

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 48, номер 11, 2022

---

---

Первое детектирование всплеска сироты на стадии роста

*В. М. Липунов, В. Г. Корнилов, В. В. Тополев, Н. В. Тюрина, Е. С. Горбовской,  
С. Г. Симаков, К. К. Жирков, Д. С. Власенко, К. Франсиле, Р. Подеста, Ф. Подеста,  
Д. С. Свинкин, Н. М. Буднев, П. В. Балануца, Д. В. Черясов, А. Р. Часовников,  
Р. Реболо, М. Серра-Рикарт, О. А. Гресь, О. А. Ершова, В. В. Юрков, А. С. Габович,  
А. Г. Тлатов, Е. М. Минкина, В. В. Владимиров, А. С. Кузнецов, Г. А. Антипов,  
С. И. Свертилов, Ю. Целик, Я. Кечин*

743

Эволюция спиральной структуры галактик по данным поля HST COSMOS

*В. П. Решетников, А. А. Марчук, И. В. Чугунов, П. А. Усачев, А. В. Мосенков*

756

Оптическое отождествление рентгеновских источников SRG/ePOZITA на примере  
глубокого обзора области Дыры Локмана

*С. Д. Быков, М. И. Бельведерский, М. Р. Гильфанов*

765

Improving Photometric Redshifts by Merging Probability Density Functions from Template-Based  
and Machine Learning Algorithms

*I. Y. K. Alshuaili, J. Y. H. Soo, M. Z. M. Jafri, Y. Rafid*

778

Активность аналогов TRAPPIST-1

*Е. С. Дмитриенко, И. С. Саванов*

780

Дифференциальное вращение крупных долгоживущих групп солнечных пятен  
и их морфологическая структура

*А. А. Осипова, Ю. А. Наговицын*

786

---

Памяти Валерия Анатольевича Рубакова 16.02.1955–19.10.2022

792

Авторский указатель (том 47, 2021 г.)

796

Предметный указатель (том 47, 2021 г.)

802

---

---



## ПЕРВОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ВСПЛЕСКА СИРОТЫ НА СТАДИИ РОСТА

© 2022 г. В. М. Липунов<sup>1,2\*</sup>, В. Г. Корнилов<sup>1</sup>, В. В. Тополев<sup>1</sup>, Н. В. Тюрина<sup>2</sup>,  
Е. С. Горбовской<sup>1</sup>, С. Г. Симаков<sup>2</sup>, К. К. Жирков<sup>1</sup>, Д. С. Власенко<sup>1,2</sup>,  
К. Франсиле<sup>3,4</sup>, Р. Подеста<sup>3,4</sup>, Ф. Подеста<sup>3</sup>, Д. С. Свинкин<sup>4</sup>, Н. М. Буднев<sup>5</sup>,  
П. В. Балануца<sup>2</sup>, Д. В. Черясов<sup>2</sup>, А. Р. Часовников<sup>1</sup>, Р. Реболо<sup>6</sup>,  
М. Серра-Рикарт<sup>6</sup>, О. А. Гресь<sup>2,5</sup>, О. А. Ершова<sup>5</sup>, В. В. Юрков<sup>7</sup>,  
А. С. Габович<sup>2,7</sup>, А. Г. Тлатов<sup>8</sup>, Е. М. Минкина<sup>1,2</sup>, В. В. Владимиров<sup>2</sup>,  
А. С. Кузнецов<sup>2</sup>, Г. А. Антипов<sup>2</sup>, С. И. Свертилов<sup>1,9</sup>, Ю. Целик<sup>5</sup>, Я. Кечин<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Национальный университет Сан-Хуана, Сан-Хуан, Аргентина

<sup>4</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>5</sup>Институт прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия

<sup>6</sup>Канарский институт астрофизики, Тенерифе, Испания

<sup>7</sup>Благовещенский государственный педагогический университет, Благовещенск, Россия

<sup>8</sup>Кисловодская солнечная станция Пулковской обсерватории, Кисловодск, Россия

<sup>9</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.05.2022 г.

После доработки 08.10.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Мы сообщаем о самой ранней регистрации оптического транзиента MASTER OT J123248.62-012924.5, совпадающего в пределах квадрата ошибок с оптическим и рентгеновским транзиентом AT2021ffa/ZTF21aauokrh. На наших изображениях яркость объекта монотонно возрастает с достоверностью  $7\sigma$ . Мы интерпретируем этот транзиент как гамма-всплеск, характеризующийся гладким оптическим автомоделным (SOSS) излучением. Отсутствие же регистрации гамма излучения на космических обсерваториях интерпретируется в рамках гипотезы о “неудавшемся” гамма-всплеске. Таким образом, речь идет о первой регистрации немонотонного всплеска-сироты.

*Ключевые слова:* гамма-всплески (gamma-ray bursts (GRBs)), сиротские всплески (orphan GRBs).

DOI: 10.31857/S0320010822110109

### ВВЕДЕНИЕ

Гамма-всплески, самые мощные явления во Вселенной, связанные с образованием черных дыр, были открыты в середине XX в. (Клебесадел и др., 1973; Мазетц и др., 1974). Распределение по длительности всплесков бимодально с условной границей 2–4 с. После 17 августа 2017 г. (обнаружения электромагнитного источника гравитационных волн — Килоновой GW170817 — при

слиянии двух нейтронных звезд) можно считать доказанным, что короткие всплески являются результатом слияния компактных объектов — нейтронных звезд (Блинников и др., 1984; Липунов и др., 1995а; Б. Пачинский, 1997) или смешанных пар, состоящих из нейтронной звезды и черной дыры. Длинные гамма-всплески обычно связывают с коллапсом ядра быстровращающейся массивной звезды (МакФадиев, Вусли, 1999; Вусли, Хегер, 2006; Липунов, Горбовской, 2007, 2008). Быстрое вращение препятствует прямому коллапсу и дает

\*Электронный адрес: lipunov2007@gmail.com

достаточно времени для превращения значительной части гравитационной и вращательной энергии в электромагнитное излучение. Из-за магнитного поля и вращения эта энергия испускается в виде двух узконаправленных релятивистских струй (Кац, Пиран, 1997). Различная степень углового раскрытия струй в разных диапазонах может быть причиной регистрации нового типа транзиентов — всплесков “сирот”, т.е. транзиентов видимых только в оптическом, радио или рентгеновском диапазоне без наблюдаемого гамма излучения (Роудс, 1997; Хуан и др., 2002; Накар, Пиран, 2003). За последние 20 лет были предприняты многочисленные попытки обнаружить такие сиротские вспышки, но безрезультатно (Левинсон, Эйчлер, 2022; Рыков и др., 2005; Рау и др., 2006; Гал-Ям и др., 2006; Малакрина и др., 2007; Ченко и др., 2013; Хо и др., 2018, 2020; Лоу и др., 2018; Хуанг и др., 2020).

В этой статье мы приводим результат наблюдений на телескопе МАСТЕР-ОАФА Глобальной сети МАСТЕР (Липунов и др., 2022) оптического (ОТ) и рентгеновского транзиента 2021lfa/ZTF21aayokph похожего на послесвечение гамма-всплеска (Яо и др., 2021; Липунов и др., 2021) и обосновываем его интерпретацию в рамках гипотезы о “неудавшемся” гамма-всплеске (Хуан и др., 2002), т.е. речь идет о первой регистрации немонотонного всплеска-сироты.

## НАБЛЮДЕНИЯ

### *Глобальная сеть МАСТЕР: принципы проведения обзорных и алертных наблюдений и обнаружения оптических транзиентов*

Глобальная сеть телескопов-роботов МАСТЕР (Липунов и др., 2010, 2019а, 2022) создана учеными МГУ в коллаборации с университетами и ведущими научными центрами (ИГУ, БГПУ, IAC, SAAO, OAFa, IAOE/OAGH) для обнаружения и исследования оптических источников гамма-всплесков (Липунов и др., 2016, 2017а–г, 2018), гравитационных волн (Абботт и др., 2016), нейтрино высоких и сверхвысоких энергий (Аартсен и др., 2017; Липунов и др., 2020), быстрых радиовспышек, всплесков-сирот и других транзиентных явлений (Горбовской и др., 2016; Троя и др., 2017; Садовничий и др., 2018; Зимнухов и др., 2019; Ласкар и др., 2019; Джордана-Митьянс и др., 2020; Ершова и др., 2020; Бакли и др., 2021). Все телескопы МАСТЕР объединены решением общих задач в единую сеть с центральной базой данных изображений и объектов, доступных по интернету для анализа в любой момент времени. Глобальная сеть МАСТЕР на данный момент является единственной развитой и работающей

(публикующей ежедневно циркуляры о проводимых наблюдениях) сетью из девяти идентичных телескопов, расположенных в Северном и Южном полушариях, способной 366 ночей в году проводить алертные (по целеуказанию непосредственно после триггера), инспекционные и собственные обзорные наблюдения в режиме реального времени, что реализовано посредством созданного центрального планировщика (часть программного обеспечения робота МАСТЕР, распределяющего площадки проходящих алертных полей ошибок между соседними обсерваториями с учетом метеоусловий, времени суток, высоты исследуемых координат в текущий момент и в ближайшее время, углового расстояния от Млечного Пути, эклиптики, Луны и Солнца, полученных пределов для контроля качества и возможной пересъемки и т.д.). Каждая площадка (4 кв.град.) снимается не менее 2 раз за ночь со сдвигом по координатам (для исключения артефактов). Для быстрого обнаружения нового оптического источника МАСТЕРом реализована полная роботизация процесса наблюдений на всех телескопах сети (с автоматическим контролем состояния оборудования) и обработки 24 ч в сутки 365/366 дней в году. На каждой обсерватории (MASTER-Amur, -Tupka, -Kislovodsk, -Ural, -Tavrida, -SAAO, -IAC, -OAFa, -OAGH) ежедневно автоматически (программным обеспечением): снимаются калибровочные изображения (на закате и рассвете), проводится обзор (в алертном, инспекционном или обзорном режимах) и по результатам online обработки (как прямым отождествлением объектов с выделением некаталогизированных, так и выделением объектов после вычитания текущего и архивного изображений) обнаруженные транзиенты (ОТ) помещаются для дальнейшего анализа в таблицу кандидатов (движущиеся источники автоматически анализируются и публикуются в MPC), а после проверки (кривая блеска по всем базам МАСТЕРа, сведения об источнике в открытых online каталогах) — публикуются в ATel, GCN, TNS (зависит от классификации объекта). Среди 3500 оптических транзиентов (Липунов и др., 2022, в печати), открытых и опубликованных МАСТЕРом за 10 лет, есть несколько десятков объектов слабее  $19^m$ . Среди них яркая красная Новая МАСТЕР ОТ J004207.99+405501.1/M31LRN 2015 (Липунов и др., 2017б), оптические источники гамма-всплесков, карликовые новые, вспышки красных карликов и другие объекты. Рассмотрим несколько примеров обнаруженных программным обеспечением МАСТЕР объектов.

MASTER ОТ J074953.05-512921.4 (GCN 17978) был обнаружен внутри поля ошибок Fermi LAT GRB 150627.18 (GCN 17791) телескопом-роботом МАСТЕР-SAAO на южноафриканской

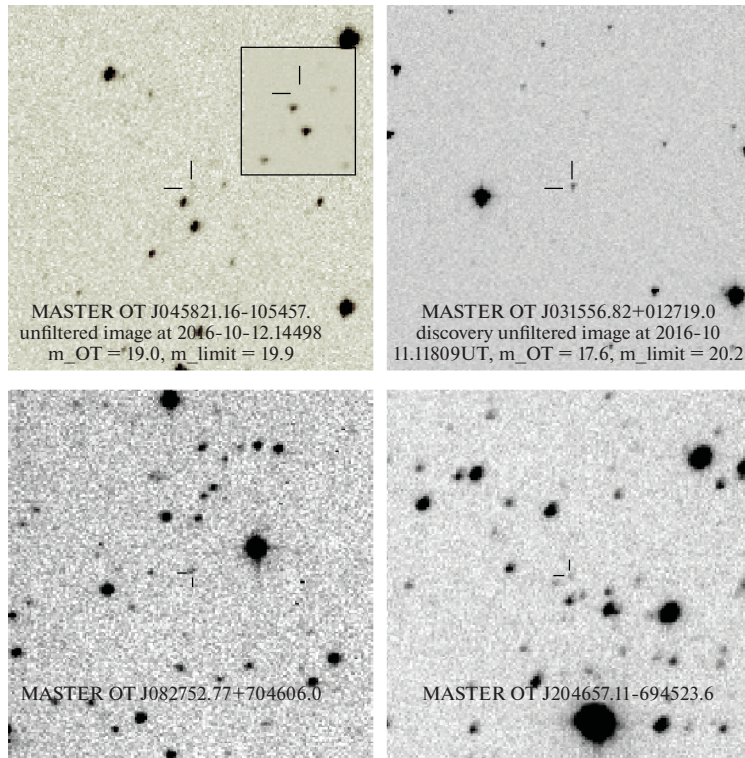


Рис. 1. Примеры обнаружения слабых объектов программным обеспечением системы МАСТЕР.

обсерватории SAAO. Новый источник яркостью  $19^m$  в белом свете был найден на трех инспекционных изображениях по координатам R.A., Dec. (2000) = 07h 49m 53.05s,  $-51^d 29^m 21.4s$  (первый снимок объекта получен в 2015-06-27 16:32:07). Объект соответствует источнику Swift-XRT,-UVOT (GCN 17976).

MASTER090525.27+405055.2 (ATel #9963) — это вспышка красного карлика (UVCet flare). Объект обнаружен в ходе обзора на телескопе МАСТЕР-Кисловодск по координатам (R.A., Dec.) = 09h 05m 25.27s +40d 50m 55.2s яркостью  $19.9^m$  в 2017-01-07 00:10:42 и  $19.0^m$  в 2017-01-07 00:33:23UT. С учетом того, что в VIZIER по данным координатам находится красная звезда (sloan)  $r = 21.167$ , одна из предыдущих вспышек была в 1978 г. (USNO-B1), и отсутствия объекта на архивных изображениях МАСТЕРА до  $20.2^m$ , классификация источника — это вспышка красного карлика (<https://www.aavso.org/vsx/index.php/viewctail.top&oidG6406>).

MASTER OT J031556.82+012719.0 discovery (ATel #9616) (рис. 1) — вспышка красного карлика, объект яркостью  $19.0^m$  обнаружен на телескопе МАСТЕР-ИАС (R.A., Dec.) = 03h 15m 56.82s +01d 27m 19.0s в 2016-10-11.12103 UT (первый снимок,  $m_{lim} = 20.3^m$ ), опорное изображение использовано от 2016-08-13.21775 UT с пределом  $20.2^m$ . В VIZIER в  $0.496''$  расположена красная звезда

(Sloan r.049), что дает с учетом кривой блеска МАСТЕРА классификацию красного карлика (<https://www.aavso.org/vsx/index.php?viewctail.top&oidG4671>).

MASTER OT J004528.12+414117.6 — вспышка карликовой новой. Транзиент  $19.0^m$  обнаружен на телескопе МАСТЕР-Кисловодск 2016-04-10.03461 UT по координатам (R.A., Dec.) = 00h 45m 28.12s +41d 41m 17.6s ( $m_{lim} = 19.5^m$ ). Объект был виден на трех изображениях за ночь. Опорное изображение использовано 2016-02-08.68476 UT с пределом  $21.1^m$ . Объект был пересянят МАСТЕР-ИАС 2016-04-13 05:11:28.249UT, яркость объекта увеличивалась до  $18.6^m$ . Спектр, полученный на 2-м Ливерпульском телескопе LT, подтверждает классификацию объекта как карликовой новой, не исключая переходного состояния к Новой (ATel #8950).

MASTER OT J082752.77+704606.0 (рис. 1) — транзиент яркостью  $19.1$  был обнаружен на телескопе МАСТЕР-Тунка 2011-03-26 14:09:51UT в ходе регулярного обзора по координатам R.A., Dec.(2000) = 08h 27m 52.77s,  $+70^d 46^m 06s.0$ . На момент обнаружения объекта в базе данных VIZIER был только один источник — GSC с яркостью в синем фильтре  $j = 21.7$  (калибровка МАСТЕРА по USNO-B1 как 0.2B+0.8R). Для объекта был получен спектр на 6-м телескопе БТА CAO РАН/SCORPIO (Моисеев и др., Atel

3255), где по эмиссии Mg II 2789 было определено красное смещение  $z = 0.91$  и предположен тип объекта — QSO или Sy2 (ATel #3255).

MASTER OT J045821.16-105457.7 (рис. 1) — карликовая новая, объект, открытый на канарском телескопе MASTER-IAC 2016-10-12.14498 UT яркостью  $19.0^m$  с амплитудой вспышки более 5 величин ( $21.0^m$  — предел на обзорных снимках МАСТЕРА данной области за 10 лет, а отсутствие объектов на изображениях PANSTARRs с пределом  $24^m$  дает такое ограничение на амплитуду вспышки (<https://www.aavso.org/vsx/index.php/viewctail.top&oidG4672>). Опорное изображение МАСТЕРА взято за 2016-02-09 21:59:52UT с пределом  $m_{\text{lim}} = 21.0^m$  (ATel #9616).

MASTER OT J204657.11-694523.6 (рис. 1) — карликовая новая, открытая на аргентинском телескопе MASTER-OAFA яркостью  $19.0^m$  в момент обнаружения 2017-06-30.21138 UT по координатам (R.A., Dec.) = 20h 46m 57.11s,  $-69^{\circ} 45' 23.6''$  ( $m_{\text{lim}} = 19.8^m$ ). Объект виден на трех изображениях за ночь. Опорное изображение использовалось за 2016-09-30.24641 UT с пределом  $20.0^m$ . В базе данных VIZIER присутствовал только один источник из каталога GSC 2.3, не красный, с известной яркостью в синем фильтре  $j_{\text{mag}} = 22.56$  (вспышка в 1978 г.), что дает амплитуду текущей вспышки более 3.5 звездных величин (калибровка МАСТЕРА по USNO-B как 0.2B+0.8R (в данном случае отсутствие значения в R фильтре дает предел в нем  $22^m$ ) <https://www.aavso.org/vsx/index.php/viewctail.top&oidQ2709>).

Богатый опыт обнаружения объектов как в алертном, так и в обзорном режимах, позволяет уверенно детектировать новые источники и оперативно сообщать о результатах их исследования в ATEL, TNS, GCN и т.д.

#### AT2021lfa/MASTER OT J123248.62-012924.5/ZTF21aayokph

Оптический источник AT2021lfa/ZTF21aayokph был обнаружен Паломарским телескопом в ходе работы по проекту ZTF 2021-05-04 05:34:48 UT (GCN 29938) (Масци и др., 2019). Яркость объекта в момент обнаружения в красном фильтре  $r = 18.6 \pm 0.08$ , а через 2 ч в фильтре  $g = 18.8 \pm 0.11$ , для сравнения использовались изображения без объекта, полученные на 2 дня ранее (Яо и др., 2021). На 3 ч раньше (до обнаружения ZTF) во время проведения собственного обзора неба на аргентинском телескопе-роботе MASTER-OAFA Глобальной сети МАСТЕР (Липунов и др., 2010, 2019, 2022; Корнилов и др., 2012) автоматическим программным обеспечением (робот МАСТЕР) был обнаружен оптический транзиент MASTER OT

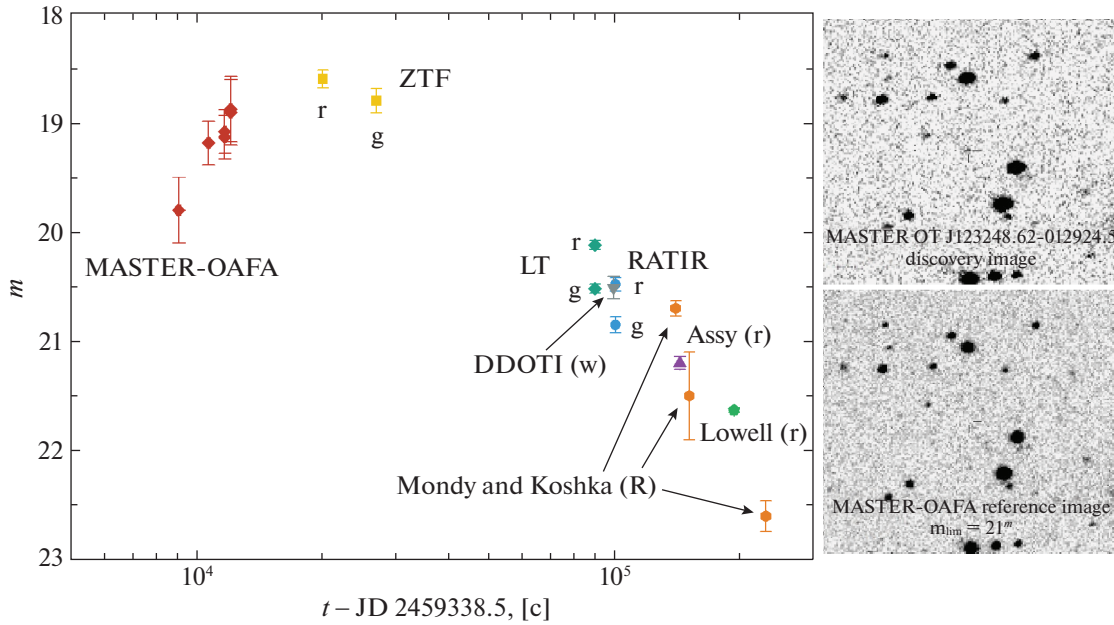
J123248.62-012924.5 (GCN 29959). В ходе обзора были получены 6 изображений с объектом, и его кривая блеска показала монотонное увеличение яркости объекта (см. табл. 1). Последующие наблюдения на других инструментах (Батлер и др., 2012, 2021; Росси и др., 2021; Уотсон и др., 2012, 2016, 2021; Фу и др., 2021; Яо и др., 2021а,б) (см. рис. 2, на который мы исключительно для наглядности нанесли все значения яркости в разных фильтрах в разное время, опубликованные на странице объекта <https://gcn.gsfc.nasa.gov/other/ZTF21aayokph.gcn3>) показали дальнейшее падение блеска, а на глубоком снимке на месте ОТ были найдены хозяйская галактика с красным смещением  $z = 1.063$  и рентгеновский транзиент с типичным потоком для рентгеновских послесвечений гамма-всплесков (Хо и др., 2021).

Как показывает кривая блеска всплеска, построенная по изображениям (рис. 2), яркость ОТ неуклонно увеличивается с первых изображений, оставаясь ниже значения ZTF на их первом кадре. Достоверность того, что блеск AT2021lfa во время наблюдений MASTER был ниже, чем во время первого наблюдения ZTF, находится на уровне  $7\sigma$ . Эта оценка получена путем сравнения суммы наблюдений 6 кадров ОТ с измерением ZTF в г фильтре, который неплохо совпадает с полосой МАСТЕРА (табл. 1). Следовательно, можно предположить, что время достижения максимальной яркости расположено между последним кадром МАСТЕР-OAFA и первым кадром ZTF.

Для проведения фотометрии мы использовали следующую процедуру. Поток оптического транзиента измерялся в  $6''$  апертуре, откалиброванной по нескольким эталонным звездам с аналогичным цветом и величинами G от GAIA EDR372-74 (Gaia коллаборация, 2016, 2020; Риелло и др., 2021). Для

**Таблица 1.** Фотометрия AT2021lfa, полученная сетью МАСТЕР

Время, UTC	Экспозиция, s	Звездная величина	Ошибка звездной величины
2021-05-04 02 : 31 : 49	180	19.8	0.3
2021-05-04 02 : 58 : 31	180	19.2	0.2
2021-05-04 03 : 15 : 19	180	19.1	0.2
2021-05-04 03 : 21 : 59	180	19.1	0.2
2021-05-04 03 : 42 : 01	180	18.9	0.3
2021-05-04 04 : 05 : 38	180	18.9	0.3



**Рис. 2.** MASTER OT J123248.62-012924.5 (AT2021lfa/ZTF21aayokph) оптическое изображение и кривая блеска (данные о фотометрии взяты из телеграмм Яо и др., GCN 29938; Ватсон и др., GCN 29940; Батлер и др., GCN 29941; Ким и др., GCN 29950; О’Коннор и др., GCN 29952; Панков и др., GCN 29954; Липунов и др., GCN 29959; Панков и др., GCN 29964; <https://gcn.gsfc.nasa.gov/other/ZTF21aayokph.gcn3>). Справа сверху показано первое изображение, полученное на МАСТЕР-OAFA, на котором был виден транзиент, справа внизу — опорный кадр, на котором нет объекта. Ошибки соответствуют уровню значимости  $1\sigma$ ,  $t_{\text{midnight}} = 2021-05-04\ 00 : 00 : 00$  UTC.

оценки ошибок мы использовали следующую формулу:  $\Delta m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{m}_i - m_{ij})^2}{N}}$ , где  $\bar{m}_i$  — звездная величина опорной звезды  $i$ , усредненная за время наблюдений,  $m_{ij}$  — звездная величина опорной звезды  $i$  на кадре  $j$ ,  $N$  — количество опорных звезд.

*Аппроксимация кривой блеска*

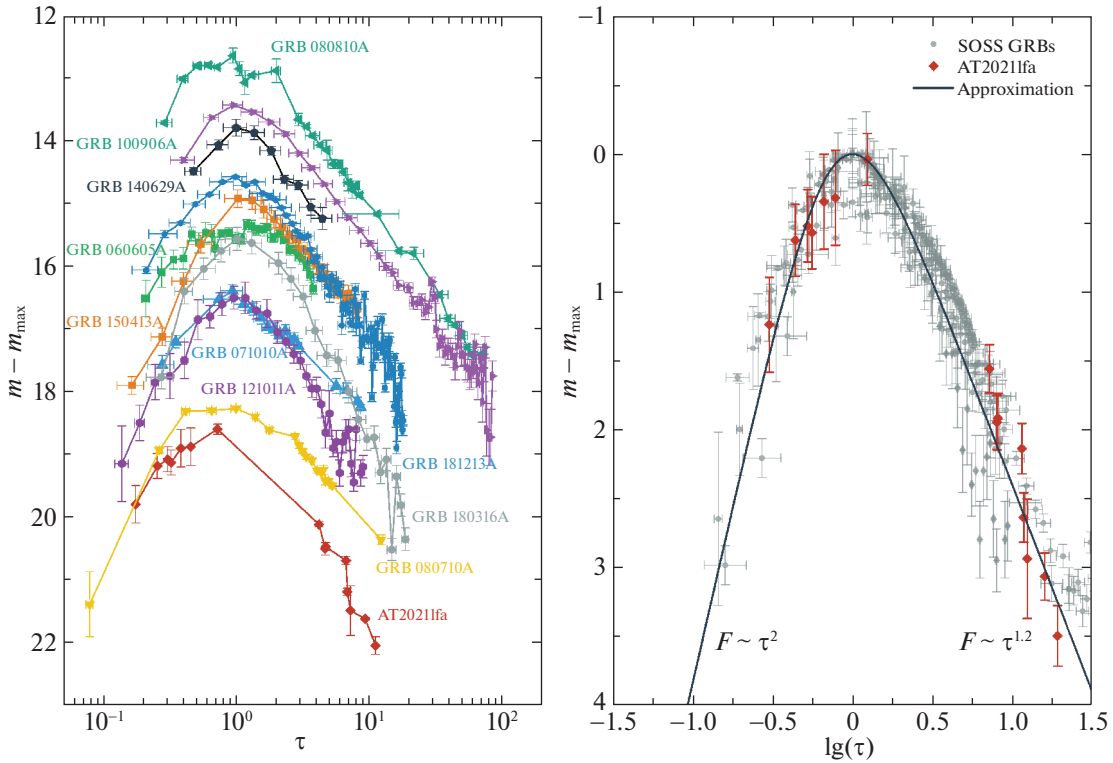
Такая немонотонная гладкая форма кривой блеска может указывать на то, что AT2021lfa является примером гамма-всплесков с плавным оптическим автоматическим излучением (здесь SOS-подобные гамма-всплески, Smooth Optical Self Similar), впервые идентифицированных в 2017 г. (Липунов и др., 2017а). В пользу того, что данный ОТ является послесвечением гамма-всплеска, выступают и другие его свойства: красный цвет ( $g - r > 0^m$ ), тусклая родительская галактика ( $r > 23^m$ ) и быстрое затухание ( $dr/dt = 1^m/\text{день}$ ) (Хо и др., 2022). SOS-подобные послесвечения гамма-всплесков описываются универсальной моделью, которая позволяет по форме кривой блеска определить как время всплеска, так и время пика. Модель основана на предположении о том, что наблюдается синхротронное излучение, создаваемое ультррелятивистской ударной волной в

сжатом межзвездном газе или в звездном ветре звезды-прародителя (Грузинов, Ваксман, 1999). Затухающий участок кривой блеска определяется временем остывания релятивистских электронов и степенным падением плотности среды. Такое излучение SOSS практически не связано с собственным оптическим излучением, которое возникает, скорее всего, в обратной ударной волне внутри джета и, как правило, видно одновременно с гамма-излучением.

