

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ИХ ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

RESEARCH ON THE PHOTOMETRIC CHARACTERISTICS OF SPACE OBJECTS, THEIR PROCESSING AND INTERPRETATION

В. Я. ПРОРОК¹, Д. В. ВОЛКОВ¹, А. О. КОРОТКОВ²

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

²АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва, Россия

V. Ya. Prorok¹, D. V. Volkov¹, A. O. Korotkov²

¹Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russia

²JSC "VNIIEM Corporation", Moscow, Russia

Аннотация. В работе рассматриваются направления возможного совершенствования процесса сбора и обработки информации о космических объектах в околоземном космическом пространстве. Делается акцент на необходимости поэтапного преобразования и последующего детального анализа последовательности фотометрической информации, получаемой оптическими средствами наблюдения и определения некоторого показателя степени корреляции между последовательностями. На основании полученного показателя предлагается осуществлять эффективное планирование процесса классификации космических объектов и повышать качество распознавания.

Ключевые слова: корреляция, фотометрическая информация, кривая блеска, космический объект, классификация, околоземное космическое пространство, распознавание.

Для цитирования: Пророк В. Я., Волков Д. В., Коротков А. О. Исследование фотометрических характеристик космических объектов, их обработка и интерпретация // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2026. Т. 210. № 1. С. 29–35.

Annotation. The study examines potential approaches for improving the process of collecting and processing information about space objects in near-Earth orbit. Emphasis is placed on the need for a step-by-step transformation and subsequent detailed analysis of photometric data sequences obtained through optical observation systems, as well as on determining a certain correlation coefficient between these sequences. Based on the obtained coefficient, it is proposed to optimize the planning of the space object classification process and enhance recognition accuracy.

Key words: correlation, photometric information, light curve, space object, classification, near-Earth space, recognition.

For citation: Prorok V. Ya., Volkov D. V., Korotkov A. O. Research on the photometric characteristics of space objects, their processing and interpretation // Electromechanical matters. VNIIEM studies. 2026. Vol. 210. № 1. P. 29–35.

Введение

В настоящее время в околоземном космическом пространстве (ОКП) находится значительное количество космических объектов (КО), не считая ещё более обширного массива космического мусора, и их численность продолжает увеличиваться экспоненциально (рис. 1). Для мониторинга и контроля этого пространства применяются разнообразные технические средства как наземного, так и космического базирования, активного и пассивного типа, работающие в широком диапазоне электромагнитного спектра: от видимого света до коротковолнового радиодиапазона [1, 2].

Одним из перспективных направлений сбора информации о КО является получение и последующий анализ фотометрической информации [3]. Обработка фотометрической информации, в частности последовательности фотометрических измерений (кривых блеска) КО, зачастую недостаточно автоматизирована и опирается на эмпирические методы оценки, что создаёт необходимость разработки более универсальных автоматизированных решений. Использование оригинальных методов автоматизированного анализа позволяет не только облегчить процесс обра-

ботки фотометрических данных, но и повысить точность получаемых оценок параметров, характеризующих КО. Разработка алгоритмов, способных надёжно выделять и нормализовывать фотометрические кривые, осуществлять их сравнительный анализ, открывает возможности для системного исследования динамических свойств КО и, как следствие, обеспечивает повышение достоверности распознавания объектов.



Рис. 1. График роста количества спутников по странам

Постановка задачи

Основная цель мониторинга космического пространства заключается не только в фиксации присутствующих объектов, но и в прогнозировании их траекторий и поведения, а также в определении типа КО, его состояния и характеристик. Данная задача носит междисциплинарный характер, что отражено в многочисленных научных публикациях [4].

Определение и прогнозирование динамики движения КО частично опирается на априорную информацию о конкретных объектах, а при отсутствии достоверных сведений о типе наблюдаемого объекта – на результаты распознавания и классификации. В этой связи особое значение приобретает автоматизированная обработка фотометрических характеристик КО для достоверного выделения индивидуальных признаков и последующей классификации [5 – 9].

