Таблица 3: Итоги работы по подхвату и наблюдениям АСЗ в обсерватории MPC C40 Краснодар в сравнении с другими обсерваториями РФ по состоянию на 11 июня 2025 г.

Nr.	Station	All MPECs	Discovery	Observations	Число полученных наблюдений за год					
					2020	2021	2022	2023	2024	2025
32	C40	1258	236	41130	10539	4909	9458	5378	4176	2931
47	84	89	1	25705	0	0	0	41	7	0
110	C20	21	1	9109	0	0	0	1512	0	0
118	A98	261	10	8590	264	725	721	912	517	288
124	168	270	0	8001	101	218	106	280	604	216
179	B18	401	155	5306	11	584	128	11	66	0
279	L76	240	74	2804	114	99	338	903	487	863
282	N42	74	2	2797	0	1766	306	377	273	15
296	B42	258	32	2541	5	0	112	61	48	15
313	C32	122	13	2346	0	7	0	0	0	0
320	C41	391	6	2267	0	0	4	6	33	15
331	D04	69	4	2153	0	0	0	0	161	1992
355	L51	271	191	1801	31	37	124	617	593	117
362	95	96	15	1753	0	107	6	84	188	100
373	94	129	25	1622	48	152	40	0	19	8
440	B17	36	0	1159	0	0	0	0	0	0
570	114	124	25	609	0	0	0	0	0	0
573	O75	160	113	602	0	0	26	26	26	0
575	C48	51	3	594	0	0	0	0	0	0
606	M75	173	158	506	0	0	0	0	354	152
625	D54	98	2	457	61	2	0	19	45	0
661	L52	87	6	410	106	15	3	3	33	0
740	C00	60	0	292	0	0	0	0	0	0
750	N82	79	68	280	0	185	92	0	3	0
793	C46	9	0	235	0	0	0	0	0	0
823	183	5	0	214	0	0	0	0	0	0
925	C15	26	1	131	0	0	0	0	0	0
932	N27	6	0	126	0	0	0	0	0	0
1020	C30	2	0	91	0	0	0	0	0	0
1098	X19	14	4	67	0	0	0	0	14	53
1119	C06	12	0	61	0	0	0	0	0	0
1142	B05	3	0	57	0	0	0	0	0	0
1154	236	1	0	55	0	0	0	0	0	55
1192	M77	2	0	48	0	0	0	0	48	0
1261	D05	6	1	39	0	17	0	0	0	0
1389	102	3	0	22	0	0	0	0	0	0
1430	C80	3	0	18	6	0	3	0	0	0
1449	255	3	0	18	0	0	0	0	0	0
1730	O72	1	0	4	0	0	4	0	0	0
1767	135	1	1	3	0	0	0	0	3	0
1768	M90	1	0	3	0	3	0	0	0	0

Столбцы таблицы таковы:

Nr — место обсерватории в общем списке MPC;

Station — международный код обсерватории;

MPEC — количество циркуляров с участием обсерватории;

Discovery — количество циркуляров MPC с открытием или подхватом АСЗ;

Observations — количество измерений АСЗ выполненных в обсерватории за все время работы; число полученных наблюдений за год за последние 6 лет.

6. Выводы

Результаты нашей работы показали, что с переходом на светосильные системы эффективность наблюдений АСЗ заметно повышается.

1. Предпочтительным считаем переход от классической системы телескопов (имеющихся в обсерваториях) системы Кассегрен или Ричи-Кретьен на прямой фокус с корректором, например, телескоп «Астро-сиб», который был модернизирован для работы в главном фокусе с относительным отверстием $F/2.7$.
2. Как удачный и недорогой вариант можно использовать серийные телескопы RASA11 ROWE-ACKER-MANN SCHMIDT (279/630 мм).
3. В качестве программного обеспечения убедительно себя показала Tycho Tracker. В настоящее время вышла версия 12.6.2 обладающая целым пакетом возможностей в исследовании малых тел Солнечной системы: слепой поиск объектов, астрометрия, фотометрия, фотометрия комет, поиск периодов блеска и многие другие необходимые функции, при этом автор программы постоянно расширяет и улучшает возможности данной программы.
4. Малые обсерватории могут вносить весомый вклад в программы обнаружения и мониторинга АСЗ и других малых тел Солнечной системы.

Список литературы

1. A. L. Ivanov, V. A. Ivanov, V. Y. Lysenko, I. V. Litvinov, and N. Y. Bogachev, *Issledovaniye asteroidov i komet v observatorii KubGU* (2015).
2. A. L. Ivanov, V. A. Ivanov, et al., *Ekologicheskiiy vestnik nauchnykh tsentrov Chernomorskogo ekonomicheskogo sotrudnichestva*, 66–69, 2013.
3. J. L. Tonry, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **123**, 58, 2011.

Анализ фотометрических измерений спутников из кластеров SpaceX с 2019 по 2025 годы

Лукьянов А.П.^{1,2}, Пругло А.В.¹, Равдин С.С.^{1,2}, Гундрова Е.И.¹

¹ ПАО «МАК «Вымпел», Москва, Россия

² Московский физико-технический институт, Москва, Россия

В статье проанализирован большой объем фотометрических данных, полученных телескопами ПАО «МАК «Вымпел» по спутникам из кластеров компании SpaceX с 2019 по 2025 гг. Проведено сопоставление фотометрических характеристик различных версий спутников этой компании. При этом использовались две модели фотометрии: модель диффузно рассеивающей по Ламберту сферы и регрессионные полиномиальные модели, аппроксимирующие зависимость блеска спутников от фазового угла методом наименьших квадратов. Последние модели показали лучшие результаты, в частности, позволили описать нестандартное поведение в виде аномального роста блеска при больших фазовых углах. Результаты анализа показали, что окраска спутников в темный цвет дала незначительный эффект, менее 0.5 звездной величины. Применение экранирующего козырька — до 1.5 звездных величин, но не при всех фазовых углах рассеяния. Наибольший эффект был отмечен для фазовых углов вблизи 90 градусов. Для спутников Starlink версии v2.0mini и серии Starshield возросло число ярких всплесков на 2 и более звездных величин. Однако для спутников Starshield они проявляются при фазовых углах больше 90 градусов в отличие от спутников серии v2.0mini. Предложено для различных космических объектов использовать регрессионную полиномиальную модель наряду с общепринятой моделью диффузной сферы.

Поступила в редакцию 29.01.2026 г. Принята в печать 23.05.2026 г.

Ключевые слова: фотометрия космических объектов, кластеры компании SpaceX, модель диффузной сферы, регрессионные полиномы

Analysis of photometric measurements of SpaceX satellites from 2019 to 2025

Lukyanov A.P.^{1,2}, Pruglo A.V.¹, Ravdin S.S.^{1,2}, Gundrova E.I.¹

¹ PJSC "IJSK "Vimpel", Moscow, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

This article analyzes a large volume of photometric data obtained by PJSC IJSK "Vimpel" telescopes on satellites in SpaceX clusters from 2019 to 2025. The photometric characteristics of various versions of satellites are compared. Two photometric models were used: a Lambertian diffuse-scattering sphere model and polynomial regression models approximating the dependence of satellite brightness on phase angle using the least-squares method. The latter models demonstrated better results, including the description of unusual behavior, such as anomalous brightness increases at large phase angles. The analysis showed that painting the satellites dark had a negligible effect, less than 0.5 stellar magnitudes. Using a shielding visor resulted in an effect of up to 1.5 stellar magnitudes, but not at all scattering phase angles. The greatest effect was observed for phase angles near 90 degrees. For the v2.0mini and Starshield series satellites, the number of bright bursts of 2 or more magnitudes has increased. However, for Starshield satellites, these bursts appear at phase angles greater than 90 degrees, unlike for the v2.0mini series satellites. Use of a regression polynomial model for various space objects, along with the generally accepted diffuse sphere model is proposed.

Received 29.01.2026. Accepted 23.05.2026.

Keywords: space object photometry, SpaceX clusters, diffuse sphere model, regression polynomials

DOI: 10.51194/INASAN.2026.11.3.003

1. Введение

Космическое пространство стремительно заполняется новыми спутниками, причем их значительная часть запускается с помощью ракет-носителей компании SpaceX. В 2022 г., например, компания стала лидером по запуску ракет-носителей, произведя 61 запуск. Это составило более трети всех запусков в мире за год [1]. Наиболее массовыми являются принадлежащие этой компании спутники, общее число которых составляет в настоящее время более 9000 и постоянно увеличивается. Среди них спутники Starlink разных модификаций и спутники Starshield [1, 2] представляют наиболее массовые группировки. Большое число достаточно ярких космических объектов стало мешать астрономическим наблюдениям [3], что привело к необходимости применять экранирующие элементы, уменьшающие их светимость [4, 5]. Измерения блеска аппаратов разных модификаций компании SpaceX, полученные на телескопах ПАО «МАК «Вымпел» [6], позволили следить за их эволюцией, выявлять условия, когда блеск этих аппаратов значительно возрастал по сравнению с его средним (и медианным) значением. В статье представлен анализ статистики фотометрических измерений блеска спутников из кластеров компании SpaceX с 2019 по 2025 гг.

2. Моделирование фотометрии в предположении диффузно рассеивающей сферы

Рассмотрим диффузную сферу с экспериментально измеряемыми параметрами по наблюдениям с разными условиями рассеяния света (фазовыми углами). Принимаемый поток излучения от фазового угла зависит следующим образом [7]:

$$E = \frac{I_{\text{Sun}}}{d^2} \frac{2}{3\pi^2} A\rho ((\pi - \phi)\cos\phi + \sin\phi), \quad (1)$$

где фазовый угол ϕ — это угол между наблюдателем, спутником и Солнцем, A и ρ обозначены соответственно эффективная площадь и эффективное альbedo спутника, d — дальность наблюдения, I_{Sun} — поток падающего на спутник солнечного излучения. Один свободный, заранее неизвестный параметр — произведение альbedo на площадь $A\rho$ — оценивается по результатам наблюдений так, чтобы наилучшим образом соответствовать измерениям яркости спутника.

Наблюдения при разных фазовых углах и дальностях пересчитываются по этой формуле в условный размер диффузно рассеивающей сферы в предположении единичного коэффициента рассеяния (альbedo). Этот размер можно считать грубой оценкой размера объекта, которая может отличаться от реального размера в несколько раз.

Фазовый угол не определяет полностью условия освещения спутника и рассеяния излучения, поскольку рассеяние света зависит от двух углов ориентации объекта для падающего и рассеянного излучения, которые он не учитывает. Вследствие этого при одном и том же фазовом угле результаты измерения приходящего потока излучения, пересчитанные к одной и той же опорной дальности, получаются разными. Разброс полученных измерений потока излучения принято описывать логнормальным законом (нормальным в терминах звездных величин, которые для краткости будем называть блеском). Звездные величины связаны с потоком падающего излучения как

$$m = -14.18 - 2.5 \lg E, \quad (2)$$

если поток излучения в полосе чувствительности человеческого глаза E измеряется в люксах ($1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 680 \text{ лк}$).

Обратный пересчет выполняется по формуле

$$E = 10^{\frac{-14.18 - m}{2.5}}. \quad (3)$$

Вычисление параметров закона распределения производится приведением измерений к опорной дальности d_0 и нулевому фазовому углу по формуле

$$E_0 = \frac{Ed^2\pi}{d_0^2((\pi - \varphi)\cos\varphi + \sin\varphi)}. \quad (4)$$

С последующим переводом в приведенную звездную величину m_0 :

$$m_0 = -14.18 - 2.5 \lg E_0 = m - 5 \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) - 2.5 \lg ((\pi - \varphi)\cos\varphi + \sin\varphi) / \pi, \quad (5)$$

для которых определяются среднее значение M и его среднеквадратический разброс σ :

$$M = \frac{\sum m_{0i}}{n}, \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (m_{0i} - M)^2}{n}}. \quad (7)$$

Здесь i — номер измерения, n — число измерений. Суммирование проводится по всем измерениям.

3. Альтернативные модели рассеяния света и наше предложение

Чтобы учесть геометрию рассеяния света, необходимо знать как минимум 4 параметра: единичные векторы направлений падения и рассеяния излучения, каждый из которых задается двумя независимыми параметрами.

В литературе эта модель описана как двулучевая функция отражательной способности (ДФОС, или Bidirectional reflectance distribution function — BRDF) — четырехмерная функция, определяющая, как свет отражается от непрозрачной поверхности [8]. Четыре параметра этой функции задают направление входящего света и направление выходящего света. Однако эта функция жестко привязана к рассеивающему объекту.

Для полноты описания еще потребуется знать параметры, задающие ориентацию объекта. Именно они, вернее отсутствие данных о них, не позволяют создать подробную фотометрическую модель. Если бы ориентация объекта была известна, то четырехмерную модель можно было бы построить при наличии множества измерений и знании ориентации объекта. Пример результативного подхода к этой задаче дан в статье [7]. В ней авторы воспользовались тем, что спутники Starlink имеют относительно простую форму (фактически, две отражающие поверхности), их ориентация в пространстве известна, и, кроме того, имеется много одинаковых спутников, что позволяет набрать достаточно большую статистику.

Для более сложных объектов, об ориентации которых можно только догадываться, построение такой подробной модели в настоящее время представляется невозможным.

Мы предлагаем использовать подход, базирующийся на одном параметре — фазовом угле, но не в рамках модели диффузной сферы, а с использованием аппроксимаций реально измеренных зависимостей блеска от фазового угла, параметры которых оцениваются по получаемым экспериментально измерениям.

Аппроксимационные формулы могут быть разными. Здесь мы ограничились рассмотрением полиномиальных зависимостей различных степеней (от 2 до 5). Величины принимаемых потоков рассеянного объектами излучения Солнца задаем в звездных величинах, то есть в логарифмическом масштабе, приводя их к одной и той же опорной дальности 1000 км. Эта дальность приблизительно соответствует типовым дальностям для спутников, летающих на высотах около 560 км.

Чтобы получить параметры регрессии, необходимо минимизировать следующее выражение:

$$S = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=0}^k b_j x_i^j - y_i \right)^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

где b_j — параметры полинома, y_i — ряд наблюдений.

Для этого, на основании необходимого условия экстремума функции $(k+1)$ переменных $S = S(b_0, b_1, \dots, b_k)$, приравняем к нулю частные производные

$$S'_{b_p} = 2 \sum_{i=1}^n x_i^p \left(\sum_{j=0}^k b_j x_i^j - y_i \right) = 0, p = \overline{0, k}. \quad (9)$$

Решение полученной системы линейных уравнений дает искомые параметры полинома. Оно программно реализовано [9] и было использовано авторами для построения полиномиальных зависимостей.

4. Результаты использования предложенной модели фотометрии на примерах спутников компании SpaceX

Благодаря большому числу запущенных компанией SpaceX спутников удалось набрать большой объем данных и получить устойчивые статистические результаты. Для оптических наблюдений спутников были использованы их орбитальные параметры в формате TLE [10]. Источниками информации являются сайты [11, 12]. Эти данные совместимы с аналитическим прогнозом SGP4 [13], обеспечивающим проведение наблюдений спутников телескопами.

Измерения получены на оптической сети телескопов ПАО «МАК «Вымпел». Анализ результатов проведен для каждой версии группировок спутников компании SpaceX:

- первоначально запущенных спутников версии v1.0,
- таких же спутников, покрытых черной краской для уменьшения помех оптической астрономии [4],
- таких же спутников, снабженных защитным козырьком также для уменьшения помех оптической астрономии [5],
- следующей версии спутников v1.5, незначительно отличающейся от v1.0, в которой на спутниках установлены средства лазерной связи,
- спутников версии v2.0mini, вес которых увеличился почти втрое для обеспечения большей пропускной способности каналов интернета,
- спутников Starshield на базе версии v2.0mini [2], с приблизительно такой же массой, предположительно отличающаяся от исходной версии v2.0mini установленными на них приборами.

По этим спутникам удалось провести наблюдения блеска в широком диапазоне углов падающего и рассеянного солнечного излучения. Углы падающего на спутник излучения в связанной с ними системе координат азимут (ось X) — угол места (ось Y) для первоначальной версии спутников v1.0 представлены на рис. 1. Координаты источника излучения и принимающих его телескопов представлены в топоцентрической системе координат, привязанной к спутнику.