Чтобы аппроксимировать кривую блеска AT2021lfa, мы использовали гладкую оптическую самоподобную модель излучения (SOSS) для гамма-всплеска. Кривая блеска SOSS описывается следующей формулой:

$$F = F_{\text{max}} \left( \frac{\beta \tau^{\beta-1}}{1 + (\beta - 1)\tau^\beta} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где  $\tau = (t - t_{\text{trig}})/(t_{\text{max}} - t_{\text{trig}})$ ,  $t_{\text{trig}}$  — время триггера (время начала активной фазы),  $t_{\text{max}}$  — время максимума,  $F_{\text{max}}$  — пиковый оптический поток. Используя кривые блеска других гамма-всплесков такого типа, мы приходим к выводу, что можно предложить  $\alpha = 1.2$ ,  $\beta = 2.71$ . Поскольку мы не знаем ни момента всплеска, ни момента его максимума, ни его пикового потока, все три значения являются неизвестными параметрами модели. Данные, полученные оптическими телескопами, и



**Рис. 3.** Кривые блеска AT2021lfa. На левой панели представлено сравнение AT2021lfa с послесвечениями SOSS гамма-всплесков (Липунов и др., 2017а). На правой панели AT2021lfa рассматривается как SOSS послесвечение. Ошибки соответствуют уровню значимости  $1\sigma$ .

опубликованные в GCN, и наши данные, были аппроксимированы методами наименьших квадратов (рис. 3, правая панель).

Аппроксимируя кривую блеска AT2021lfa моделью гладкого оптического автомодельного излучения, взяв в качестве свободных параметров ( $t_{\text{trig}}$ ,  $t_{\text{max}}$  и  $m_{\text{max}}$ ), мы получили с помощью МНК следующие значения параметров: момент вспышки  $t_{\text{trig}} = 2021.05.04(01 : 33 \pm 00 : 14)$  UTC; момент пика  $t_{\text{max}} = 2021.05.04(04 : 52 \pm 00 : 14)$  UTC; пиковая звездная величина  $m_{\text{max}} = 18.6 \pm 0.2$ . На левой панели рис. 3 можно увидеть кривую блеска AT2021lfa в сравнении с самыми яркими SOSS гамма-всплесками. С одной стороны, AT2021lfa действительно похож на них, но, с другой стороны, время достижения максимума у него самое большое, что, скорее всего, связано с эффектом селекции: ZTF в основном обследует небо в однодневном ритме, поэтому длительные события с большей вероятностью будут обнаружены. Следует также учитывать, что, несмотря на хорошее соответствие кривой блеска SOS, кривая блеска спадает, скорее, как  $t^{-1.4}$ , а не как  $t^{-1.2}$ . Это может быть вызвано распространением лобовой ударной волны в звездном ветре прародителя в модели медленного остывания (Чжан и др., 2006). Однако различие в наклоне правой части кривой блеска не исключает

возможности того, что в случае AT2021lfa мы имеем дело с послесвечением гамма-всплеска.

Рентгеновские данные обсерватории им. Нила Герелса “Свифт” (Хо и др., 2021) дают поток в полосе 0.3–10 кэВ, равный  $2.9 \times 10^{-13}$  эрг  $\text{см}^{-2}$   $\text{с}^{-1}$  через один день после обнаружения ZTF, что соответствует светимости  $1.9 \times 10^{45}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  при  $z = 1.0632$ . Используя эту оценку, мы можем рассчитать плотность потока мгновенного гамма-излучения транзиента, если бы это был гамма-всплеск.

#### Рентгеновские наблюдения

Для анализа наблюдений, сделанных Swift-XRT через 1 день после обнаружения AT2021lfa, мы использовали стандартный пакет HEASOFT 6.2875 (Эванс и др., 2009). Используя хранилище открытых данных Swift и автоматическое программное обеспечение, доступное по адресу UKSSDC71, учитывая значение красного смещения от Gemini South  $z = 1.063$ , мы выбрали наиболее подходящую модель (модель поглощения межзвездной среды Тюбингена–Боулдера). В этой модели есть несколько ключевых параметров:  $cflux$ ,  $TB_{\text{abs}}$ ,  $zTB_{\text{abs}}$ ,  $powerlaw$ , где  $cflux$  — это поток в отчетах в секунду на квадратный см;



**Таблица 2.** Параметры рентгеновского спектра

НН (внутреннее)	$7 (+59, -7) \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$
НН (галактическое)	$1.95 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$
$z$ поглощения	1.063
Фотонный индекс	2.01 (+1.79, -0.71)
Поток (0.3–10 кэВ) (наблюдаемый)	$1.5 (+1.0, -0.7) \times 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Поток (0.3–10 кэВ) (непоглощенный)	$2.05 (+11.31, -0.67) \times 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Отсчеты в поток (наблюдаемый)	$3.30 \times 10^{-11} \text{ эрг см}^{-2} \text{ отсч.}^{-1}$
Отсчеты в поток (непоглощенный)	$4.38 \times 10^{-11} \text{ эрг см}^{-2} \text{ отсч.}^{-1}$
W-статистика (d.o.f.)	39.17(36)
Время экспозиции спектра	9.7 кс

$TB_{\text{abs}}$  и  $zTB_{\text{abs}}$  являются параметрами модели и представляют компоненты модели поглощения; степенной закон (powerlaw) равен  $K \times E^{-\alpha}$ ,  $\alpha$  — индекс фотона,  $K$  — нормировочная константа,  $E$  — энергия фотона. В результате мы получили параметры рентгеновского транзиента и его спектр (см. табл. 2).

Для оценки быстрой изотропной максимальной яркости гамма-излучения мы использовали набор корреляций между потоком рентгеновского излучения и яркостью гамма-излучения, полученных за долгую историю наблюдений (Дайнотти и др., 2017), в частности, корреляцию между потоком рентгеновского излучения через 11 ч после вспышки в собственной системе и быстрым потоком гамма-излучения (Д’Аванзо и др., 2012). Наблюдения Swift-XRT проводились через 28 ч после полученного  $t_{\text{trig}}$ . Предполагая, что  $z = 1.063$ , в собственной системе отсчета время наблюдений составляет 13.6 ч, так что  $E_{\gamma, \text{iso}} \in (10^{51}, 10^{54})$  эрг. Это означает, что в таком приближении гамма-всплеск мог бы быть обнаружен. Сравнение рентгеновского спектра AT2021fa со спектрами длинных гамма-всплесков показывает небольшую разницу (рис. 4). Его фотонный индекс  $\alpha = 2.01$  согласуется с ожидаемыми значениями, согласно стандартной теории послесвечения (Сари, 1997). Таким образом, можно предположить, что наблюдаемый рентгеновский транзиент напоминает гамма-всплеск на поздних стадиях послесвечения.

### Поиск гамма-излучения

Чтобы исключить возможность того, что этот транзиент является типичным длинным гамма-всплеском, который по каким-то причинам не был

автоматически обнаружен гамма-телескопами, был проведен поиск в каталоге всплесков Fermi/GBM, списке подпороговых триггеров, архиве Swift GRB и архиве GCN. Мы искали связанный GRB в расчетном интервале  $2\Delta t_{\text{trig}}$  ( $\Delta t_{\text{trig}}$  — разница между расчетным  $t_{\text{trig}}$  и временем первого кадра МАСТЕР) в данных третьей межпланетной сети (IPN), которая состоит из восьми космических аппаратов, обеспечивающих постоянный мониторинг высокоэнергетических вспышек по всему небу. Наиболее чувствительными детекторами в IPN являются телескоп Swift Burst Alert Telescope (также мы проверили архив Swift GRB) (Бартелми и др., 2005), монитор гамма-всплесков Fermi (мы проверили каталог GRB и список подпороговых триггеров Fermi-GBM с флагом надежности, не равным 2) (Миган и др., 2009), INTEGRAL со спектрометром SPI (SPI-ACS) на борту (фон Кинлин и др., 2003) и прибор Konus на космическом аппарате Wind (Аптекарь и др., 1995). Мы не нашли соответствующего транзиента в гамма-диапазоне по желаемым координатам, включая архив GCN. Положение AT2021fa было видно GBM в течение всего интервала, GBM показывал сильно изменяющуюся скорость счета. Swift проходил южноатлантическую аномалию и не собирал данные в течение  $\approx 20\%$  исследуемого времени, а остальное время источник находился вне поля зрения Swift BAT. Напротив, Konus-Wind и INTEGRAL (SPI-ACS) имели полный охват в диапазонах 20–1500 и 80–8000 кэВ соответственно и стабильные скорости подсчета (см. табл. 3). Мы не обнаружили значительного ( $>5\sigma$ ) превышения над фоном в данных режима ожидания Konus-Wind во временных масштабах от 2.944 с до 100 с. Мы также не обнаружили каких-либо существенных

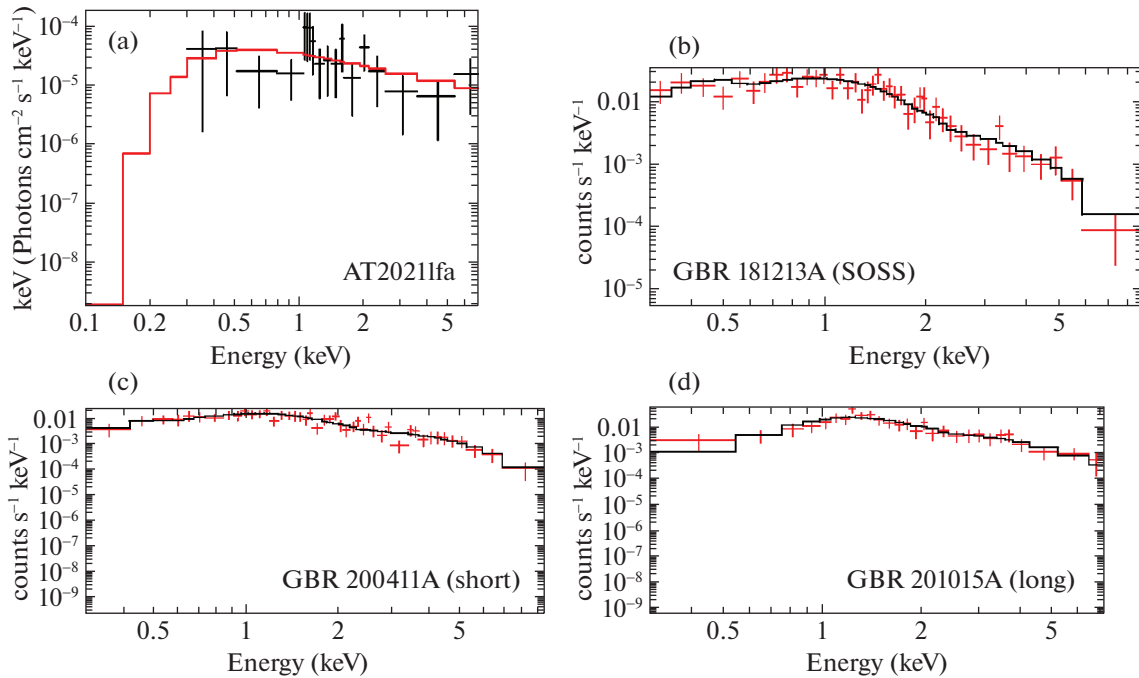


Рис. 4. (a) — Усредненный рентгеновский спектр AT2021lfa, (b)–(d) — спектры других гамма-всплесков для сравнения, ошибки соответствуют интервалу  $1\sigma$ .

транзиентов (событий увеличения потока) в данных SPI-ACS. Используя данные режима ожидания Kopus-Wind, мы оцениваем верхний предел (90% достоверности) пикового потока для типичного длинного спектра GRB (функция Банда (Банд и др., 1993)  $\alpha = -1$ ,  $\beta = -2.5$  и  $E_p = 300$  кэВ) до  $3.4 \times 10^{-7}$  эрг  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  (10–1500 кэВ, шкала 2.944 с). Более мягкая полоса спектра с  $E_p = 10$  кэВ, типичная для гамма-всплесков низкой яркости, приводит к несколько более низкому предельному пиковому потоку  $3.0 \times 10^{-7}$  эрг  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Для INTEGRAL SPI-ACS средняя скорость счета при бинировании 50 мс на исследуемом временном интервале составляла 135 600 отсч./с. Используя коэффициент пересчета (Вигано, Марегетти, 2010), мы приходим к следующему верхнему пределу (90% достоверности) для пикового потока  $-2.7 \times 10^{-7}$  эрг  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Используя космологические константы, согласно данным микроволнового обзора “Планк” (Коллаборация Планк, 2020), эти верхние пределы соответствуют светимости  $1.9 \times 10^{51}$  эрг  $\text{s}^{-1}$ , если длительность вспышки 100 с, это соответствует  $2 \times 10^{53}$  эрг. Учитывая это, оценку потока гамма-излучения по рентгеновскому детектированию, а также полученные параметры для модели SOS, мы можем предположить, что это не типичный длинный гамма-всплеск, так как характерного в таких случаях гамма-излучения зафиксировано не было. В настоящее время существу-

ют три модели, которые предсказывают существование транзиентов, напоминающих послесвечения гамма-всплесков, но не сопровождаются существенной вспышкой гамма-излучения. Это осевой сиротский гамма-всплеск (Накар и др., 2003), внеосевой сиротский гамма-всплеск, или потерянное послесвечение (Роудс, 1997), и неудавшийся гамма-всплеск, или “грязный огненный шар” (Хуан и др., 2002). Первый основан на модели джета типичного гамма-всплеска, который наблюдается вблизи луча зрения, но не демонстрирует существенного гамма-излучения из-за его более высокой направленности в гамма-диапазоне. Вторая модель аналогична, но угол раскрытия увеличивается со временем. Третий основан на струе с высоким барийным загрязнением, из-за чего начальный лоренц-фактор намного меньше 100. Чтобы определить, к какому типу сиротских всплесков относится AT2021lfa, обратимся к расчетам кривых блеска анизотропных джетов, движущихся в однородной среде. Детальные исследования показывают, что на начальном этапе (до достижения максимума) внеосевые кривые блеска послесвечения растут значительно быстрее (при разумной модели профиля джета), чем в случае осевой струи (Хуан и др., 2002; Се, Макфадиев, 2019). Разница заметна даже при небольших углах зрения. Однако ряд других гидродинамических моделирований внеосевых кривых блеска в оптике дают противоположную картину с очень медленным нарастанием (Гранот и др., 2018), которое не наблюдается для данного

**Таблица 3.** Подробная информация об орбитальных инструментах, используемых для поиска гамма-всплесков

Инструмент	Энергия (КэВ)	Комментарии
Wind (Konus)	20–1500	ОТ был виден весь интервал, стабильный фон
Fermi (GBM; NaI)	8–1000	ОТ был виден весь интервал, переменный фон
INTEGRAL (SPI-ACS)	75–8000	ОТ был виден весь интервал, стабильный фон
Swift (BAT)	15–350	$t_{\text{trig}} = -840\text{s}, -440\text{s}$ Swift в SAA $t_{\text{trig}} = -440\text{s}, +840\text{s}$ ОТ вне поля зрения

ОТ. Сравнение начального поведения наблюдаемой, смоделированных кривых блеска внеосевого всплеска и SOSS кривой можно увидеть на графике (рис. 5). Начальный рост кривой блеска неплохо описывается SOSS кривой, которая дает рост потока со временем согласно формуле  $F \sim t^2$ . Формально возможно подобрать профиль джета таким, чтобы получить наблюдаемую относительно низкую скорость роста, но это требует дополнительного изучения и моделирования. Таким образом, мы не можем отбросить сценарий внеосевого сиротского всплеска. Стоит отметить, что в статье (Хо и др., 2022) данный всплеск интерпретирован как кандидат во внеосевой сиротский гамма-всплеск, но их анализ, проведенный без фотометрии МАСТЕР, которая застала рост блеска, сильно завывшал время начала всплеска, а следовательно, и вносил искажение в определение наклона кривой блеска на раннем этапе послесвечения.

В рамках нашего предположения осталось рассмотреть разделение на “неудавшийся” сценарий и осевой сиротский всплеск. Осевые гамма-всплески предположительно имеют такие же кривые блеска, как и неудавшиеся гамма-всплески, но имеют гораздо более высокий начальный фактор Лоренца.

### Оценка Лоренц-фактора

Оценка гамма-фактора может быть получена разными путями. Можно использовать простую модель расширения огенного шара с внешней ударной волной. Кривая блеска в стандартной модели послесвечения достигает максимума, когда масса материала, набранного из окружающей среды ударной волной, сравнивается с массой эжектируемого материала:

$$\frac{E_{\text{iso}}}{\Gamma_0^2 c^2} \approx \frac{4}{3} \pi m_p n R_d^3. \quad (2)$$

Это происходит во время  $t_{p,z} \approx R_d/2\Gamma_0^2 c$  на дистанции  $R_d$  от центра расширения, где  $t_{p,z} = t_p/(1+z)$ , а  $t_p = t_{\text{max}} - t_{\text{trig}} = (12.0 \pm 0.8)10^3$  с. Исключая радиус замедления  $R_d$  из последних двух

выражений, легко оценить начальное значение коэффициента Лоренца:

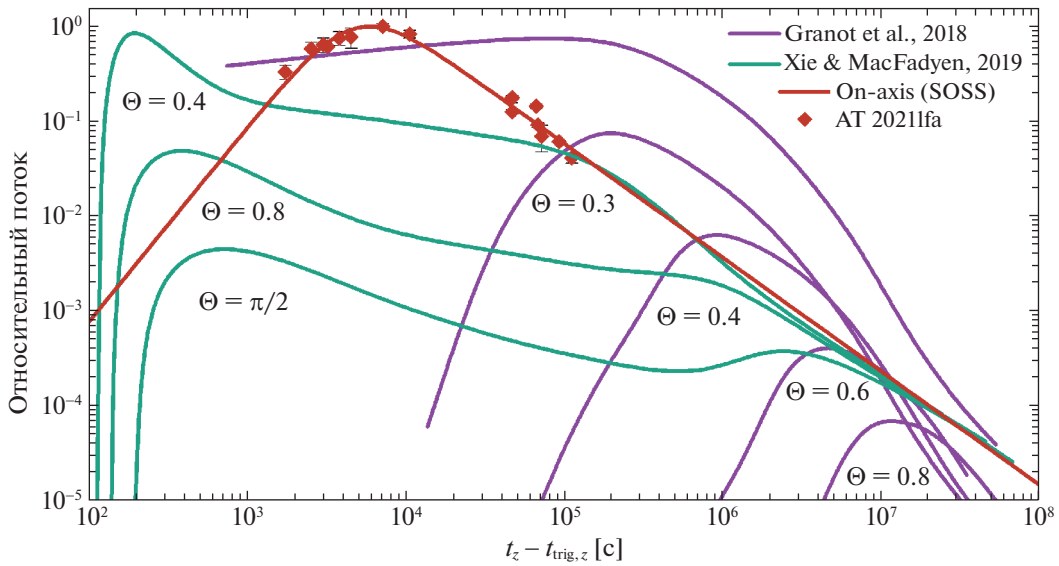
$$\Gamma_0 \approx \left( \frac{3}{32\pi c^5 m_p} \right)^{1/8} \left( \frac{E_{\text{iso}}}{n} \right)^{1/8} (t_{p,z})^{-3/8} \propto \left( \frac{E_{\text{iso}}}{n} \right)^{1/8} (t_{p,z})^{-3/8}. \quad (3)$$

Теоретически аналогичная оптическая кривая блеска может быть получена как результат излучения внутренней ударной волны. Однако оценка гамма-фактора в ударной волне не меняется (Хаскоет и др., 2014). Обнаружение рентгеновского излучения в нашем случае позволяет отдать предпочтение сценарию с внешней ударной волной. Мы подчеркиваем, что крутизна оптической кривой блеска больше соответствует излучению ударной волны, распространяющейся в звездном ветре. Действительно, предполагая, что распределение плотности в звездном ветре описывается как  $\rho = Ar^{-2}$ , соотношение (3) переписывается как  $E_{\text{iso}}/\Gamma_0^2 c^2 \approx 16\pi AR_d$ . Опять исключая  $R_d$ , мы получаем

$$\Gamma_0 \approx 52 \left( \frac{E_{52}^{\text{iso}}}{A_*} \right)^{1/4} (t_{p,z})^{-1/4}. \quad (4)$$

Здесь  $A_* = A/(5 \times 10^{11})$  г/см — параметр звездного ветра, а  $E_{52} = E/10^{52}$ . Используя верхний предел светимости и считая  $A_* = 1$ , мы получаем характерное значение  $\Gamma_0 \approx 15$ . Если рассмотреть расширение в межзвездную среду с постоянной плотностью для характерных параметров концентрации в 1–100 частиц в см<sup>3</sup>, то получаем значения для начального гамма-фактора в диапазоне  $\Gamma_0 \in (29, 50)$ .

Другой метод оценки заключается в использовании набора корреляций между параметрами оптической кривой блеска, гамма-фактором и потоком гамма-излучения для набора схожих гамма-всплесков (Эн-вей Лян, 2010). Чтобы проверить правильность этих корреляций в случае AT2021fla, мы использовали корреляцию между временными



**Рис. 5.** Относительные кривые блеска осевого SOSS-гамма-всплеска и внеосевых всплесков, полученных в разных гидродинамических расчетах с разными углами раствора джета на момент начала наблюдения. Начальный угол полуоткрытия для всех сценариев соответствует  $\Theta_{\text{view}} = 0.2$ . Верхняя фиолетовая кривая соответствует  $\Theta_{\text{view}} = 0.3$ , но со смещенным временем триггера на сутки раньше предполагаемого.

параметрами в рамках модели SOS кривой блеска (см. табл. 4):

$$\log t_d = (0.48 \pm 0.13) + (1.06 \pm 0.06) \log t_r, \quad (5)$$

$$\log t_d = (-0.09 \pm 0.29) + (1.17 \pm 0.11) \log t_p, \quad (6)$$

$$\log t_r = (-0.54 \pm 0.22) + (1.11 \pm 0.08) \log t_p, \quad (7)$$

$$\log \omega = (0.05 \pm 0.27) + (1.16 \pm 0.10) \log t_p. \quad (8)$$

Видно, что параметры удовлетворяют им и не отклоняются более чем на  $1\sigma$ . Таким образом, мы можем предположить, что корреляции показывают истинную картину, несмотря на то что некоторые из корреляций, описанных в работе (Эн-вей Лян,

2010), противоречивы, например, корреляции между максимальным оптическим блеском и изотропным гамма-излучением, а также между временем максимума  $t_{p,z}$  и изотропным гамма-излучением:

$$\log t_{p,z} = (2.25 \pm 0.07) - (0.38 \pm 0.07) \log E_{52}^{\text{iso}}, \quad (9)$$

$$\log L_{p,O} = (47.10 \pm 0.12) + (1.17 \pm 0.13) \log E_{52}^{\text{iso}}. \quad (10)$$

Оценка изотропного гамма-излучения колеблется от  $10^{51}$  эрг в первом случае до  $10^{47} - 10^{48}$  эрг в последнем. Они, однако, оба указывают на отсутствие обнаружения AT2021lfa с помощью *Konus/Wind* и *INTEGRAL SPI-ACS*, поскольку они устанавливают верхний предел для изотропного гамма-потока при  $10^{52}$  эрг. Мы можем предложить на их основе оценку начального гамма-фактора  $\Gamma_0$ , используя данные корреляции и время максимума в собственной системе отсчета  $t_{p,z} = 5800 \pm 400$  с:

$$\log \Gamma_0 = (3.69 \pm 0.09) - (0.63 \pm 0.04) \log t_{p,z} = 1.31 \pm 0.48 \quad (11)$$

или  $\Gamma_0 = (13.5; 30.9)$ . Это значение коэффициента Лоренца не противоречит необнаружению гамма-телескопом из-за другой корреляции:  $\Gamma_0 = 195 \times E_{\gamma, \text{iso}, 52}^{0.27}$ , что соответствует  $E_{\gamma, \text{iso}} = 10^{49}$  эрг.

Поскольку оба метода поддерживают гипотезу о малом гамма-факторе (намного меньше 100), мы идентифицируем AT2021lfa как вероятный неудавшийся гамма-всплеск или грязный огненный шар.

**Таблица 4.** Временные параметры AT2021lfa

$t_p, s$	$11\,970 \pm 840$
$\omega, s$	$27\,240 \pm 2530$
$t_r, s$	$5260 \pm 360$
$t_d, s$	$32\,500 \pm 2500$
$\log t_p$	$4.08 \pm 0.02$
$\log \omega$	$4.43 \pm 0.09$
$\log t_r$	$3.72 \pm 0.07$
$\log t_d$	$4.51 \pm 0.08$

С наблюдательной точки зрения оптический транзистент AT2021fa может несомненно представлять собой всплеск-сироту с рентгеновским послесвечением. Это явление мы попытались объяснить в рамках так называемой модели “грязного огненного шара” с низким гамма-фактором Лоренца и недоразвитой струей. Подчеркнем, что обнаруженный в данном исследовании плавный немонотонный характер оптического излучения демонстрирует автомодельный характер взрыва и перехода релятивистской ударной волны к затуханию. Более того, с помощью модели SOSS-излучения удалось локализовать момент начала катастрофы.