В статье рассматривается задача автоматизации процесса анализа фотометрической информации, получаемой средствами мониторинга ОКП, что позволяет повысить достоверность распознавания КО.

Пусть имеется некоторый алфавит классов $U = \{u_1, u_2, \dots, u_q\}$, где q – количество классов КО, для которых характерен некоторый словарь признаков $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, где n – количество признаков.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать некоторую методику F , которая отображает словарь признаков X в выбранный алфавит U и далее обрабатывает его для получения результирующей информации:

$$\frac{F}{X^k} \rightarrow u_i, u_i \in U, k - \text{сеанс мониторинга.}$$

То есть функция F принимает на вход набор признаков, полученный в результате сбора фотометрической информации на очередном сеансе мониторинга ОКП, выделяет соответствующий класс u_i из алфавита U , таким образом осуществляя классификацию КО.

Методика сравнения последовательности фотометрических измерений (кривых блеска) по космическим объектам

Методика предназначена для извлечения и анализа кривых блеска КО. Основная задача – получить нормализованную кривую изменения яркости объекта по ширине изображения, вычислить коэффициент корреляции между полученным изображением и набором эталонных инвариантных изображений всех КО из алфавита распознаваемых классов.

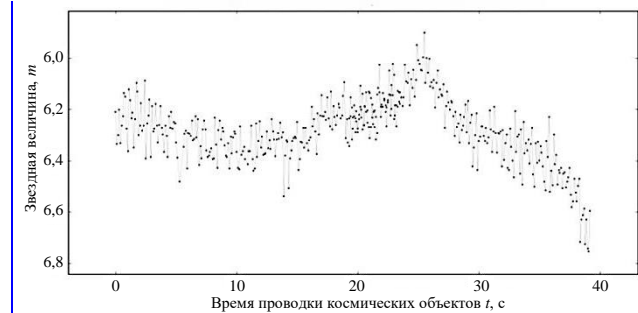


Рис. 2. График кривой блеска космического объекта

В качестве исходных данных используется набор эталонных кривых блеска, полученный на разных сеансах мониторинга и кривая блеска классифицируемого КО (рис. 2) [10, 11]. По оси абсцисс X отложено время наблюдений в секундах с начала сеанса наблюдения. По оси ординат Y отображается звездная величина – логарифмическая мера видимой яркости объекта. На рис. 2 представлена кривая блеска, зафиксированная многоканальным мониторинговым телескопом *Mini-MegaTORTORA* (ММТ-9), расположенным в Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук в Архызе. Телескоп оснащён девятью оптическими каналами, что позволяет получать субсекундное временное разрешение при съёмке больших областей неба. ММТ-9 используется для наблюдения быстро изменяющихся астрономических явлений, таких как вспышки, переменные звёзды и метеоры, а также служит источником данных для астрофизических исследований [12].

Структурная схема методики сравнения кривых блеска представлена на рис. 3.

Вычислительный эксперимент

Программная реализация анализа кривых блеска КО выполнена на языке программирования *Python* и использует специализированные библиотеки: *Pillow* и *OpenCV* для обработки изображений, *NumPy* и *SciPy* для работы с числовыми данными и временными рядами, *Matplotlib* для визуализации графиков, для восстановления пропусков и прогнозирования кривых блеска используется композитная нейронная сеть. Графический интерфейс реализован с помощью встроенной библиотеки *Django* для взаимодействия пользователя с данными.

На стартовой странице осуществляется добавление нового объекта в базу данных, включая возможность указания названия, загрузки фотографии и изображений кривых блеска № 1 и № 2 (рис. 4).