Углы рассеянного излучения, принимаемого телескопами, представлены на рис. 2.

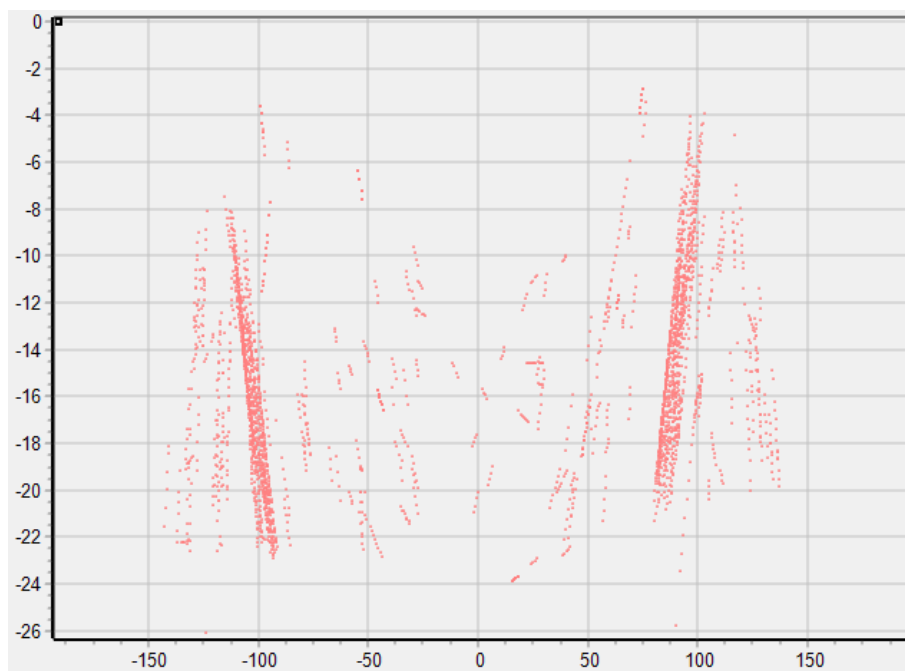


Рис. 1: Диапазон углов солнечного освещения спутников в координатах азимут (ось X) — угол места (ось Y).

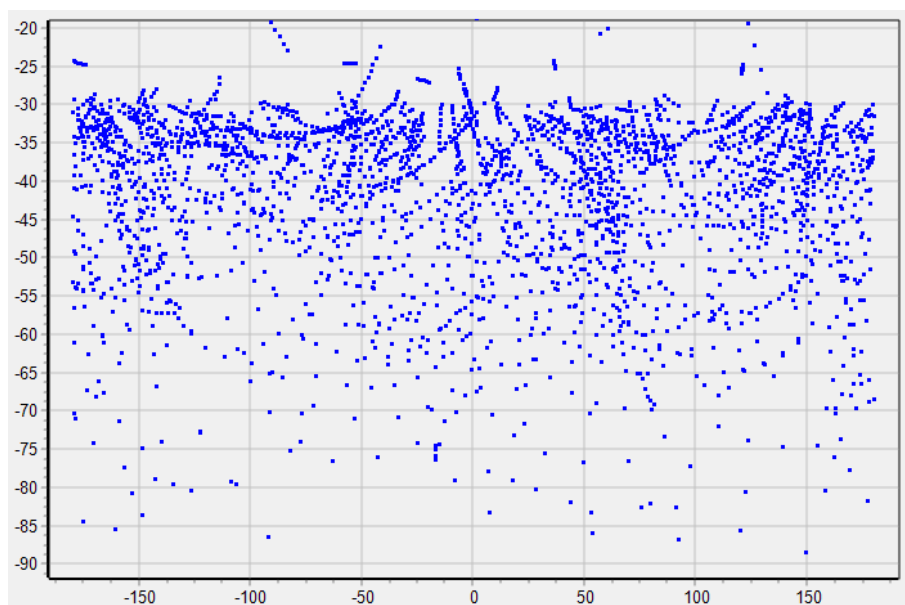


Рис. 2: Диапазон углов рассеяния солнечного излучения спутников в координатах: ось X — азимут относительно азимута падающего солнечного излучения, ось Y — угол места.

Очевидно, что углы места солнечного излучения принимают только отрицательные значения, так как в противном случае проведение оптических наблюдений с поверхности Земли невозможно из-за засветки наблюдающего телескопа. Углы места рассеянного излучения также всегда отрицательны, так как телескопы, на которых происходит измерение рассеянного излучения, находятся ниже спутника.

По совокупности полученных данных на рис. 3 представлена зависимость приведенного к дальности 1000 км блеска от фазового угла для версии спутников v1.0.

По оси Y величина блеска отложена в порядке убывания, соответствующем его физическому возрастанию. Таким образом, повышение координат точек соответствует их большему блеску. Черной линией показана зависимость блеска от фазового угла по модели рассеяния диффузной сферой (1), параметры которой подобраны по статистике полученных измерений M (6):

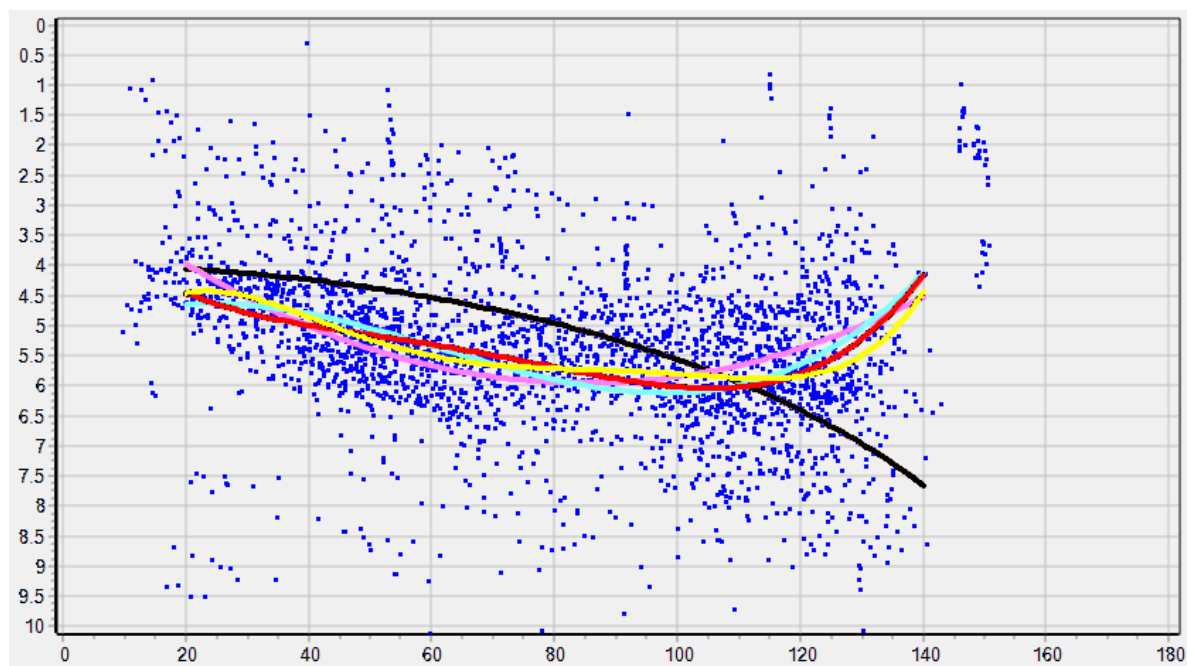


Рис. 3: Зависимость блеска от фазового угла для первых Starlink v1.0 без средств, уменьшающих их блеск. Измерения на интервале от момента их запуска (ноябрь 2019 г.) до конца 2020 г.

$$M_0(\varphi) = M - 2.5 \lg (((\pi - \varphi) \cos \varphi + \sin \varphi) / \pi). \quad (10)$$

Остальные линии представляют аппроксимирующие методом наименьших квадратов [14] полиномы: малиновый — второй степени, бирюзовый — 3-й, красный — 4-й, желтый — 5-й.

Аналогичные зависимости приведенного к дальности 1000 км блеска представлены на следующих рисунках:

- Рис. 4 — зависимость блеска от фазового угла для Starlink v1.0, окрашенных в темный цвет (так называемые darksat). Измерения на интервале от момента их запуска (январь 2020 г.) до конца 2020 г. — для спутников v1.0, покрытых черной краской,
- Рис. 5 — для спутников, снабженных защитным козырьком,
- Рис. 6 — для спутников v1.5,
- Рис. 7 — для спутников v2.0mini с наклоном 70 градусов,
- Рис. 8 — для модификации спутников Starshield на базе версии v2.0mini.

Из представленных рисунков видно, что точность аппроксимирующих полиномов выше точности модели диффузной сферы в целом. Кроме того, полиномы отражают увеличение блеска при больших фазовых углах, что не учитывается в используемой модели рассеяния сферой. Особенно большое увеличение блеска для фазовых углов более 90 градусов заметно для кластеров, спутники которых снабжены солнцезащитным козырьком. Вероятно, геометрия отражающего козырька обладает таким свойством. Дополнительным физическим механизмом увеличения блеска на больших фазовых углах является излучение поверхности Земли, над которой в этот момент пролетает спутник. Этот эффект отмечался при анализе фотометрии даже на высоких орбитах [15], удаленных от поверхности Земли гораздо больше, чем низкоорбитальные спутники компании SpaceX.

Характеристики аппроксимаций отражены в табл. 1.

Из данных табл. 1 видно, что уменьшение мешающего влияния для астрономических наблюдений, которого пытались добиться окраской спутников в темный цвет, дало незначительный эффект, менее 0.5 звездной величины (около 1.6 раз в линейных единицах). Применение экранирующего козырька дало эффект до 1.5 звездных величин (около 4 раз в линейных единицах), но не на всех фазовых углах рассеяния. Наибольший эффект был отмечен для фазовых углов в районе 90 градусов.

Обращает на себя внимание то, что блеск более крупных спутников версии v2.0mini не увеличился, а даже в среднем стал немного меньше, чем у версии v1.0. Однако заметно возросло число ярких всплесков, превышающих средние значения на 2 и более звездных величин (более 6 раз в линейных единицах). Этот эффект заметен также в фотометрии спутников серии Starshield, однако он проявляется при фазовых углах больше 90 градусов, в отличие от спутников серии v2.0mini, у которых яркие всплески регистрируются

Таблица 1: Характеристики аппроксимаций.

Версия кластера спутников	Модель диффузной сферы		СКО полиномиальных моделей степеней				Диапазон изменения блеска полиномиальных моделей	
	Среднее	СКО	2	3	4	5	Минимальный блеск	Максимальный блеск
v1.0	3.99	2.15	1.69	1.65	1.64	1.63	6.0	4.0
v1.0 темные	4.13	1.37	1.15	1.14	1.14	1.14	6.0	4.5
v1.0 с козырьком	3.94	1.65	1.04	0.96	0.94	0.90	7.6	4.0
v1.5	4.64	1.68	0.90	0.81	0.81	0.81	7.2	5.0
v2.0mini	5.55	1.57	1.08	1.06	1.05	1.04	7.5	5.5
Starshield	4.22	1.93	1.00	1.00	0.98	0.98	6.6	5.2

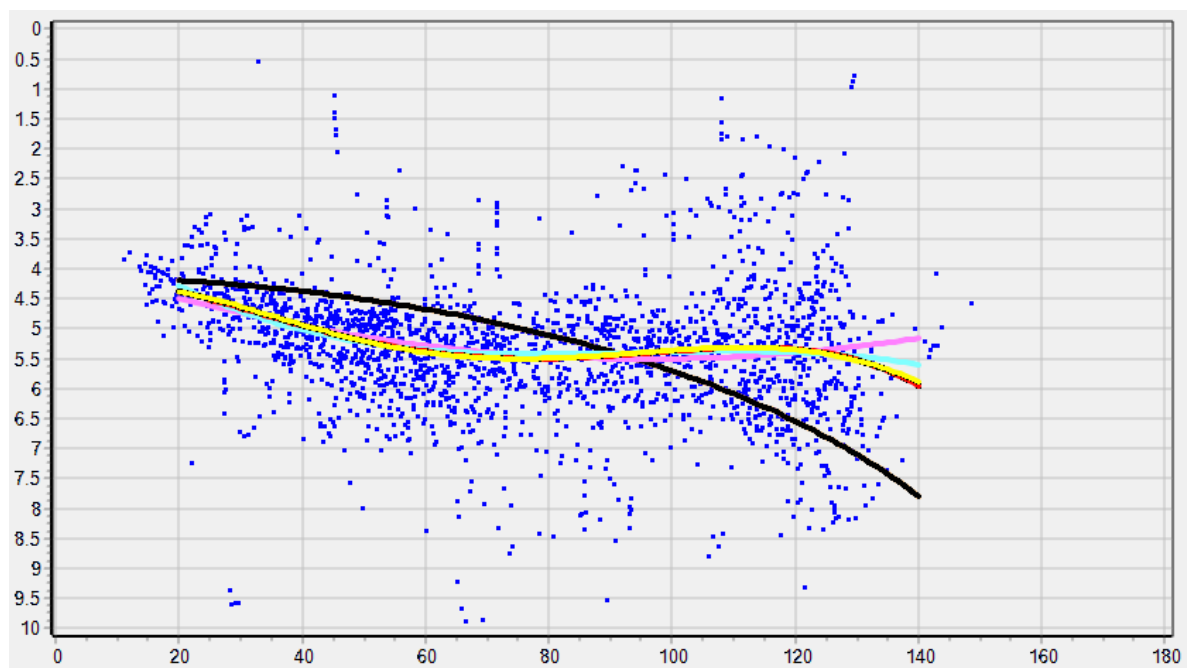


Рис. 4: Зависимость блеска от фазового угла для Starlink v1.0, окрашенных в темный цвет (так называемые darksat). Измерения на интервале от момента их запуска (январь 2020 г.) до конца 2020 г.

при фазовых углах менее 90 градусов. Подобные всплески блеска можно интерпретировать зеркальными отражениями от плоских конструкций либо конструкций с большим радиусом кривизны, которые не всегда закрываются козырьком.

Сравнение точностей рассмотренных моделей фотометрии показало, что по крайней мере для рассмотренных кластеров спутников SpaceX полиномиальные аппроксимации дают заметно более высокую точность описания блеска объектов при разных фазовых углах. Для объектов, не рассмотренных в этой статье, выигрыш может оказаться другим — как больше, так и меньше, но аппроксимации, полученные методом наименьших квадратов, всегда будут точнее, хотя построение полиномиальной аппроксимации требует наличия данных в широком диапазоне фазовых углов. Для фазовых углов, при которых не было наблюдений, модель диффузной сферы, опирающаяся на физические предположения, может дать более надежные оценки блеска.

Сравнение точностей полиномиальных аппроксимаций разной степени, приведенных в табл. 1, приводит к выводу, что использование полиномов выше 2-й степени не имеет практического смысла.

Таким образом, предлагается использовать модель диффузной сферы при узком диапазоне фазовых углов наблюдений или для редко наблюдаемых объектов, а в остальных случаях — полиномиальную модель второго порядка. Параметры моделей необходимо уточнять после получения новых измерений. Хранить большие объемы ранее полученных данных для применения метода наименьших квадратов при этом необязательно, если применить рекуррентный вариант алгоритма.