Мы посвящаем эту работу памяти нашего товарища и соавтора — Виктора Геральдовича Корнилова — одного из ключевых создателей глобальной сети МАСТЕР, который покинул нас в мае 2021 г. Мы благодарим за поддержку со стороны программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. В. Липунов, Е. Горбовской, Н. Тюрина поддерживаются грантом РФФИ 19-29-11011. Н.М. Буднев поддержан Министерством науки и высшего образования РФ (2020-0017). О.А. Гресь поддержан Минобрнауки РФ (ГЗ Оборудование FZZE-2020-0024), оборудование УНУ “Астрофизический комплекс МГУ-ИГУ” поддержано Минобрнауки РФ (соглашение ЕВ-075-15-2021-675). В этой работе использовались данные, предоставленные британским центром научных данных Swift при Университете Лестера. В этой работе использовались данные миссии Европейского космического агентства (ЕКА) Gaia 3.0, обработанные Консорциумом по обработке и анализу данных Gaia (DPAC).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аартсен и др. (M.G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, I. Al Samarai, D. Altmann, et al.), *Astron. Astrophys.* **607**, A115 (2017).
2. Аптекар и др. (R.L. Aptekar, D.D. Frederiks, S.V. Golenetskii, V.N. Il'yinskii, E.P. Mazets, V.N. Panov, Z.J. Sokolova, M.M. Terekhov, et al.), *Space Sci. Rev.* **71**, 265 (1995).
3. Бакли и др. (D.A.H. Buckley, S. Bagnulo, R.J. Britto, J. Mao, D.A. Kann, J. Cooper, V. Lipunov, D.M. Hewitt, et al.), *MNRAS* **506**, 2621 (2021).
4. Бартелми и др. (S.D. Barthelmy, L.M. Barbier, J.R. Cummings, Ed.E. Fenimore, N. Gehrels, D.K. Hullinger, H.A. Krimm, C.B. Markwardt, et al.), *Space Sci. Rev.* **120**, 143 (2005).
5. Бартелми и др. (S.D. Barthelmy, P. Butterworth, T.L. Cline, N. Gehrels, F. Marshall, T. Takeshima, V. Connaughton, R.M. Kippen, et al.), *AIP Conf. Proceed.* **428**, 99 (1998).
6. Батлер и др. (N. Butler, C. Klein, O. Fox, G. Lotkin, J. Bloom, J.X. Prochaska, E. Ramirez-Ruiz, J.A. de Diego, et al.), *Proc. SPIE* **8446**, 844610 (2012).
7. Батлер и др. (N. Butler, A.M. Watson, A. Kutyrev, W.H. Lee, M.G. Richer, O. Fox, J.X. Prochaska, J. Bloom, A. Cucchiara, et al.), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29941** (2021).
8. Банд и др. (D. Band, J. Matteson, L. Ford, B. Schaefer, D. Palmer, B. Teegarden, T. Cline, M. Briggs, et al.), *Astrophys. J.* **413**, 281 (1993).
9. Блинников и др. (S.I. Blinnikov, I.D. Novikov, T.V. Perevodchikova, and A.G. Polnarev), *Sov. Astron. Lett* **10**, 177 (1984).
10. Вигано, Мерегетти (D. Vigano and S. Mereghetti), *Proceedings of the Extreme sky: Sampling the Universe above 10 keV* **49** (2010).
11. Воеводин и др. (V.V. Voevodin, A.S. Antonov, D.A. Nikitenko, P.A. Shvets, S.I. Sobolev, I.Yu. Sidorov, K.S. Stefanov, V.V. Voevodin, S.A. Zhumatiy, et al.), *Supercomputing Frontiers and Innovations* **6** (2), 4 (2019).
12. Вусли, Хереп (S.E. Woosley and A. Heger), *Astrophys. J.* **637**, 914 (2006).
13. ГАЙЯ коллаборация (Gaia Collaboration), *Astron. Astrophys.* **595**, A1 (2016).
14. ГАЙЯ коллаборация (Gaia Collaboration), *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2020).
15. Гал-Ям, Авишай и др. (A. Gal-Yam, E.O. Ofek, D. Poznanski, A. Levinson, E. Waxman, D.A. Frail, A.M. Soderberg, E. Nakar, et al.), *Astrophys. J.* **639**, 331 (2006).
16. Горбовской и др. (E.S. Gorbovskey, V.M. Lipunov, D.A.H. Buckley, V.G. Kornilov, P.V. Balanutsa, N.V. Tyurina, A.S. Kuznetsov, D.A. Kuvshinov, et al.), *MNRAS* **455**, 3312 (2016).
17. Гранот и др. (J. Granot, F. De Colle, and E. Ramirez-Ruiz), *MNRAS* **481**, 2711 (2018).
18. Грузинов, Ваксман (Gruzinov and Waxman), *Astrophys. J.* **511**, 852 (1999).
19. Д’Аванзо и др. (P. D’Avanzo, R. Salvaterra, B. Sbarufatti, L. Nava, A. Melandri, M.G. Bernardini, S. Campana, S. Covino, et al.), *MNRAS* **425**, 506 (2012).
20. Дайнотти, Дель Веккио (Dainotti and Del Vecchio), *New Astron. Rev.* **77**, 23 (2017).
21. Джордана-Митьянс и др. (N. Jordana-Mitjans, C.G. Mundell, S. Kobayashi, R.J. Smith, C. Guidorzi, I.A. Steele, M. Shrestha, A. Gomboc, et al.), *Astrophys. J.* **892**, 97 (2020).
22. Ершова и др. (O.A. Ershova, V.M. Lipunov, E.S. Gorbovskey, N.V. Tyurina, V.G. Kornilov, D.S. Zimnukhov, A. Gabovich, O.A. Gress, et al.), *Astron. Rep.* **64**, 126 (2020).
23. Зимнухов и др. (D.S. Zimnukhov, V.M. Lipunov, E.S. Gorbovskey, V.G. Kornilov, N.V. Tyurina, V.V. Chazov, A.V. Gabovich, P.V. Balanutsa, et al.), *Astron. Rep.* **63**, 1056 (2019).
24. Кац, Пирани (Katz and Piran), *Astrophys. J.* **490**, 772 (1997).

25. Ким и др. (V. Kim, N. Pankov, M. Krugov, A. Pozanenko, and S. Belkin), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29950**, (2021).
26. фон Кинлин и др. (A. von Kienlin, V. Beckmann, A. Rau, N. Arend, K. Bennett, B. McBreen, P. Connell, S. Deluij, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L299 (2003).
27. Клебесадель и др. (R.W. Klebesadel, I.B. Strong, and R.A. Olson), *Astrophys. J.* **182**, L85 (1973).
28. Корнилов и др. (V.G. Kornilov, V.M. Lipunov, E.S. Gorbovskey, A.A. Belinski, D.A. Kuvshinov, N.V. Tyurina, N.I. Shatsky, A.V. Sankovich, et al.), *Experiment. Astron.* **33**, 173 (2012).
29. Ласкар и др. (T. Laskar, H. van Eerten, P. Schady, C.G. Mundell, K.D. Alexander, R. Barniol Duran, E. Berger, J. Bolmer, et al.), *Astrophys. J.* **884**, 121 (2019).
30. Левинсон, Эйчлер (A. Levinson and D. Eichler), *Astrophys. J.* **575**, 923 (2002).
31. Липунов (V.M. Lipunov, K.A. Postnov, M.E. Prokhorov, I.E. Panchenko, and H.E. Jorgensen), *Astrophys. J.* **454**, L593 (1995).
32. Липунов (V. Lipunov and E. Gorbovskey), *Astrophys. J.* **665L**, 97L (2007).
33. Липунов (V. Lipunov and E. Gorbovskey), *MNRAS* **383**, 1397L (2008).
34. Липунов (V. Lipunov), *Достижения в астрономии — 2010* **6**, (2010).
35. Липунов и др. (V.M. Lipunov, J. Gorosabel, M.V. Pruzhinskaya, A. de Ugarte Postigo, V. Pelassa, A.E. Tsvetkova, I.V. Sokolov, D.A. Kann, et al.), *MNRAS* **455**, 712 (2016).
36. Липунов и др. (V.M. Lipunov, S.G. Simakov, E.S. Gorbovskey, D.M. Vlasenko, et al.), *Astrophys. J.* **845**, 52 (2017a).
37. Липунов и др. (V.M. Lipunov, S.I. Blinnikov, E.S. Gorbovskey, A.V. Tutukov, P. Baklanov, V. Krushinski, N.V. Tyurina, P.V. Balanutsa et al.), *MNRAS* **470**, 2339 (2017b).
38. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.G. Kornilov, E.S. Gorbovskey, D.A.H. Buckley, N.V. Tyurina, P.V. Balanutsa, A.S. Kuznetsov, J. Greiner, et al.), *MNRAS* **465**, 3656 (2017b).
39. Липунов и др. (V.M. Lipunov, E.S. Gorbovskey, V.G. Kornilov, N.V. Tyurina, P.V. Balanutsa, A.S. Kuznetsov, D.M. Vlasenko, D.A. Kuvshinov, et al.), *Astrophys. J. Lett* **850**, L1 (2017r).
40. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.G. Kornilov, E.S. Gorbovskey, G.V. Lipunova, D.M. Vlasenko, I.E. Panchenko, N.V. Tyurina, V. G. Grinshpun, et al.), *New Astronomy* **63**, 48 (2018a).
41. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.V. Vladimirov, E.S. Gorbovskey, A.S. Kuznetsov, D.S. Zimnukhov, P.V. Balanutsa, V.G. Kornilov, N.V. Tyurina, et al.), *Astron. Rep.* **63**, 293 (2019).
42. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.G. Kornilov, K.K. Zhirkov, E.S. Gorbovskey, N.M. Budnev, D.A.H. Buckley, R. Rebolo, M. Serra-Ricart, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **896**, L19 (2020).
43. Липунов и др. (V.M. Lipunov, V.G. Kornilov, E.S. Gorbovskey, I.S. Gorbunov, P.V. Balanutsa, V.V. Vladimirov, A.S. Kuznetsov, D. Vlasenko, et al.), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29959** (2021).
44. Липунов и др. (L.M. Lipunov, V.G. Kornilov, K. Zhirkov, A. Kuznetsov, E. Gorbovskey, N.M. Budnev, D.A.H. Buckley, R.R. Lopez, et al.), *Universe* **8**, 271 (2022).
45. Лоу и др. (C.J. Law, B.M. Gaensler, B.D. Metzger, E.O. Ofek, L. Sironi, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **866**, L22 (2018).
46. Мазец и др. (E.P. Mazets, S.V. Golenetskii, V.N. Ilinskii, Iu.A. Gurian, T.V. Kharitonova, et al.), *ЖЭТФ Lett.* **19**, 77 (1974).
47. МакФадден, Вусли (A.I. MacFadyen and S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **524**, 262 (1999).
48. Малакрино и др. (F. Malacrino, J.-L. Atteia, M. Boër, A. Klotz, C. Veillet, J.-C. Cuillandre, GRB RTAS Collaboration, et al.), *Astron. Astrophys.* **464**, L29 (2007).
49. Масци и др. (F.J. Masci, R.R. Laher, B. Rusholme, D.L. Shupe, S. Groom, J. Surace, E. Jackson, S. Monkevitz, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131**, 018003 (2019).
50. Миган и др. (C. Meegan, G. Lichti, P.N. Bhat, E. Bissaldi, M.S. Briggs, V. Connaughton, R. Diehl, G. Fishman, et al.), *Astrophys. J.* **702**, 791 (2009).
51. Накар, Пирам (E. Nakar and T. Piran), *New Astron.* **8**, 141 (2003).
52. О'Коннор и др. (B. O'Connor, S. Dichiaro, E. Troja, P. Gatkine, J.M. Durbak, S.B. Cenko, A. Kutyrev, and S. Veilleux), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29952** (2021).
53. Панков и др. (N. Pankov, S. Belkin, E. Klunko, A. Novichonok, A. Pozanenko, and A. Zhornichenko), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29954** (2021a).
54. Панков и др. (N. Pankov, S. Belkin, E. Klunko, A. Novichonok, A. Pozanenko, A. Zhornichenko), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29964**, (2021b).
55. Пачинский (Paczynski B.), *Astrophys. J. Lett.* **494**, L45 (1997).
56. Планк коллаборация (Planck Collaboration; N. Aghanim, Y. Akrami, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Ballardini, and A.J. Banday), *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020).
57. Рау и др. (A. Rau, J. Greiner, and R. Schwarz), *Astron. Astrophys.* **449**, 79 (2006).
58. Риелло и др. (M. Riello, F. De Angeli, D.W. Evans, P. Montegriffo, J.M. Carrasco, G. Busso, L. Palaversa, P.W. Burgess, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A3 (2021).
59. Роберт Кехо и др. (R. Kehoe, C. Akerlof, R. Balsano, J. Bloch, D. Casperson, S. Fletcher, G. Gisler, B. Lee, et al.), *Astrophys. J.* **577**, 845 (2002).
60. Росси и др. (A. Rossi, E. Palazzi, and F. Cusano), *GRB Coord. Netw. Circ.* **30079** (2021).
61. Роудс (J.E. Rhoads), *Astrophys. J.* **487**, L1 (1997).
62. Рыков и др. (E.S. Rykoff, F. Aharonian, C.W. Akerlof, K. Alatalo, M.C.B. Ashley, T. Guver, D. Horns, R.L. Kehoe, et al.), *Astrophys. J.* **631**, 1032 (2005).

63. Садовничий и др. (V.A. Sadovnichy, M.I. Panasyuk, S.I. Svertilov, V.M. Lipunov, V.V. Bogomolov, E.S. Gorbovskey, A.V. Bogomolov, A.J. Castro-Tirado, et al.), *Astrophys. J.* **861**, 48 (2018).
64. Сари Р. (R. Sari), *Astrophys. J.* **489**, L37 (1997).
65. Се, Макфэдиен (X. Xie and A. MacFadyen), *Astrophys. J.* **880**, 135 (2019).
66. Стил и др. (I.A. Steele, R.J. Smith, P.C. Rees, I.P. Baker, S.D. Bates, M.F. Bode, M.K. Bowman, D. Carter, et al.), *Proc. SPIE* **5489**, 679 (2004).
67. Троя и др. (E. Troja, V.M. Lipunov, C.G. Mundell, N.R. Butler, A.M. Watson, S. Kobayashi, S.B. Cenko, F.E. Marshall, et al.), *Nature* **547**, 425 (2017).
68. Уотсон и др. (A.M. Watson, M.G. Richer, J.S. Bloom, N.R. Butler, U. Cesena, D. Clark, E. Colorado, A. Cordova, et al.), *Proc. SPIE* **8444**, 8445L (2012).
69. Уотсон и др. (F.T. Watson, S.J. Berukoff, T. Hays, K. Reardon, D.J. Speiss, and S. Wiant), *Proc. SPIE* **9910**, 99100G (2016).
70. Уотсон и др. (A.M. Watson, N. Butler, R.L. Becerra, S. Dichiara, A. Kutyrev, W.H. Lee, O. Lopez, et al.), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29940** (2021).
71. Фу и др. (S.Y. Fu, Z.P. Zhu, X. Liu, D. Xu, X. Gao, and J.Z. Liu), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29948**, (2021).
72. Хаскоет и др. (R. Hascoet, A.M. Beloborodov, F. Daigne, and R. Mochkovitch), *Astrophys. J.* **782**, 5 (2014).
73. Хо и др. (A.Y.Q. Ho, S.R. Kulkarni, P.E. Nugent, W. Zhao, F. Rusu, S.B. Cenko, V. Ravi, M.M. Kasliwal, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **854**, L13 (2018).
74. Хо и др. (A.Y.Q. Ho, D.A. Perley, P. Beniamini, S.B. Cenko, S.R. Kulkarni, I. Andreoni, L.P. Singer, K. De, et al.), *Astrophys. J.* **905**, 98 (2020).
75. Хо и др. (A. Ho, Y. Yao, and D. Perley), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29953** (2021).
76. Хо и др. (A. Ho, D.A. Perley, Y. Yao, D. Svinkin, A. de Ugarte Postigo, R.A. Perley, D.A. Kann, E. Burns, et al.), eprint arXiv:2201.12366 (2022).
77. Хуанг и др. (Y.F. Huang, Z.G. Dai, and T. Lu), *MNRAS* **332**, 735 (2002).
78. Хуанг и др. (Y. Huang, Y. Urata, K. Huang, K. Lee, M. Tsai, Y.I. Shirasaki, M. Sawicki, S. Arnouts, et al.), *Astrophys. J.* **897**, 69 (2020).
79. Ченко и др. (S.B. Cenko, S.R. Kulkarni, A. Horesh, A. Corsi, D.B. Fox, J. Carpenter, D.A. Frail, P.E. Nugent, et al.), *Astrophys. J.* **769**, 130 (2013).
80. Чжан и др. (B. Zhang, Y.Z. Fan, J. Dyks, S. Kobayashi, P. Meszaros, D.N. Burrows, J.A. Nousek, and N. Gehrels), *Astrophys. J.* **642**, 354 (2006).
81. Эбботт и др. (B.P. Abbott, R. Abbott, T.D. Abbott, M.R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **826**, L13 (2016).
82. Эванс и др. (P.A. Evans, A.P. Beardmore, K.L. Page, J.P. Osborne, P.T. O'Brien, R. Willingale, R.L.C. Starling, D.N. Burrows, et al.), *MNRAS* **397**, 1177 (2009).
83. Эн-вей Лян и др. (En-Wei Liang, S. Yi, J. Zhang, H. Lu, and B. Zhang), *Astrophys. J.* **725**, 2209 (2010).
84. Яо и др. (Y. Yao, D. Perley, and A. Ho), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29938** (2021a).
85. Яо и др. (Y. Yao, D. Perley, and A. Ho), *GRB Coord. Netw. Circ.* **29945** (2021b).

## ЭВОЛЮЦИЯ СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ГАЛАКТИК ПО ДАННЫМ ПОЛЯ HST COSMOS

© 2022 г. В. П. Решетников<sup>1,2\*</sup>, А. А. Марчук<sup>1,2</sup>,  
И. В. Чугунов<sup>1,2</sup>, П. А. Усачев<sup>1,2</sup>, А. В. Мосенков<sup>3,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Университет Бригама Янга, США

Поступила в редакцию 30.09.2022 г.

После доработки 31.11.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Выполнено исследование угла закрутки ( $\psi$ ) спиральных ветвей галактик в поле COSMOS Космического телескопа Хаббл. Выборка состоит из 102 видимых плашмя галактик с двухрукавным узором, находящихся на среднем красном смещении  $\langle z \rangle \approx 0.5$ . Показано, что типичные значения  $\psi$  у ветвей далеких галактик близки к значениям для близких спиральных галактик. В пределах одной галактики разброс значений  $\psi$  для разных ветвей составляет, в среднем, половину среднего угла закрутки. В диапазоне  $z$  от 1 до 0 обнаружена тенденция к уменьшению значения  $\psi$ . Анализ распределений угла  $\psi$  у галактик на разных красных смещениях не противоречит предположению, что у большинства галактик при  $z \leq 0.5$  спиральные ветви имеют приливное происхождение или они возникли за счет транзитных рекуррентных неустойчивостей в их дисках.

*Ключевые слова:* галактики, фотометрия, эволюция.

DOI: 10.31857/S0320010822110122

### ВВЕДЕНИЕ

Спиральные ветви являются наиболее заметной особенностью у большинства ярких галактик в окружающей нас части Вселенной. Так, в локальной Вселенной доля таких галактик составляет  $\sim 75\%$  от всех галактик ярче абсолютной звездной величины  $-20^m$  в полосе  $B$  (Конселис, 2006). Исследованию спирального узора галактик посвящено огромное количество работ (см. недавний обзор Селлвуда и Мастерс, 2022), однако многие вопросы, связанные с формированием и поддержанием существования спиральных ветвей, а также с их наблюдательными проявлениями остаются плохо изученными. Важность изучения этих вопросов обусловлена тем значимым влиянием, которое спиральный узор оказывает на глобальные процессы в галактике, например, на перераспределение углового момента в диске (Селлвуд и Бинни, 2002), его устойчивость (Иноуэ и др., 2021), темп звездообразования (Керехета и др., 2021), химическую эволюцию (Скарано, Лепин, 2013) и т.д.

Исследования спирального узора далеких галактик пока немногочисленны. Известно, что знакомые по близкой Вселенной типы спиральной

структуры (grand-design, флоккулентные, множественные ветви) уже присутствовали на  $z \geq 1$  (Элмегрин, Элмегрин, 2014). Пространственная плотность спиральных галактик падает с ростом  $z$  (между  $z = 0.5$  и  $z = 2.5$  она уменьшается примерно на порядок — Маргалев-Бентабол и др., 2022), однако объекты с крупномасштабным спиральным узором встречаются даже на  $z \approx 3$  (Ву и др., 2022).

Основной целью нашей работы является исследование углов закрутки у сотни двухрукавных спиральных галактик вплоть до красного смещения  $z \sim 1$ .

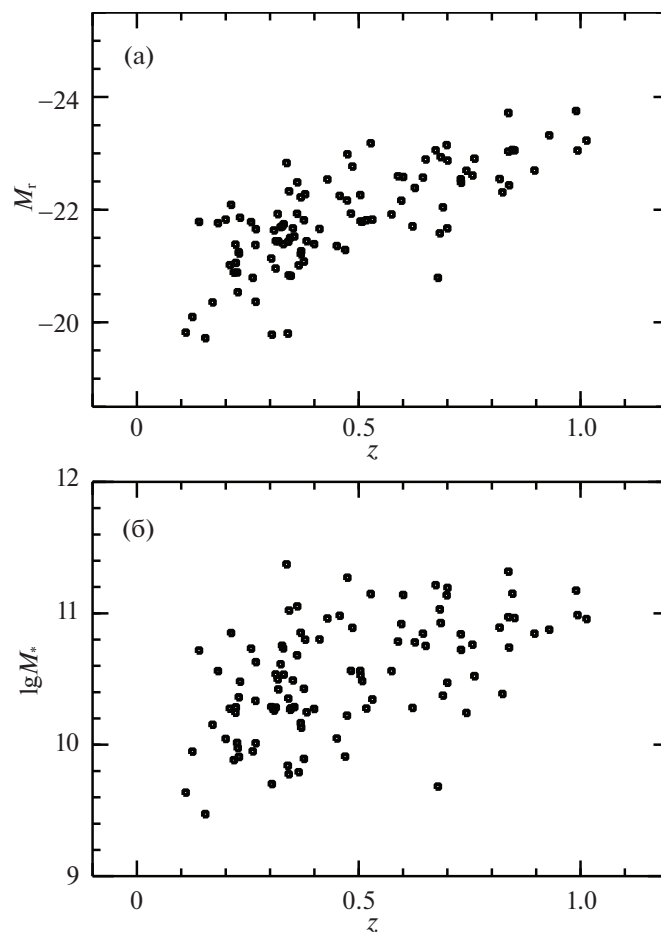
Все числовые величины в статье приведены для космологической модели с постоянной Хаббла  $70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  и  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ .

### ВЫБОРКА ГАЛАКТИК

Для изучения структуры далеких спиральных галактик мы рассмотрели поле COSMOS Космического телескопа Хаббл (Коекмоер и др., 2007). Изображение этого поля, имеющего площадь почти  $2 \square^\circ$ , было получено в фильтре F814W с помощью камеры ACS. Для отбора объектов в COSMOS мы использовали выборку из 26 113

\* Электронный адрес: v.reshetnikov@spbu.ru





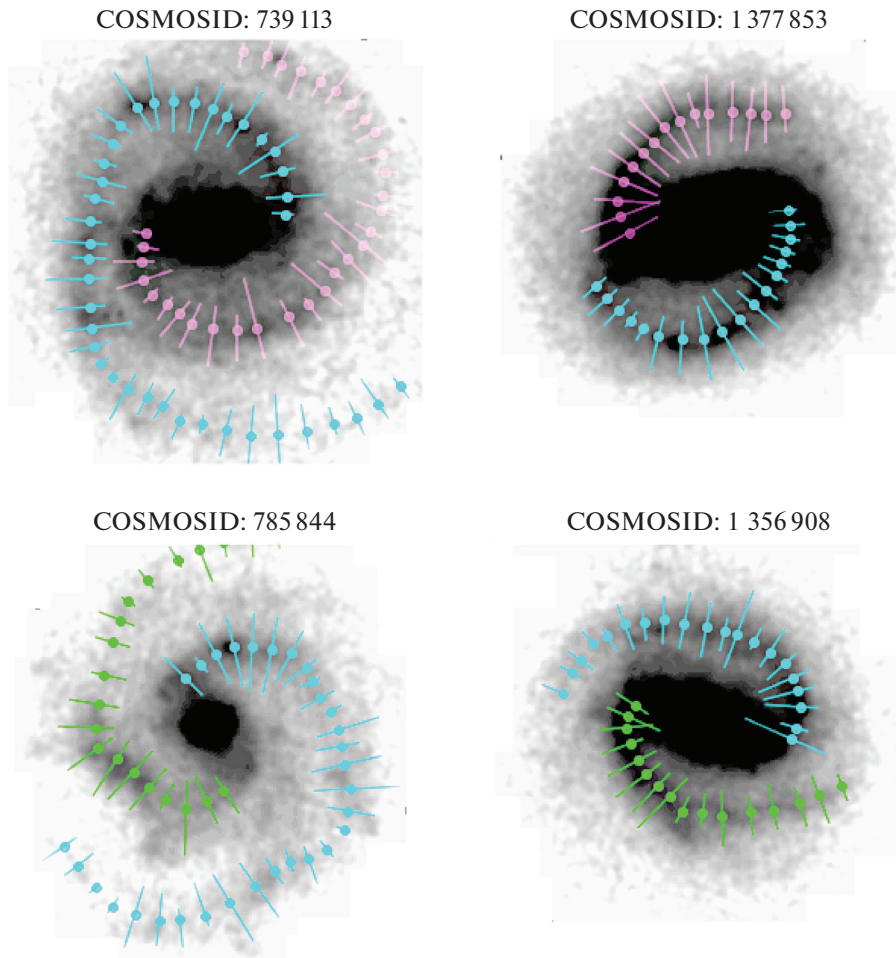
**Рис. 1.** Зависимость абсолютной звездной величины спиральных галактик в фильтре  $r$  (а) и их звездной массы (б) от красного смещения.

ярких ( $F814W < 22^m5$ ) галактик в этом поле, представленную в работе Мандельбаум и др. (2012). Для всех объектов выборки с помощью пакета SExtractor (Бертин, Арно, 1996) были определены видимые сжатия ( $b/a$ ) и отобраны 7441 галактика с  $b/a \geq 0.7$ . Далее был выполнен визуальный просмотр изображений галактик, и сформирована выборка из 184 видимых практически плашмя спиральных галактик с хорошо различимыми спиральными ветвями. В ходе последующего анализа в окончательной выборке были оставлены 102 галактики с выраженным двухрукавным спиральным узором. Дальнейшая работа по анализу спиральных ветвей галактик (см. следующий раздел статьи) проводилась по представленным в работе Мандельбаум и др. (2012) редуцированным и приведенным к масштабу  $0''.03/\text{пиксел}$  изображениям галактик.

Галактики выборки были отождествлены с каталогом COSMOS2020 (Вивер и др., 2022). Для каждого объекта из COSMOS2020 были взяты найденные с помощью программы LePhare (Илберт и др., 2006) фотометрические красные сме-

щения (их точность составляет  $\sim 1\%$ ), абсолютные звездные величины в фильтре  $r$  (Subaru HSC) и оценки массы звезд в солнечных массах ( $M_*$ ). На рис. 1а,б показано положение галактик на плоскостях абсолютная звездная величина ( $M_r$ ) — красное смещение ( $z$ ) и звездная масса галактики —  $z$ . На рисунках видно, что в нашу выборку попали галактики вплоть до  $z \approx 1$  (среднее красное смещение выборки  $\langle z \rangle = 0.47 \pm 0.23$ ), причем галактики являются в среднем яркими  $\langle M_r \rangle = -21^m85 \pm 0^m88$  и массивными  $\langle \lg M_* \rangle = 10.52 \pm 0.43$ . На рис. 1а,б также хорошо видна наблюдательная селекция — светимость и масса попавших в выборку объектов растут с увеличением  $z$ . Если ограничиться только наиболее массивными галактиками с  $\lg M_* \geq 10.5$  ( $M_* \geq 3 \times 10^{10} M_\odot$ ), то такие объекты выделяются во всем диапазоне  $z$ , и соответствующая подвыборка является относительно полной.