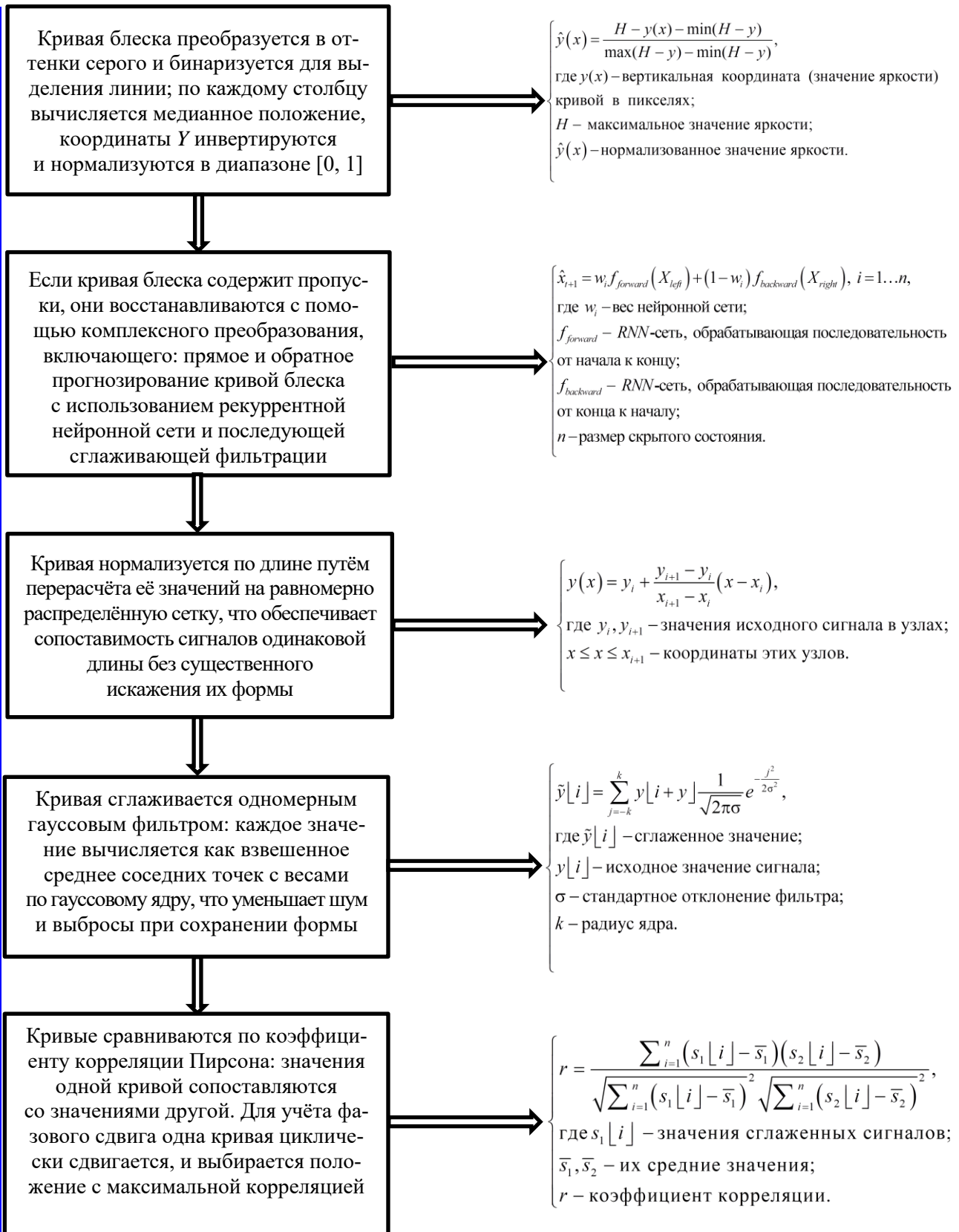


Рис. 3. Структурная схема методики сравнения кривых блеска

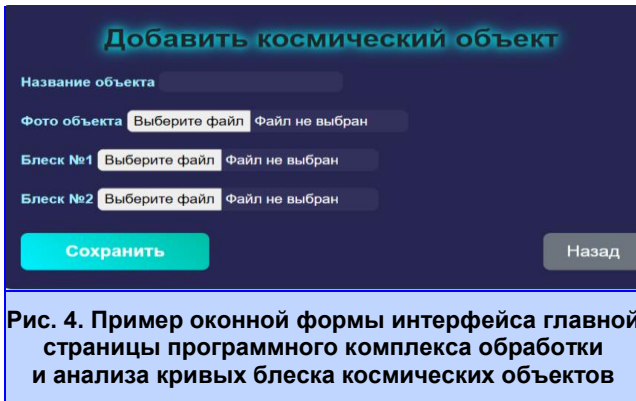


Рис. 4. Пример оконной формы интерфейса главной страницы программного комплекса обработки и анализа кривых блеска космических объектов