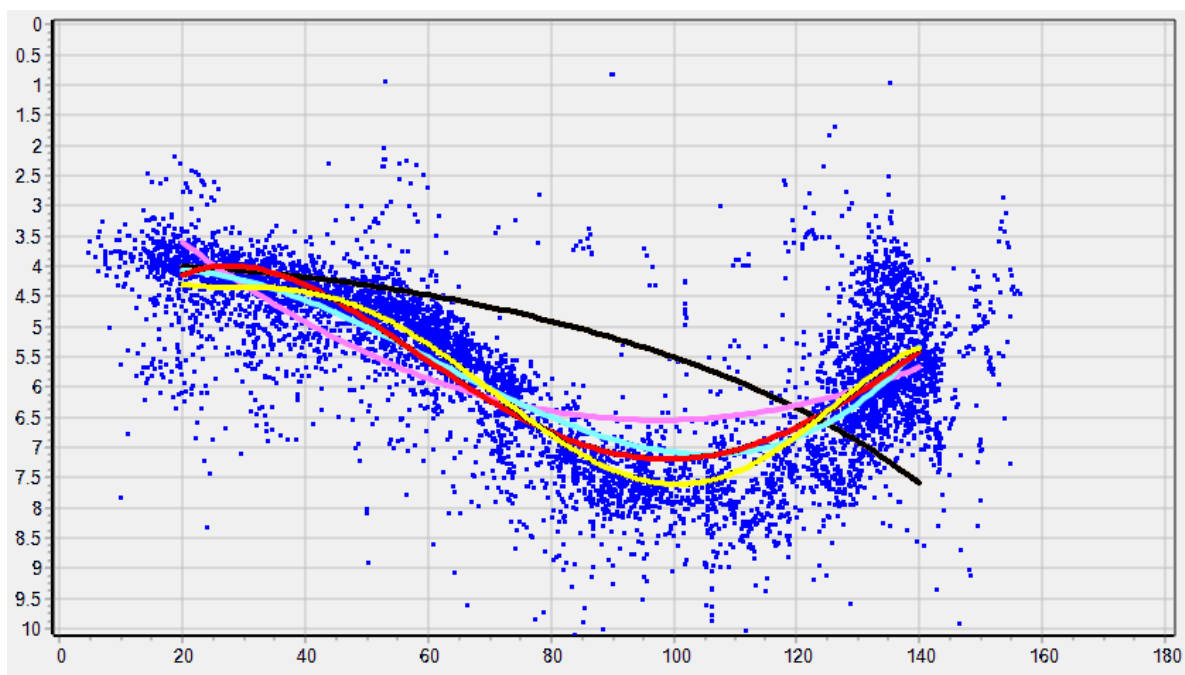


Рис. 5: Зависимость блеска от фазового угла для Starlink v1.0, с солнцезотражающим козырьком. Измерения на интервале от момента их запуска (август 2020 г.) до августа 2022 г.

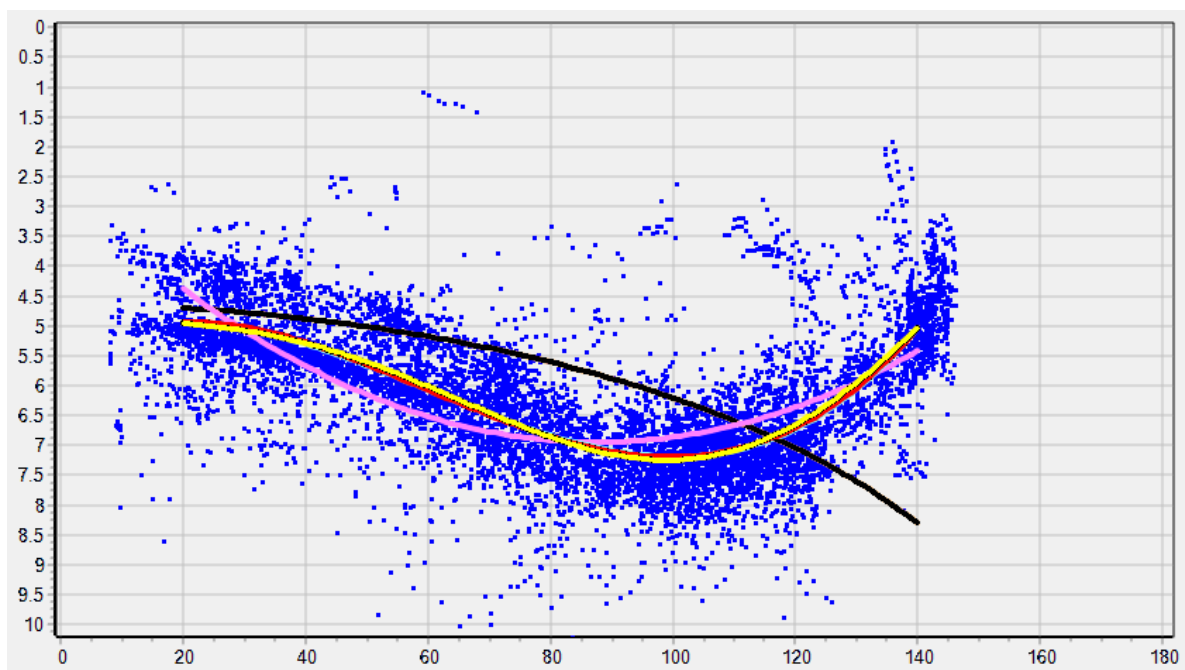


Рис. 6: Зависимость блеска от фазового угла для Starlink v1.5. Измерения на интервале от момента их первого запуска (сентябрь 2021 г.) до августа 2023 г.

5. Выводы

1. Собран и проанализирован большой объем фотометрических данных, полученных телескопами ПАО «МАК «Вымпел» по спутникам из кластеров компании SpaceX с 2019 по 2025 гг. Для анализа использовались две модели фотометрии: модель диффузно рассеивающей по Ламберту сферы и регрессионные полиномиальные модели, аппроксимирующие зависимость блеска спутников от фазового угла методом наименьших квадратов. Последние модели показали лучшие результаты как по статистике отклоне-

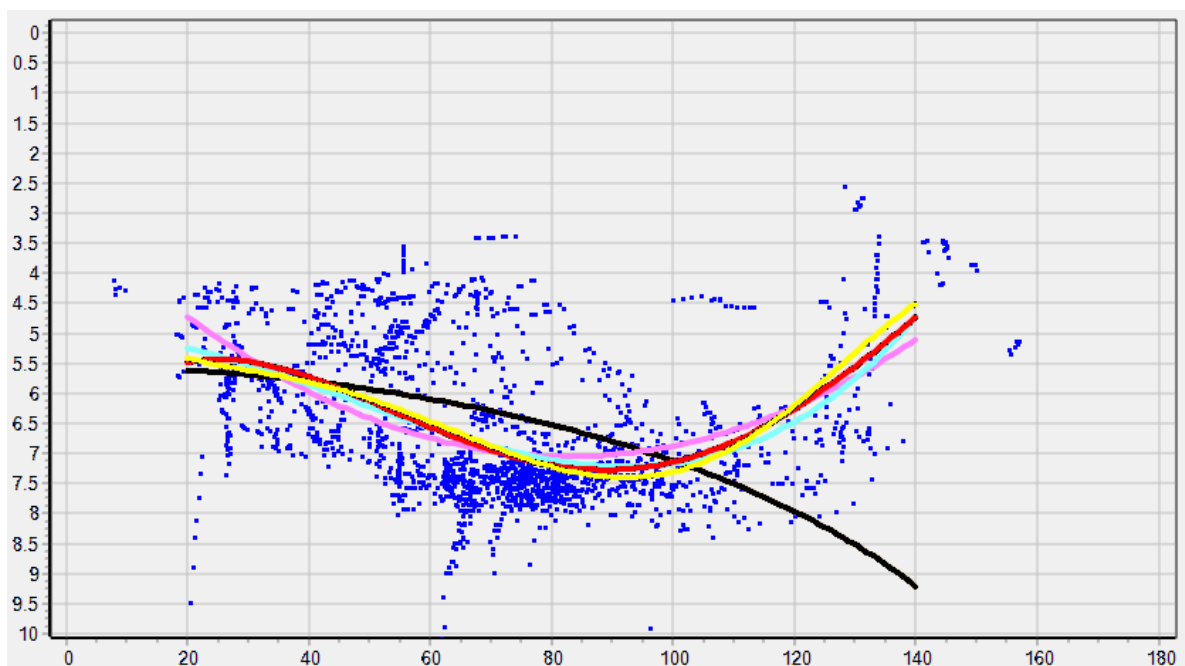


Рис. 7: Зависимость блеска от фазового угла для Starlink v2.0mini на орбитах с наклонением 70 градусов, запущенных 30 ноября 2024 г.

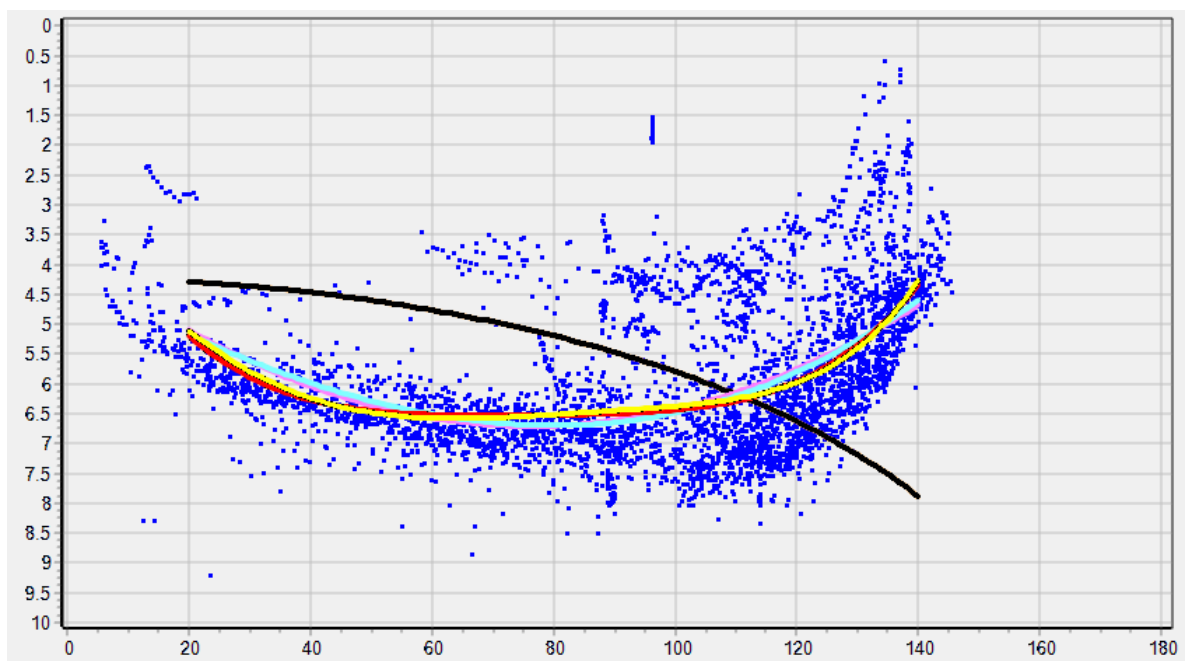


Рис. 8: Зависимость блеска от фазового угла для StarShield на орбитах с наклонением 70 градусов, запущенных одновременно со Starlink v2.0 mini 30 ноября 2024 г.

ний, так и позволили описать нестандартное поведение в виде аномального роста блеска при больших фазовых углах.

2. Проведено сопоставление фотометрических характеристик различных версий кластеров спутников компании SpaceX:

- первоначально запущенных спутников версии v1.0,
- таких же спутников, покрытых черной краской для уменьшения помех оптической астрономии,

- таких же спутников, снабженных защитным козырьком также для уменьшения помех оптической астрономии,
 - следующей версии спутников v1.5, незначительно отличающейся от v1.0, в которой на спутниках установлены средства лазерной связи,
 - спутников версии v2.0mini, вес которых увеличился почти вдвое для обеспечения большей пропускной способности каналов интернета,
 - спутников Starshield на базе версии v2.0mini, с приблизительно такой же массой, предположительно отличающаяся от исходной версии v2.0mini установленными на них приборами.
3. Показано, что уменьшение мешающего влияния для астрономических наблюдений, которого пытались добиться окраской спутников в темный цвет, дало незначительный эффект, менее 0.5 звездной величины. Применение экранирующего козырька дало эффект до 1.5 звездных величин, но не на всех фазовых углах рассеяния. Наибольший эффект был отмечен для фазовых углов вблизи 90 градусов.
 4. Замечено, что блеск более крупных спутников версии v2.0mini не увеличился, а даже в среднем стал немного меньше, чем у версии v1.0. Однако заметно возросло число ярких всплесков, превышающих средние значения на 2 и более звездных величин (более 6 раз в линейных единицах). Этот эффект замечен также в фотометрии спутников серии Starshield, однако он проявляется при фазовых углах больше 90 градусов в отличие от спутников серии v2.0mini, у которых яркие всплески регистрируются при фазовых углах менее 90 градусов.
 5. Предложено для различных космических объектов, а не только для спутников компании SpaceX, наряду с общепринятой моделью диффузной сферы использовать регрессионную полиномиальную модель. Модель диффузной сферы предлагается использовать при узком диапазоне фазовых углов наблюдений или для редко наблюдаемых объектов. В остальных случаях предлагается использовать полиномиальную модель второго порядка, как одну из самых простых и достаточно точных.

Список литературы

1. Wikipedia, SpaceX, URL <https://ru.wikipedia.org/wiki/SpaceX>.
2. Wikipedia, Starshield, URL https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_Starshield.
3. A. C. Boley and M. Byers, *Scientific Reports*, **11**, 2021.
4. SpaceX to experiment with less-reflective satellite coatings on next Starlink launch, URL <https://spaceflightnow.com/2019/12/09/spacex-to-experiment-with-less-reflective-satellite-coatings-on-next-starlink-launch>.
5. SpaceX has revealed new details on its plans to darken the Starlink satellites, URL <https://skyandtelescope.org/astronomy-news/details-spacex-starlink-visorsat>.
6. Network of optical monitoring equipment for near-Earth space objects PJSC "IJC "Vypel", URL <https://macvypel.ru/projects/diversifikaciya/set-opticheskikh-sredstv-monitoringa-okolozemnykh-kosmicheskikh-obektov>.
7. F. Fankhauser, J. A. Tyson, and J. Askari, *Astron. J.*, **166**, 59, 2023.
8. Wikipedia, Bidirectional reflectance distribution function, URL https://en.wikipedia.org/wiki/Bidirectional_reflectance_distribution_function.
9. Procedure Polyfit, URL <https://docs.exponenta.ru/matlab/ref/polyfit.html>.
10. NORAD Two-Line Element Set Format, URL <https://celestrak.org/NORAD/documentation/tle-fmt.php>.
11. NASA's Orbital Parameters of Space Objects, URL <https://www.space-track.org/>.
12. Orbital parameters of space objects by independent observers, URL <https://www.mmccants.org/tles/>.
13. D. A. Vallado and P. Crawford, URL <https://celestrak.org/publications/AIAA/2008-6770/AIAA-2008-6770.pdf>.
14. L. V. Kolomiets and N. Y. Ponikarova, *Samara University Press*, 2017.
15. I. V. Korobtsev and M. N. Mishina, *Solnechno-zemnaya fizika*, **5**, 117, 2019.

Система автоматической обработки изображений для поиска оптических транзиентов

Панков Н.С.^{1,2}, Позаненко А.С.^{1,2}, Минаев П.Ю.¹, Щекотихин Е.А.¹, Белкин С.О.³, Мазаева Е.Д.¹, Вольнова А.А.¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³Университет Монаша, Мельбурн, Австралия

Быстро развивающиеся многоволновые (в гамма-, рентгеновском, оптическом, радио-диапазонах) и многоканальные (совместно в электромагнитном и гравитационном каналах) наблюдения требуют обработки значительного объема изображений для поиска быстропеременных оптических транзиентов в режиме времени, близкому к реальному. Данное требование является критически важным при поиске оптических компонентов космических гамма-всплесков, особенно в контексте их возможной ассоциации с гравитационно-волновыми событиями, регистрируемыми детекторами LIGO, Virgo и KAGRA. В данной работе представлен программный комплекс STARFALL, разработанный для автоматизированной обработки астрономических изображений и поиска кандидатов в оптические транзиенты. В качестве ядра системы обработки выступает программный пакет APEX. Приведены основные функциональные возможности STARFALL, продемонстрирована его применимость к реальным данным и представлены научные результаты, полученные с помощью разрабатываемого ПО. Кроме того, кратко обсуждаются перспективы дальнейшей модификации системы.

Поступила в редакцию 27.01.2026 г. Принята в печать 03.05.2026 г.