Как было указано выше, в выборку были включены галактики с  $b/a \geq 0.7$ , которые по визуальной оценке ориентированы практически плашмя. Среднее видимое сжатие объектов в окончательной выборке оказалось равным  $\langle b/a \rangle = 0.87 \pm 0.065$ .



**Рис. 2.** Примеры галактик из выборки с промеренными спиральями. Точками отмечены положения пиков яркости, отрезки соответствуют полуширине спиралей.

В дальнейшем анализе поправка за возможный наклон плоскости диска не учитывалась, и галактики принимались видимыми точно “плашмя”.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ

Процедура измерения характеристик спирального узора аналогична методике из работы Савченко и др. (2020), и кратко описана ниже. Для каждой галактики мы размечаем индивидуальные спиральные рукава, начиная от концов бара или центральных областей и вплоть до внешних областей, где спираль еще видна над уровнем фона. Все спирали должны быть хорошо различимы и не должны содержать ветвлений и самопересечений. Затем по специальному алгоритму в каждой точке рукава строится срез, перпендикулярный направлению спирали, и протянутый между минимумами межрукавного пространства. Каждый срез аппроксимируется аналитически асимметричной гауссо-

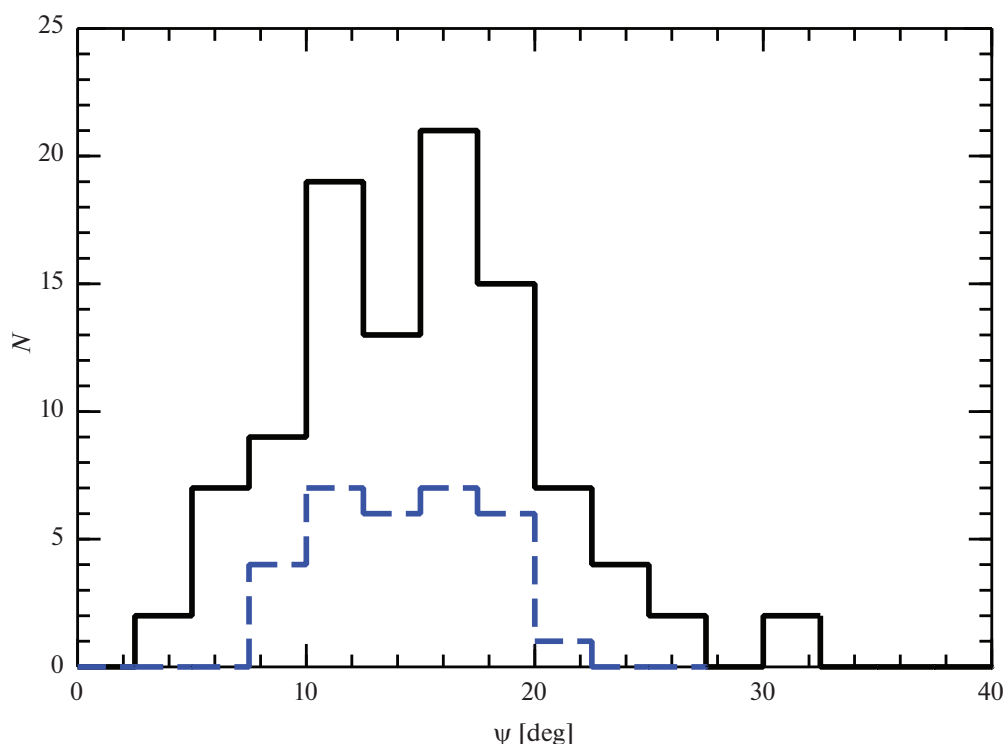
вой функцией, имеющей вид

$$I(r) = I_0 \exp \left[ -\frac{(r - r_{\text{peak}})^2}{W_1^2 s + W_2^2 (1 - s)} \right], \quad (1)$$

где  $I_0$  обозначает центральный поток,  $W_{1,2}$  — внутренняя и внешняя полуширины,  $r$  — расстояние вдоль среза,  $r_{\text{peak}}$  обозначает положение пика яркости, параметр  $s$  равен 0 если  $r \leq r_{\text{peak}}$ , иначе 1 (см. рис. 5 в работе Савченко и др., 2020). Производится свертка получившегося профиля с соответствующим профилем PSF F814W для учета влияния оптической системы на изображения.

После того, как аппроксимация произведена для всех срезов, мы имеем полностью промеренную модель рукава. Примеры получившейся разметки после аппроксимации для 4 галактик приведены на рис. 2. Положения пиков  $r_{\text{peak}}$  отмечены точками, а размер отрезка соответствует полученным полуширинам.

Угол закрутки  $\psi$  оценивается на основе полученных срезов поперек спирального рукава. Для



**Рис. 3.** Распределение галактик из поля COSMOS по средним углам закрутки (сплошная линия); соответствующее распределение для галактик из трех глубоких полей Космического телескопа Хаббл изображено штриховой линией (Савченко, Решетников, 2011).

этого координаты положения пиков вдоль спирали наносятся на плоскость  $\log r \div \varphi$ , где  $\varphi$  — это полярный угол, и затем находится линейная регрессия. Угол наклона линейной зависимости равен искомому углу закрутки  $\psi$ , а среднев квадратическое отклонение от прямой дает оценку ошибки определения угла закрутки  $\sigma_\psi$ . В итоге у 99 галактик выборки были найдены углы закрутки для обеих спиральных ветвей, у трех галактик измерения удалось выполнить лишь для одной из ветвей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Углы закрутки

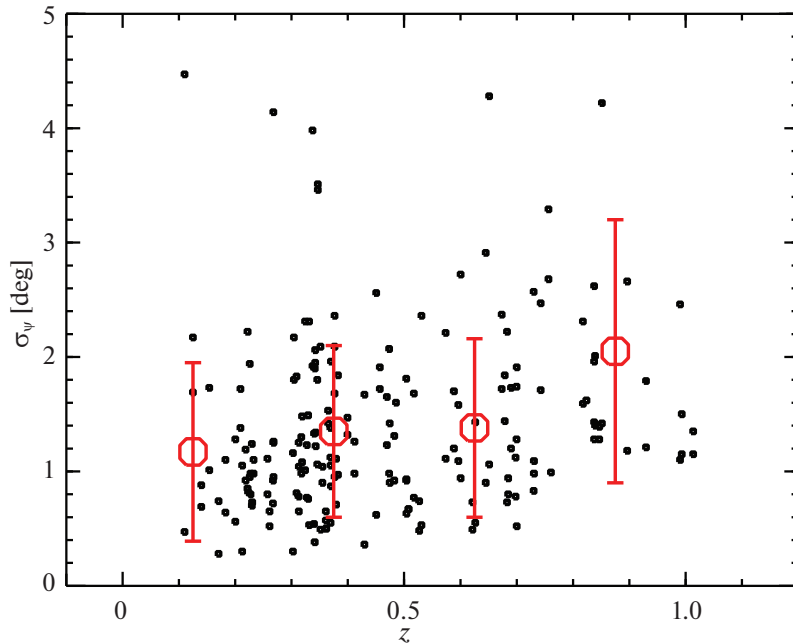
На рис. 3 показано распределение усредненных по двум ветвям углов закрутки для 99 галактик выборки, у которых есть измерения для обеих ветвей. Для сравнения на этом же рисунке изображено распределение для 31 галактики из трех глубоких полей Космического телескопа Хаббл (HDF-N, HDF-S, HUDF) из работы Савченко и Решетникова (2011). Галактики из статьи Савченко и Решетникова (2011) находятся на среднем красном смещении  $\langle z \rangle = 0.69 \pm 0.30$ , и их углы закрутки, найденные на основе Фурье-анализа изображений, измерены в фильтре F606W. Как видно на рис. 3, распределения для двух выборок далеких галактик, у которых углы закрутки определены разными

методами, хорошо согласуются. Так, среднее значение угла закрутки для двухрукавных спиральных галактик из поля COSMOS составляет  $\langle \psi \rangle = 14^\circ 85 \pm 5^\circ 51$ , для галактик из работы Савченко и Решетникова (2011)  $\langle \psi \rangle = 14^\circ 1 \pm 3^\circ 5$ . Если рассмотреть все измеренные ветви в COSMOS по отдельности, то для них среднее значение составляет  $\langle \psi \rangle = 15^\circ 02 \pm 7^\circ 05$  (201 спиральная ветвь).

Сравним приведенные выше средние значения  $\psi$  с данными для близких галактик.

Например,  
 $\langle \psi \rangle = 15^\circ 2 \pm 3^\circ 7$  (50 grand-design галактик, фильтр  $g$ ; Савченко, Решетников, 2013),  
 $\langle \psi \rangle = 18^\circ 3 \pm 7^\circ 5$  (79 галактик, фильтр  $r$ ; Ю, Хо, 2019),  
 $\langle \psi \rangle = 14^\circ 8 \pm 5^\circ 3$  (155 галактик, фильтр  $r$ ; Савченко и др., 2020).

У 75 близких grand-design спиральных галактик из работы Диаз-Гарсия и др. (2019) угол закрутки показывает зависимость от морфологического типа — он меняется от  $13^\circ 6 \pm 1^\circ 6$  (S0/a–Sab) до  $19^\circ 7 \pm 2^\circ 5$  (Scd–Sdm) (измерения проведены на длине волны 3.6 мкм). Сходная зависимость от типа прослеживается и в других работах (например, Савченко и др., 2020). В большой выборке объектов (4378 галактик, фильтр  $r$ ; Ю, Хо, 2020) угол закрутки варьируется от  $\sim 10^\circ$  для галактик



**Рис. 4.** Зависимость среднеквадратического отклонения угла закрутки спиральной ветви от красного смещения галактики. Кружки с барами — средние значения в бинах по  $z$  0–0.25, 0.25–0.5, 0.5–0.75 и 0.75–1.0.

типа Sa до  $\sim 30^\circ$  для Sd (см. рис. 10 в статье Ю, Хо, 2020).

Таким образом, типичные значения углов закрутки у галактик на  $z \sim 0.5-1$  близки к значениям для галактик в окружающей части Вселенной.

#### Разброс угла закрутки

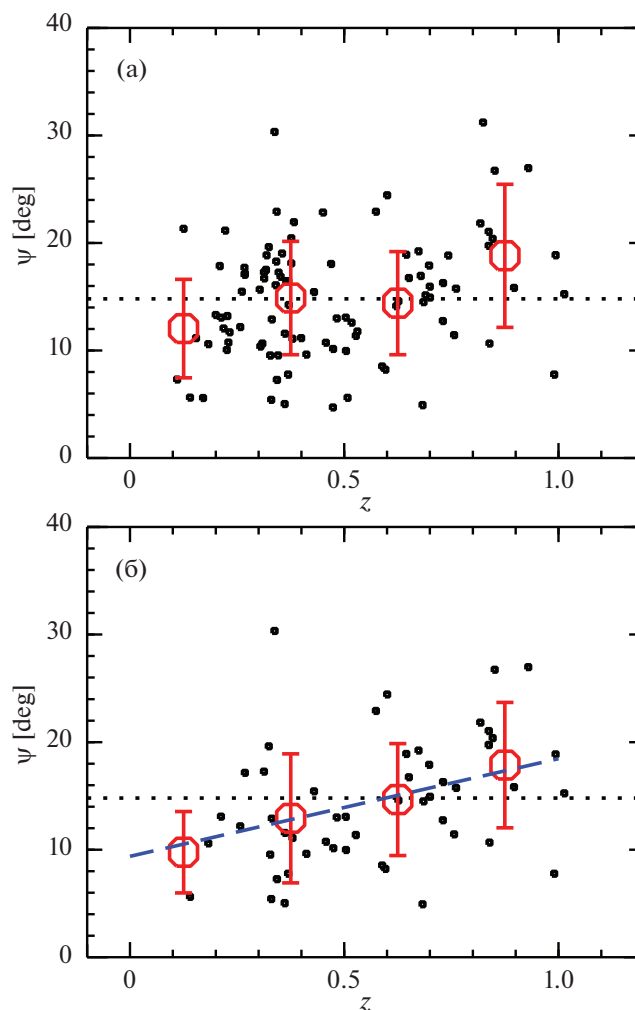
В пределах одной галактики спиральные ветви показывают довольно большой разброс значений угла закрутки. Среднее значение разности величин  $\psi$  для двух спиральных ветвей объектов нашей выборки составляет  $\Delta\psi = |\psi_1 - \psi_2| = 6^\circ 3 \pm 5^\circ 3$ . Средняя относительная вариация угла закрутки  $\Delta\psi / \langle \psi \rangle = 0.48 \pm 0.41$ . Таким образом, типичный разброс значений  $\psi$  для разных ветвей в пределах одной галактики достигает половины величины среднего угла закрутки. Радиальные вариации  $\psi$  в пределах одной и той же ветви могут достигать сравнимых значений (Савченко и др., 2020).

На рис. 4 для всех измеренных спиральных ветвей изображена зависимость ошибки определения угла закрутки ( $\sigma_\psi$ ) от красного смещения галактики. Разброс точек на рисунке очень большой, но прослеживается определенная тенденция к росту значений  $\sigma_\psi$  с увеличением  $z$ . Это может означать как влияние наблюдательной селекции (сложность измерений у более далеких галактик), так и большую иррегулярность, “комковатость” (clumpiness) ветвей у далеких галактик (Элмегрин и др., 2007).

#### Эволюция угла закрутки?

Изменение значений средних углов закрутки спиральных ветвей галактик с красным смещением изображено на рис. 5а,б. Несмотря на большой разброс наблюдательных точек, на рис. 5а заметен слабый тренд  $\psi$  с  $z$ . Если же рассмотреть менее искаженную наблюдательной селекцией подвыборку массивных спиральных галактик с  $\lg M_* \geq 10.5$  (рис. 5б), то этот тренд становится более выраженным: от  $z = 1$  к  $z = 0$  наблюдаемые углы закрутки уменьшаются, т.е. спиральные ветви становятся в среднем, закрученными более туго. (Статистически связь между  $\psi$  и  $z$  на рис. 5б является умеренной (ее коэффициент ранговой корреляции Спирмена равен 0.38), но значимой на уровне  $>99\%$ .) Показанная на рис. 5б линейная зависимость соответствует темпу закручивания  $\sim 1^\circ$ /млрд лет.

Возможной причиной существования наблюдаемого тренда между  $\psi$  и  $z$  может являться влияние  $k$ -поправки, т.е. того, что при переходе к более далеким галактикам мы видим их изображения во все более коротковолновом диапазоне. Если угол закрутки ветвей зависит от длины волны ( $\lambda$ ) таким образом, что значения  $\psi$  увеличиваются с уменьшением  $\lambda$ , это могло хотя бы частично объяснить рис. 5. Как сказано выше, наши измерения были выполнены в фильтре Космического телескопа Хаббл ACS/F814W с эффективной длиной волны  $\lambda_{\text{eff}} \approx 8000 \text{ \AA}$ , т.е. примерно в полосе  $I$ . При наблюдениях объектов на  $z = 1$  этот фильтр будет

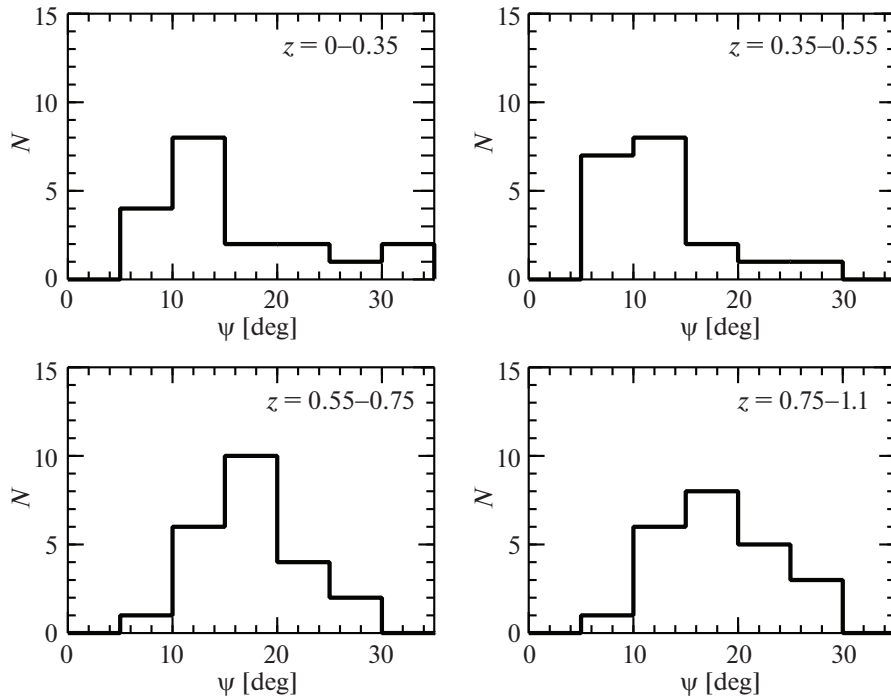


**Рис. 5.** Зависимость среднего угла закрутки спирального узора от красного смещения галактики: (а) вся выборка, (б) галактики с  $\lg M_* \geq 10.5$ . Кружки с барами на обоих рисунках — средние значения в бинах по  $z$  0–0.25, 0.25–0.5, 0.5–0.75 и 0.75–1.0. Горизонтальными линиями из точек показано среднее значение  $\psi$  для всей выборки, штриховая линия — линейная регрессия для массивных спиральных галактик.

приближенно соответствовать фильтру  $B$ . Непосредственное сравнение углов закрутки близких галактик, найденных в голубых фильтрах ( $B$ ,  $g$ ) и в ближнем ИК диапазоне, не показало значимых различий (см., например, Сейгар и др., 2006; Дэвис и др., 2012; Савченко и др., 2020). Кроме того, есть указания на то, что угол закрутки спиральных ветвей может уменьшаться при переходе от “красных” к “голубым” фильтрам (Ю, Хо, 2018). Если это так, то это даже усиливает значимость наблюдательного тренда на рис. 5. Еще одной причиной может являться наблюдательная селекция при отборе объектов — среди более далеких галактик из-за худшего пространственного разрешения выше вероятность пропустить галактики с туго закрученными спиральными ветвями. Оба этих эффекта — влияние  $k$ -поправки и наблюдательной селекции — нуждаются в дальнейшем изучении.

Стоит также отметить, что в ходе эволюции спиральных галактик от  $z \sim 1$  к  $z \sim 0$  увеличивается светимость балджей и их вклад в полную светимость галактик возрастает (см., например, Сачдева и др., 2017). С другой стороны, в ряде работ было отмечено, что у галактик с более яркими балджами и с более высокой концентрацией светимости к центру значения  $\psi$ , в среднем, меньше, чем у галактик с более слабыми балджами и с меньшей концентрацией (см., например, Савченко, Решетников, 2013; Ю, Хо, 2020). Таким образом, изменение угла закрутки с  $z$  хотя бы отчасти может быть следствием эволюции глобальной структуры галактик.

Разные модели генерации и поддержания спиральной структуры предсказывают разное поведение угла закрутки в зависимости от времени. Например, в моделях, в которых ветви возникают за



**Рис. 6.** Распределения углов закрутки  $\psi$  спиральных ветвей массивных галактик выборки ( $\lg M_* \geq 10.5$ ) в разных интервалах красных смещений.

счет приливного возмущения и/или транзитных спиральных неустойчивостей в самогравитирующем диске, угол  $\psi$  может уменьшаться со временем (см. обзор Доббс, Баба, 2014). В то же время в теории волн плотности (Лин, Шу, 1964) спиральный узор является квазистационарным с неизменным углом закрутки.

Для транзитных и рекуррентных спиральных ветвей недавно был предложен простой наблюдательный тест (Прингл, Доббс, 2019). Пусть спиральная ветвь при формировании имеет угол закрутки  $\psi_{\max}$ , затем ветвь постепенно закручивается и, наконец, исчезает при некотором минимальном значении  $\psi_{\min}$ . Тогда на основе простых соображений можно получить, что котангенс угла закрутки меняется линейно со временем:  $\text{ctg } \psi \propto t$ . Следовательно, если в произвольный момент времени мы рассмотрим случайную выборку галактик, спиральные ветви в которых находятся на разных стадиях закручивания, можно ожидать, что галактики будут распределены однородно по  $\text{ctg } \psi$  в интервале от  $\text{ctg } \psi_{\min}$  до  $\text{ctg } \psi_{\max}$ . Применение этого теста для двух выборок близких галактик в первом приближении подтвердило однородность распределения значений  $\text{ctg } \psi$  (Прингл, Доббс, 2019; Лингард и др., 2021).

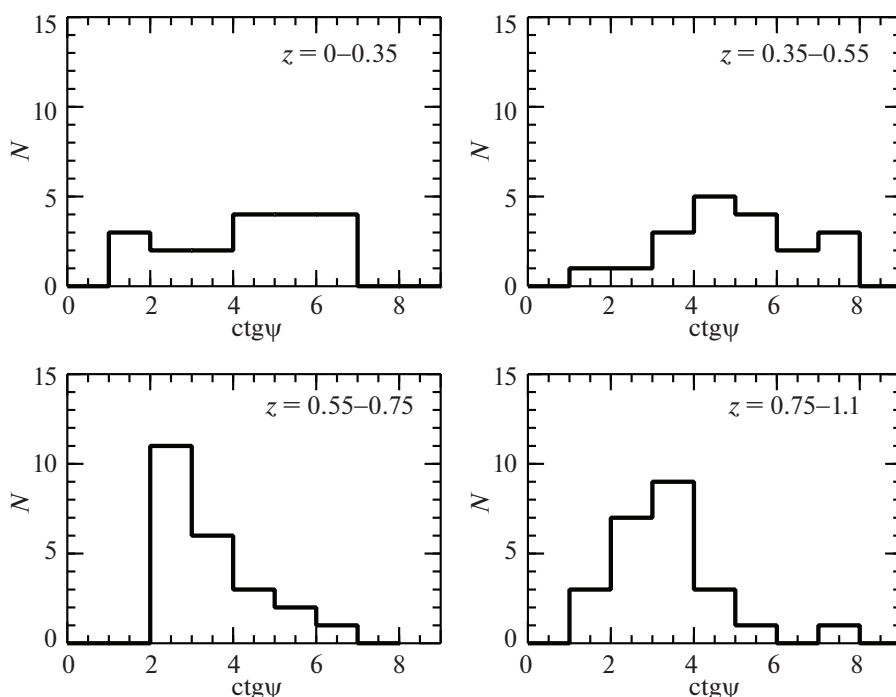
Рассмотрим, как распределены по значениям  $\text{ctg } \psi$  далекие галактики в поле COSMOS. Мы взяли относительно полную подвыборку галактик с

$\lg M_* \geq 10.5$ , для которых есть измерения  $\psi$  для 85 индивидуальных спиральных ветвей. На рис. 6 и 7 в четырех интервалах  $z$  приведены распределения галактик по  $\psi$  и по  $\text{ctg } \psi$ . (Величины интервалов были подобраны так, чтобы в них попадало примерно одинаковое число галактик.) Показанные на рис. 6 распределения в первом приближении неоднородны, и их средние значения смещаются в сторону меньших значений  $\psi$  с уменьшением красного смещения. При переходе к  $\text{ctg } \psi$  вид распределений меняется (рис. 7) — в первых двух интервалах красных смещений распределения близки к однородным (конечно, в пределах скудной статистики), что согласуется с результатами недавних работ, в которых изучались близкие галактики (Прингл, Доббс, 2019; Лингард и др., 2021). При  $z > 0.5$  распределения демонстрируют глобальные пики при  $\text{ctg } \psi \approx 3$  ( $\psi \approx 18^\circ$ ). Изменение вида распределений с красным смещением может означать, что в разные эпохи могли преобладать разные механизмы генерации спирального узора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нашей работе была впервые детально рассмотрена форма спиральных ветвей у двухрукавных галактик в поле COSMOS Космического телескопа Хаббл.

Мы нашли, что характерные значения угла закрутки спирального узора вплоть до  $z \sim 1$  —  $\langle \psi \rangle \approx 15^\circ$  близки к значениям для близких галактик.



**Рис. 7.** Распределения значений  $\text{ctg}\psi$  спиральных ветвей массивных галактик выборки ( $\lg M_* \geq 10.5$ ) в разных интервалах красных смещений.

В пределах одной галактики разные спиральные ветви демонстрируют сильно различающиеся значения угла закрутки. Для индивидуальных ветвей ошибка определения  $\psi$  увеличивается с  $z$ , что может быть следствием их растущей иррегулярности.

Обнаружен наблюдательный тренд, свидетельствующий о постепенном уменьшении значений  $\psi$  с уменьшением  $z$  (рис. 5). Этот тренд соответствует средней скорости закручивания  $\sim 1^\circ$ /млрд лет.

Анализ распределений величины  $\text{ctg}\psi$  (тест Прингла–Доббс) массивных галактик ( $\lg M_* \geq 10.5$ ) для разных интервалов красных смещений не противоречит тому, что при  $z \leq 0.5$  основными механизмами генерации спиральных ветвей могли быть приливные возмущения и транзитные неустойчивости в их дисках. Применение этого теста для больших выборок спиральных галактик на разных красных смещениях может стать полезным инструментом для изучения эволюции спирального узора.

Отметим, что полученные нами результаты основаны на относительно небольшой выборке объектов, и они нуждаются в подтверждении на гораздо большем материале. Сочетание данных по глубоким полям космических телескопов HST и JWST с развитием компьютерных методов анализа изображений вскоре даст возможность исследовать затронутые в нашей статье вопросы гораздо более детально.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-22-00483).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бертин, Арно (E. Bertin and S. Arnouts), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **117**, 393 (1996).
2. Вивер и др. (J.R. Weaver, O.B. Kauffmann, O. Ilbert, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **258**, id.11 (2022).
3. Ву и др. (Y. Wu, Z. Cai, F. Sun, et al.), *Astrophys. J.*, submitted (arXiv:2208.08473) (2022).
4. Диаз-Гарсия и др. (S. Diaz-Garcia, H. Salo, J.H. Knapen, and M. Herrera-Endoqui), *Astron. Astrophys.* **631**, A94 (2019).
5. Доббс, Баба (C. Dobbs and J. Baba), *Publ. Astron. Soc. Austr.* **31**, e035 (2014).
6. Дэвис и др. (B.L. Davis, J.C. Berrier, D.W. Shields, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **199**, id. 33 (2012).
7. Илберт и др. (O. Ilbert, S. Arnouts, H.J. McCracken, et al.), *Astron. Astrophys.* **457**, 841 (2006).
8. Иноуэ и др. (S. Inoue, T. Takagi, A. Miyazaki, et al.), *MNRAS* **506**, 84 (2021).
9. Конселис (C.J. Conselice), *MNRAS* **373**, 1389 (2006).
10. Керехета и др. (M. Querejeta, E. Schinnerer, S. Meidt, J. Sun, A.K. Leroy, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A133 (2021).
11. Коекмоер и др. (A.M. Koekemoer, H. Aussel, D. Calzetti, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 196 (2007).
12. Лин, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).