Результаты всех сравнений КО, включая вычисление коэффициента корреляции Пирсона и сдвиг кривых блеска, сохраняются в базе данных и выводятся для каждого объекта. Соответствующие отображения приведены на рис. 5.

Результаты сравнения кривых блеска

На рис. 6 представлена кривая блеска с пропущенным участком обрыва в середине, выделенным на графике красным цветом, где отсутствие данных затрудняет анализ и интерпретацию формы кривой. Ось Y (нормализованная яркость кривой) безразмерная величина, полученная методом

Min-Max нормализации (метод минимального-максимального уровня). После нормализации значения лежат в диапазоне $[0, 1]$. Такая нормализация позволяет сравнивать кривые из разных изображений, устраняя влияние масштаба и абсолютного уровня яркости, обозначается Y_{norm} . Ось X (дискретные отсчеты) – индекс столбца изображения или номер отсчета сигнала. В текущей реализации каждый отсчет соответствует одному пикселю по горизонтали изображения. Эта ось безразмерная и отражает относительное положение кривой вдоль изображения, обозначается как время наблюдения $t = i\Delta t$ в секундах, где i – номер отсчета, Δt – интервал между кадрами.

На рис. 7 показан восстановленный участок кривой, полученный двумя методами: интерполяцией (1 – синяя линия) и композитной нейронной сетью (2 – красная линия). Восстановление с помощью нейронной сети выполняется методом двунаправленного прогнозирования: строятся предсказания «вперед» и «назад», которые затем объединяются через взвешенное среднее, придавая больший вес значениям, расположенным ближе к известным данным. Такой подход позволяет максимально точно восполнить форму кривой на участке пропуска.