Ключевые слова: автоматизация, программный конвейер, оптические транзиенты, обработка изображений

The Automatic Image Processing Software for Optical Transient Detection

Pankov N.S.^{1,2}, Pozanenko A.S.^{1,2}, Minaev P.Yu.¹, Schekotikhin E.A.¹, Belkin S.O.³, Mazaeva E.D.¹, Volnova A.A.¹

¹Space Research Institute of the RAS, Moscow, Russia

²Higher School of Economics, Moscow, Russia

³Monash University, Melbourne, Australia

The rapidly evolving era of multi-wavelength (gamma, X-ray, optical, and radio bands) and multi-messenger observations requires extensive processing of image arrays to detect fast optical transients in the near-real time regime. This requirement is crucial when searching for optical components of cosmic gamma-ray bursts (GRBs), especially in the context of their possible association with gravitational-wave events detected by LIGO, Virgo and KAGRA. In this work, we present STARFALL, a software specifically developed for the automatic processing of astronomical images to identify optical transient candidates. The core of the image processing is built upon the APEX package. The main functionalities of STARFALL are described. The application to real data is demonstrated and the scientific results obtained using the developed program are showcased. Furthermore, the prospects for future software development are briefly discussed.

Received 27.01.2026. Accepted 03.05.2026.

Keywords: automation, software pipeline, optical transients, image processing

DOI: 10.51194/INASAN.2026.11.3.004

1. Introduction

The modern era of multi-messenger astrophysics requires development of software designed to perform automatic image processing. The ROTSE telescope was a pioneer in terms of hardware and software, that has allowed detecting the earliest stage of a GRB optical emission (seconds after gamma-ray detection, see e.g. [1]). Nowadays there are many optical surveys containing both narrow and widefield telescopes installed to monitor the night sky for transient sources. In particular the ZTF [2, 3], or GOTO [4] tend to equip their infrastructure with an automatic image processing software. For instance, the ZTF image processing pipeline ZUDS¹ [3] is deployed at the IPAC and contains several pipelines, including image calibration, source extraction, astrometric and photometric calibrations, image subtraction, and candidate transient classification. However, these pipelines were designed specifically for the usage in the ZTF project, although ZUDS code could be used in pipelines for other telescopes. We have been developing (since 2019) a general ready-to-use approach with a flexible configuration for the automatic image processing in the application to images taken by a heterogeneous network of telescopes. Typically, there are several software serving for certain purposes: e.g. SExtractor [5] for source extraction, Astrometry.net [6] for astronomical image calibration, cosmic_conn [7, 8] for cosmic ray detection, and so on. Many of them are de-facto standards in their respective tasks.

¹<https://github.com/zuds-survey/zuds-pipeline>

The primary objective of this work is to integrate the respective software components into a unified system designed for the automated processing of survey images and the subsequent candidate transients detection and reporting. An important aspect is to have user-friendly interface to the system components via web for a convenient visual analysis. Another aspect is usage of modern AI-instruments helping benefits in tasks, where classical instruments struggle (e.g. bogus and anomaly detection, image generation, source classification, etc.). STDWeb [9] is a first open source transient detection system, which was designed taking into account these aspects. There are limitations of STDWeb usage as pointed out in [9]: e.g. no calibration support and image series processing.

STARFALL is an automatic system, which in near-real time performs the complete processing cycle for a series of astronomical images from calibration to candidate transient detection. We rely on experience of leading transient survey ZTF and GOTO and incorporate open source solutions such as Astro-SCRAPPY [10], Cosmic-Conn [7, 8], skylib², HOTPANTS [11], SEP [12], Astrometry.net [6], SExtractor [5], SWarp [13], PSFEx [14], STDWeb [9]. Most of the image processing utilities used by STARFALL are based on the APEX package [15]. Next sections will cover workflow of the STARFALL automatic astronomical image processing, and the processes involved in it. Further sections will display scientific results obtained with STARFALL components. In the final section the conclusion and future plans are presented.

2. Workflow

STARFALL is being designed in the microservice architecture paradigm. The principle of the current STARFALL prototype operation is best described by the diagram shown in Fig. 1.

According to the flow chart in Fig. 1, STARFALL initially scans for a new survey image using a Python service `image-scanner`, based on `watchdog`³ package. We assume that this service is installed in-place with image warehouse. The open source file server deployed there allows for a manual image upload via web UI or via SFTP client. `watchdog` service parses and processes image metadata and stores it inside the SQL database.

Then, depending on the image type, a specific pipeline is started. In the case of a science image, the automatic image processing pipeline is run by the `process_image` Airflow DAG. The flow chart of the processing pipeline is displayed in Fig. 2.

²<https://github.com/SkynetRTN/skylib>

³<https://github.com/gorakhargosh/watchdog>

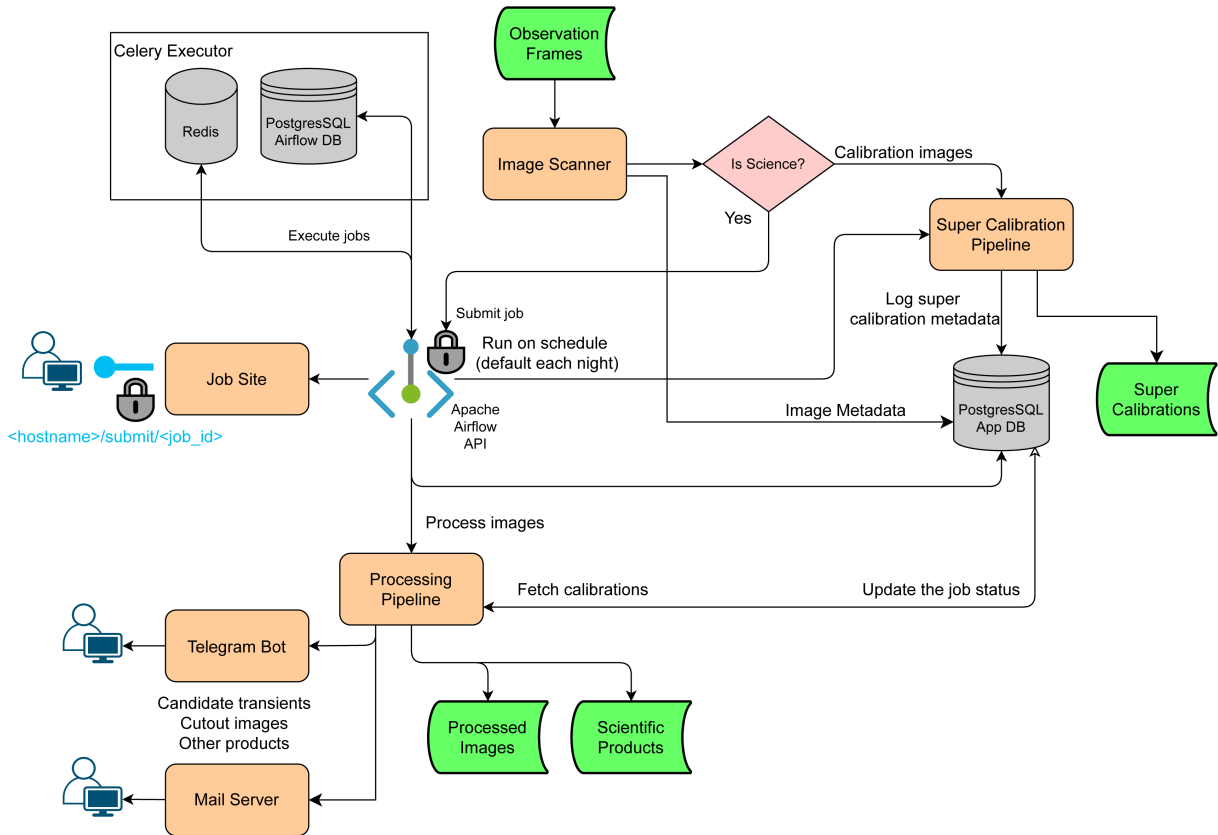


Figure 1: The flow chart of the Starfall automatic image processing system. The description is provided in Section 2.

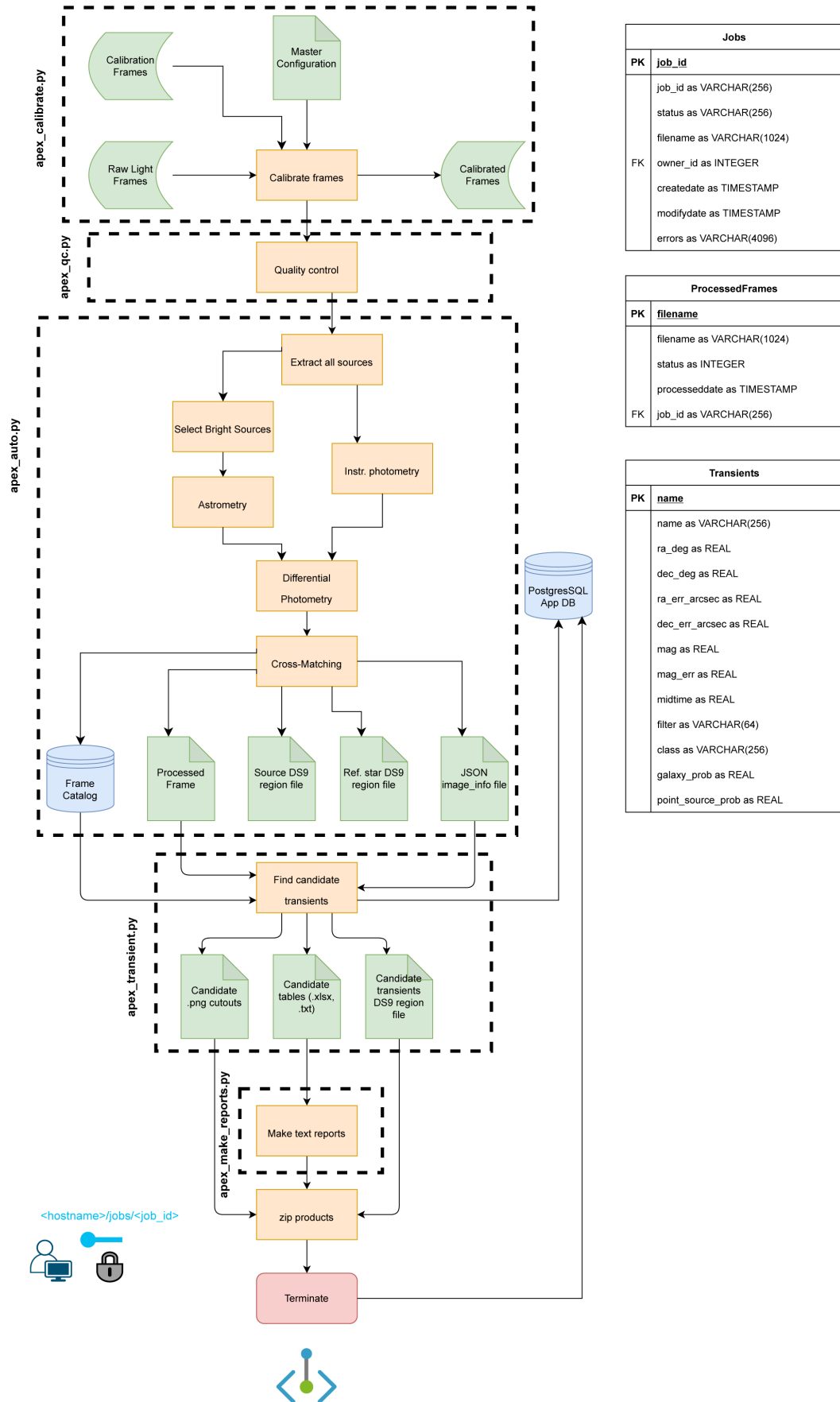


Figure 2: The flow chart of the image processing pipeline. Sections 3–10 describe the pipeline operation.

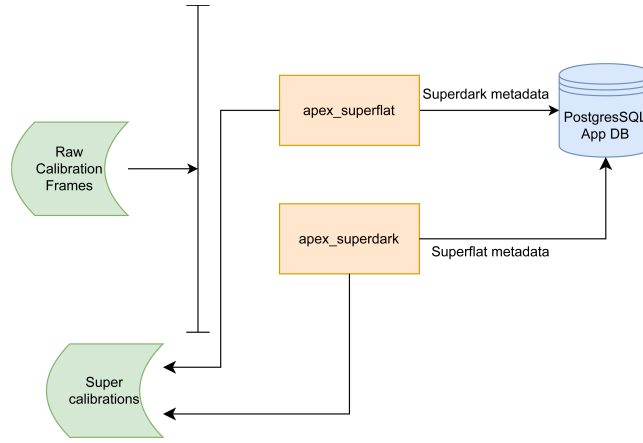


Figure 3: The flow chart of the supercalibration pipeline. Raw calibration images are stacked with a respective script (`apex_superflat` in the case of flat images, otherwise, for dark images, `apex_superdark` is used). The metadata of the supercalibration images are then stored in the SQL database.

Alternatively, for a calibration image, the super calibration image pipeline is executed (the flow chart is in Fig. 3). These pipelines are orchestrated with the `Airflow`⁴ instance, which allows to manage the jobs using unified REST API over the web requests. Here, we recommend that `Airflow` is connected with the image server with fast internet connection, since images will be downloaded via the SFTP client from the `Airflow` DAG. Another option is to deploy the `Airflow` on the same machine as the image server.

The job-viewer Flask service provides regular users with a convenient web UI for monitoring and managing processing jobs (Fig. 4), thus abstracting low-level `Airflow` administrative controls. The jobs status, user logins, and image information are stored in the SQL database.

After the image processing finished, the lightweight results (lists of candidate transients, image cutouts, etc.) are sent via the email server and/or the Telegram bot to subscribed persons and displayed on dedicated web-pages. We also allow a user to upload images to the server manually. This will create a processing job in the same way as described earlier.

The processing is executed inside the `process_image` `Airflow` DAG in the same way as triggered automatically on new survey images. The processing routines are run independently and the maximum number of running jobs is limited by `Airflow` admins.

3. Image Calibration

The software checks special image header boolean keywords in order to assume the image has been calibrated or not. These keywords are: `DARKCORR` — indicates dark correction, `FLATCORR` — indicates flat-field correction, `CRCORR` — indicates cosmic ray masking or removal, `BACKCORR` — indicates sky background subtraction. In the case of a raw uncalibrated image, the `Airflow` triggers `apex_calibrate` pipeline to run on the image using already prepared stacked calibration images. Supercalibrations are prepared by the `Airflow` DAG `create_supercals`, which creates stacked dark and flat-field images grouping them by several attributes (resolution, exposure, filter, observation date, etc). This DAG is run on each night. When no suitable supercalibrations available, `create_supercals` is triggered automatically.

3.1. Bias/Dark Subtraction

The bias/dark subtraction implemented in the `apex_calibrate` pipeline. It automatically select bias/dark images according to image exposure and temperature, creates a superdark image, then subtracts it from the raw science image. If there is no suitable dark images available, `apex_calibrate` tries to scale existing dark image exposures and temperatures to match the light frame. Note that there is either bias or dark image calibration is performed, not both. The reason is that a dark image already includes bias.

3.2. Flat-Field Correction

This calibration step is provided by the `apex_calibrate` pipeline. The flat images are automatically selected based on the science image filter. Then the series of the flat images combined into a superflat image. During the

⁴<https://airflow.apache.org/>

STARFALL Home About Search admin Logout

Automatic image processing

Performs a complete image processing:

- image calibration
- quality control
- stacking
- measurement
- aperture photometry
- PSF photometry
- astrometric reduction
- photometric calibration
- search for candidate transient

Start

ABOUT US ...

LINKS
[Home](#)
[About](#)
[Services](#)
[Contact](#)

CONTACT
 Email: ???
 Phone: ???

© 2025 Nicolai Pankov

(a) Index page.

STARFALL Home About Search admin Logout

1. Select images

Choose light images with sources: Browse... 5 files selected ✓
 Choose dark images: Browse... DF-15_12_725.tif ✓
 Choose flat images: Browse... FF_R_250724.tif ✓

Upload your files (max 1024.0 MiB) Upload your files (max 1024.0 MiB) Upload your files (max 1024.0 MiB)

Clear Validate Next

2. Set job parameters

Telescope: C/AAO/ZTSH
 Stack mode: sum
 Field Center (for astrometry): 332.89675 ✓ 32.73242 ✓
 Optical filter: R
 Astrometric catalog: USNO-B1.0
 Photometric catalog: USNO-B1.0
 Transient Search Circle: 332.89675 32.73242 1.0

Submit

ABOUT US ...

LINKS
[Home](#)
[About](#)
[Services](#)
[Contact](#)

CONTACT
 Email: ???
 Phone: ???