13. Лингард и др. (T. Lingard, K.L. Masters, C. Krawczyk, et al.), *MNRAS* **504**, 3364 (2021).
14. Мандельбаум и др. (R. Mandelbaum, Ch.M. Hirata, A. Leauthaud, R.J. Massey, and J. Rhodes), *MNRAS* **420**, 1518 (2012).
15. Маргалёф-Бентабол и др. (B. Margalef-Bentabol, Ch.J. Conselice, B. Haussler, et al.), *MNRAS* **511**, 1502 (2022).
16. Прингл, Доббс (J.E. Pringle and C.L. Dobbs), *MNRAS* **490**, 1470 (2019).
17. Савченко С.С., Решетников В.П., Письма в Астрон. журн. **37**, 883 (2011) [S.S. Savchenko, V.P. Reshetnikov, *Astron. Lett.* **37**, 817 (2011)].
18. Савченко, Решетников (S.S. Savchenko and V.P. Reshetnikov), *MNRAS* **436**, 1074 (2013).
19. Савченко и др. (S. Savchenko, A. Marchuk, A. Mosenkov, and K. Grishunin), *MNRAS* **493**, 390 (2020).
20. Сачдева и др. (S. Sachdeva, K. Saha, and N.P. Singh), *Astrophys. J.* **840**, 79 (2017).
21. Сейгар и др. (M.S. Seigar, J.S. Bullock, A.J. Barth, and L.C. Ho), *Astrophys. J.* **645**, 1012 (2006).
22. Селлвуд, Мастерс (J.A. Sellwood and K.L. Masters), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **60**, 73 (2022).
23. Селлвуд, Бинни (J.A. Sellwood and J.J. Binney), *MNRAS Astrophys.* **336**, 785 (2002).
24. Скарано, Лепин (S. Scarano and J.R.D. Lépine), *MNRAS* **428**, 625 (2013).
25. Элмергин и др. (D.M. Elmegreen, B.G. Elmegreen, T. Ferguson, B. Mullan), *Astrophys. J.* **663**, 734 (2007).
26. Элмергин, Элмергин (D.M. Elmegreen and B.G. Elmegreen), *Astrophys. J.* **781**, 11 (2014).
27. Ю, Хо (Si-Yue Yu and L.C. Ho), *Astrophys. J.* **869**, id.29 (2018).
28. Ю, Хо (Si-Yue Yu and L.C. Ho), *Astrophys. J.* **871**, id.194 (2019).
29. Ю, Хо (Si-Yue Yu and L.C. Ho), *Astrophys. J.* **900**, id.150 (2020).



# ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ИСТОЧНИКОВ СРГ/еРОЗИТА НА ПРИМЕРЕ ГЛУБОКОГО ОБЗОРА ОБЛАСТИ ДЫРЫ ЛОКМАНА

© 2022 г. С. Д. Быков<sup>1,2\*</sup>, М. И. Бельведерский<sup>3,4</sup>, М. Р. Гильфанов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Казанский университет, Казань, Россия

<sup>2</sup>Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия

<sup>3</sup>Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

<sup>4</sup>Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 21.10.2022 г.

После доработки 21.10.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Представлен метод оптического отождествления источников, детектируемых в широкоугольных рентгеновских обзорах неба. Для этой цели была создана и обучена нейросетевая модель для характеристики фотометрических признаков популяций оптических компаньонов рентгеновских источников и оптических объектов поля. Результат обработки фотометрической информации используется для вероятностного отождествления рентгеновских источников с источниками оптического обзора DESI LIS. Эффективность метода проиллюстрирована на примере глубокого обзора области Дыры Локмана телескопом еРОЗИТА обсерватории СРГ. Для оценки точности модели создана валидационная выборка на основе каталогов рентгеновских источников спутников Chandra и XMM-Newton. Точность отождествления в нашем методе достигает 94% по всему рентгеновскому каталогу области Дыры Локмана и 97% для источников с потоком  $F_{x, 0.5-2} > 10^{-14}$  эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Обсуждается дальнейшее развитие модели отождествления и шаги, необходимые для применения ее к данным всего обзора неба СРГ/еРОЗИТА.

*Ключевые слова:* рентгеновские источники, внегалактические источники, Дыра Локмана.

DOI: 10.31857/S0320010822110055

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Орбитальная рентгеновская обсерватория СРГ (Сюняев и др., 2021) была запущена в июле 2019 г., и в декабре того же года начала обзор всего неба. На борту обсерватории находится два инструмента: телескоп СРГ/еРОЗИТА (Предел и др., 2021), работающий в диапазоне 0.3–9.0 кэВ, и телескоп СРГ/ART-XC им. М.Н. Павлинского (Павлинский и др., 2021), работающий в диапазоне 6–30 кэВ. Ожидается, что по итогам четырехлетнего обзора неба телескоп СРГ/еРОЗИТА откроет порядка трех миллионов активных ядер галактик, около ста тысяч скоплений и групп галактик, а также множество рентгеновски-ярких звезд и галактик (Прокопенко и Гильфанов, 2009; Мерлони и др., 2012; Пиллепич и др., 2012; Колодзиг и др., 2013a,b).

Для полноценного использования результатов рентгеновского обзора неба необходимо определить свойства объектов не только в рентгеновском, но и в других диапазонах электромагнитного спектра. Прежде всего речь идет об определении типа объекта и расстояния до него. Проблема решается через сопоставление источников рентгеновского излучения с известными объектами в оптическом (преимущественно) и других диапазонах спектра. Такая задача носит названия кросс-отождествления (Сазерленд и Сандерс, 1992; Будавери и Лоредо, 2015; Пино и др., 2017). В настоящей работе мы рассматриваем задачу поиска оптических компаньонов рентгеновских источников. В дальнейшем рентгеновские источники мы будем называть “источники”, а кандидаты в оптические компаньоны — “объекты”. Особенностью задачи оптического отождествления является то, что ошибка положения рентгеновских источников примерно на порядок больше, чем ошибка положения оптических объектов. Кроме того, из-за высо-

\* Электронный адрес: sergei.d.bykov@gmail.com

кой плотности оптических объектов часто в “круге ошибок” положения рентгеновского источника находится несколько кандидатов в его оптические компаньоны. При этом часто сложно определить, какой из оптических объектов является настоящим компаньоном (или что компаньона нет вообще). Чтобы разрешить данную задачу, необходимо привлекать дополнительные данные, например, звездные величины или цвета объектов. Решению такой задачи на примере данных SRG/eROZITA посвящена эта статья.

Один из ранних подходов к учету дополнительной информации был продемонстрирован в работе Сазерленд и Сандерс (1992) с использованием метода отношений правдоподобия (MLR-метод). Метод берет в расчет положения источников в сравниваемых каталогах (включая ошибки), их число на единицу площади неба и распределение по звездной величине. Впоследствии метод был развит в работах Будавари и Сзалай (2008); Нэйлор и др. (2013); Будавари и Лоредо (2015); Пино и др. (2017); Сальвато и др. (2018) с обобщением на вариант кросс-корреляции более чем двух каталогов, а так же построением вероятностной (байесовой) модели для учета не только звездной величины, но и набора измерений любого вида.

История применения различных методов поиска компаньонов к рентгеновским обзорам (преимущественно телескопов Chandra и XMM-Newton) обширна (Бруса и др., 2007; Луо и др., 2010; Нэйлор и др., 2013; Марчеси и др., 2016; Ананна и др., 2017; Луо и др., 2017; Пино и др., 2017; Сальвато и др., 2018; Чен и др., 2018; Бельведерский и др., 2022; Сальвато и др., 2022). В широком смысле разные методы используют похожие подходы к задаче отождествления. На первом шаге вычисляются распределения звездных величин (и иногда так же цветов или других признаков) для оптических компаньонов и объектов поля, а на втором шаге эта информация комбинируется с информацией о взаимном положении источников из разных каталогов и их позиционных ошибках. Достижимая точность отождествления зависит от конкретного метода учета фотометрической информации и от качества рентгеновских и оптических каталогов, их глубины и позиционной точности. Целью настоящей работы является решение задачи оптического отождествления рентгеновских источников для параметров обзора всего неба телескопом eROZITA обсерватории SRG (см. также Бельведерский и др., 2022). В работе излагается метод отождествления, его применение к данным глубокого обзора области Дыры Локмана, а также оценивается точность предложенного метода с помощью валидационной выборки. Основной целью работы являются представление и валидация

метода отождествления рентгеновских источников SRG/eROZITA. Характеристики рентгеновских наблюдений, каталог источников и результаты их оптического отождествления и классификации приведены в сопутствующих статьях серии публикаций, посвященных глубокому обзору Дыры Локмана телескопом SRG/eROZITA (Гильфанов и др. 2022, в подготовке; Бельведерский и др. 2022, в подготовке).

Статья построена следующим образом. В разделе 2 описываются используемые данные, в разделе 3 описываются построение модели отождествления и создание обучающей и валидационной выборки объектов. В разделе 4 мы обсуждаем результаты и делаем выводы.

## 2. ДАННЫЕ

### 2.1. Рентгеновские данные

Дыра Локмана — это зона низкого межзвездного поглощения (Локман и др., 1986), которая была изучена телескопом SRG/eROZITA в рамках верификационной фазы наблюдений телескопов обсерватории SRG осенью 2019 г. Глубокий обзор этой области был проведен в октябре 2019 г. Отпечаток обзора на небе имеет размер  $5^\circ \times 3.7^\circ$  с площадью порядка 18.5 кв. градусов. Глубина экспозиции составила 8 ксек на точку, чувствительность в диапазоне 0.3–2.3 кэВ составила  $\sim 3 \times 10^{-15}$  эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>. Примерные координаты центра исследованной области RA = 162°, Dec = 58°. Дальнейшие подробности наблюдений, рентгеновских данных и каталога источников приведены в работе Гильфанова и др. (2022).

Модель оптического отождествления отработывалась и тестировалась на каталоге рентгеновских источников eROZITA Дыры Локмана средней и большой яркости (Гильфанов и др., 2022). В этот каталог включены точечные источники с достоверностью детектирования, выраженной в терминах правдоподобия  $DL > 10$ , что для Гауссова распределения примерно соответствует значимости  $\approx 4\sigma$ . Рентгеновский каталог включает 6885 источников.

Для построения модели отождествления и ее валидации мы использовали данные орбитальных рентгеновских обсерваторий Chandra и XMM-Newton. Данные Chandra брались из каталога Chandra Source Catalog 2.0, CSC (Эванс и др., 2010), и данные XMM-Newton из каталога 4XMM DR10 (Вебб и др., 2020). Эти каталоги были отфильтрованы по флагам качества детектирования, для того, чтобы минимизировать

количество ложных рентгеновских источников<sup>1</sup>. Таким образом, в зоне обзора Дыры Локмана SRG/eROZITA было найдено 2029 и 1316 источников Chandra и XMM соответственно. Данные этих обсерваторий покрывают около 20% площади обзора SRG/eROZITA. Расположение источников SRG/eROZITA, Chandra и XMM-Newton в поле Дыры Локмана приведено в работе Гильфанова и др. (2022).

## 2.2. Оптические данные

В качестве каталога оптических источников, среди которых мы будем искать компаньоны источникам SRG/eROZITA, был выбран фотометрический каталог DESI Legacy Imaging Surveys (DESI LIS, Дей и др., 2019) из-за его большой глубины и площади<sup>2</sup>. Каталог составлен по данным трех телескопов: BASS (фильтры g,r), MzLS (z) и DECaLS (g,r,z). Эти три телескопа имеют разные предельные чувствительности в разных фильтрах. DECaLS предоставляет данные на  $DEC < 32^\circ$ , поэтому для области Дыры Локмана ( $DEC \approx 58^\circ$ ) и изучения фотометрических признаков мы использовали данные BASS и MzLS. Кроме того, каталог DESI LIS предоставляет данные об инфракрасных потоках в четырех фильтрах WISE, если они доступны. Все потоки были поправлены на поглощение (dereddened).

Данные DESI использовались во всем поле Локмана (со средней плотностью объектов  $\sim 58000$  источников на квадратный градус) для отождествления источников eROZITA. Для обучения фотометрической модели использованы все объекты DESI вокруг источников CSC 2.0 на небе с  $DEC > 32^\circ$  (см. п. 3.1.1).

Для всех объектов DESI мы вычислили отношение сигнал-шум для измерений во всех фильтрах (g, r, z, w1, w2, w3, w4). Если измерение в каком-нибудь фильтре имело отношение сигнал/шум меньше 3, то мы считали, что измерение в данном фильтре отсутствует.

## 3. МОДЕЛЬ

В этом разделе описаны фотометрическая модель отбора кандидатов в оптические компаньоны и ее применение к данным eROZITA. В подразделе 3.1 описывается фотометрическая

модель, а именно, в п. 3.1.1 — обучающая выборка, а в п. 3.1.2 — фотометрический классификатор. В подразделе 3.2 обсуждается валидационная выборка в Дыре Локмана, а в подразделе 3.3 — применение байесова подхода к задаче отождествления и его результаты для источников eROZITA.

### 3.1. Фотометрическая модель

В этой части мы изучаем фотометрические признаки двух популяций: 1) объекты DESI LIS, которые являются настоящими компаньонами рентгеновских источников (в данном случае — источников Chandra); объекты DESI LIS, которые не являются компаньонами рентгеновских источников — так называемые полевые источники. Такое разделение оптических объектов на два класса мотивировано тем, что источники рентгеновского излучения являются достаточно редким и специфическим типом небесных объектов, так что их оптические компаньоны обладают характеристиками, отличными от объектов поля.

Для отбора оптических объектов в первый класс мы использовали однозначные оптические компаньоны рентгеновских источников из каталога Chandra, имеющего высокую точность локализации. Процедура отбора источников с однозначными оптическими компаньонами будет описана ниже.

**3.1.1. Обучающая выборка.** Мы использовали данные CSC 2.0 на внегалактическом небе ( $|b| > 20^\circ$ ), в зоне покрытия DESI LIS, исключая область Дыры Локмана. Полученная выборка из 157958 источников Chandra была кросс-коррелирована с каталогом DESI с радиусом поиска 30 угл. сек. Таким образом, было выделено около 3 млн объектов DESI. Для каждого источника Chandra была определена локальная плотность оптических объектов  $\rho_{desi}$ , исходя из их количества в кольце 10–30 угл. сек. Чтобы контролировать частоту случайных совпадений между CSC и DESI, для каждого рентгеновского источника вычислен радиус  $r_{false}$  случайного совпадения по формуле

$$r_{false} = \sqrt{-\frac{\ln(1 - f_{lim})}{\pi \rho_{desi}}}, \quad (1)$$

где  $f_{lim}$  — вероятность найти один и более оптических объектов на расстоянии  $r < r_{false}$  от рентгеновского источника (Бельведерский и др., 2022). Величина  $r_{false}$  вычислялась в предположении однородного распределения оптических объектов с плотностью  $\rho_{desi}$ . В качестве порогового значения вероятности мы выбрали  $f_{lim} = 0.03$ . Для каждого источника из каталога Chandra также вычисляется ошибка положения  $r_{98}$ , соответствующая радиусу,

<sup>1</sup>Фильтры для CSC: `conf_flag`, `extent_flag`, `sat_src_flag`, `pileup_flag`, `dither_warning_flag` равны `false`, `likelihood`  $> 10$ . Фильтры для 4XMM DR10: `sc_sum_flag` = 0 или 1, также `sc_var_flag`, `sc_extent` и `confused` равны `false`, `sc_det_ml`  $> 10$ .

<sup>2</sup><https://www.legacysurvey.org>

в пределах которого с вероятностью 98% находится настоящее положение рентгеновского источника.

Дальнейший отбор надежных оптических компаньонов проводился следующим образом: если в пределах  $r_{\text{false}}$  от рентгеновского источника найден единственный объект DESI LIS, при этом расстояние от него до источника Chandra меньше  $r_{98}$ , то такой объект считался *надежным оптическим компаньоном источника Chandra*. Мы также оставили только надежные источники Chandra (см. п. 2.1). Таких пар Chandra-DESI нашлось 71 993.

Для отбора *надежных источников поля* мы нашли все объекты DESI в кольце 10–30 угл. сек от источника Chandra. Количество полевых объектов составило 2 135 168.

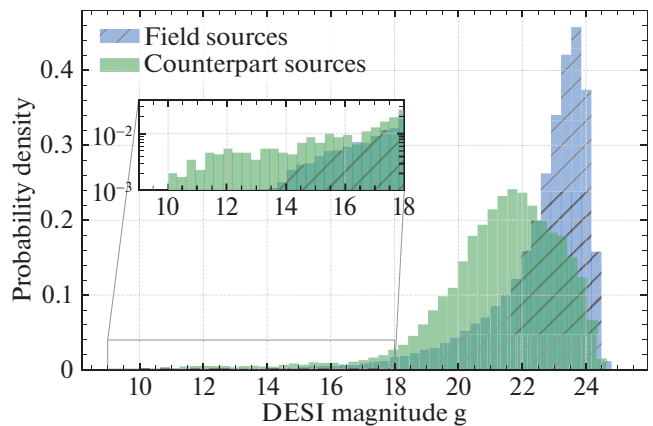
На следующем шаге мы оставили в выборке надежных компаньонов только те объекты, у которых рентгеновский поток в диапазоне 0.5–2 кэВ источника Chandra превышал  $3 \times 10^{-15}$  эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>, что соответствует порогу детектирования телескопа ePOZITA в поле Дыры Локмана. Заметим, что это важнейший шаг, поскольку обучающая и валидационная выборки должны быть эквивалентны по своим свойствам рентгеновскому каталогу, для которого будет производиться оптическое отождествление. Например, если бы мы включили в выборку надежных компаньонов все источники Chandra, то их фотометрические признаки сместились бы в сторону многочисленных тусклых источников, недоступных для СРГ/ePOZITA (Сальва-то и др., 2018).

Наконец, мы отобрали только надежные компаньоны и объекты поля, расположенные на DEC > 32° (см. п. 2.2). Из источников поля, полученных таким образом, мы случайным образом отобрали половину, так как общее количество объектов получилось большое.

В результате этой процедуры отбора размер выборки надежных компаньонов составил 12 452, а выборки надежных полевых объектов — 244 008.

На рис. 1 мы иллюстрируем распределение источников этих двух выборок по звездной величине в фильтре g. Видно, что в среднем компаньоны рентгеновских источников ярче, чем полевые источники. В отсутствие дополнительной информации, этот факт можно использовать для определения более предпочтительных оптических компаньонов источникам ePOZITA (см. обсуждение ниже).

Предельное отношение сигнал/шум в тренировочной выборке (см. п. 2.2) изменено с 3 до 4.



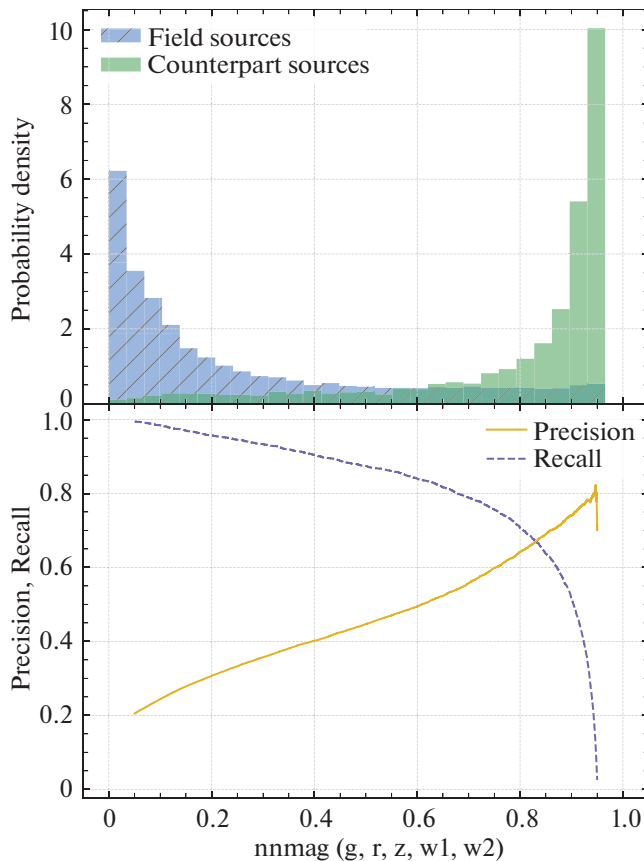
**Рис. 1.** Плотность распределения по видимой звездной величине в фильтре g объектов DESI, которые попали в выборку надежных компаньонов (зеленая гистограмма) и надежных полевых источников (голубая гистограмма со штрихами). Вставка показывает область ярких объектов в логарифмическом масштабе по оси y.

**3.1.2. Фотометрический классификатор.** Задача классификации состоит в том, чтобы по набору фотометрической информации определить, является ли источник скорее компаньоном рентгеновского источника, или скорее является полевым источником. Такие задачи эффективно решаются с применением методов машинного обучения.

В качестве признаков для модели мы использовали звездные величины g, r, z, w1, w2 и цвета g-g, r-z, g-z, z-w1, r-w2, w1-w2. Мы не использовали фильтры w3, w4, так как в области Дыры Локмана эти измерения отсутствуют у 95 и 90% источников соответственно. Кроме того, у части рентгеновских источников отсутствуют измерения в фильтрах g, r, z, w1, w2 (18, 12, 6, 35, 60% соответственно). По этой причине мы ввели три модели: первая модель использует только признаки (звездные величины и цвета), относящиеся к фильтрам g, r, z, вторая модель использует фильтры g, r, z, w1, и третья модель — g, r, z, w1, w2.

В качестве классификатора мы использовали нейронную сеть, на вход которой подаются соответствующие признаки модели, а на выходе получается число между 0 и 1, которое мы назвали pntag. Далее опишем модель, основанную на всех признаках: g, r, z, w1 и w2.

Мы построили нейронную сеть с функцией активации tanh, в которой было 4 слоя по 8 нейронов в каждом. После каждого слоя для предотвращения переобучения добавлен исключаяющий (dropout) слой с вероятностью 0.1. На выход нейронной сети добавлен слой с одним нейроном с логистической активацией. В качестве функции потерь использовалась двоичная



**Рис. 2.** Верхняя панель: плотность распределения по выводу нейронной сети (nnmag) объектов DESI, которые попали в тестовую выборку полевых источников (голубая гистограмма со штрихами) и компаньонов (зеленая гистограмма). Нижняя панель: кривые полноты (“recall”, пунктирная линия) и точности (“precision”, сплошная линия) для компаньонов в зависимости от нижнего порога по nnmag, использованного для классификации оптического объекта в качестве компаньона рентгеновского источника.

кроссэнтропия (binary crossentropy). Количество источников класса “компаньон” — 10 480, класса “полевой” — 55 636; 30% данных использовались как тестовые, 20% использовались для кросс-валидации, а остальное — как обучающая выборка. Для обучения классификаторов использовался пакет KERAS<sup>3</sup>.

На рис. 2 (верхняя панель) представлена гистограмма вывода нейронной сети (nnmag) на тестовой выборке (данные, которые не были использованы для обучения) для обоих классов объектов. Видно, что объекты класса 1 (компаньоны) имеют значения nnmag ближе к единице, а объекты класса 0 (полевые источники) имеют nnmag ближе к 0. Эту гистограмму можно сравнить с

рис. 1, в которой разделение по величине  $g$  не такое очевидное. Также на рисунке на нижней панели показаны две метрики качества модели для разных значений порога nnmag: полнота (recall) и точность (precision). При данном значении nnmag источники назначаются компаньоном (полевым), если их значение nnmag больше (меньше) порогового<sup>4</sup>. В качестве общей метрики качества модели мы использовали значение точности в точке пересечения двух кривых, в случае с моделью  $g, r, z, w1, w2$  это число равно 0.67. Отметим, что в точке пересечения двух кривых значения полноты и точности равны друг другу.

В табл. 1 описаны важные параметры для всех трех моделей: используемые признаки, размеры выборок, структуры нейронной сети и общее качество модели. Стоит отметить падение точности модели с потерей данных из инфракрасного диапазона — модель  $grzw1w2$  имеет общую точность 0.67,  $grzw1$  — 0.61, и  $grz$  — только 0.38.

### 3.2. Валидационная выборка в Дыре Локмана

Для того чтобы оценить качество кросс-отождествления, нужно иметь выборку источников eРОЗИТА с известными оптическими компаньонами. Для этого мы привлекаем данные спутников Chandra и XMM-Newton в области Дыры Локмана. Мы использовали подход, аналогичный примененному в работе Бельведерского и др. (2022).

Процедура отбора следующая:

1. Мы провели кросс-корреляцию полных каталогов Chandra (XMM)<sup>5</sup> с каталогом eРОЗИТА Дыры Локмана с радиусом поиска 30 угл. сек и выписали уникальные пары eРОЗИТА-Chandra (XMM), оставив из них только надежные детектирования Chandra/XMM. Таких получилось 461 (646).
2. Для каждого источника Chandra (XMM) нашли все объекты DESI LIS в пределах 15 угл. сек и выбрали из них такие, которые (а) лежат в пределах  $1.1 \times r_{98}$  от соответствующего рентгеновского источника и являются единственным оптическим объектом в данном радиусе, и (б) лежат в пределах  $r_{false}$ . Таким образом, было найдено 310 (383)

<sup>4</sup>Полнота вычисляется по формуле  $TP/(TP + FN)$ , а точность как  $TP/(TP + FP)$ , где true positive (TP) — количество правильно определенных компаньонов, false negative (FN) — компаньонов, определенных как полевые, false positive (FP) — полевых, определенных как компаньоны.

<sup>5</sup>Без фильтра по качеству, см. п. 2.1.

<sup>3</sup><https://keras.io>

Таблица 1. Описание фотометрических моделей

Модель	Признаки	Размер выборки <sup>1</sup>	Структура сети	Общее качество <sup>2</sup>
nnmag_grzw1w2	g, r, z, w1, w2 g-r, r-z, g-z z-w1, r-w1, w1-w2	1: 10480 0: 55636	4 слоя по 8 нейронов Dropout rate: 0.1	0.67
nnmag_grzw1	g, r, z, w1 g-r, r-z, g-z, z-w1	1: 10814 0: 89670	4 слоя по 8 нейронов Dropout rate: 0.1	0.61
nnmag_grz	g, r, z g-r, r-z, g-z	1: 11092 0: 141845	2 слоя по 13 нейронов Dropout rate: 0.0	0.38

<sup>1</sup> Класс 1 относится к компаньонам, класс 0 — к полевым источникам.

<sup>2</sup> Полнота в точке пересечения кривых полноты и точности, см. п. 3.1.2.

пар Chandra (XMM) — DESI (определения величин см. в п. 3.1.1). В качестве  $r_{\text{false}}$  выбран радиус  $1.47''$ , исходя из средней плотности DESI в области Дыры Локмана.

- После этого из пар Chandra (XMM)—DESI были исключены такие, в которых поток в диапазоне 0.5–2 кэВ по данным eROZITA и Chandra/XMM отличается больше, чем в пять раз (Бельведерский и др., 2022) — осталось 235 (374) источников.
- Два каталога (eROSITA-Chandra-DESI и eROSITA-XMM-DESI) были совмещены, а дубликаты удалены. Получен каталог, состоящий из 548 троек eROSITA-Chandra (XMM)—DESI. Из него были удалены случаи, когда вокруг источника eROZITA находились один надежный источник XMM/Chandra и два и более источника Chandra/XMM, не прошедшие фильтр на качество детектирования. Осталось 529 троек eROSITA-Chandra (XMM) - DESI.

Это позволило точно определить соответствие между рентгеновским источником eROZITA и оптическим объектом DESI. Этот каталог будет в дальнейшем использован для проверки качества отождествления.

Мы также создали каталог источников eROZITA, у которых нет оптического компаньона в каталоге DESI LIS — это так называемые бездомные (hostless) источники. Для этого на втором шаге изменили критерий поиска, потребовав чтобы в пределах  $2 \times r_{98}$  и  $2 \times r_{\text{false}}$  не было ни одного оптического объекта DESI. Остальные шаги остались без изменений. Итоговое количество бездомных (бесхозных) источников eROZITA в валидационной выборке составило 30.