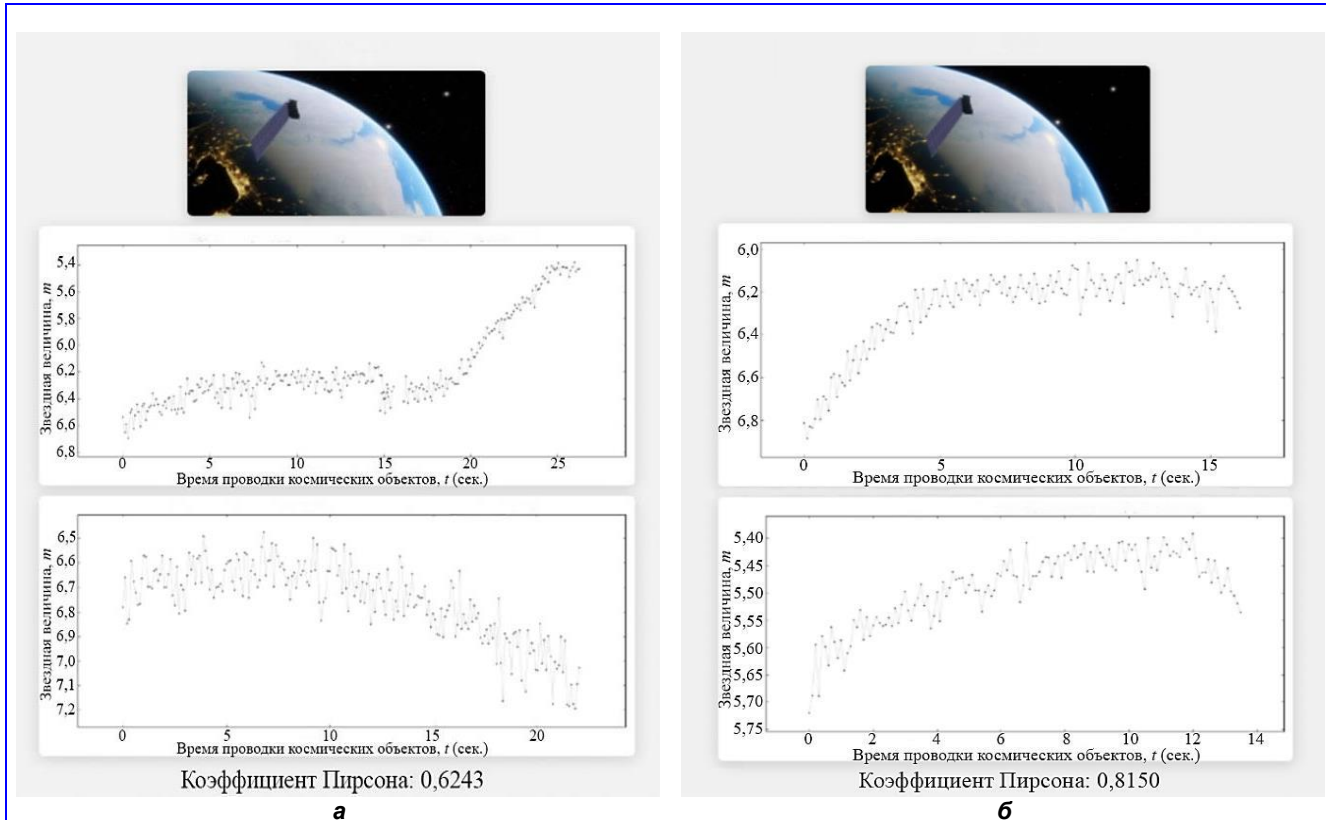


Рис. 5. Примеры отображения исходных данных для сравнения кривых блеска при низком (а) и высоком (б) значениях коэффициента корреляции Пирсона

При наличии обрыва кривой блеска в конце последовательности возможно восстановление пропущенных данных на основе известных участков с учётом их временной структуры. Для демонстрации приведены два примера: на рис. 8 показана кривая с пропущенным участком в конце, где отсутствие данных затрудняет анализ формы кривой; на рис. 9 – та же кривая после восстановления, где пропуски в конце восполнены с сохранением общей структуры блеска. Восстановление выполняется методом направленного прогнозирования, при котором строятся предсказания «вперед», объединяется через взвешенное среднее, что обеспечивает

максимально точное восполнение формы кривой на участке пропуска [5].

На рис. 10, а, представлены кривые, полученные в результате двух отдельных сеансов мониторинга космического аппарата: исходная эталонная кривая блеска (синяя с пунктиром – 1) и кривая для сравнения (сплошная (красная) линия рядом – 2). После выравнивания и сглаживания с учётом оптимального фазового сдвига получена комбинированная кривая, отражающая согласованное поведение блеска. Зелёной линией 3 показана разница между кривыми, позволяющая оценить остаточные расхождения.

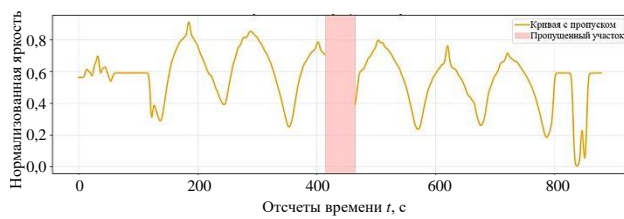


Рис. 6. Кривая блеска с пропуском в середине

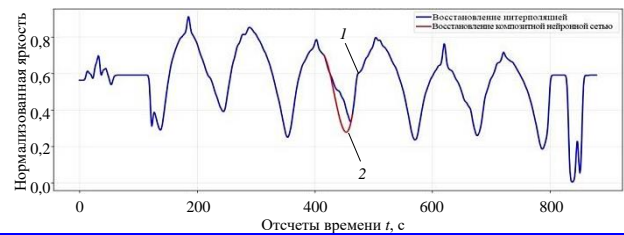


Рис. 7. График восстановления кривой блеска с пропуском: 1 (синяя линия) – восстановление интерполяцией; 2 (красная линия) – восстановление композитной нейронной сетью