© 2025 Nicolai Pankov

(b) Upload Page.

Figure 4: **Starfall** Web UI forms. a) The index page, where users can start the automatic image processing. b) The upload page, where images are uploaded and processing job parameters are chosen.

combination process, bad pixels are iteratively rejected using sigma clipping. The science image is then divided by the resulted superflat image.

3.3. Sky Background Subtraction

The sky background estimation is based on several algorithms. There are ones that were originally implemented for APEX [15, 16, 17], including the `clean` estimator. Another widely used option is a mesh-grid estimator as implemented in `SExtractor` and `SEP`. The estimated sky background map is subtracted from the science image. The sky background subtraction is included in the `apex_calibrate` pipeline.

3.4. Cosmic Ray Removal

The cosmic ray removal is made around two algorithms. The first one is implemented in the `Astro-SCRAPPY` package and based on principle of identifying sources with sharp edges as cosmic ray tracks. Another option is `Cosmic-Conn` neural network, which is best suited for images with plate scale of around 0.2–0.3 arcsec per pixel.

4. Image Quality Control

A series of calibrated images is undergo quality control process prior to image stacking. For each image there is a score assigned, which is an average from four metrics:

- number of sources in the image,
- median image FWHM,
- average sky background level,
- median source ellipticity.

Images with score that deviate significantly from the average do not pass quality control. As the result, a list of quality images is generated. Quality control is implemented as the `apex_qc` pipeline. In practice, quality control allows to obtain list of images that being stacked reaches deeper magnitudes as $\sim \sqrt{N}$, where N is the count of stacked images. We estimated that the image quality control improves a limiting magnitude by 0.3 mag on average, which results in the detection of faint sources.

5. Image Stacking

Images passed quality control are stacked to a single deep image. We use the `apex_stack` pipeline for this, which performs alignment of images using common sources, and then stacking. As was pointed out in the previous section, stacking allows to increase limiting magnitude as $\sim \sqrt{N}$. To speed up the stacking process we limit the number of common sources up to ~ 30 (for `DIST-ORIENT` algorithm) and up to ~ 150 sources in the case of triangle matching algorithms depending on the image angular size.

6. Source Extraction

We have relied on the APEX `conn` source extractor in combination with the source deblender `mt_conn`, and additional source measuring function. All of these were written in Python with usage of Numpy arrays. However, we have decided to implement an additional APEX source extraction plugin `conn_sep`, which wraps `SEP` routines, for better performance. The plugin allows to extract, deblend, and measure sources in one step. Among measured parameters there are X,Y coordinates, rotation angle and their respective 1σ errors.

7. Aperture Photometry

The implementation of the aperture photometry written for APEX and implemented in Python with usage of Numpy arrays, had several disadvantages and limitations, therefore we completely rewritten it using the `SEP` framework. Our first and an obvious reason was to optimize the aperture creation and measurement of the source aperture flux. Although, this process is performed in parallel on CPU threads (with help of `dask`), the potential for a faster performance is visible. Another reason is to add support for sub-pixel aperture rasterization, which can be useful for images with large pixel size leading to small apertures. In third, the aperture growth curve to find best possible aperture size has requested. Finally, the pixel masking was requested to reduce contamination from nearby sources and artifact pixels, when doing photometry of the given source. The `SEP` meets all our requirements and have chosen for the aperture photometry implementation. Thus, the flow chart of the aperture photometry in its latest version is displayed in Fig. 5.

As an input, the aperture photometry takes an image with extracted sources list. The flux measuring is performed in apertures of radii R , R_{in} , and R_{out} , corresponding to the central aperture, and the annuli ring (optional). The arrays of source rotation angles θ and ellipticity Ell are also passed to `SEP`. By default $R = FWHM$ is used for an automatic photometry of sources.

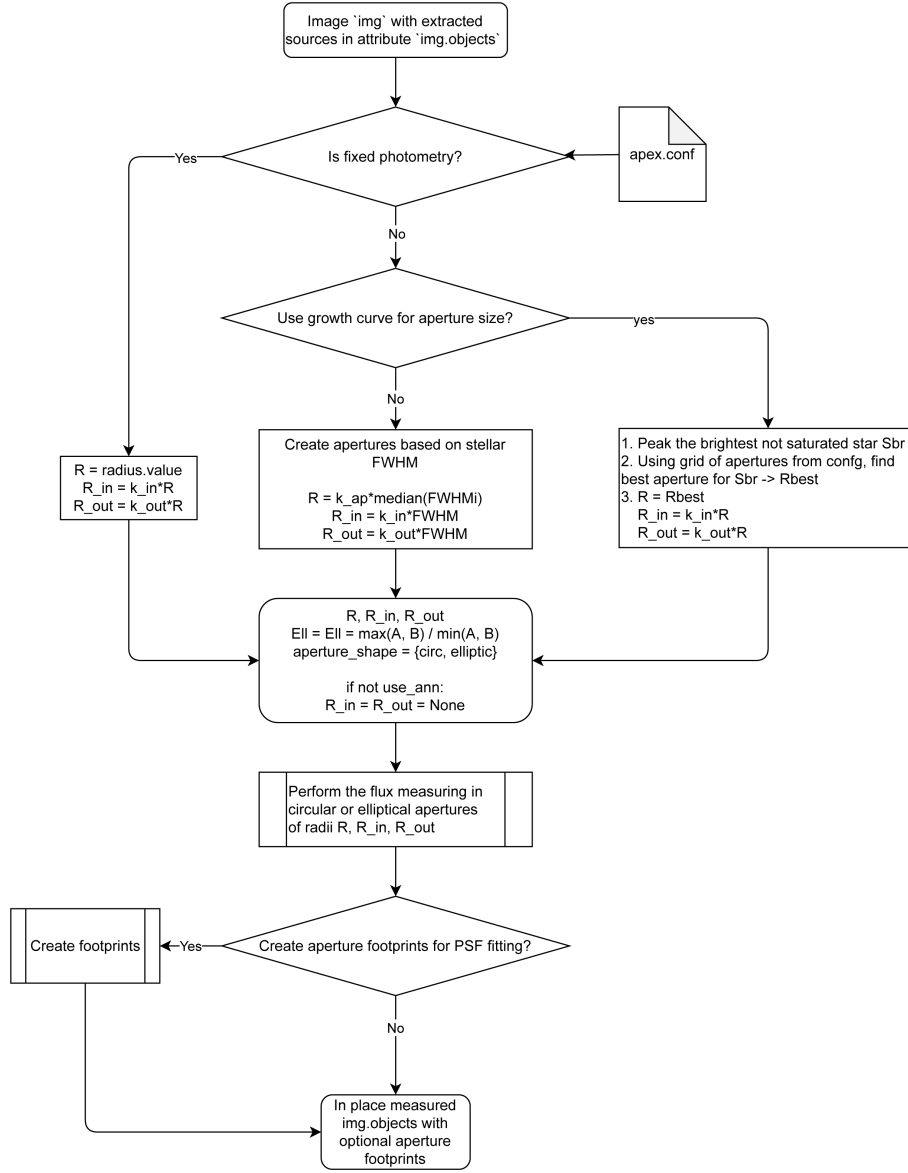


Figure 5: The flow chart of the aperture photometry. See details in the text.

8. Photometric Calibration

Using APEX we provide two photometric regimes: an automatic photometry and a forced photometry. The first one performs photometric calibration for all sources in the image, while the second one performs it for selected sources.

8.1. Automatic Photometry

To calibrate all sources in the image, we fetch list of calibration stars from the USNO-B1.0 catalog [18]. We filter the list by criteria presented in [15]. Among them are magnitude variability, colors, star/galaxy separation, saturation and blending, etc. Variability, colors and star/galaxy separation constraint are defined in the configuration file and can be tuned to match given images. After list of calibrators obtained and filtered, the fit of the polynomial model is performed. The model expression is given below:

$$m_{\text{calib}} = c_0 + c_1 m_{\text{inst}} + c_2 m_{\text{inst}}^2 + \dots + c_n m_{\text{inst}}^n + Z + \kappa X(z) \quad (1)$$

where c_i are the polynomial coefficients, m_{inst} are the instrumental magnitudes of calibration stars obtained after aperture or PSF-photometry, Z is the photometric zero-point, κ is the extinction term and $X(z)$ is the airmass. The total photometric error σ_m includes error on the Z , m_{inst} of calibration stars and measured sources. The fitting process is iterative to provide outlier rejection for σ_m minimization. The error threshold is specified in the configuration file. By default it is set to 0.05 mag, which is acceptable error for most cases.

8.2. Forced Photometry

Specially for the needs of a fast photometric calibration of a set of sources we developed the `apex_forced_phot` pipeline. It is useful to measure, e.g. already known positions of GRB afterglows. As input the pipeline takes the astrometrically calibrated image and a list of positions to measure, including the list of calibration stars with their catalog magnitudes, specified in a JSON-file, which template is provided in the Lis. 1.

Listing 1: A JSON input file template.

```
[
  {
    "ra": <RA in degrees>,
    "dec": <Dec in degrees>,
    "name": "Source_name",
    "refstar": false,
    "img_type": "science_(or_difference)"
    "aperture_radius": <aperture radius in arcsec>
  },
  {
    "ra": <RA in degrees>,
    "dec": <Dec in degrees>,
    "name": "Reference_star_#1",
    "mag": <magnitude>,
    "mag_err": <magnitude error>,
    "refstar": true
  },
  {
    "ra": <RA in degrees>,
    "dec": <Dec in degrees>,
    "name": "Reference_star_#2",
    "mag": <magnitude>,
    "mag_err": <magnitude error>,
    "refstar": true
  }
]
```

Optionally, science and difference images can be provided on input to measure residual sources on difference image, which will be calibrated against stars on the science image. Here, we assume that the difference image is normalized on the science image, e.g. after `apex_subtract` (see Section 10.2). To enable this mode, one should use `"img_type": "difference"` in the JSON-file.

In addition, to have consistent measurements of diffuse sources, a fixed aperture angular radius can be specified for the sources of interest. For this to be enabled, the JSON attribute `"aperture_radius"` must be filled with a positive float number.

9. Astrometric Calibration

Images with absent astrometric information in their FITS headers are undergo process of astrometric calibration. The procedure is consist of two steps. At the first step a preliminary solution is constructed using prior information about the observed field: approximate center coordinates, focal length and detector pixel sizes (or pixel scale in units of arcsec per pixel). At the next step, the plate solving is initiated using, e.g. USNO-B1.0 catalog (by default) as reference with already implemented APEX algorithms [15, 16, 17].

10. Transient Detection

As of version v2023.11, we provide two APEX pipelines for the transient detection: `apex_transient` and `apex_subtract`. The first one is made upon matching extracted sources list with known catalogs, e.g. USNO-B1.0, while the second one uses optimal image subtraction to find variable sources in difference images.

10.1. Catalog Matching

The `apex_transient` pipeline performs the cross-matching with catalogs to find candidates according to the algorithm, which can be expressed in several steps as shown in the Appendix 1.

At the first step, we exclude sources that are known close stars or variable stars in CNS5 [19] and NSVS [20] catalogs. Also, we exclude moving transients (e.g. asteroids) using the MPC service [21]. Then, we select as candidates those sources that are not identified with USNO-B1.0, PS1 [22] or GLADE+ [23] catalogs. In addition, as candidates we select red catalog sources (i.e. source satisfying color constraints $g - r > 0$, $B2 - R2 > 0.5$) with a significant brightness excess ($> 2.5\sigma$) in the image. The candidate transients are scored using their coordinate-based probability inside the localization contour, the brightness excess, and the deviation from the specified LVK distance bounds (only valid for GLADE+ galaxies).

10.2. Optimal Image Subtraction

In contrast, `apex_subtract` detects transients using optimal image subtraction algorithm, described in [24]. First, both template and science images are background subtracted. Next, the template image is per-pixel aligned with the science image using common sources from both images. The cross-matching of common sources is achieved with algorithms implemented by APEX, and further alignment is performed using `scikit-image` [25] affine transformation. It worth mentioning, that the template image could be either specified or automatically downloaded from the HIPS2PIX portal (DSS2, PS1, SDSS-DR12 [26], LS DR9 [27], UKIDSS [28], and 2MASS [28] images are used). Further, the template image is blurred (i.e. convolved with a PSF kernel) to match the PSF of the science image. `apex_subtract` has two modes of PSF matching: a) global kernel and b) spatially variable PSF kernel. The global kernel is just a Gaussian filter with $FWHM = \sqrt{FWHM_{\text{blur}}^2 - FWHM_{\text{sharp}}^2}$, where $FWHM_{\text{blur}}$ is the median $FWHM$ of the blurriest image, and $FWHM_{\text{sharp}}$ is the $FWHM$ of the sharpest one. The blurred image would be computed as $\hat{I}(x, y)_{\text{blurred}} = \hat{I}(x, y) * \hat{G}(FWHM)$, where $\hat{G}$ is the Gaussian kernel. Then, the template image is normalized to the science image to have an ability for photometry of the residual image by using measurements of comparison stars in the science image. The normalization factor is computed from brightest common sources present on both images as $s_{\text{bright}} = \text{Med}\{s_1 s_2, \dots, s_{n-1}, s_n\}$, where $s_i = f_{i,\text{sci}}/f_{i,\text{tmp}}$ is the scale factor of an individual source based on the aperture flux f , n is the number of sources. Finally, the template brightness is scaled as $\hat{T}(x, y)_{\text{scaled}} = s_{\text{bright}} \times \hat{T}(x, y)$, and the difference image is simply $\hat{D}(x, y) = \hat{I}(x, y) - \hat{T}_{\text{scaled}}(x, y)$. For this mode we wrote the legacy code in Python. The global kernel mode is suitable for narrow field telescopes having small PSF variations across the image field. However, for larger fields (typically around 0.5 degrees in diameter and larger) the spatially-variable kernel is preferred. This mode is achieved using the HOTPANTS⁵ software. We adopted the *ZTF* priors [3] for the HOTPANTS parameters as defaults. The residual point-like sources on the difference image are extracted as candidate transients by `apex_subtract`. The examples of the pipeline usage is displayed in Fig. 6 (description is included).

10.3. Human Vetting

Each transient detection pipeline may be triggered on artifact sources, that is why visual analysis (human vetting) is necessary to neglect them. To help with vetting, the pipelines generate visual region markup for the SAOImage DS9 image visualization application. After removing spurious detections we typically left with $\lesssim 10$ final candidates (for regular fields of ~ 15 arcmin in diameter).

11. Results

In addition to the examples provided above, the results obtained with `apex_transient` and `apex_subtract` pipelines were already used in the published papers. The obtained results are briefly presented here; a detailed review lies beyond the scope of this work.

11.1. GRB 200829A

APEX pipelines were utilized to construct the well detailed optical light curve of GRB 200829A by processing relatively large series of images. Particularly, `apex_forced_phot` was used to obtain apparent magnitudes of the source. A comprehensive analysis of GRB 200829A is presented in [29].

⁵<https://github.com/acbecker/hotpants>

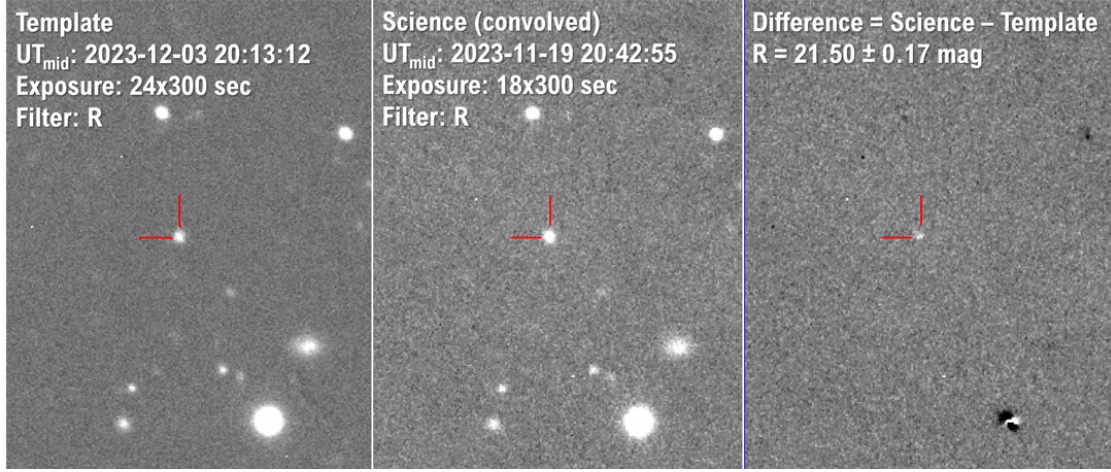


Figure 6: The GRB 231117A optical afterglow detection using optimal image subtraction pipeline `apex_subtract`. The left image is the template, taken on 2023-12-03 20:13 UT (midtime), the middle one is the convolved science image, taken on 2023-11-19 20:42 UT (midtime). A total exposure was 24×300 sec for the template, and 18×300 sec for the science image. Both images were taken in the R-filter with AZT-22 1.5-meter telescope of Maidanak observatory. The optical afterglow (indicated by a red crosshair) stands out clearly out its host galaxy SDSS J220933.34+133119.5 (located at the redshift of $z = 0.257$) in the difference image. The brightness of the optical afterglow was $R = 21.50 \pm 0.17$ mag.