### 3.3. NWAY и идентификация рентгеновских объектов в поле Дыры Локмана

Объединение информации о взаимном положении и позиционных ошибках, с одной стороны, и фотометрических свойствах объектов, с другой, проводилось с помощью кода NWAY<sup>6</sup> (Сальвато и др., 2018), который использует байесов подход к вычислению вероятностей. На вход этой программе подаются два каталога — eROZITA и DESI. Первоначально вычисляется вероятность совпадения каждой возможной пары, исходя только из астрометрических положений, ошибок на них, а также плотности источников на небе. Затем вероятности уточняются с использованием сторонней информации (далее — фотометрических priоров). При этом уточнение происходит, исходя из отношения плотностей распределения priоров для компаньонов и полевых источников. На выходе каждому объекту eROZITA сопоставляется число  $p_{\text{any}}$ , характеризующее наличие у него оптического компаньона, а каждому кандидату в компаньоны DESI — число  $p_i$ , характеризующее его вероятность быть этим компаньоном. Чем ближе числа к единице, тем надежнее соответствующее утверждение. Отметим, однако, что параметры  $p_{\text{any}}$  и  $p_i$  не следует интерпретировать как вероятности в строгом смысле.

В качестве фотометрического priора мы использовали величину pnmag, полученную нейронной сетью — фотометрическим классификатором (п. 3.1.2, см. также пример на рис. 2). Выбор фотометрической модели (табл. 1) проводился в зависимости от того, какие именно признаки были доступны для того или иного объекта DESI LIS. При этом мы следили, чтобы не происходило “утечки” информации: для каждого оптического объекта использовался только один фотометрический priор, полученный моделью, обладающей наибольшей точностью, доступной для данного объекта (табл. 1). Если же фотометрической информации

<sup>6</sup><https://github.com/JohannesBuchner/nway>

об объекте было недостаточно для применения ни одной из моделей в табл. 1 (например, отсутствовало измерение в фильтре  $z$ ), то в качестве приора использовалась любая доступная информация (звездные величины и цвета), откалиброванная по выборке из секции 3.1.1, например, как проиллюстрировано на рис. 1.

При работе NWAY в качестве  $1\sigma^7$  ошибки положения для источников eРОЗИТА мы использовали соответствующую откалиброванную позиционную ошибку из каталога рентгеновских источников eРОЗИТА (Гильфанов и др., 2022, в подготовке), а для источников DESI LIS — фиксированную ошибку 0.1 угл. сек.

В результате работы программы NWAY для каждого источника eРОЗИТА мы вычислили значение параметра  $p_{\text{any}}$ , а для каждого оптического объекта в радиусе  $30''$  от рентгеновского источника — значение  $p_i$ . Кандидат с наибольшим  $p_i$  назначался наиболее вероятным компаньоном. Рентгеновские источники со значением  $p_{\text{any}}$  ниже порога  $p_{\text{any},0} = 0.12$  считались бездомными. Выбор значения порога  $p_{\text{any},0}$  обсуждается в следующем разделе.

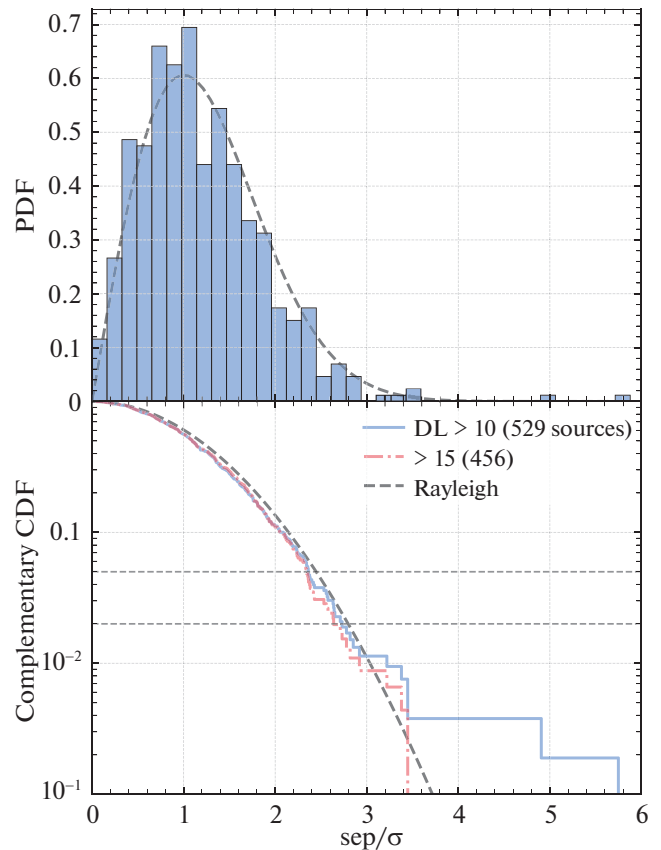
#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе представлены результаты оптического отождествления рентгеновских источников eРОЗИТА в области Дыры Локмана. В подразделе 4.1 приведена общая статистика по числу отождествлений, в подразделе 4.2 описывается калибровка позиционных ошибок рентгеновского каталога на основе валидационной выборки, в подразделе 4.3 описывается оценка точности, полноты и чистоты каталога компаньонов. В подразделе 4.4 мы обсуждаем обобщение модели на все небо и необходимые для этого изменения в процедуре.

##### 4.1. Результаты отождествления

В результате применения вышеописанной процедуры отождествления, из 6885 источников eРОЗИТА в поле Дыры Локмана 6346 (92%) источников имеют  $p_{\text{any}} > 0.12$ , а 4360 (63%) —  $p_{\text{any}} > 0.8$ . Для 5866 рентгеновских источников наиболее вероятным оптическим компаньоном оказался ближайший объект DESI LIS, а для 1019 — не ближайший. Для 6458 рентгеновских источников наиболее вероятный оптический компаньон лежит на угловых расстояниях  $\text{sep} < r_{98}$ , а для 427 —  $\text{sep} > r_{98}$ . Для 443 (6%) источников eРОЗИТА было найдено два и более кандидатов с

<sup>7</sup>Соответствует вероятности 39% для двухмерного нормального распределения.



**Рис. 3.** Распределения по смещениям рентгеновских источников от их оптических компаньонов в валидационной выборке. Верхняя панель: голубая гистограмма показывает плотность распределения по величине  $\text{sep}/\sigma$ . Нижняя панель: кумулятивное распределение этой же величины для двух вариантов отбора рентгеновских источников по правдоподобию детектирования DL ( $DL > 10$  — голубая сплошная линия,  $DL > 15$  — красная штрихпунктирная линия). На обеих панелях черной штриховой линией показано ожидаемое распределение Релея. На нижней панели горизонтальными линиями показаны уровни вероятности 95 и 98%.

близкими значениями  $p_i$  (в пределах фактора 2). Для 5919 (86%) источников eРОЗИТА один из оптических объектов имеет значение  $p_i > 0.8$ .

##### 4.2. Проверка позиционных ошибок рентгеновских источников eРОЗИТА

529 валидационных пар eROSITA-DESI LIS позволяют нам проверить правильность определения ошибки положений рентгеновских источников. Если ошибки откалиброваны правильно, то ожидается, что распределение величины  $\text{sep}/\sigma$  (где  $\text{sep}$  расстояние между наблюдаемым положением рентгеновского источника и его настоящим положением,  $\sigma$  — его ошибка положения) будет подчиняться распределению Релея (Уотсон и др., 2009;

Чен и др., 2018; Брюннер и др., 2021; Бельведерский и др., 2022).

Результаты представлены на рис. 3, где показаны распределения этой величины, измеренные по валидационному каталогу. В качестве настоящего положения рентгеновского источника мы использовали положение его оптического компаньона, которое известно с точностью лучше долей секунды, в то время как типичная точность локализации рентгеновских источников составляет  $\sim 3\text{--}20$  угл. сек. На рис. 3 приведены распределения для полного каталога, в котором правдоподобие детектирования  $DL > 10$  и для источников с правдоподобием  $DL > 15$  (что соответствует уровню достоверности  $\approx 5\sigma$  для гауссова распределения). Чем выше порог, тем меньше в каталоге ложных источников. Так же нанесено ожидаемое распределение Релея.

Как видно на рис. 3, наблюдаемые распределения хорошо описываются распределением Релея. В случае полной валидационной выборки, включающей источники до уровня достоверности  $DL = 10$ , можно увидеть два источника на больших отклонениях  $\text{ser} \gtrsim 5\sigma$ . Визуальная инспекция этих областей на картах неба не выявила очевидных аномалий в рентгеновских или оптических данных. Появление этих двух источников является результатом случайного наложения, не связанных между собой источников eROZITA и Chandra, при этом некоторые из источников eROZITA могут быть ложными (т.е. результатом статистических флуктуаций на рентгеновском изображении), на что может указывать их сравнительно невысокая статистическая значимость ( $< 5\sigma$  в терминах гауссова распределения). Отметим, что при пороге значимости  $4\sigma$  мы ожидаем порядка  $\sim 10\text{--}20$  ложных источников в поле Дыры Локмана (см. более подробное обсуждение в работе Гильфанова и др. 2022). В распределении источников высокой значимости ( $DL > 15$ ) такого хвоста в распределении нет — оно хорошо согласуется с распределением Релея.

Таким образом, позиционные ошибки, приведенные в каталоге источников eROZITA, адекватно описывают неопределенности в положениях рентгеновских источников, что обосновывает их использование при вычислении байесовых вероятностей отождествления источников в программе NWAY.

#### 4.3. Точность и полнота оптического отождествления

Необходимо оценить качество нашей модели отождествления, сравнить ее с алгоритмом тривиального выбора ближайшего оптического объекта в качестве компаньона, а также откалибровать порог по параметру  $p_{\text{any}}$ . Для этого мы используем

валидационную выборку и сравниваем компаньоны, подобранные нашей моделью, и настоящие компаньоны, найденные с использованием данных Chandra/XMM.

Для интерпретации результата работы модели отождествления мы применяем следующий алгоритм. Используя заранее выбранное значение порога  $p_{\text{any},0}$ , мы классифицируем источники eROZITA с  $p_{\text{any}} < p_{\text{any},0}$  как бездомные. Для источников с  $p_{\text{any}} > p_{\text{any},0}$  в качестве компаньона выбираем объект с максимальным значением величины  $p_i$ . При этом возможны следующие исходы:

- Правильно определено, что источник имеет компаньон, и сам компаньон выбран правильно. Обозначим это число через  $A$ .
- Правильно определено, что источник имеет компаньон, но сам компаньон выбран неправильно ( $B$ ). Это ошибка идентификации.
- Бездомный источник неправильно классифицирован как источник с компаньоном ( $C$ ). Это ошибка классификации бездомного источника.
- Источник с компаньоном неправильно классифицирован как бездомный ( $D$ ). Это ошибка классификации источника с компаньоном.
- Правильно определено, что источник является бездомным ( $E$ ).

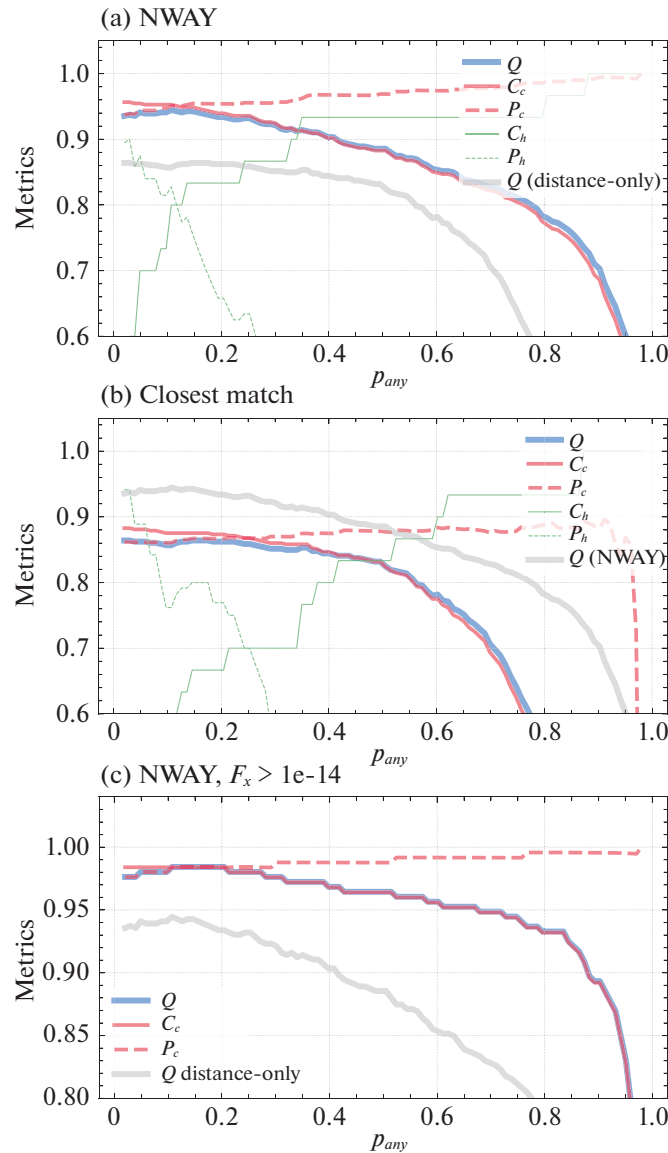
В приложении на рис. 5 приведены несколько примеров источников из валидационного каталога и их оптическое окружение. Отмечены положения рентгеновских источников (eROZITA, Chandra, XMM) и оптические объекты. Мы также указываем параметры отождествления ( $p_{\text{any}}, p_i$ ) и настоящий компаньон. Показаны три примера правильного и один пример неправильного отождествления.

В валидационной выборке  $N_c = 529$  источников с компаньонами и  $N_h = 30$  бездомных источников.

Мы задаем следующие метрики качества (Бельведерский и др., 2022):

- Общая метрика  $Q = \frac{A + E}{N_c + N_h}$ .
- Полнота отождествления компаньонов  $C_c = \frac{A}{N_c}$ .
- Полнота отождествления бездомных источников  $C_h = \frac{E}{N_h}$ .





**Рис. 4.** Метрики качества модели отождествления в зависимости от значения порога  $p_{any,0}$ . Сплошной толстой синей линией показано поведение метрики  $Q$ . Красные линии средней толщины соответствуют отбору компаньонов: сплошная линия — полнота  $C_c$ , штриховая — точность  $P_c$ . Тонкие зеленые линии показывают метрики для отбора бездомных источников: сплошная линия — полнота  $C_h$ , штриховая — точность  $P_h$ . (а) — Полная модель отождествления с использованием фотометрической и позиционной информации; серой линией нанесена метрика  $Q$  для случая отбора ближайшего партнера. (б) — Отождествление с ближайшим оптическим объектом; серой линией показана метрика  $Q$  фотометрической модели. (с) — Полная модель отождествления для ярких источников ( $F > 10^{-14}$  эрг см $^{-2}$  с $^{-1}$ ); серой линией показана метрика  $Q$  фотометрической модели полного каталога.

- Точность отождествления компаньонов  $P_c = \frac{A}{A + B + C}$ .
- Точность отождествления бездомных источников  $P_h = \frac{E}{D + E}$ .

фотометрической и позиционной информации, для позиционной модели (в качестве компаньона выбирается ближайший оптический объект) и полной модели, примененной к ярким источникам с потоком  $F_X > 10^{-14}$  эрг/с/см $^2$ .

На рис. 4 показано поведение вышеприведенных метрик для трех вариантов модели отождествления: для полной модели с использованием

Точка пересечения кривых полноты и точности отбора компаньонов расположена на  $p_{any} = 0.12$ , при этом достигаются значения точности и полноты 94–95%. Для бездомных источников пересечение происходит при  $p_{any} \approx 0.15$  с точностью и полно-

**Таблица 2.** Количество правильно или неправильно определенных компаньонов источников eРОЗИТА для трех вариантов модели отождествления: полная модель, отождествление с ближайшим оптическим источником; полная модель, примененная к ярким источникам валидационного каталога

Модель	Компаньон верный (А)	Компаньон неверный (В)	Компаньон назначен для бездомного (С)	Источник с компаньон-ном назначен бездомным (D)	Верно бездомный (Е)	Качество модели
NWAY + nntag $p_{\text{ану},0} = 0.12$	503	20	6	6	24	$Q = 0.94$
Ближайший партнер $p_{\text{ану},0} = 0.24$	460	61	9	8	21	$Q = 0.86$
NWAY + nntag (яркие источники) $p_{\text{ану},0} = 0.11$	246	4	0	0	3	$Q = 0.98$

той 80%. При этом на  $p_{\text{ану}} = 0.12$  общая точность модели отождествления достигает  $Q = 94\%$ . Порог по  $p_{\text{ану}}$  должен выбираться в зависимости от конкретной научной задачи, для которой производится оптическое отождествление. Для общей задачи классификации рентгеновских источников порог  $p_{\text{ану},0} = 0.12$  является хорошим выбором.

В случае наивного отождествления рентгеновского источника с ближайшим оптическим объектом из каталога DESI LIS пересечение кривых отбора компаньонов происходит при  $p_{\text{ану}} \approx 0.24$  с точностью и полнотой 86–87%, и для отбора бездомных  $p_{\text{ану}}$  такое же с точностью и полнотой 70%. Общая точность модели  $Q = 86\%$ .

При отождествлении ярких источников (поток в диапазоне 0.5–2 кэВ  $F_x > 10^{-14}$  эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>) достигаются точность и полнота порядка 98% для  $p_{\text{ану},0} \approx 0.12$ . Отметим, что при таком фильтре по рентгеновскому потоку в валидационной выборке оказывается всего три бездомных источника, поэтому калибровка метрик для бездомных источников не производилась.

В табл. 2 показаны результаты оценки точности в соответствующих случаях.

Наблюдается сильное повышение качества отождествления при добавлении фотометрической информации — общее качество отождествления  $Q$  возрастает на 8 процентных пунктов. Однако интересно отметить, что отождествление с ближайшим оптическим источником предоставляет неплохую точность само по себе. Это связано с относительно хорошей точностью локализации рентгеновских источников телескопом eРОЗИТА и плотностью оптических объектов на уровне чувствительности обзора DESI LIS в области Дыры Локмана. Плотность объектов DESI в области Дыры Локмана соответствует одному объекту в кружке радиусом 10 угл. сек, что примерно является точностью

локализации источников SRG/eРОЗИТА. Благодаря этому отождествление источников eРОЗИТА с ближайшим оптическим объектом во многих случаях приводит к правильному результату.

#### 4.4. Дальнейшие шаги для обзора всего неба

Область Дыры Локмана наблюдалась телескопом eРОЗИТА в ходе верификационной фазы наблюдений обсерватории SRG. Рентгеновская чувствительность достаточно равномерно распределена по площади обзора. Кроме того, площадь обзора не слишком велика, что позволяет игнорировать вариации межзвездного поглощения, а также глубины обзора DESI LIS. При распространении фотометрической модели на большие участки неба будет необходимо учесть эти эффекты. Обзор DESI LIS покрывает не все небо, и, вероятно, качество фотометрического каталога можно использовать обзор Pan-STARRS<sup>8</sup> или подобные.

В подразделе 3.1 описана достаточно гибкая процедура обучения фотометрической модели. Во-первых, в обучающих данных был сделан акцент на глубине рентгеновского обзора  $3 \times 10^{-15}$  эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>, и обновление процедуры для применения в обзоре всего неба (где глубина обзора варьируется) достаточно просто и заключается в разбиении моделей по интервалам по рентгеновскому потоку. Во-вторых, упор в данной работе был сделан на внегалактических полях ( $|b| > 20^\circ$ ), и использование новой обучающей выборки из области галактического диска позволит подойти к задаче отождествления рентгеновских источников в густонаселенных полях в Хребте нашей Галактики ( $|b| < 20^\circ$ ).

<sup>8</sup><https://outerspace.stsci.edu/display/PANSTARRS/>

Создание валидационного каталога по данным всего неба позволит точнее откалибровать ошибки положения рентгеновских источников (см. подраздел 4.2) за счет заметного увеличения размера выборки. Также, вероятно, можно будет учесть более тонкие эффекты, связанные с зависимостью калибровки позиционных ошибок от рентгеновского потока, достоверности детектирования (Бельведерский и др., 2022), положения на небе и т.д. Валидационный каталог большого размера поможет точнее оценить кривые полноты и чистоты алгоритма отождествления и его зависимость от параметров детектирования, в том числе от положения на небе.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье построена модель оптического отождествления источников, открываемых телескопом ePOZITA, используя в качестве примера каталог рентгеновских источников ePOZITA в области Дыры Локмана, и оценили ее точность и полноту. В качестве источника оптических данных мы использовали данные обзора DESI LIS, дополненные инфракрасной фотометрией спутника WISE. Обучение и валидация моделей производились с использованием данных рентгеновских обсерваторий Chandra и XMM.

Представлена фотометрическая модель, основанная на использовании нейронных сетей для разделения фотометрических признаков оптических компаньонов рентгеновских источников от полевых источников. Модель преобразует всю совокупность доступных фотометрических данных в одно число, которое мы назвали  $pptag$  и которое варьируется от 0 до 1 и позволяет разделять эти два класса с точностью/полнотой 40–70% в зависимости от доступных данных.

Мы описываем построение выборки источников ePOZITA с надежно определенными оптически компаньонами. Подобная выборка позволяет охарактеризовать точность и полноту любой модели отождествления, а так же при необходимости легко конструируется на больших участках неба. В области Дыры Локмана это позволило точно найти оптический компаньон для 559 источников ePOZITA из 6885. Валидационная выборка позволила нам проверить точность определения ошибок положений рентгеновских источников, как описано в подразделе 4.2.

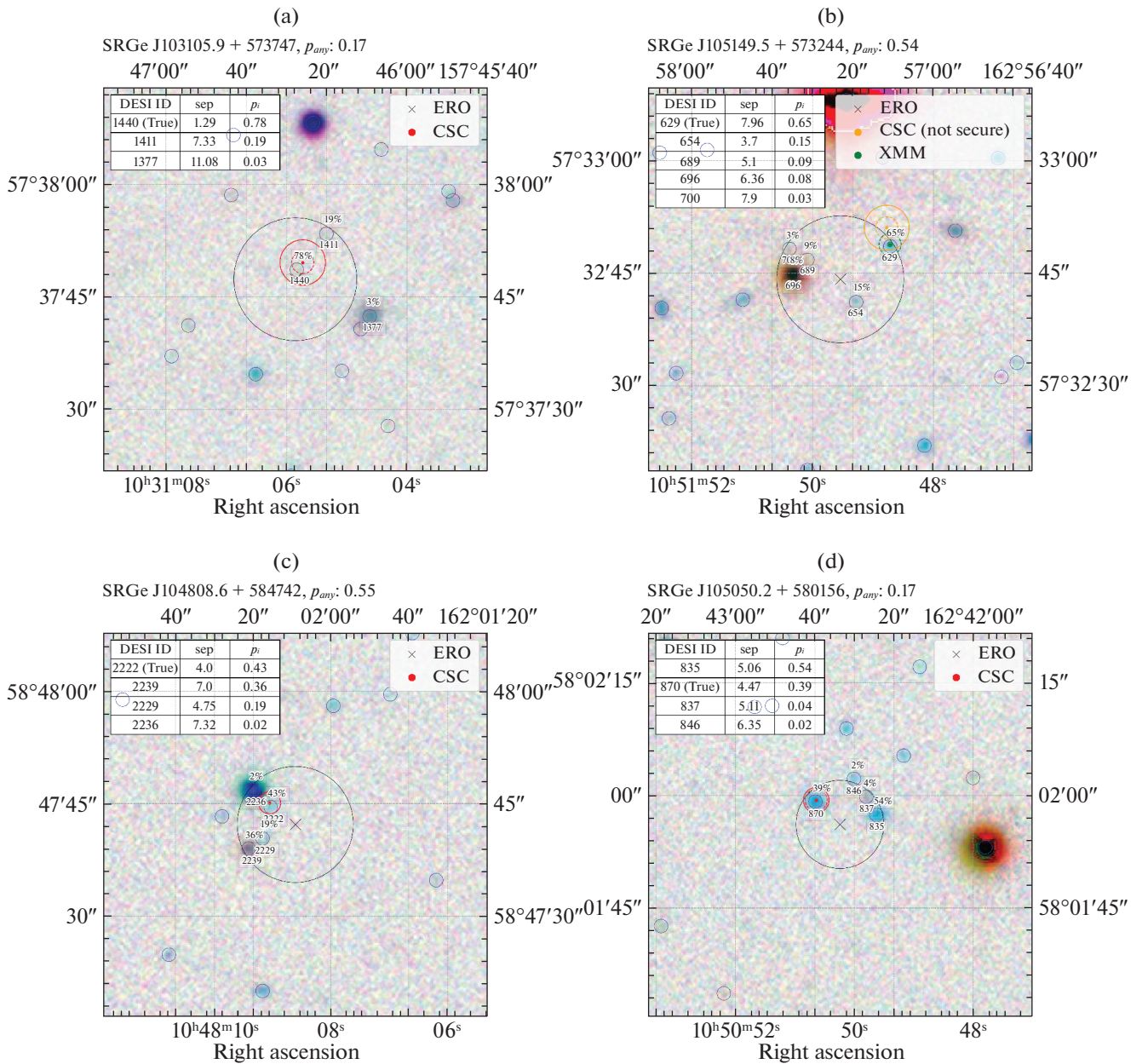
Мы применили связку из нейронной сети и кода NWay для поиска оптических компаньонов источников SRG/ePOZITA в области Дыры Локмана.

Качество построенной модели отождествления обсуждается в подразделе 4.3. Построенная модель достигает полноты и чистоты (точности) отбора компаньонов 95% и отбора бесхозных источников 80%, что превосходит наивное отождествление по ближайшему партнеру на 8 процентных пунктов. Для ярких рентгеновских источников ( $F_{0.5-2} > 10^{-14}$  эрг см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>) модель достигает точности 98%. Мы приводим примеры отождествлений, а также подробные кривые калибровок. В заключение мы обсудили необходимые шаги для применения модели в обзоре всего неба SRG/ePOZITA.

Это исследование использовало результаты наблюдений телескопа ePOZITA на борту обсерватории SRG. Обсерватория SRG изготовлена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской федеральной научной программы с участием Германского центра авиации и космонавтики (DLR). Рентгеновский телескоп SRG/ePOZITA изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной физики Общества им. Макса Планка (MPE) при поддержке DLR. Космический аппарат SRG спроектирован, изготовлен, запущен и управляется НПО им. Лавочкина и его субподрядчиками. Прием научных данных осуществляется комплексом антенн дальней космической связи в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре и финансируется Роскосмосом. Используемые в настоящей работе данные телескопа ePOZITA обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом ePOZITA и программного обеспечения для обработки и анализа данных, разработанного российским консорциумом телескопа ePOZITA.

С. Д. Быков благодарит за поддержку международную исследовательскую школу по астрофизике общества Макса Планка (IMPRS) в Мюнхенском университете имени Людвига и Максимилиана. М.И. Бельведерский и М.Р. Гильфанов благодарят поддержку гранта РФФ 21-12-00343.

Программное обеспечение: NumPy (Харрис и др., 2020), Matplotlib (Хантер и др., 2007), SciPy (Виртанен и др., 2020), Pandas (Команда pandas, 2020), AstroPy (Коллаборация Astropy и др., 2018), HEALPix (Горски и др., 2005), HEALPy (Зонка и др., 2019).