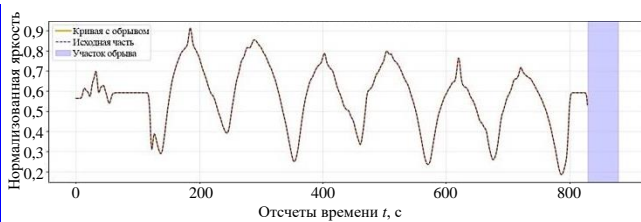


Рис. 8. График кривой блеска с обрывом в конце

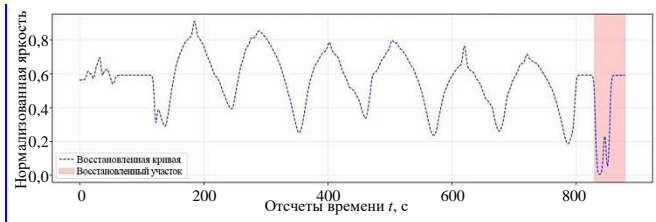
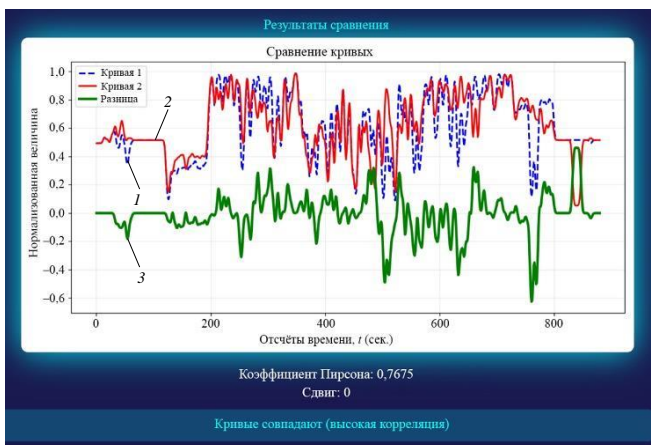
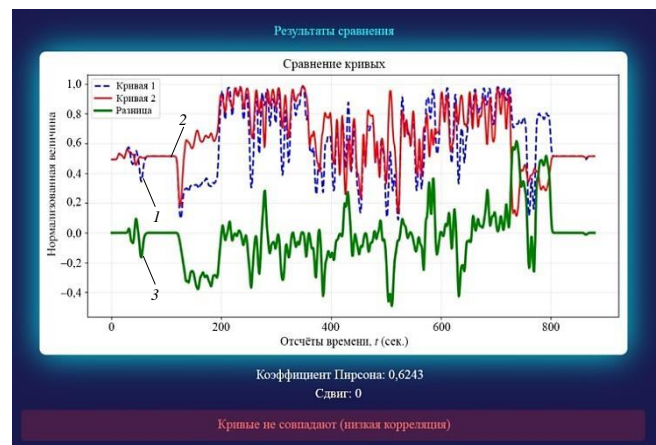


Рис. 9. График кривой блеска с восстановленным участком в конце



а



б

Рис. 10. Примеры результатов сравнения кривых блеска одного космического аппарата, полученных в двух отдельных сеансах мониторинга, с высокой (а) и низкой (б) корреляциями

По оси X отложено время наблюдений (46 секунд), по оси Y – нормализованная яркость объекта, что обеспечивает количественную оценку при сравнении сигналов. Результаты сравнения кривых блеска демонстрируют высокую степень согласованности.

Статистическая значимость этой корреляции подтверждается значением коэффициента Пирсона, превышающим сравнительный порог в 0,7.