11.2. GRB 201015A

We used `APEX` to obtain astrometric calibration of GRB 201015A images. It helped to distinguish the source from its host galaxy located at a separation of only 1.5 arcsec. A comprehensive analysis of GRB 201015A is presented in [30].

11.3. GRB 230506C

The `APEX` pipelines were used to process images and find candidate counterparts to GRB 230506C (see Table 1). The actual counterpart was found by us with the `apex_transient` pipeline after comparison with USNO-B1.0 and PS1 catalogs (see the 3-rd row of Table 1).

11.4. GRB 231115A

In [31] dedicated to the comprehensive analysis of giant SGR flare GRB 231115A, the `apex_subtract` pipeline was used to remove the bright halo of the M82 host galaxy of the SGR, therefore made it possible to obtain upper limits on optical candidate transients.

11.5. GRB 240225B

We utilized `APEX` pipelines to perform image processing of the observations of GRB 240225B taken by AZT-33IK telescope of Sayan Solar Observatory (Mondy) [32] and obtained its light curve in the R-filter. For instance, we used `apex_subtract` to subtract PS1 DR1 r-filter template image to make sure the underlying host galaxy does not affect the afterglow measurements.

Table 1: The candidate optical counterparts to GRB 230506C after human vetting. The observation epoch is $t_{\text{obs}} = T_0 + 0.02914$ days, where T_0 is the GRB detection time.

#	R.A.	Dec	R magnitude		
	hr	deg	Image mag	PS1* mag	USNO-B1.0 mag
3	08:57:17.7	+45:06:53.0	21.81 ± 0.05	20.29 ± 0.05	19.71
6	08:57:21.4	+45:08:47.8	20.70 ± 0.05	19.71 ± 0.04	n/d
8	08:57:28.13	+45:07:59.48	20.05 ± 0.05	n/d	n/d
16	08:57:34.9	+45:10:09.8	19.46 ± 0.10	19.45 ± 0.02	n/d

* — Magnitudes were calculated by converting PS1 r, i magnitudes using Lupton 2005 equations.

11.6. GW190425

The APEX pipelines were used to process extensive set of survey images of the fields located in the 90% probability contour of a gravitational-wave event GW190425. It helped to obtain lists of candidates for each field, which was unable to perform only with manual inspection of fields (Mazaeva et. al, unpublished).

11.7. Other results

We also use APEX pipelines, including one for forced photometry `apex_forced_phot` to obtain lists of candidate transients and photometry of already discovered transients, and publish results to the GCN service. For instance, since 2024-01-01 we have posted >100 GCN circulars.

12. Conclusions

STARFALL is an image processing system that manages jobs in near-time mode. It was designed to detect candidate transients to gamma-ray burst afterglows, including ones that connected with gravitational wave events detected by LVK. STARFALL accepts jobs from the local image watchdog client installed at the image server connected with a telescope. Also, a user can submit processing jobs via the convenient web UI. In comparison with alternative solutions such as STDWeb, STARFALL integrates comprehensive functionality — calibration of image series images, quality control, image co-adding, source extraction, astrometric and photometric calibration, transient detection largely by leveraging the APEX pipelines. Pipeline orchestration is handled with the industry-standard Airflow, enabling concurrent pipeline execution and offering administrators convenient job management via a web UI or a REST API. Building on the functionality described in [15], we have developed new and revised legacy APEX components: notably, a new source-extraction plugin, `conn_sep`, which substantially improves extraction performance, and a migration of aperture photometry to the SEP framework, which enhances throughput and adds features such as source masking and aperture-growth curves. The recently implemented pipelines `apex_forced_phot`, `apex_transient`, and `apex_subtract` enable forced photometry on image data and facilitate candidate transient detection using catalog-matching or image-subtraction techniques. To demonstrate practical utility, these pipelines were deployed and tested on observed transient events. For instance, by utilizing `apex_transient` we discovered the GRB 230506C’s optical counterpart.

13. Future Development

The development of STARFALL and APEX is in active stage. We aim at performance boosting of existing processing tasks using GPU calculations (we consider CuPy and PyTorchDIA frameworks) or even replacing existing Python functionality with calls to more optimized external programs. Additionally, we target at incorporating AI-solutions such as described in [33].

14. Availability

The source code is available upon reasonable request to the main author of the manuscript.

References

1. C. Akerlof, R. Balsano, S. Barthelmy, J. Bloch, et al., *Astrophys. J. Lett.*, **532**, L25, 2000.
2. E. C. Bellm, S. R. Kulkarni, M. J. Graham, R. Dekany, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **131**, 018002, 2019.
3. F. J. Masci, R. R. Laher, B. Rusholme, D. L. Shupe, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **131**, 018003, 2019.
4. D. Steeghs, D. K. Galloway, K. Ackley, M. J. Dyer, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **511**, 2405, 2022.
5. E. Bertin and S. Arnouts, *Astron. and Astrophys. Supp.*, **117**, 393, 1996.
6. D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle, M. Blanton, and S. Roweis, *Astron. J.*, **139**, 1782, 2010.
7. C. Xu, C. McCully, B. Dong, D. A. Howell, and P. Sen, Cosmic-conn lco cr dataset, 2021, URL <https://doi.org/10.5281/zenodo.5034763>.
8. C. Xu, C. McCully, B. Dong, D. A. Howell, and P. Sen, *Astrophys. J.*, **942**, 73, 2023.
9. S. Karpov, *arXiv e-prints*, arXiv:2411.16470, 2024.
10. C. McCully and M. Tewes, Astro-SCRAPPY: Speedy Cosmic Ray Annihilation Package in Python, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1907.032, 2019.
11. A. Becker, HOTPANTS: High Order Transform of PSF AND Template Subtraction, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1504.004, 2015.
12. K. Barbary, *The Journal of Open Source Software*, **1**, 58, 2016.
13. E. Bertin, SWarp: Resampling and Co-adding FITS Images Together, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1010.068, 2010.
14. E. Bertin, in I. N. Evans, A. Accomazzi, D. J. Mink, and A. H. Rots, eds., *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*, **442**, 435 (2011).

15. N. Pankov, , A. Pozanenko, V. Kouprianov, and S. Belkin, in A. Pozanenko, S. Stupnikov, B. Thalheim, E. Mendez, and N. Kiselyova, eds., *Data Analytics and Management in Data Intensive Domains*, 104–134 (2022).
16. A. V. Devyatkin, D. L. Gorshanov, V. V. Kouprianov, and I. A. Verestchagina, *Solar System Research*, **44**, 68, 2010.
17. V. Kouprianov, in *39th COSPAR Scientific Assembly*, **39**, 974 (2012).
18. D. G. Monet, S. E. Levine, B. Canzian, H. D. Ables, et al., *Astron. J.*, **125**, 984, 2003, URL <https://doi.org/10.1086/345888>.
19. A. Golovin, S. Reffert, A. Just, S. Jordan, A. Vani, and H. Jahreis, *Astron. and Astrophys.*, **670**, A19, 2023.
20. P. R. Wozniak, W. T. Vestrand, C. W. Akerlof, R. Balsano, et al., VizieR Online Data Catalog: Northern Sky Variability Survey (NSVS) (Wozniak+, 2004), VizieR On-line Data Catalog: II/287. Originally published in: 2004AJ....127.2436W, 2004.
21. G. Williams, S. Keys, M. Rudenko, and J. Galache, Minor planet center - asteroid orbital data, VO resource provided by the GAVO Data Center, 2009, URL <http://dc.g-vo.org/mpc/q/pla/info>.
22. K. C. Chambers, E. A. Magnier, N. Metcalfe, and et al., *arXiv e-prints*, arXiv:1612.05560, 2016.
23. G. Dály, R. Díaz, F. R. Bouchet, Z. Frei, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **514**, 1403, 2022.
24. C. Alard, *Astron. and Astrophys.*, **343**, 10, 1999.
25. S. van der Walt, J. L. Schönberger, J. Nunez-Iglesias, F. Boulogne, et al., *PeerJ*, **2**, e453, 2014.
26. S. Alam, F. D. Albareti, C. Allende Prieto, F. Anders, et al., *Astrophys. J. Supp. Ser.*, **219**, 12, 2015.
27. A. Dey, D. J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, et al., *Astron. J.*, **157**, 168, 2019.
28. A. Lawrence, S. J. Warren, O. Almaini, A. C. Edge, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **379**, 1599, 2007.
29. N. S. Pankov, A. S. Pozanenko, P. Y. Minaev, S. O. Belkin, et al., *Astronomy Letters*, **49**, 81, 2023.
30. S. Belkin, A. S. Pozanenko, P. Y. Minaev, N. S. Pankov, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **527**, 11507, 2024.
31. P. Y. Minaev, A. S. Pozanenko, S. A. Grebenev, I. V. Chelovekov, N. S. Pankov, A. A. Khabibullin, R. Y. Inasaridze, and A. O. Novichonok, *Astronomy Letters*, **50**, 1, 2024.
32. A. Kumar, B. P. Gompertz, B. Schneider, S. Belkin, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **544**, 1541, 2025, URL <https://doi.org/10.1093/mnras/staf1689>.
33. E. Shekotihi, N. Pankov, A. Pozanenko, and S. Belkin, *Pattern Recognition and Image Analysis*, **34**, 870, 2024.

Appendix A. Algorithms

In this section, we describe the catalogs matching algorithm. The following notations are used below. $P_{\text{star}} = \frac{1}{\sigma_{FWHM}\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(FWHM-S)^2}{\sigma_{FWHM}^2}$ ($FWHM$ and σ_{FWHM} is the image $FWHM$ and its 66.7% standard error, and S is the source $FWHM$) is the probability of the source to be point-like; $P_{\text{gal}} = 1 - P_{\text{star}}$ if $FWHM > S$, $P_{\text{gal}} = 0$, otherwise, is the probability of the source to be diffuse-like (i.e. a galaxy, see Fig. 7 for the explanation); mag_{image} and $\sigma_{mag,\text{image}}$ are the magnitude of the source in the image and its standard error; mag_{cat} and $\sigma_{mag,\text{cat}}$ is the same but for catalog entries; D is the distance to a GLADE+ galaxy, D_{GW} and σ_{GW} are the estimation on distance to the gravitational wave event and its standard error (as given by LVK); $P(ra_i, dec_i)$ is the probability density at the coordinates ra_i, dec_i as specified in a HEALPix skymap (e.g. skymap of an LVK event); $\Sigma = (|mag_{\text{image}} - mag_{\text{cat}}|) / (\sqrt{\sigma_{mag,\text{image}}^2 + \sigma_{mag,\text{cat}}^2})$.

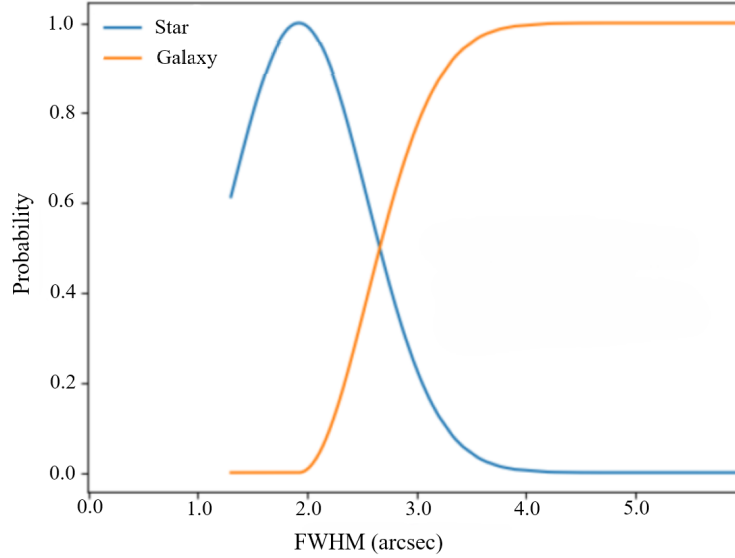


Figure 7: The source classification probability functions: the blue curve (left) is a probability to be a star P_{star} , and the orange curve (right) is a probability to be a galaxy demonstrated for a sample image with seeing of 2.0 arcsec. The classification is based on an image seeing (average $FWHM$ of stars). It is designed in such a way that star probability rapidly decreases to the left (area of cosmic rays) and to the right (area of galaxies). At the same time, the probability to classify a source as a galaxy P_{gal} rapidly decreases towards left bound, and plummets after $FWHM = \text{seeing}$. Towards large $FWHM$ s P_{gal} saturates at near 1.0.

Note, that $P(ra_i, dec_i) \propto \exp(-\frac{(ra_i - ra_0)^2 + (dec_i - dec_0)^2}{2r^2})$ for the case of a circular skymap (e.g. given by Swift, Fermi, EP), here r is the uncertainty radius in degrees, and (ra_0, dec_0) are coordinates of the circle center (in degrees).

Algorithm 1 A catalog search for candidate transients

```

1:  $R \leftarrow 3.0$  arcsec
2: Catalogs  $\leftarrow$  CNS5, NSVS, MPC, USNO-B1.0, PS1, GLADE+
3:                                      $\triangleright$  Reject sources by following criteria
4: if (is a cosmic ray) or  $(P_{\text{star}} + P_{\text{gal}} > 0.8)$  or  $(a/b > 1.8)$  then
5:   Reject
6: end if
7:
8: Catalog cross-match with radius  $R$ 
9: if source  $\in$  {CNS5, NSVS, MPC} then
10:   Reject
11: end if
12: Transform catalog magnitudes according to the image filter
13: Classify catalog sources
14: if (is point-like) and  $(g - r \geq 0$  or  $B2 - R2 \geq 0.5)$  and  $(\Sigma \geq 2.5)$  then
15:   class = RSF  $\triangleright$  Red stellar flare
16: else if (is point-like) and  $(g - r \geq 0$  or  $B2 - R2 \geq 0.5)$  and  $(\Sigma < 2.5)$  then
17:   class = RS  $\triangleright$  Red star
18: else if (is point-like) and  $(g - r < 0$  or  $B2 - R2 < 0.5)$  and  $(\Sigma \geq 2.5)$  then
19:   class = BSF  $\triangleright$  Blue stellar flare
20: else if (is point-like) and  $(g - r < 0$  or  $B2 - R2 < 0.5)$  and  $(\Sigma < 2.5)$  then
21:   class = BS  $\triangleright$  Blue star
22: else if (is diffuse) and  $(g - r > 0$  or  $B2 - R2 > 0.5)$  and  $(\Sigma > 2.5)$  then
23:   class = RGB  $\triangleright$  red galactic burst
24: else if (is diffuse) and  $(g - r > 0$  or  $B2 - R2 > 0.5)$  and  $(\Sigma < 2.5)$  then
25:   class = RG  $\triangleright$  red galaxy
26: else if (is diffuse) and  $(g - r < 0$  or  $B2 - R2 < 0.5)$  and  $(\Sigma > 2.5)$  then
27:   class = BGB  $\triangleright$  blue galactic burst
28: else if (is diffuse) and  $(g - r < 0$  or  $B2 - R2 < 0.5)$  and  $(\Sigma < 2.5)$  then
29:   class = BG  $\triangleright$  blue galaxy
30: else
31:   class = ?  $\triangleright$  unknown class
32: end if
33:
34: Select candidates
35: candidates  $\leftarrow$  []
36: if source  $\notin$  {USNO-B1.0, PS1, GLADE+} then
37:   candidates.append(source)  $\triangleright$  Unidentified source
38: end if
39:
40: if source  $\in$  {USNO-B1.0, PS1, GLADE+} and  $(g - r \geq 0$  or  $B2 - R2 \geq 0.5)$  and  $(\Sigma \geq 2.5)$  then
41:   candidates.append(source)  $\triangleright$  Source that has brightness excess in comparison with catalog
42: end if
43:
44: Remove candidates outside localization region (e.g. 90% contour)
45: if source  $\notin$  localization contour then
46:   candidates.remove(source)
47: end if
48:
49: Apply scoring
50: scores  $\leftarrow$  [0, 0, ..., 0]
51: for  $i = 1, \dots, \text{candidates.length}$  do
52:   if source  $\notin$  {USNO-B1.0, PS1, GLADE+} then
53:     scores[i] += 1
54:   end if
55:   if source  $\in$  {USNO-B1.0, PS1, GLADE+} then
56:     scores[i] +=  $\Sigma$ 
57:   end if
58:   if source  $\in$  GLADE+ then
59:     scores[i] +=  $\sigma_{\text{GW}}/(|D - D_{\text{GW}}|)$ 
60:   end if
61:   scores[i] +=  $p(r_{\text{a}_{\text{source}}}, \text{dec}_{\text{source}})$ 
62: end for
63:
64: Sort sources by score in descending order
65: candidates.sort(reverse=True)
66: Save cross-matched sources table in .txt format
67: Save cross-matched sources table in .xlsx format
68: Save candidates table in .txt format
69: Save candidates table in .xlsx format
70: Save candidates DS9 region file in .reg format