**Рис. 5.** Примеры изображений неба (по данным DESI LIS) в окрестности источников eРОЗИТА. Крестом и черным кругом отмечены положение источника eРОЗИТА и его ошибка положения  $r_{98}$ . Название источника и значение  $p_{any}$  указаны в заголовке. Синими маленькими кружками показаны положения объектов DESI LIS, снизу каждого кружочка подписан его идентификатор, сверху — значение  $p_i$  в процентах. В таблицах на врезках указаны кандидаты в компаньоны, у которых  $p_i > 0.01$ , их идентификаторы и расстояние до источника eРОЗИТА в угловых секундах. Положения источников Chandra(XMM) из валидационного каталога показаны красными (зелеными) кружками. Пунктирная линия показывает радиус  $r_{false} = 1.47''$  вокруг Chandra/XMM. Настоящий компаньон указан комментарием (True). В случаях (a), (b), (c) отождествление компаньона верное, в случаях (d) — неверное, несмотря на условно большое значение  $p_{any} > 0.12$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананна и др. (T.T. Ananna, M. Salvato, S. LaMassa, C.M. Urry, N. Cappelluti, C. Cardamone, et al.), *Astrophys. J.* **850**, 66 (2017).
2. Бельведерский и др. (M.I. Belvedersky, A.V. Meshcheryakov, M.R. Gilfanov, and P.S. Medvedev), arXiv e-prints, p. arXiv:2203.11531 (2022).
3. Бруса и др. (M. Brusa, G. Zamorani, A. Comastri, G. Hasinger, N. Cappelluti, F. Civano, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **172**, 353 (2007).
4. Брюннер и др. (H. Brunner, T. Liu, G. Lamer, A. Georgakakis, A. Merloni, M. Brusa, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:2106.14517 (2021).
5. Будавари и Лоредо (T. Budavári and T.J. Loredo), *Annual Review of Statistics and Its Application* **2**, 113 (2015).
6. Будавари и Сзалай (T. Budavári and A.S. Szalay), *Astrophys. J.* **679**, 301 (2008).
7. Вебб и др. (N.A. Webb, M. Coriat, I. Traulsen, J. Ballet, C. Motch, F.J. Carrera, et al.), *Astron. Astrophys.* **641**, A136 (2020).
8. Виртанен и др. (P. Virtanen, R. Gommers, T.E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, et al.), *Nature Methods* **17**, 261 (2020).
9. Горски и др. (K.M. Górski, E. Hivon, A.J. Banday, B.D. Wandelt, F.K. Hansen, M. Reinecke, et al.), *Astrophys. J.* **622**, 759 (2005).
10. Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), *Astron. J.* **157**, 168 (2019).
11. Зонка и др. (A. Zonca, L. Singer, D. Lenz, M. Reinecke, C. Rosset, E. Hivon, et al.), *Journal of Open Source Software* **4**, 1298 (2019).
12. Коллаборация Астроу и др. (Astropy Collaboration, A.M. Price-Whelan, B.M. Sipocz, H.M. Günther, P.L. Lim, S.M. Crawford, et al.), *Astron. J.* **156**, 123 (2018).
13. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, G. Hütsi, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **558**, A90 (2013a).
14. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Sazonov, and M. Brusa), *Astron. Astrophys.* **558**, A89 (2013b).
15. T. pandas development team, *pandas-dev/pandas: Pandas* (2020).
16. Локман и др. (F.J. Lockman, K. Jahoda, and D. McCammon), *Astrophys. J.* **302**, 432 (1986).
17. Луо и др. (B. Luo, W.N. Brandt, Y.Q. Xue, M. Brusa, D.M. Alexander, F. E. Bauer, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **187**, 560 (2010).
18. Луо и др. (B. Luo, W.N. Brandt, Y.Q. Xue, B. Lehmer, D.M. Alexander, F. E. Bauer, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **228**, 2 (2017).
19. Марчеси и др. (S. Marchesi, F. Civano, M. Elvis, M. Salvato, M. Brusa, A. Comastri, et al.), *Astrophys. J.* **817**, 34 (2016).
20. Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Böhringer, T. Boller, H. Brunner, et al.), arXiv e-prints, p. arXiv:1209.3114 (2012).
21. Нэйлор и др. (T. Naylor, P.S. Broos, and E.D. Feigelson), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **209**, 30 (2013).
22. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, A. Tkachenko, V. Levin, N. Alexandrovich, V. Arefiev, V. Babyshkin, et al.), *Astron. Astrophys.* **650**, A42 (2021).
23. Пиллепич и др. (A. Pillepich, C. Porciani, and T.H. Reiprich), *MNRAS* **422**, 44 (2012).
24. Пино и др. (F.X. Pineau, S. Derriere, C. Motch, F.J. Carrera, F. Genova, L. Michel, et al.), *Astron. Astrophys.*, 597, A89 (2017).
25. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A1 (2021).
26. Прокопенко и Гильфанов (I.G. Prokopenko and M.R. Gilfanov), *Astronomy Letters* **35**, 294 (2009).
27. Сазерленд и Сандерс (W. Sutherland and W. Saunders), *MNRAS* **259**, 413 (1992).
28. Сальвато и др. (M. Salvato, J. Buchner, T. Budavári, T. Dwelly, A. Merloni, M. Brusa, et al.), *MNRAS* **473**, 4937 (2018).
29. Сальвато и др. (M. Salvato, J. Wolf, T. Dwelly, A. Georgakakis, M. Brusa, A. Merloni, et al.), *Astron. Astrophys.* **661**, A3 (2022).
30. Сюняев и др. (R. Sunyaev, V. Arefiev, V. Babyshkin, A. Bogomolov, K. Borisov, M. Buntov, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A132 (2021).
31. Уотсон и др. (M.G. Watson, A.C. Schröder, D. Fyfe, C.G. Page, G. Lamer, S. Mateos, et al.), *Astron. Astrophys.* **493**, 339 (2009).
32. Хантер и др. (J.D. Hunter), *Computing in Science & Engineering* **9**, 90 (2007).
33. Харрис и др. (C.R. Harris, K.J. Millman, S.J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen, D. Cournapeau, et al.), *Nature* **585**, 357 (2020).
34. Чен и др. (C.T.J. Chen, W.N. Brandt, B. Luo, P. Ranalli, G. Yang, D. M. Alexander, et al.), *MNRAS* **478**, 2132 (2018).
35. Эванс и др. (I.N. Evans, F.A. Primini, K.J. Glotfelty, C.S. Anderson, N.R. Bonaventura, J.C. Chen, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **189**, 37 (2010).

# Improving Photometric Redshifts by Merging Probability Density Functions from Template-Based and Machine Learning Algorithms<sup>1</sup>

© 2022 г. I. Y. K. Alshuaili<sup>1</sup>, J. Y. H. Soo<sup>1\*</sup>, M. Z. M. Jafri<sup>1</sup>, Y. Rafid<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Physics, Universiti Sains Malaysia, 11800 USM, Pulau Pinang, Malaysia*

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.

После доработки 06.10.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

**Abstract**—This study aims to improve the photometric redshifts (photo-zs) of galaxies by integrating two contemporary methods: template-fitting and machine learning. Finding the synergy between these two methods was not a high priority in the past, but now that our computer processing power and observational accuracy have increased, we deem it worth investigating. We compared two methods to improve galaxy photometric redshift estimations by using the algorithms ANNz2 and BPz on different photometric and spectroscopic samples from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS). We find that the photometric redshift performance of ANNz2 (machine learning) is better than that of BPz (galactic templates), and with the utilization of the merging technique we introduced, we see that there is an improvement in photo-z when the two strategies are consolidated, providing improvements in  $\sigma_{\text{RMS}}$  and  $\sigma_{68}$  up to [0.0265 & 0.0222] in LRG sample and [0.0471 & 0.0471] in the Stripe-82 sample. This simple demonstration can be used for photo-zs of galaxies in fainter and deeper sky surveys, and future work is required to prove its viability in these samples.

*Keywords:* Galaxies: distances and redshifts Methods: photometric methods: data analysis.

**DOI:** 10.31857/S032001082211002X

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- J. Y. H. Soo, Ph. D. Thesis (University College London, 2018).
- A. J. Connolly, csabai, a. S. Szalay, et al., *Astron. J.* **110**, 2655c (1995).
- Y. Wang, N. Bahcall, E. L. Turner, arXiv:9906256V1 (1998).
- E. Vanzella, S. Cristiani, A. Fontana, M. Nonino, and S. Arnouts, et al., *Astron. Astrophys.* **423**, 761 (2003).
- R. Beck, C.-A. Lin, E. E. O. Ishida, et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **468**, 4323B (2017).
- D. G. York, J. Adelman, J. E. Anderson, et al., *Astron. J.* **120**, 1579 (2000).
- J. A. Newman, D. Gruen., *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **60**, 363 (2022).
- Abdurro'uf, K. Accetta, C. Aerts, V. A. et al., *Astrophys. J.* **259**, 35 (2022).
- J. Gunn, M. Carr, C. Rockosi, et al. *Astron. J.* **116**, 3040 (2020).
- D. J. Eisenstein, D. H. Weinberg, E. Agol, H. Aihara, et al., *Astron. J.* **142**, 24 (2011).
- K. Abazajian, et al., *Astrophys. J.* **182**, 543 (2009).
- A. E. Firth, O. Lahav, R. Somerville, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **339**, 1195 (2003).
- W. A. Baum, *IAU Symp.* **15**, 390 (1962).
- S. A. Butchins, *Astron. Astrophys.* **97**, 407 (1981).
- B. Massimo, C. Stefano, R. Oleksandra, A. Valeria, R. Giuseppe and L. Giuseppe. **8**: 658229 (2021)
- I. Sadeh, F. B. Abdalla, and O. Lahav. *Pub. Astron. Soc. Pac.* **128.968**: 104502 (2016).
- M. Bilicki, H. Hoekstra, M. J. I. Brown, V. Amaro, C. Blake, et al., *Astron. Astrophys.* **616**, A69 (2018).
- N. Benitez, *Astron. J.* **536(2)**, 571 (2000).
- O. Ilbert, S. Arnouts, H.J. McCracken, M. Bolzonella, E. Bertin, O. Le Fèvre, et al., *Astron. Astrophys.* **457(3)**, 841 (2006).
- T. Abbott, G. Aldering, J. Annis, M. Barlow, C. Bebek, et al. arXiv: 0510346 (2005)
- M. J. Brown, J. Moustakas, J. D. Smith, E. Da Cunha, T.H. Jarrett, et al., *Astrophys. J.* **212(2)**, 18 (2014).

<sup>1</sup>Полная версия статьи будет опубликована в английской версии журнала (*Astronomy Letters*, vol. 48, No. 11, 2022).

\*E-mail: johnsooyh@usm.my

22. G. D. Coleman, C. C. Wu, D.W. Weedman, *Astrophys. J.* **43**, 393 (1980).
23. A. L. Kinney, D. Calzetti, R. C. Bohlin, K. McQuade, T. Storchi-Bergmann, H. R. Schmitt, *Astrophys. J.* **467** 38 (1996).
24. G. Bruzual, S. Charlot, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **344**(4), 1000 (2003)
25. M. Polletta, M. Tajer, L. Maraschi, G. Trinchieri, C. J. Lonsdale, L. Chiappetti, et al., *Astrophys. J.* **663**(1), 81 (2007).
26. Z. Ivezić, S. M. Kahn, J. A. Tyson, B. Abel, E. Acosta, R. Allsman, et al., *Astrophys. J.* **873**(2), 111 (2019).
27. C. Padilla, F. J. Castander, A. Alarcón, J. Aleksic, O. Ballester, et al., *Astrophys. J.* **157**(6), 246 (2019).
28. <http://www.sdss.org/>. Accessed June 5, 2022.
29. A. V. Meshcheryakov, V. V. Glazkova, S. V. Gerasimov, et al., *Astron. Lett.* **41**(7), 307 (2016).
30. F. B. Abdalla, M. Banerji, O. Lahav, V. Rashkov. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **417**, 1891 (2011).

## АКТИВНОСТЬ АНАЛОГОВ TRAPPIST-1

© 2022 г. Е. С. Дмитриенко<sup>1\*</sup>, И. С. Саванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 21.08.2022 г.

После доработки 25.10.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Планетная система звезды TRAPPIST-1 обладает семью экзопланетами, три из которых находятся в зоне обитаемости. По литературным данным нами выполнен анализ свойств холодных карликов, которые могли бы рассматриваться в качестве аналога этого объекта. Используя имеющиеся в литературе данные (Сели и др., 2021) для ультрахолодных карликов, подобных TRAPPIST-1, мы определили величины параметра их запятненности  $S$  (доли поверхности, покрытой холодными пятнами) и площадей пятен в единицах долей площади поверхности Солнца. Получено, что в среднем TRAPPIST-1 вращается медленнее, чем большинство звезд из рассматриваемой выборки, а его запятненность выше, чем у них. Исследовано 7 объектов, для которых имеются достоверные сведения об их возрасте, вращении и пятенной активности. Найдено, что доля поверхности TRAPPIST-1, покрытая пятнами, превосходит аналогичные величины для других объектов, в том числе даже для более молодых звезд с возрастом 1–3 млрд лет. Выделены два объекта — TIC 302408306 и TIC 366567664 — с близкими характеристиками (возраст, вращение) к TRAPPIST-1. Их возраст оценивается в 9.0 и 7.9 млрд лет, соответственно. Эти звезды вращаются быстрее, чем TRAPPIST-1, а площадь поверхности, покрытая пятнами, у них несколько меньше, чем у TRAPPIST-1. Указанные объекты обладают более стабильными и более гладкими фазовыми кривыми с одним минимумом.

*Ключевые слова:* звездная активность, звездные пятна.

DOI: 10.31857/S0320010822110079

### ВВЕДЕНИЕ

Поскольку все больше и больше экзопланет обнаруживается вокруг холодных карликов спектрального класса M (самых распространенных объектов Галактики), изучение магнитной активности этих звезд и ее последствий для обитаемости планет приобретает первостепенное значение. Для обнаружения звездных вспышек и фотометрической переменности блеска, связанных с вращательной модуляцией и звездными пятнами, необходим непрерывный мониторинг, который наиболее оптимальным образом может быть достигнут с помощью космических обсерваторий, таких, например, как Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS).

К числу наиболее уникальных планетных систем около холодных карликов можно отнести следующие три (см. в Сели и др., 2021). Во-первых, это Проксима Центавра (M5.5 V) — ближайшая к Солнцу звезда, в обитаемой зоне которой находится планета с массой Земли. Другая система —

звезда Тигардена (2MASS J02530084 + 1652532, M7V), у которой обнаружены две планеты с массой Земли, являющиеся одними из планет с наименьшей массой, известными на момент открытия. Третий пример — TRAPPIST-1 (2MASS J23062928-0502285, M8V), который обладает семью транзитными экзопланетами, три из которых находятся в зоне обитаемости (Гиллон и др., 2016, 2017).

TRAPPIST-1 служит предметом многочисленных наземных и космических исследований (см. Сели и др., 2021; Гонзалес и др., 2019; Бургассер, Мамаджек, 2017; Вида и др., 2017; Дмитриенко, Саванов, 2018, и др., а также ссылки в них). Высокоточные фотометрические наблюдения проводились с космическими аппаратами Spitzer, Кеплер-K2, космическим телескопом им. Хаббла.

Обсуждение результатов определений основных параметров звезды TRAPPIST-1 можно найти в статьях Бургассер и Мамаджек (2017), Сели и др. (2021) и цитируемой в них литературе. Результаты детального анализа фотометрических наблюдений TRAPPIST-1 с космическим телескопом Кеплер

\*Электронный адрес: [issed@rambler.ru](mailto:issed@rambler.ru)



Таблица 1

Gaia DR2 source ID	<i>S</i>	<i>A</i>	Gaia DR2 source ID	<i>S</i>	<i>A</i>
229155579195699456	0.009	206	3197623290976364544	0.037	875
1040681747033185152	0.021	510	3200303384927513088	0.006	145
1254110521784729856	0.059	1408	3475115115014143488	0.079	1874
1282632682337912832	0.014	325	3830128624846458880	0.018	440
1295931997030930432	0.029	682	4733265410022963200	0.093	2200
1303076623589331968	0.041	968	4967628688601250816	0.013	308
1412377317863375360	0.072	1698	4971892010576979968	0.007	162
1437716460972795392	0.060	1425	4989399774745144320	0.005	123
1454104436971779328	0.022	532	5809399363316630528	0.018	426
1618010323247026432	0.007	162	5856405272135504896	0.033	787
1656001233124961024	0.046	1082	5983189339421392896	0.101	2380
1821315795663331328	0.034	809	599891555546067072	0.016	391
1916411143300424704	0.052	1240	6135947032490329088	0.005	127
1998109946788787456	0.063	1504	6224387727748520960	0.007	162
2088442248714858240	0.074	1746	6525046188759705600	0.030	721
2137903951084527360	0.028	673	6783123184369906688	0.020	466
2177877452238558976	0.012	290	779689533779300736	0.028	655
2336406413104712192	0.024	580	847228998317017472	0.030	717
2349207644734247936	0.025	598	89186168428165632	0.032	752
2472387757755767296	0.025	598	901941452829250560	0.018	440
2883680659313632768	0.043	1029	977653372545774336	0.056	1324

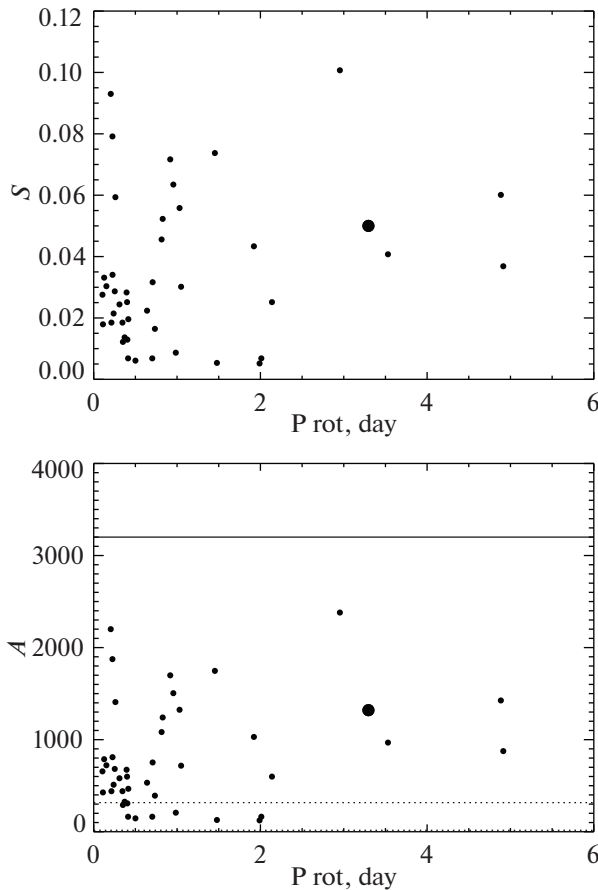
**Примечание.** *S* приводится в долях площади видимой полусферы звезды, *A* — в м.д.п. (см. пояснения в тексте).

(его продолжением — миссией К2) были представлены нами в Дмитриенко и Саванов (2018). Вида и др. (2017) изучили вспышечную активность этого объекта, выделив и проанализировав 42 вспышки с энергиями в диапазоне  $1.26 \times 10^{30} - 1.4 \times 10^{33}$  эрг, а также рассмотрели возможность влияния вспышек на атмосферы экзопланет.

Учитывая большой интерес, проявляемый к TRAPPIST-1, и его уникальность, по литературным данным нами был выполнен анализ свойств холодных карликов, которые могли бы рассматриваться в качестве аналога этого объекта.

### АНАЛИЗ ХОЛОДНЫХ М КАРЛИКОВ, ПОДОБНЫХ TRAPPIST-1

Сели и др. (2021) представили результаты анализа ультрахолодных карликов, подобных TRAPPIST-1, используя данные полнокадровой фотометрии кадров TESS за первые два года. Была исследована выборка объектов в ограниченном объеме до 50 пк, состоящая из 339 звезд, фотометрические характеристики которых близки к характеристикам TRAPPIST-1 (на диаграммах цветовых показателей GAIA они расположены ближе, чем  $0^m5$  к TRAPPIST-1). Были проанализированы 30-минутные кривые блеска 248 звезд в



**Рис. 1.** Сопоставление величин параметра запятненности  $S$  (в относительной величине) (вверху) и  $A$  (в абсолютной мере, выраженной в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.) (внизу) исследуемых объектов и периодов их вращения. Крупный кружок — данные для TRAPPIST-1. На нижней диаграмме штриховая линия соответствует максимумам бимодального распределения параметра  $A$  для Солнца, а максимальное солнечное значение параметра  $A$  представлено сплошной линией.

поисках вспышек и модуляции блеска, вызванной звездными пятнами. Суммарное распределение частоты вспышек (FFD) 94 идентифицированных вспышек показывает степенной закон с индексом, аналогичным найденному для TRAPPIST-1 (с учетом приведения в единую систему данных миссий Кеплер и TESS), и содержит вспышки до  $E_{\text{TESS}} = 3 \times 10^{33}$  эрг. Для 42 звезд были определены периоды вращения менее пяти суток, что указывает на значительную долю быстрых ротаторов в выборке. Возраст 88 звезд из выборки был оценен с использованием нескольких подходов (кинематической информации).

Таблица A1 из Сели и др. (2021) содержит данные о величинах периодов и амплитуд переменности блеска 43 звезд-аналогов TRAPPIST-1. Используя информацию, необходимую для полу-

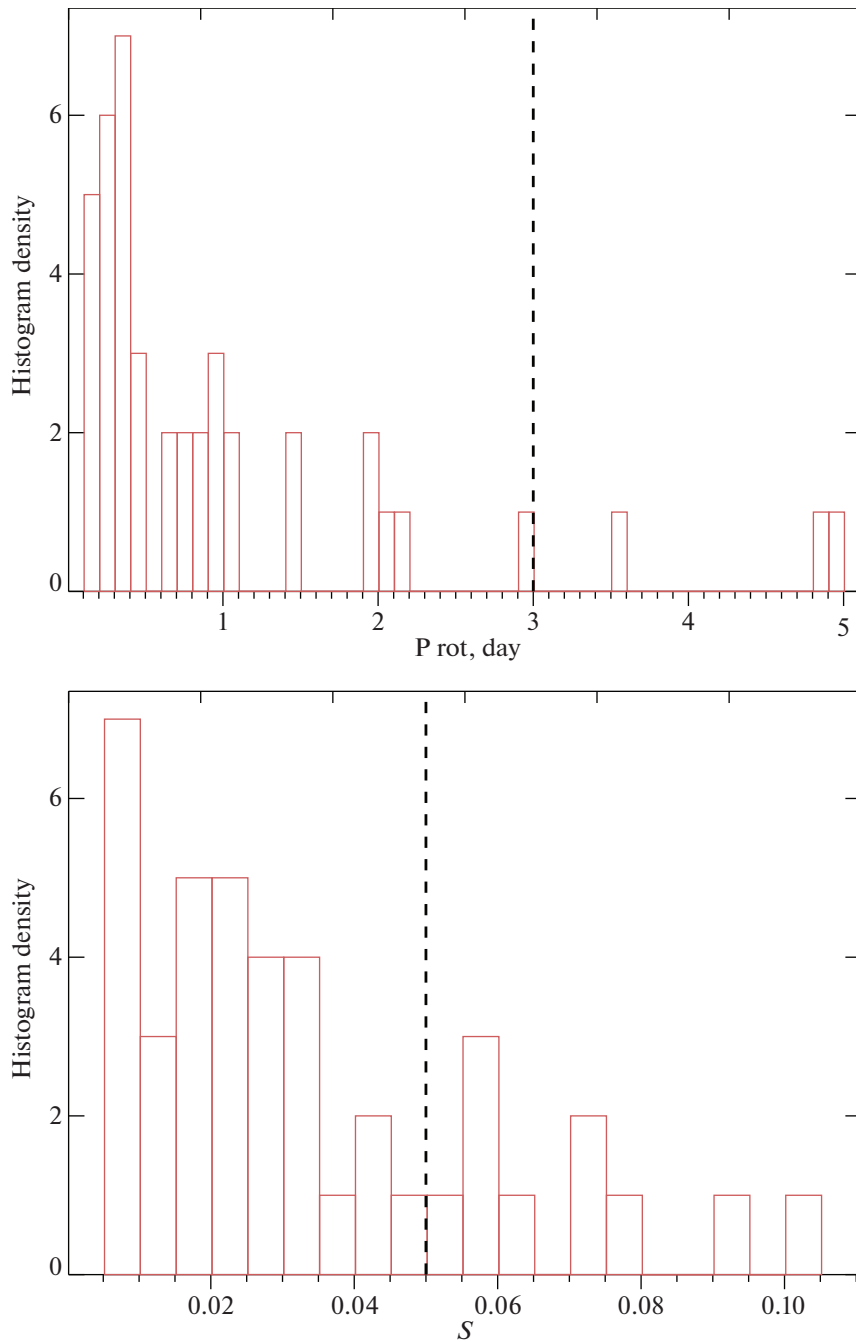
чения оценок параметра запятненности  $S$  (доли поверхности, покрытой холодными пятнами) — амплитуду переменности блеска объекта  $R_{\text{var}}$  и его эффективную температуру, по ранее примененной нами методике (см. Дмитриенко, Саванов, 2018; Саванов, 2015) было найдено 42 величины  $S$  (табл. 1). Как и в Сели и др. (2021), для всех исследуемых звезд была принята величина эффективной температуры  $T_{\text{eff}} = 2560$  К, используемой при исследовании TRAPPIST-1.

На верхней диаграмме рис. 1 представлено сопоставление величин параметра запятненности  $S$  (в относительной величине) и величин  $A$  площадей пятен (в абсолютной мере, выраженной в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.) исследуемых звезд с величинами периода их вращения. Обе диаграммы позволяют сделать основные выводы, как об изменении активности звезд рассматриваемой выборки с изменением периодов вращения, так и о положении TRAPPIST-1 относительно звезд-аналогов.

Можно заключить, что большинство из объектов, отобранных Сели и др. (2021), вращаются быстрее, чем TRAPPIST-1, при этом площадь пятен на их поверхности сопоставима с величиной для TRAPPIST-1, или меньше. В среднем, TRAPPIST-1 вращается медленнее, чем большинство звезд из Сели и др. (2021), а его запятненность выше. Указанные выводы проиллюстрированы на рис. 2, на котором представлены гистограммы распределений величин периодов вращения и параметра запятненности  $S$ .