На рис. 10, б, представлены две кривые: эталонная кривая блеска (синяя с пунктиром – 1) и кривая для сравнения (сплошная (красная) линия рядом – 2), полученные при мониторинге двух различных космических аппаратов. После выравнивания и сглаживания с учётом оптимального фазового сдвига получена комбинированная кривая. Зелёной линией 3 показана разница между кривыми. По оси X отложено время наблюдений (46 секунд), по оси Y – нормализованная яркость объекта. Результаты сравнения кривых блеска демонстрируют низкую степень совпадения между наблюдениями. Статистическая значимость коэффициента Пирсона ниже 0,7.

Выводы

Таким образом, можно сделать вывод, что использование предлагаемых подходов к обработке последовательностей фотометрических измерений

характеристик КО, включающих в себя алгоритмы интеллектуального анализа данных, композитных рекуррентных нейронных сетей для восстановления пропусков и последующего кросс-корреляционного анализа кривых блеска позволяет сформировать программную платформу для комплексного анализа кривых блеска КО.

Такая платформа обеспечивает полный цикл анализа: от загрузки исходных данных до интеллектуальной обработки и наглядного представления результатов, открывая возможности для автоматизированного, точного и надёжного исследования блеска КО с применением алгоритмов кросс-корреляции и искусственных нейронных сетей.

По результатам вычислительного эксперимента по распознаванию КО с использованием коэффициента корреляции на базе эталонных фотометрических характеристик десяти космических аппаратов, взятых из открытых данных телескопа ММТ [13], вероятность правильной идентификации составила 84%.

Использование предложенного подхода позволяет получать дополнительную информацию о степени схожести КО и включать эту характеристику в набор признаков для задач распознавания и классификации.

Список источников

1. Глуценко А. А., Хохлов В. П. Метод обнаружения маневра космического аппарата на основе текущих траекторных измерений // Труды МАИ. 2019. Вып. № 109. С. [1–21]. DOI : 10.34759/trd-2019-109-17.
2. Комплексы электронно-оптических средств для мониторинга околоземного космического пространства / И. Е. Молотов [и др.] // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2017. Т. 14. № 4-2. С. 110–116.
3. Благодыренко Е. В., Кошкарлов А. С., Шосталь В. Ю. Метод формирования фотометрических эталонов космических объектов // 78-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. СПб : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. С. 122–125.
4. Фотометрические наблюдения и моделирование формы космического мусора на средневысотных орбитах / И. В. Коробцев [и др.] // Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10. № 1. С. 74–82. DOI : 10.12737/szf-101202410.
5. Schuster M., Paliwal K. K. Bidirectional Recurrent Neural Networks // IEEE Transactions on Signal Processing. 1997. Vol. 45. No. 11. Pp. 2673–2681. DOI : 10.1109/78.650093.
6. Айдаркин Д. В., Поленищенко Л. И. Интерполяция и аппроксимация: метод, указания к лабораторным работам по высшей математике. Ульяновск : УВАУ ГА, 2004. 39 с.
7. Федотов А. А. Основы цифровой обработки биомедицинских изображений : учеб. пособие. Самара : Изд-во СГАУ, 2013. 108 с.
8. Полякова В. В., Шаброва Н. В. Основы теории статистики: учебное пособие. Екатеринбург : УрФУ, 2015. 148 с.
9. Прогнозирование временных рядов с помощью AutoML [Электронный ресурс] // Хабр : [сайт]. 2021. URL : <https://habr.com/ru/articles/559796/> (дата обращения: 08.10.2025).
10. Методический подход к распознаванию космических объектов по информации о трендовых составляющих фотометрических кривых блеска [Электронный ресурс] / Е. В. Благодыренко [и др.] // 80-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов. СПб : СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2025. С. 92–94.
11. База данных фотометрии ИСЗ, сформированная по наблюдательным данным ММТ-9 / В. В. Сасюк [и др.] // Всероссийская конференция с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы» (17 – 19 апреля 2019 г.): сб. трудов конференции. М. : ИКИ РАН, 2019. С. 45–50.