```

Каталитическая активность астрофизически релевантных материалов в синтезе ароматических углеводородов: экспериментальное исследование

Максимов В.В.^{1,2}, Мурга М.С.²

¹Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского, Москва, Россия

²Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Экспериментально исследована каталитическая активность астрофизически релевантных материалов (карбида кремния SiC, графита и аморфного углерода) в образовании ароматических углеводородов (АУ) из ацетилена. Эксперименты проводились в пиролизном реакторе при температурах 750, 850 и 950 °С и атмосферном давлении. Ацетилен подавался в смеси с гелием в объемном соотношении 1:100. Методом гравиметрического анализа определены выходы АУ и сажи. Показано, что присутствие всех исследованных материалов приводит к подавлению образования сажи в 1.5–2 раза и увеличению селективности по АУ с 1–2% (в отсутствие катализатора) до 20–35%. Наибольшая селективность (до 35%) достигнута на аморфном углероде, что связано с его развитой поверхностью и высокой концентрацией дефектных центров. Повышение температуры ожидаемо увеличивает абсолютный выход сажи, однако не влияет на селективность по АУ. Поскольку все исследованные материалы присутствуют в оболочках углеродных звезд асимптотической ветви гигантов (АВГ), то полученные результаты указывают на возможность существенного вклада гетерогенных каталитических реакций в синтез ароматических молекул в этих объектах.

Поступила в редакцию 20.02.2026 г. Принята в печать 05.06.2026 г.

Ключевые слова: пыль, полициклические ароматические углеводороды, катализ, образование ПАУ

Experimental study of catalytic ability of astrophysically relevant materials for the PAH formation

Maksimov V.V.^{1,2}, Murga M.S.²

¹Institute of Organic Chemistry of RAS named after N.D. Zelinsky, Moscow, Russia

²Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

We experimentally studied the catalytic activity of astrophysically relevant materials (silicon carbide (SiC), graphite, and amorphous carbon) in the formation of aromatic hydrocarbons (AHs) from acetylene. The experiments were performed in a pyrolytic reactor at temperatures of 750, 850, and 950 °C under atmospheric pressure. Acetylene was supplied in a mixture with helium at a volume ratio of 1:100. The yields of AHs and soot were determined by gravimetric analysis. The presence of all studied materials was found to suppress soot formation by a factor of 1.5–2 and increase AH selectivity from 1–2% (in the absence of a catalyst) to 20–35%. The highest selectivity (up to 35%) was achieved on amorphous carbon, which is attributed to its developed surface area and high density of defect sites. Increasing the temperature expectedly increases the absolute soot yield but does not affect AH selectivity. Since all the studied materials are present in the envelopes of carbon asymptotic giant branch (AGB) stars, our results suggest that heterogeneous catalytic reactions can significantly contribute to the synthesis of aromatic molecules in these objects.

Received 20.02.2026. Accepted 05.06.2026.

Keywords: dust, polycyclic aromatic hydrocarbons, catalysis, PAH formation

DOI: 10.51194/INASAN.2026.11.3.005

1. Введение

Самыми крупными молекулами, обнаруженными в межзвездной среде (МЗС), являются полициклические ароматические углеводороды (АУ). Эти молекулы повсеместно присутствуют в объектах МЗС и играют ключевую роль в ее ионизационном, тепловом и химическом состоянии [1]. Согласно астрохимическим кинетическим моделям, большая часть межзвездных полициклических АУ формируется в оболочках углеродных звезд асимптотической ветви гигантов (АВГ), где условия (температура и давление) благоприятствуют протеканию газофазных реакций образования первого ароматического кольца (бензола) и последующего его роста до крупных полициклических АУ [2, 3]. Подобные реакции, как правило, обладают существенным активационным барьером, который непреодолим в условиях разреженной МЗС.

В работах [4, 5] рассмотрен альтернативный сценарий, согласно которому бензол может эффективно формироваться в реакции циклотримеризации (ЦТМ) ацетилена на поверхности пылинок. Эта реакция была предложена около ста лет назад Н.Д. Зелинским [6], который обнаружил, что активированный уголь выступает в роли катализатора образования бензола. Недавно механизм данной реакции был поэтапно исследован с помощью современных квантово-химических методов [7]. Включение ЦТМ в кинетические модели астрохимических процессов может приводить к увеличению расчетного выхода бензола и, как следствие, всех АУ на порядок и более [5].

Важно подчеркнуть, что реакция ЦТМ ацетилена на различных катализаторах активно изучается как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. В настоящее время в качестве катализаторов используются, главным образом, переходные металлы (например, палладий [8], серебро [9] и др.), а также сложные (органометаллические комплексы [10, 11]. Селективность по бензолу (то есть, конечный выход бензола относительно всех продуктов) на таких катализаторах достигает высоких значений — вплоть до 100%. Однако указанные материалы отсутствуют в оболочках звезд АВГ и, в целом, в МЗС. В качестве материала поверхности в оболочках углеродных звезд АВГ могут выступать: аморфный углерод, графит и карбид кремния (SiC). Каталитическая активность последнего в отношении синтеза АУ была отмечена в работе [12].

Цель настоящей работы — экспериментально оценить каталитическую активность астрофизически релевантных материалов (SiC, графита и аморфного углерода) в синтезе АУ в условиях, характерных для зоны образования пыли в оболочках звезд АВГ. Для решения этой задачи на базе Института органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН (в Центре перспективных каталитических технологий) была разработана и собрана специализированная экспериментальная установка, включающая пиролизический реактор. Данная установка позволяет получать основные продукты пиролиза ацетилена — АУ и сажу. Анализ полученных образцов проводился гравиметрическим методом. Ниже представлено описание экспериментальной установки, изложены полученные результаты и сформулированы основные выводы работы.

2. Описание эксперимента

Вид экспериментальной установки показан на рис. 1 (слева). Схема установки показана на рис. 1 (справа). В ее состав входит нескольких основных блоков:

1. Блок источников сырьевого газа. Блок состоит из двух 40-литровых баллонов высокого давления (с ацетиленом и гелием), находящихся за пределами лабораторной комнаты. Баллоны посредством металлических капилляров подключены в общую сеть подачи газа к лабораторным тягам и установкам дозирования газа.
2. Блок дозирования и смешения газов. Основой блока является два регулятора расхода газа (РРГ) Bronkhorst с высокой степенью точности. Управление РРГ осуществляется на отдельном компьютере. После дозирования газы попадают в камеру смешения и далее по полипропиленовому капилляру подаются в трубчатый реактор.
3. Блок реактора. Блок включает в себя печь и трубчатый реактор. Печь представляет собой кварцевую трубку с диаметром около 20 мм, обмотанную нихромовой спиралью. Управление нагревом печи осуществлялось пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) регулятором фирмы ТЕРМО-ДАТ. В качестве реактора использовалась кварцевая трубка с внешним диаметром 8 мм и внутренним диаметром 5 мм. Для уменьшения проскока ацетилена и для фиксации слоя катализатора в середине кварцевой трубки в качестве наполнения в печи использовался кварц с фракцией 0.2-0.5 мм.
4. Блок выделения продукта. Блок состоит из стеклянной круглодонной колбы Эрленмейера. Колба предварительно наполнялась дихлорметаном (ДХМ) марки ВЭЖХ (ДХМ эффективно растворяет ароматические соединения). Выход кварцевого реактора был погружен в слой растворителя для обеспечения барботаж смеси сырьевого газа и продуктов. В процессе барботажа смесь остывала и целевые компоненты (т. е. АУ) оставались в растворителе, а газовая часть улетала под тягу. Колба с растворителем находилась в бане с силиконовым маслом, которая охлаждалась до -10°C посредством циркуляционного насоса. Охлаждение проводилось с целью уменьшения испарения растворителя.

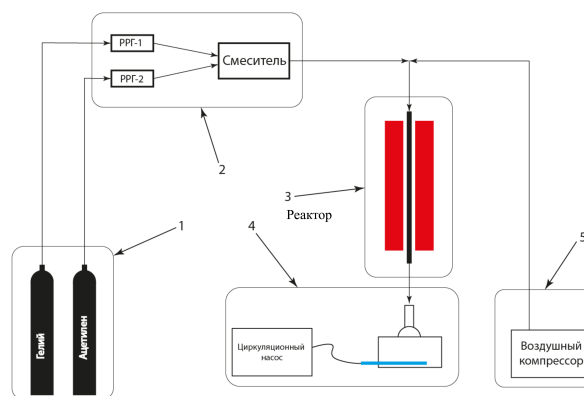


Рис. 1: Слева — фото экспериментальной установки. Справа — схема экспериментальной установки. 1 — блок источников сырьевого газа. 2 — блок дозирования и смешения газов. 3 — блок реактора. 4 — блок выделения продукта. 5 — блок подготовки сжатого воздуха.

5. Блок подготовки сжатого воздуха. Блок состоял из воздушного компрессора, подключенного к линии полипропиленовом капилляром. Воздух использовался для отжига сажи.

Методика эксперимента включала несколько последовательных этапов: подготовку реактора и реагентов, проведение пиролиза и последующий гравиметрический анализ продуктов.

Подготовка компонентов. Перед каждым экспериментом проводилась тщательная очистка всех элементов установки. Кварцевый реактор (трубка) прокаливался при температуре 950°C в потоке воздуха в течение 6 часов для удаления органических остатков. Кварцевый наполнитель очищался путем кипячения в концентрированной азотной кислоте в течение 4 часов с последующей многократной промывкой дистиллированной водой и высушиванием.

Проведение эксперимента. В подготовленный реактор загружалась навеска исследуемого катализатора и чистый кварцевый наполнитель. Через реактор пропускался ацетилен в контролируемых условиях температуры и давления. Летучие продукты пиролиза конденсировались в колбе-приемнике, содержащей ДХМ, который улавливал образующиеся АУ. По завершении процесса твердые продукты (сажа) оседали на кварцевом наполнителе и стенках реактора.

Гравиметрический анализ. Взвешивание проводилось на высокоточных аналитических весах (точность 0.0001 г) по следующей схеме:

- До эксперимента измерялась масса пустого кварцевого реактора, чистой колбы-приемника, кварцевого наполнителя и навески катализатора.
- После завершения пиролиза и охлаждения установки производилось повторное взвешивание реактора и кварцевого наполнителя (вместе с осевшей на них сажой).
- Массу сажи, образовавшейся непосредственно на катализаторе, определяли как разность массы кварцевого наполнителя с сажой после эксперимента и массы чистого наполнителя вместе с исходной навеской катализатора, измеренной до опыта.
- Колбу-приемник с раствором ДХМ, содержащим уловленные АУ, осторожно выпаривали на водяной бане при 45°C до полного удаления растворителя. Массу остатка определяли путем взвешивания колбы после выпаривания.

Все полученные значения массы фиксировались в лабораторном протоколе.

Для идентификации молекулярного состава синтезированных АУ в нескольких экспериментах проводился анализ методом газовой хромато-масс-спектрологии (ГХ-МС). Использовался прибор Thermo ISQ с капиллярной колонкой Varian VF-5ms (длина 30 м, внутренний диаметр 0.25 мм, толщина неподвижной фазы 0.25 мкм).

3. Параметры экспериментов

Всего проведено 12 экспериментов: 3 эксперимента без катализаторов (в реакторе находился только слой кварца) и 9 экспериментов с тремя катализаторами в виде SiC, графена и аморфного углерода. С каждым катализатором проведено по три независимых эксперимента с температурами 750, 850 и 950°C. Давление устанавливалось в 1 атм. Подавались газы ацетилен и гелий (марка 6.0) в объемном соотношении 1:100. Было установлено, что в связи с «зауглероживанием» реактора максимально возможное время работы установки составляет 3 часа. За это время соотношение между накопленными ароматическими продуктами и сажой было оптимальным, тогда как при увеличении длительности большая часть газа переходила в сажу, и ароматические продукты не сепарировались. Все параметры экспериментов приведены в табл. 1.

4. Результаты

На рис. 2 представлен пример хроматограммы образца, полученного без катализатора в объемном соотношении между ацетиленом и гелием 1:1. Расшифровка данной хроматограммы приведена в табл. 2. По данным хроматограммы видно, что основным продуктом конверсии ацетилена является молекула бензола, остальные ароматические молекулы присутствуют в существенно меньших количествах. При меньших парциальных давлениях ацетилена в реакторе сигналы продуктов на хроматограмме были низкими, поэтому их анализ не проводился. Однако мы предполагаем, что основным продуктом в этих экспериментах также является бензол.

По каждому эксперименту получены результаты гравиметрических измерений продуктов (сажи и АУ), эти данные приведены в табл. 3. На рис. 3 измеренные массы продемонстрированы в виде гистограммы. На рис. 4 показаны величины конверсии ацетилена и селективности по АУ для всех экспериментов. Конверсия ацетилена характеризует долю прореагировавшего сырья (ацетилена), а под селективностью по АУ здесь и далее понимается отношение массы образовавшихся АУ к общей массе всех продуктов, то есть селективность показывает, какая часть прореагировавшего ацетилена превратилась в целевые АУ, а какая — в сажу.

Наибольшая масса сажи и наименьшая масса АУ сформировались в эксперименте без катализатора. Селективность по АУ в этом случае минимальная и составляет всего 1–2%. С ростом температуры масса

Таблица 1: Условия проведения экспериментов.