12. Кудрявцева Т. Л., Авраменко А. А. Фотограмметрия и дистанционное зондирование : учеб. пособие. Уссурийск : ФГБОУ ВО Приморская ГСХА, 2021. 152 с.
13. Satellites identified in MMT data // MMT : [сайт]. 2025. URL : <http://mmt.favor2.info/satellites> (дата обращения: 11.10.2025).

References

1. Glushchenko A. A., Khokhlov V. P. Method for detecting spacecraft maneuver based on current trajectory measurements // Proceedings of the Moscow Aviation Institute. 2019. No. 109. Pp. [1–21]. DOI : 10.34759/trd-2019-109-17.
2. Complexes of electron-optical means for monitoring near-Earth space / I. E. Molotov [et al.] // Ecological Bulletin of the Scientific Centers of the Black sea economic cooperation (BSEC). 2017. Vol. 14. No. 4-2. Pp. 110–116.
3. Blagodyrenko E. V., Koshkarov A. S., Shostal V. Yu. Method of forming photometric standards of space objects // 78th Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg Scientific Research Institute named after A. S. Popov, dedicated to Radio Day: collection of reports. St. Petersburg : SPbSETU "LETI", 2023. Pp. 122–125.
4. Photometric observations and modeling of the shape of space debris in medium-altitude orbits / I. V. Korobtsev [et al.] // Solar-terrestrial Physics. 2024. Vol. 10. No. 1. Pp. 74–82. DOI : 10.12737/szf-101202410.
5. Schuster M., Paliwal K. K. Bidirectional Recurrent Neural Networks // IEEE Transactions on Signal Processing. 1997. Vol. 45. No. 11. Pp. 2673–2681. DOI : 10.1109/78.650093.
6. Aidarkin D. V., Polenishchenko L. I. Interpolation and approximation: a method, guidelines for laboratory work in higher mathematics. Ulyanovsk : UVAU GA, 2004. 39 p.
7. Fedotov A. A. Fundamentals of digital processing of biomedical images: textbook. stipend. Samara : Publishing House of SSAU, 2013. 108 p.
8. Polyakova V. V., Shabrova N. V. Fundamentals of the theory of statistics: a textbook. Yekaterinburg : UrFU, 2015. 148 p.
9. Time series forecasting using AutoML [Electronic resource] // Habr : [website]. 2021. URL : <https://habr.com/ru/articles/559796/> (date of access: 08.10.2025).
10. Methodological approach to the recognition of space objects based on information about the trend components of photometric light curves [Electronic resource] / E. V. Blagodyrenko [et al.] // 80th Scientific and Technical Conference of the St. Petersburg Scientific Research Institute named after A. S. Popov, dedicated to Radio Day: collection of reports. St. Petersburg : SPbSETU "LETI", 2025. Pp. 92–94.
11. SATELLITE photometry database based on observational data from MMT-9 / V. V. Sasyuk [et al.] // All-Russian Conference with international participation "Space Debris: fundamental and practical aspects of the Threat" (April 17 – 19, 2019) : proceedings of the conference. Moscow : IKI RAS, 2019. Pp. 45–50.
12. Kudryavtseva T. L., Avramenko A. A. Photogrammetry and remote sensing : textbook. stipend. Ussuriysk : Primorsky State Agricultural Academy, 2021. 152 p.
13. Satellites identified in MMT data // MMT : [website]. 2025. URL : <http://mmt.favor2.info/satellites> (date of request: 11.10.2025).

Поступила в редакцию 02.02.2026

The article was submitted 02.02.2026

Информация об авторах

Валерий Ярославович Пророк – доктор технических наук, профессор, профессор, т. 8 (495) 366-26-44;
Дмитрий Витальевич Волков – аспирант, e-mail: vka@mil.ru;
Антон Олегович Коротков – инженер 1 категории, т. 8 (495) 623-44-57.

Information about the authors

Valery Yaroslavovich Prorok – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, t. 8 (495) 366-26-44;
Dmitry Vitalyevich Volkov – Postgraduate Student, e-mail: vka@mil.ru;
Anton Olegovich Korotkov – 1st category Engineer, t. 8 (495) 623-44-57.