	Катализатор	Вес катализатора, г	Температура, °С	Время синтеза, мин
1	Без катализатора	—	750	160
2	Без катализатора	—	850	146
3	Без катализатора	—	950	151
4	SiC	0.0030	750	153
5	SiC	0.0051	850	154
6	SiC	0.0053	950	161
7	Аморфный углерод	0.0063	750	166
8	Аморфный углерод	0.0069	850	171
9	Аморфный углерод	0.0055	950	179
10	Графит	0.0051	750	155
11	Графит	0.0048	850	159
12	Графит	0.0061	950	163

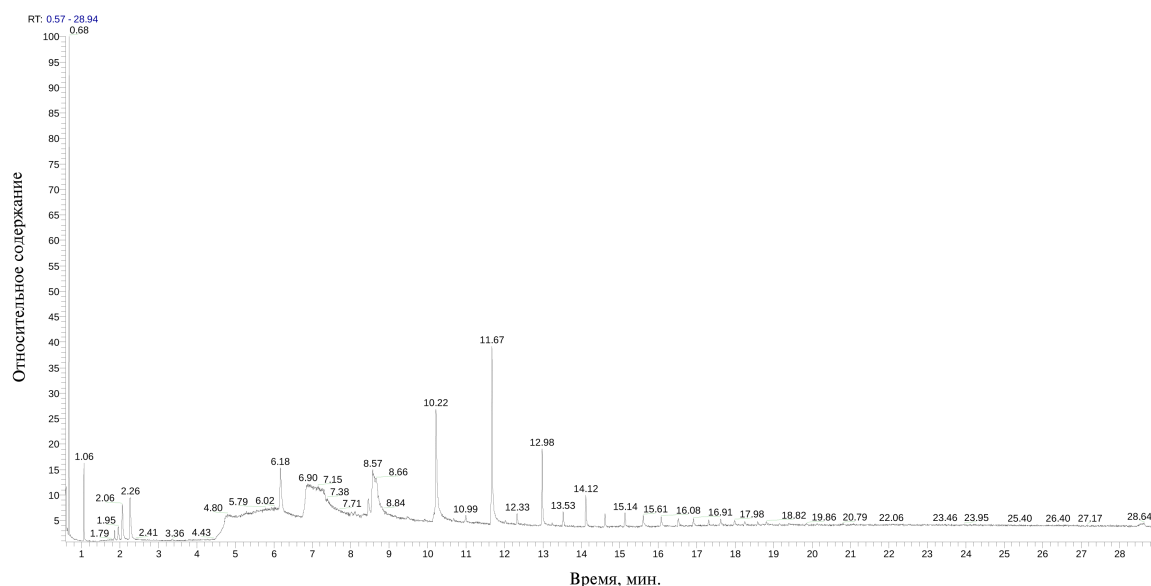


Рис. 2: Хроматограмма образца, полученного без катализатора в объемном соотношении между ацетиленом и гелием 1:1.

сажи растет, так как все химические реакции протекают быстрее, в том числе реакции, ведущие к образованию сажи. В то же время в отсутствие катализатора наблюдается снижение селективности по АУ с ростом температуры, что указывает на ускорение неселективных процессов сажеобразования. При добавлении катализаторов образование сажи стало заметно подавлено, а масса АУ существенно увеличилась. При добавлении катализатора SiC наблюдается снижение конверсии ацетилена до 20% и одновременное увеличение селективности по АУ до 20%. Схожие результаты получаются и в случае использования графита как катализатора. В случае аморфного углерода в качестве катализатора наблюдается значительное увеличение конверсии ацетилена до 40% и селективности по АУ до 35%. Аморфный углерод обладает большой удельной поверхностью, пористостью и развитой структурой, что способствует эффективной адсорбции ацетилена и благоприятствует реакции ЦТМ (реакция Зелинского). Этим и можно объяснить повышенную активность данного катализатора. Отметим, что при повышении температуры в присутствии катализаторов масса сажи и конверсия ацетилена, в целом, растут, а селективность по АУ находится примерно на одном уровне.

Таким образом, все рассмотренные материалы (SiC, графит, аморфный углерод) проявили свою каталитическую активность в синтезе АУ (в частности, бензола) при конверсии ацетилена. Это означает, что

Таблица 2: Содержание компонентов в образце, хроматограмма которого показана на рис. 2.

Время, мин	Площадь пика, %	Компонент
0.68	42.14	бензол
1.06	8.81	толуол
1.85	1.57	этилбензол
1.95	2.71	ксилол
2.06	8.93	фенилацетилен
2.26	8.28	стирол
2.28	3.71	ксилол
3.38	0.20	метилстирол
6.18	16.6	1-фенилпропин
8.02	0.6	C ₁₀ H ₁₀ -1
8.11	1.18	C ₁₀ H ₁₀ -2
8.46	5.26	нафталин
9.92	следы	метилнафталин
15.99	следы	пирен
16.89	следы	метилпирен
17.61	следы	пирен-с2

Таблица 3: Результаты гравиметрических измерений.

	Катализатор	Масса пропущенного ацетилена, г.	Масса сажи, г.	Масса АУ, г.	Конверсия ацетилена, %	Селективность по АУ, %
1	Без кат-ра	0.192	0.033	0.0009	17.7%	2.7%
2	Без кат-ра	0.175	0.055	0.0011	32.2%	1.9%
3	Без кат-ра	0.181	0.058	0.0007	32.3%	1.2%
4	SiC	0.184	0.021	0.0056	14.7%	20.8%
5	SiC	0.185	0.031	0.0081	21.2%	20.7%
6	SiC	0.193	0.029	0.0094	20.1%	24.2%
7	Аморфный углерод	0.199	0.041	0.0177	29.3%	30.4%
8	Аморфный углерод	0.205	0.047	0.0239	34.4%	33.9%
9	Аморфный углерод	0.215	0.057	0.0311	41.2%	35.1%
10	Графит	0.186	0.022	0.0065	15.2%	23.0%
11	Графит	0.191	0.036	0.0088	23.3%	19.8%
12	Графит	0.196	0.038	0.0101	24.6%	21.0%

сформировавшиеся в первую очередь твердые частицы в оболочках звезд АВГ могут выступать в роли первичных катализаторов, инициируя синтез первого ароматического кольца. Более того, можно предположить возможность протекания автокаталитического механизма: по мере образования полициклические АУ сами могут становиться центрами адсорбции и последующей ЦТМ ацетилена. В этом случае поверхность растущих полициклических АУ берет на себя функцию катализатора, что способствует лавинообразному нарастанию их количества и размеров. Такой механизм согласуется с повсеместной распространенностью полициклических АУ в МЗС и может объяснить высокую эффективность их образования в моделях, учитывающих гетерогенные реакции [5].

Добавим, что в зоне конденсации пыли в оболочках звезд АВГ пылевые частицы предположительно имеют аморфную структуру. Согласно нашим результатам аморфный углерод обладает наибольшей активностью среди рассмотренных материалов, следовательно, синтез АУ на пылевых частицах должен происходить интенсивно.

Стоит отметить, что лабораторные условия в наших экспериментах не идентичны условиям в реальных объектах — в оболочках звезд АВГ. Основные условия, которые необходимо воспроизвести, — это значения температуры и давления, а также состав сырьевых газов. Установленные нами параметры находились на пересечении технических экспериментальных возможностей, доступных в Центре перспективных ката-

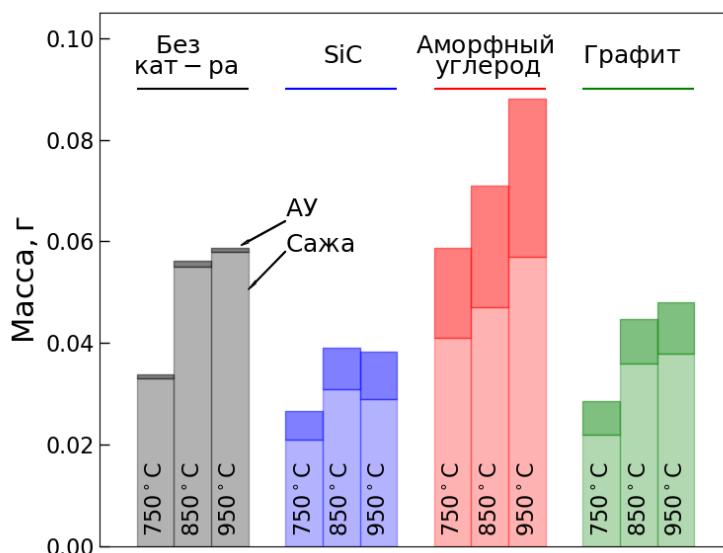


Рис. 3: Массы сажи (светлые тона) и АУ (темные тона), полученные в экспериментах при температурах 750, 850 и 950 °C с использованием катализаторов (синий цвет — SiC, красный цвет — аморфный углерод, зеленый цвет — графит) и без катализаторов (серый цвет).

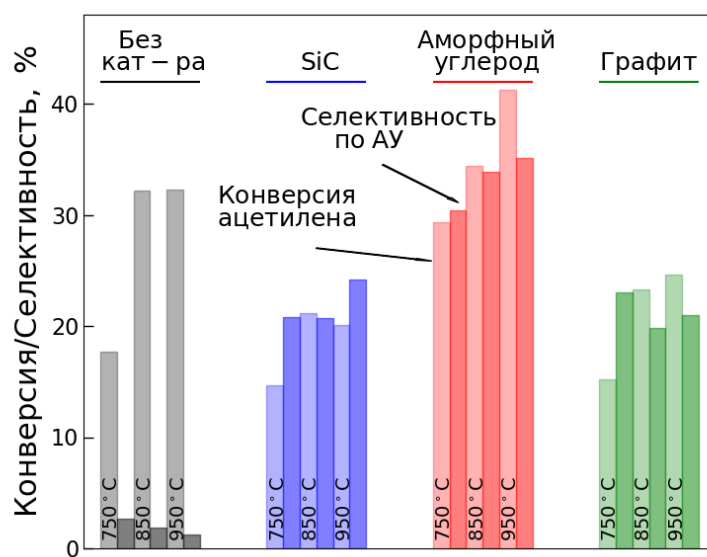


Рис. 4: Конверсия ацетилена (светлые тона) и селективность по АУ (темные тона). Цвета те же, что и на рис. 3.

литических технологий Института органической химии РАН, и физических условий в оболочках звезд АВГ, оцениваемым по астрономическим наблюдениям. В зоне образования пыли и ароматических молекул в оболочках звезд АВГ диапазон условий довольно широк: давление — от ~ 1 до $\sim 10^{-10}$ атм, температура — от ~ 1700 до ~ 500 °C, основным компонентом газа является молекула водорода H_2 , второй по содержанию является молекула CO ($\sim 10^{-4}$ молекул CO на 1 молекулу H_2), и третьей — молекула ацетилена ($\sim 10^{-5}$ молекул C_2H_2 на 1 молекулу H_2).

Абсолютно точное воспроизведение условий в оболочке звезды АВГ на имеющемся оборудовании невозможно и в данном случае нецелесообразно. Нужно принимать во внимание то, что в астрономических масштабах процессы протекают на больших временных промежутках, соответственно, в лаборатории не могут быть полностью воспроизведены. В лабораторной астрохимии условия практически всегда заведомо отличаются от условий в реальных космических объектах. Считается, что результаты экспериментов можно

применять в астрохимии, если есть уверенность в том, что сам процесс протекает одинаково при разных условиях и различие возникает только в продолжительности получения результата.

В нашем случае наиболее затруднительным представляется воспроизведение низкого давления и низкой концентрации ацетилена. В случае достижения требуемых параметров длительность эксперимента превысила бы разумные пределы, поэтому мы проводили эксперименты при атмосферном давлении (максимально достигаемое значение в оболочках звезд АВГ), но снизили значение парциального давления ацетилена в реакторе, заполненном до 1 атм инертным газом. Мы установили, что при объемном соотношении ацетилена к инертному газу, равному 1:100, продукты образуются за приемлемое время (около трех часов).

Мы полагаем, что те же реакции происходят и при более низких давлениях, так как каталитические реакции образования и роста АУ на поверхности SiC были отслежены экспериментально ранее при сверхнизком вакууме (10^{-8} атм) в работе [12]. В нашей работе мы акцентируем внимание на изучении эффективности протекания каталитических реакций, а не на установлении факта их протекания. При понижении давления результаты изменятся количественно, однако качественные выводы о механизме и эффективности каталитических реакций сохранятся.

5. Заключение

В данной работе проведено экспериментальное исследование каталитической активности астрофизически релевантных материалов (SiC, графита и аморфного углерода) в образовании ароматических молекул, в частности, бензола. Ключевым элементом экспериментальной установки являлся пиролитический реактор, в который подавалась газовая смесь ацетилена и гелия. Эксперименты проводились при атмосферном давлении и температурах 750, 850 и 950°C. Методом гравиметрического анализа определены массовые выходы основных продуктов пиролиза.

Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии катализаторов на ход процесса. Установлено, что в присутствии исследуемых материалов выход сажи (побочного продукта) подавляется в 1.5–2 раза по массе, тогда как селективность по целевому продукту (АУ) возрастает с 1–2% (в некаталитическом процессе) до 35%. Показано, что повышение температуры от 750 до 950°C ожидаемо приводит к увеличению абсолютной массы образующейся сажи, однако селективность по АУ остается при этом практически неизменной.

Таким образом, экспериментально подтвержден каталитический эффект SiC, графита и аморфного углерода в реакциях конверсии ацетилена в АУ. По своей эффективности данные материалы уступают известным катализаторам, таким как палладий или серебро. Тем не менее, их присутствие в оболочках звезд АВГ позволяет предположить, что они могут вносить значимый вклад в химическую эволюцию углеводородов в этих объектах, выступая в роли естественных катализаторов.

Список литературы

1. A. G. G. M. Tielens, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, **46**, 289, 2008.
2. M. Frenklach and E. D. Feigelson, *Astrophys. J.*, **341**, 372, 1989.
3. I. Cherchneff, *Astron. and Astrophys.*, **545**, A12, 2012.
4. M. S. Murga, *Astronomy Reports*, **68**, 1176, 2024.
5. M. S. Murga, I. V. Loginov, D. S. Wiebe, D. R. Fedotova, V. S. Krasnoukhov, and I. O. Antonov, *Astron. and Astrophys.*, **704**, A266, 2025.
6. N. D. Zelinsky, *C. R. Acad. Sci.*, **177**, 882, 1923.
7. E. G. Gordeev, E. O. Pentsak, and V. P. Ananikov, *Journal of the American Chemical Society*, **142**, 3784, 2020, URL <https://doi.org/10.1021/jacs.9b10887>, pMID: 32058705.
8. S. Abbet, A. Sanchez, U. Heiz, W.-D. Schneider, A. M. Ferrari, G. Pacchioni, and N. Rösch, *Journal of the American Chemical Society*, **122**, 3453, 2000, URL <https://doi.org/10.1021/ja9922476>.
9. V. Cinar, S. Zhang, E. E. Happel, N. T. S. K. Dewage, M. M. Montemore, and E. C. H. Sykes, *Chem. Sci.*, **15**, 6716, 2024, URL <http://dx.doi.org/10.1039/D4SC01053A>.
10. W. Gan, L. Geng, B. Yin, H. Zhang, Z. Luo, and K. Hansen, *The Journal of Physical Chemistry A*, **125**, 10392, 2021, URL <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.1c09015>, pMID: 34846886.
11. P. R. Remya and C. H. Suresh, *Molecular Catalysis*, **441**, 63, 2017, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S246882311730439X>.
12. T. Q. Zhao, Q. Li, B. S. Liu, R. K. E. Gover, P. J. Sarre, and A. S.-C. Cheung, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **18**, 3489, 2016, URL <http://dx.doi.org/10.1039/C5CP06425B>.

Содержание

<i>Русаков А.И., Лагуткин В.Н.</i> Статистическая оценка размеров частиц космического мусора по результатам радиолокационных наблюдений	145
<i>Иванов В.А., Иванов А.Л., Курбатов Г.А.</i> Потенциал малых обсерваторий в решении задачи обнаружения и мониторинга МНТ на примере обсерватории Кубанского госуниверситета	152
<i>Лукьянов А.П., Пругло А.В., Равдин С.С., Гундрова Е.И.</i> Анализ фотометрических измерений спутников из кластеров SpaceX с 2019 по 2025 годы	158
<i>Панков Н.С., Позаненко А.С., Минаев П.Ю., Щекотихин Е.А., Белкин С.О., Мазаева Е.Д., Волнова А.А.</i> Система автоматической обработки изображений для поиска оптических транзиентов	167
<i>Максимов В.В., Мурга М.С.</i> Каталитическая активность астрофизически релевантных материалов в синтезе ароматических углеводородов: экспериментальное исследование	181

Contents

<i>Rusakov A.I., Lagutkin V.N.</i> Statistical estimation of sizes of space debris particles based on the results of radar observations	145
<i>Ivanov V.A., Ivanov A.L., Kurbatov G.A.</i> Observations of comets at the Astrophysical observatory of Kuban state university	152
<i>Lukyanov A.P., Pruglo A.V., Ravidin S.S., Gundrova E.I.</i> Analysis of photometric measurements of SpaceX satellites from 2019 to 2025	158
<i>Pankov N.S., Pozanenko A.S., Minaev P.Yu., Schekotikhin E.A., Belkin S.O., Mazaeva E.D., Volnova A.A.</i> The automatic image processing software for optical transient detection	167
<i>Maksimov V.V., Murga M.S.</i> Catalytic activity of astrophysically relevant materials in the synthesis of aromatic hydrocarbons: an experimental study	181