## ВОЗРАСТ И ЗАПЯТНЕННОСТЬ

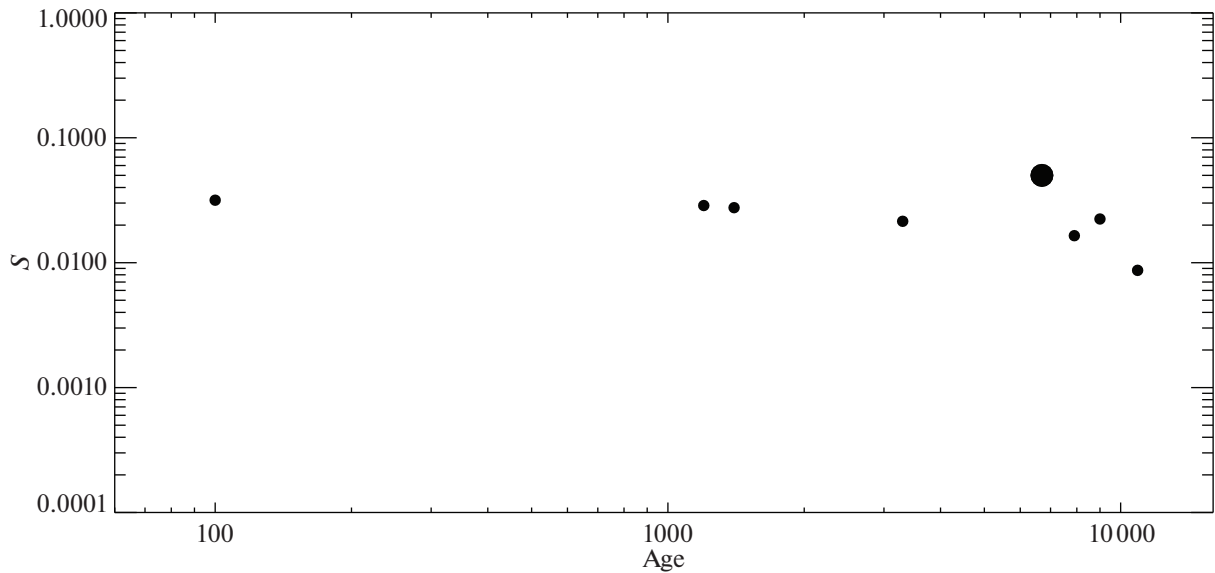
В принципе, такой результат можно ожидать, если большинство объектов из Сели и др. (2021) моложе, но с этим предположением плохо согласуется вывод о большей активности TRAPPIST-1. Объекты из Сели и др. (2021) были выбраны согласно их фотометрическим характеристикам, поэтому вполне естественно, что их возраст может различаться. Как указывалось, общепринятой оценкой возраста TRAPPIST-1 является  $7.6 \pm 2.2$  млрд лет (Бургассер, Мамаджек, 2017). Первые оценки возраста объектов были получены Сели и др. (2021) по их кинематическим свойствам. Затем, привлекая данные обзора GAIA, была рассмотрена возможность определения возраста для объектов, входящих в широкие пары. Окончательные результаты представлены Сели и др. (2021) в табл. 2, диапазон изменения возраста объектов выборки составляет 0–13 млрд лет. Возраст объектов устанавливается с очень большой погрешностью,



**Рис. 2.** Гистограммы распределений величин периодов вращения (вверху) и параметра запятненности  $S$  (в относительной величине) (внизу). Штриховые линии — данные для TRAPPIST-1.

так, например, при использовании кинематического метода погрешность определения составляет 2–3 млрд лет. В итоге было отобрано 19 пар объектов, но только для 9 из них имеются измерения лучевых скоростей. Наконец, не для всех звезд в Сели и др. (2021) приведены данные о периодах их вращения. Окончательно нами было выделено всего 7 объектов, для которых мы располагаем сведениями об их возрасте, вращении и пятенной

активности. На рис. 3 приведена диаграмма, на которой представлено сопоставление параметра  $S$  с возрастом объектов. Эти данные указывают на вероятное уменьшение параметра  $S$  с возрастом, подобно тому, как было отмечено нами ранее в Дмитриенко и Саванов (2017). При этом, как было указано выше, доля поверхности TRAPPIST-1, покрытая пятнами, превосходит величины  $S$ , полученные нами по данным Сели и др. (2021), в том



**Рис. 3.** Сопоставление параметра запятности  $S$  с возрастом семи объектов, имеющих наиболее точные определения параметров (см. текст). Крупный кружок — данные для TRAPPIST-1. По оси абсцисс — возраст в млн лет.

числе для более молодых звезд с возрастом 1–3 млрд лет.

Согласно данным, представленным на рис. 3, наиболее близкими по своим характеристикам к TRAPPIST-1 (возраст, вращение) являются два объекта — TIC 302408306 и TIC 366567664. Их возраст, согласно Сели и др. (2021), составляет  $9.0 \pm 3.4$  и  $7.9 \pm 3.3$  млрд лет соответственно. Они вращаются быстрее, чем TRAPPIST-1, величины их периодов вращения равны 0.64 и 0.73 сут. Площадь поверхности, покрытая пятнами, у этих холодных карликов несколько меньше, чем у TRAPPIST-1, но рассматриваемые величины сопоставимы. У TRAPPIST-1 холодные пятна занимают примерно 5% от площади видимой поверхности звезды, а у TIC 302408306 и TIC 366567664 — 3.7 и 2.7% соответственно. На рис. А.1 в Сели и др. (2021) приведены кривые блеска для этих звезд. Можно отметить, что TIC 302408306 и TIC 366567664 обладают по сравнению с TRAPPIST-1 более стабильной и более выраженной вращательной модуляцией блеска (более гладкие фазовые кривые с одним минимумом). Для TRAPPIST-1 в Дмитриенко и Саванов (2018) было сделано заключение о быстрой переменности формы кривой блеска звезды — изменения происходили на характерных временах, сопоставимых с одним периодом вращения объекта.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

TRAPPIST-1 (2MASS J23062928-0502285) является холодным карликом спектрального класса M8, окруженным семью планетами. Этот объект

служит предметом многочисленных наблюдательных и теоретических исследований (число ссылок в базе данных SIMBAD более 700). Три из семи планет расположены в зоне обитаемости. Сели и др. (2021) представили результаты анализа ультрахолодных карликов, подобных TRAPPIST-1, используя архив космической миссии TESS. Для 42 звезд были определены периоды вращения менее 5 сут, что указывает на значительную долю быстрых ротаторов в выборке. Возраст 88 объектов из выборки был оценен с применением нескольких подходов, включая кинематический.

Используя имеющиеся данные для этих звезд, мы получили оценки параметра запятности  $S$  (доли поверхности, покрытой холодными пятнами) и величины площадей пятен в единицах м.д.п. В результате мы пришли к заключению, что, в среднем, TRAPPIST-1 вращается медленнее, чем большинство звезд из Сели и др. (2021), а его запятность выше. Нами было рассмотрено 7 объектов, для которых мы располагаем достоверными сведениями об их возрасте, вращении и запятности. Сопоставление параметра  $S$  с возрастом объектов в целом указало на вероятное уменьшение параметра  $S$  с возрастом, при этом доля поверхности TRAPPIST-1, покрытая пятнами, превосходит аналогичные величины для других объектов, в том числе для более молодых звезд с возрастом 1–3 млрд лет.

Были выделены два объекта — TIC 302408306 и TIC 366567664 — с близкими характеристиками (возраст, вращение) к TRAPPIST-1. Их возраст, согласно Сели и др. (2021), равен 9.0 и 7.9 млрд лет (погрешность величин составляет около 3 млрд

лет) соответственно. Эти звезды вращаются быстрее, чем TRAPPIST-1, а площадь поверхности, покрытая пятнами, у них несколько меньше, чем у TRAPPIST-1, но рассматриваемые величины сопоставимы. Указанные объекты обладают по сравнению с TRAPPIST-1 более стабильными и более гладкими фазовыми кривыми с одним минимумом.

И.С. Саванов признателен правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

В настоящей работе использовались сведения из астрономической базы данных SIMBAD и архива космической миссии TESS.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бургассер, Мамаджек (A.J. Burgasser and E.E. Mamajek), *Astrophys. J.* **845**, 110 (2017).
2. Вида и др. (K. Vida, Z. Kóvári, A. Pál, K. Oláh and L. Kriskovics), *Astrophys. J.* **841**, 124 (2017).
3. Гиллон и др. (M. Gillon, E. Jehin, S.M. Lederer, et al.), *Nature* **533**, 221 (2016).
4. Гиллон и др. (M. Gillon, A.H.M.J. Triaud, B.-O. Demory, et al.), *Nature* **542**, 456 (2017).
5. Гонзалес и др. (E.C. Gonzales, J.K. Faherty, J. Gagné, et al.), *Astrophys. J.* **886**, 131 (2019).
6. Дмитриенко, Саванов (E.S. Dmitrienko and I.S. Savanov), *Astron. Rep.* **61**, 122 (2017).
7. Дмитриенко, Саванов (E.S. Dmitrienko and I.S. Savanov), *Astron. Rep.* **62**, 412 (2018).
8. Наговицын, Певцов (Y.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), *Astrophys. J.* **906**, 27 (2021).
9. Саванов (I.S. Savanov), *Astrophys. Bull.* **70**, 83 (2015).
10. Сели и др. (B. Seli, K. Vida, A. Moór, A. Pál, and K. Oláh), *Astron. Astrophys.* **650**, A138 (2021).

# ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВРАЩЕНИЕ КРУПНЫХ ДОЛГОЖИВУЩИХ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН И ИХ МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА

© 2022 г. А. А. Осипова<sup>1\*</sup>, Ю. А. Наговицын<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 22.09.2022 г.

После доработки 31.10.2022 г.; принята к публикации 15.11.2022 г.

Наговицын и др. (2018) выявили две моды зависимости скорости вращения крупных долгоживущих групп солнечных пятен от широты, однако чем именно объясняется феномен двухкомпонентности, осталось необъясненным. В данной работе проверяется предположение о связи скорости дифференциального вращения таких групп с их морфологической структурой. Используются данные Гринвичской обсерватории за промежуток времени 1874–1976 гг. Получено, что кривая дифференциального вращения более быстрой моды крупных долгоживущих групп пятен LLG1 совпадает с кривой дифференциального вращения, полученной для групп, растянутых по долготе (streams), а кривая вращения более медленной моды LLG2 — для групп, состоящих из одного пятна или кластера пятен (singles).

*Ключевые слова:* группы солнечных пятен, дифференциальное вращение.

DOI: 10.31857/S0320010822110110

## ВВЕДЕНИЕ

Дифференциальное вращение Солнца может быть описано законом Фая:  $\omega = A + B \sin^2 \varphi$ , где  $A$  — угловая скорость вращения Солнца на экваторе,  $B$  — коэффициент дифференциальности,  $\varphi$  — широта. Иногда в эту формулу добавляется еще один член разложения по полиномам Лежандра — синус широты в четвертой степени. Факт разложения по четным степеням синуса фиксирует симметричность вращения относительно экватора. Дифференциальному вращению, рассчитанному по координатным наблюдениям групп солнечных пятен, посвящено большое количество работ (Обридко, Наговицын, 2017). Оно может зависеть от цикла солнечной активности (Гокхэйл, Сивараман, 1981; Говард, 1976, 1984; Кэмбри, Нишикава, 1990), магнитной структуры (Бальтазар и др., 1986), возраста группы (Годоли, Маццукони, 1979; Тернулло и др., 1981; Ньютон, Нанн, 1951; Гокхэйл, Хиремат, 1984), размера группы (Уорд, 1966; Ховард и др., 1984; Джа и др., 2021), ее эволюции (Куценко, Абраменко, 2021).

В работе Наговицына и др. (2018) предложен новый подход, основанный на рассмотрении ги-

стограмм группированных выборок значений долготных скоростей групп солнечных пятен в последовательных интервалах широт. Такой подход позволяет для данного широтного интервала рассмотреть общее распределение скоростей и выделить современными статистическими методами (Левенберг, 1944; Марквардт, 1963) — так называемый LM-алгоритм — отдельные нормальные моды. В результате было показано, что общую картину можно себе представить как одновременное существование двух фундаментальных мод вращения групп пятен: быстрой T1 и медленной T2. Дифференциальность вращения у них практически одинакова: коэффициент при  $\sin^2$  в законе Фая — 2.87–2.88 град/сут, экваториальная скорость же значимо различается на 0.27 град/сут.

С другой стороны, ранее были выявлены две различающиеся популяции групп солнечных пятен (Дмитриева и др., 1968; Куклин, 1980; Наговицын и др., 2012, 2016, 2017, 2021; Наговицын, Певцов, 2016): мелкие короткоживущие группы SSG и крупные долгоживущие LLG. Рассмотрение долготных скоростей групп пятен в рамках подхода группированных выборок и LM-алгоритма Наговицыным и др. (2018) показало, что SSG связаны

\*Электронный адрес: osisasha@mail.ru

с быстрой компонентой вращения, а LLG — и с быстрой, и с медленной.

В этой работе мы пытаемся понять, почему вращению LLG групп соответствуют две компоненты вращения. Иначе говоря, существуют ли свойства групп, которые упорядочивают общую картину? В качестве гипотезы мы предполагаем, что разделение на две выявленные моды вращения у LLG связано с морфологической структурой групп пятен этой популяции.

Ранее Уорд (1966), используя данные Гринвичской обсерватории за промежуток 1935–1944 г. о морфологическом типе групп, разделил их на три класса в зависимости от сложности морфологической структуры и вытянутости по долготе. Он показал, что вытянутые по долготе группы вращаются быстрее правильных, почти круглых групп. Бальтазар и др. (1986) показали, тоже по гринвичским данным, но за промежуток 1940–1968 г., что скорость дифференциального вращения групп солнечных пятен зависит от цюрихского класса группы, где одиночные крупные группы типов H и J вращаются медленнее всего, а типы C и D — наиболее быстрые.

## ДАННЫЕ

Для определения скоростей дифференциального вращения по группам пятен популяции LLG относительно кэррингтоновской системы координат используем длительные данные Гринвичской обсерватории (RGO, <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>, Уиллис и др., 2013) за все время существования этой программы наблюдений с 1874 по 1976 г.

Согласно Наговицыну и Певцову (2016), популяции групп пятен, площади которых образуют два логнормальных распределения, разделяются по времени жизни: SSG существуют  $\leq 5$  дней, LLG  $> 5$  дней. Для каждой группы, принадлежащей LLG популяции, имеются данные о ее кэррингтоновской долготе  $L$  для всех дней наблюдений. Мы строим зависимость долготы от времени  $L = L(t)$ , и приближаем полученную картину с помощью метода наименьших квадратов линейным уравнением  $L = a + bt$ , где  $b$  является скоростью  $\omega_C$  долготного дифференциального вращения относительно кэррингтоновской сетки координат. На модуль скорости долготных скоростей накладываем ограничение сверху 2.5 град/сут. Морфологический тип группы определяем в день максимального развития группы, когда площадь группы максимальна.

Скорость дифференциального вращения  $\omega_C$  рассчитывается относительно системы гелиографических долгот Кэррингтона, которая вращается

с периодом 25.38 сут (Аллен, 1977). Для перевода  $\omega_C$  в сидерическую скорость дифференциального вращения используем  $\Delta\omega = 360$  град/25.38 сут = 14.18 град/сут, так что сидерические скорости дифференциального вращения  $\omega = \omega_C + \Delta\omega$ .

Проанализируем морфологическую структуру групп солнечных пятен. Каждой группе с 1874 по 1976 г. в Гринвиче присваивался тип, описывающий морфологическую структуру (Уиллис и др., 2013):

0 = одиночное пятно;

1 = одиночное пятно с несколькими мелкими пятнами;

2 = пара пятен;

3 = пара пятен с несколькими мелкими пятнами;

4 = растянутое по долготе пятно;

5 = растянутое по долготе пятно с отдельным одиночным пятном;

6 = растянутое по долготе пятно с двумя отдельными пятнами;

7 = кластер пятен или группа сложной формы;

8 = два кластера пятен или группа сложной формы;

9 = прочее, не подпадающее под описание других типов.

В своей известной работе Уорд (1966) разделил эти типы групп на три смысловых класса:

— одиночные (singles) — гринвичские типы групп пятен 0, 1, 7;

— двойные (doubles) — типы 2, 3, 8;

— растянутые по долготе (streams) — типы 4, 5, 6.

Повторим разбиение групп на морфологические классы аналогично Уорду, но для всего времени проведения гринвичских наблюдений. Тип 9 мы не включали в рассмотрение, как и Уорд (1966), поскольку в этом типе содержатся группы морфологической структуры, не подпадающие под описание какого-либо из типов 0–8. В табл. 1 приведено полученное количество групп разных типов.

Всего нами было получено долготных скоростей групп пятен для типов: одиночные (singles) — 5249, двойные (doubles) — 1429, растянутые по долготе (streams) — 4174. Далее для каждого из трех типов в избранных интервалах широт, следуя подходу Наговицына и др. (2018), была найдена среднестатистическая скорость вращения. А именно, сначала производился 2D-биннинг долготных скоростей со следующими параметрами: по синусу широты  $\sin \varphi \in [-0.625; 0.625]$ ,  $\Delta \sin \varphi = 0.05$ ,  $\omega \in [-2.55; 2.55]$ ,  $\Delta \omega = 0.1$ . Затем для каждой широты каждого интервала  $\sin \varphi$  распределение скоростей группированной выборки предполагалось нормальным, и с помощью LM-алгоритма находились его среднее и ошибка этого значения, которые присваивались данному среднему синусу широты  $\sin \varphi$  как локальная скорость дифференциального вращения  $\omega = \omega(\sin \varphi)$ .

**Таблица 1.** Количество групп пятен популяции LLG различных типов

Тип	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Количество	2327	1632	806	420	2024	1138	1012	1290	203	1367

**Таблица 2.** Результаты использования  $t$ -критерия Стьюдента для проверки гипотезы о совпадении кривых дифференциального вращения различных типов на уровне значимости 5%,  $M_1$  и  $M_2$  — средние арифметические,  $m_1$  и  $m_2$  — стандартные ошибки среднего,  $t$  — наблюдаемое значение  $t$ -критерия (2),  $T_{cr}$  — наблюдаемое значение  $t$ -критерия

Ряды	$M_1 - M_2$	$m_1^2 + m_2^2$	$t$	$T_{cr}$
Singles – T2	0.0041	$1.05162 \times 10^{-4}$	0.40	2.09
LLG2 – T2	–0.01374	$2.02476 \times 10^{-4}$	0.97	2.09
Streams – T1	–0.0156	0.00103	0.49	2.09
LLG1 – T1	–0.00679	0.00392	0.11	2.09
Singles – LLG2	0.01783	$3.07638 \times 10^{-4}$	1.02	2.09
Streams – LLG1	–0.00881	0.00495	0.13	2.09

Здесь следует сделать важное методическое замечание. В недавней работе Куценко и Абраменко (2021) по данным SDO/HMI показано, что при эволюции некоторых групп пятен на видимой полусфере Солнца от полноценной биполярной конфигурации до стадии, когда хвостовая часть в белом свете пропадает, происходит сдвиг средних координат группы, что должно приводить к завышению истинной (средневзвешенной по магнитному потоку) скорости вращения. Это существенное замечание, поэтому мы оценили вклад таких групп в статистику. Всего групп популяции LLG за 102 года наблюдений 12 197. Среди них 3993 группы, представляющие типы 0 и 1 в максимальной стадии развития, а оставшихся групп неуниполярных типов 2–8 в максимальной стадии развития — 8204. Далее из них нами были отобраны те группы, которые завершили эволюцию как униполярные — в последний день их наблюдения. С типами 0 и 1 таких групп было 792: 700 типа 0 и 92 типа 1. Таким образом, получаем, что частотность случаев, описанных Куценко и Абраменко (2021), в общей статистике всего 9.7%, и это вряд ли изменит общую картину наших статистических распределений.

#### КРИВЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ВРАЩЕНИЯ ДЛЯ ГРУПП ПЯТЕН РАЗЛИЧНЫХ МОРФОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Результирующие данные о дифференциальном вращении показаны на рис. 1. Там же приведены

кривые дифференциального вращения быстрой и медленной модах T1 и T2 из статьи Наговицына и др. (2018) в приближении  $\omega = A + B \sin^2 \varphi$  — пунктир. Им соответствуют формулы

$$\omega_{T1} = (14.616 \pm 0.013) - (2.88 \pm 0.13) \sin^2 \varphi, \quad (1)$$

$$\omega_{T2} = (14.3499 \pm 0.0039) - (2.869 \pm 0.043) \sin^2 \varphi.$$

Также на рис. 1 нанесены данные о быстрой и медленной моде крупных долгоживущих групп пятен LLG1 и LLG2 из той же статьи. Можно отметить, что группы различных морфологических типов ложатся на разные кривые вращения. На рис. 1 видно, что группы, состоящие из одного пятна или кластера пятен, вращаются медленнее всех, двойные или биполярные группы вращаются чуть быстрее, и самые быстрые — это растянутые по долготе группы пятен. Также можно заметить, что кривые вращения групп типа singles (состоящих из одного пятна или кластера пятен) лежат ближе к более медленной моде T2, а streams (растянутых по долготе) — к более быстрой моде T1. В следующем пункте проверим это предположение. Так как малочисленный тип двойных или биполярных групп составляющий всего 13% от общего рассматриваемого числа групп, лежит между модами T1 и T2, в дальнейшем анализе этот тип рассматривать не будем.



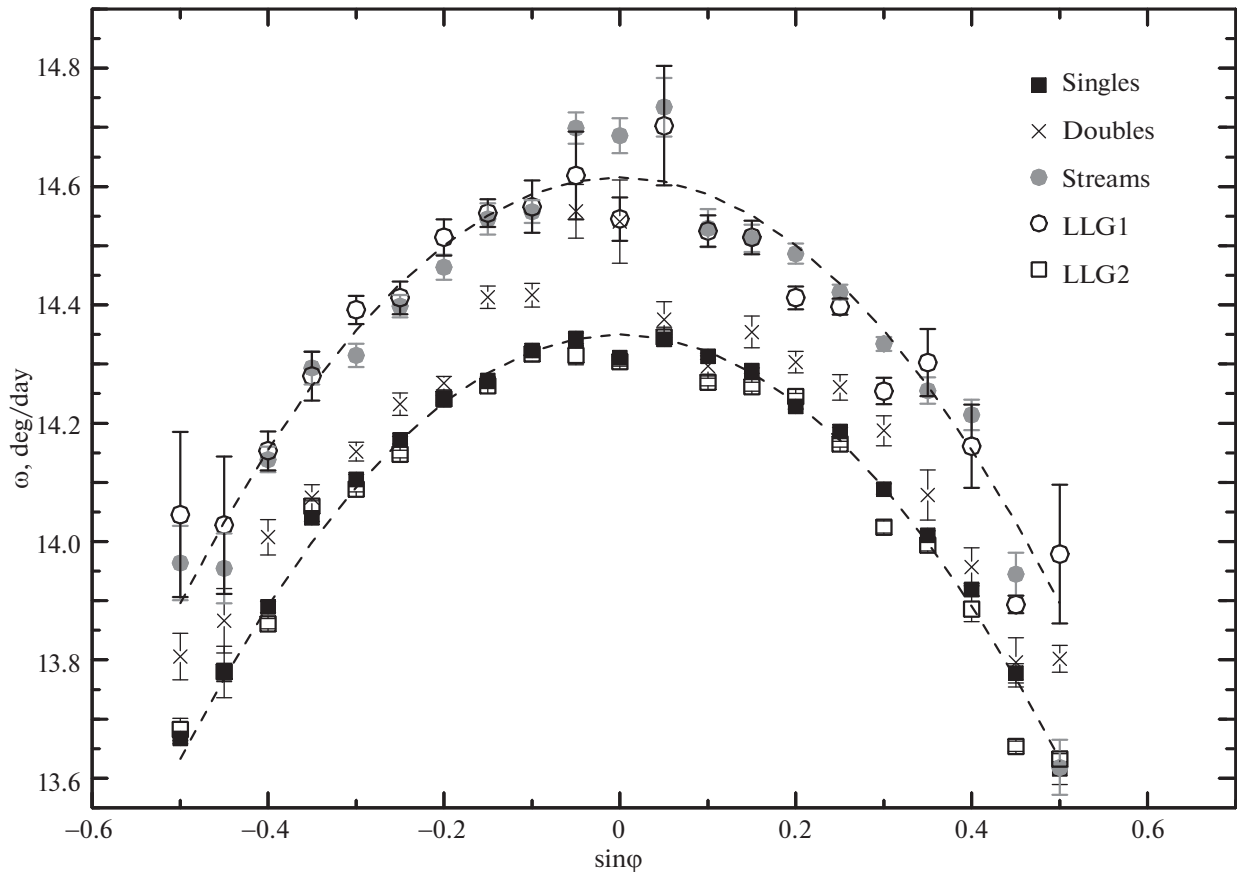


Рис. 1. Кривые вращения для промежутка 1874–1976 гг. для рассмотренных в статье типов групп (черные квадратики — singles, черные крестики — doubles, серые кружки — streams), наложенные на полученные Наговицыным и др. (2018) кривые вращения быстрой и медленной моды крупных долгоживущих групп пятен LLG1 (белые кружки) и LLG2 (светлые квадратики) и моды вращения крупных долгоживущих пятен (верхняя пунктирная линия — более быстрая мода T1, нижняя — более медленная T2 из формулы (1)).

### СВЯЗЬ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ГРУППЫ И ДВУХ МОД ВРАЩЕНИЯ LLG

Из рассмотрения рис. 1 мы можем предположить, что более медленная кривая вращения LLG2 совпадает с кривыми вращения singles и T2, а кривая вращения быстрых больших пятен LLG1 — с модами вращения streams и T1. Проверим данное предположение с использованием  $t$ -критерия Стьюдента (Гмурман, 1968; Стьюдент, 1908):

$$t = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \quad (2)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  — средние арифметические,  $m_1$  и  $m_2$  — стандартные ошибки среднего. Значение критического  $T_{cr}$  находится по таблице распределения Стьюдента для выбранного уровня значимости. Проверим нашу гипотезу о совпадении кривых дифференциального вращения типа singles с медленной модой вращения популяции LLG2 и фундаментальной модой вращения T2, а также о

совпадении кривых дифференциального вращения типа streams с быстрой модой вращения популяции LLG1 и фундаментальной модой вращения T1. Проверку гипотезы о совпадении будем проверять на уровне значимости 5%, тогда  $T_{cr} = 2.09$ . Если мы проверяем непротиворечивость этой гипотезы, то для полученных нами с использованием формулы (2)  $t$  должно выполняться условие

$$|t| < T_{cr}. \quad (3)$$

Результаты представлены в табл. 2, для всех рассмотренных сравнений рядов выполняется условие (3).

Теперь проверим — уже на 1% уровне значимости — различие мод вращения разных типов групп, находя  $t$  и сравнивая его для этого уровня значимости с  $T_{cr} = 2.9$ . Соответственно, в этом случае должно быть  $|t| > T_{cr}$ . Результаты представлены в табл. 3. Различие для всех случаев оказывается значимым.

Таким образом, обе проверяемые гипотезы дали положительный результат. Вывод: гипотеза о

**Таблица 3.** Результаты использования  $t$ -критерия Стьюдента для проверки гипотезы о различии кривых дифференциального вращения различных типов на уровне значимости 1%

Ряды	$M_1 - M_2$	$m_1^2 + m_2^2$	$t$	$T_{cr}$
Singles – Streams	–0.24539	0.00114	7.3	2.9
Singles – LLG1	–0.2542	0.00402	4.0	2.9
Singles – T1	–0.26099	$1.05162 \times 10^{-4}$	25	2.9
Streams – LLG2	0.26323	0.00124	7.5	2.9
Streams – T2	0.24949	0.00103	7.8	2.9
LLG1 – LLG2	0.27204	0.00412	4.2	2.9
LLG2 – T1	–0.27883	$2.02476 \times 10^{-4}$	20	2.9
LLG1 – T2	0.2583	0.00392	4.1	2.9

том, что скорость дифференциального вращения крупных долгоживущих групп солнечных пятен связана с их морфологической структурой, подтверждается.

### ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее Наговицын и др. (2018) подтвердили, вслед за рядом других работ, что скорость дифференциального вращения групп солнечных пятен не является универсальной функцией широты. Обосновывалось предположение о существовании на Солнце двух фундаментальных мод вращения: быстрой T1 и медленной T2. Популяция мелких короткоживущих групп SSG вращается быстро, а популяция крупных долгоживущих групп LLG разделяется на две: на те, скорость вращения которых такая же, как и у SSG, и на те, которые вращаются значительно медленнее.

В нашей статье мы получили, что кривая вращения более быстрой моды крупных долгоживущих групп пятен LLG1 статистически совпадает с кривой дифференциального вращения групп, растянутым по долготе (гринвичский тип — streams), а кривая вращения более медленной моды LLG2 — с кривой дифференциального вращения групп, состоящих из одного пятна или кластера пятен (singles). При этом быстрому вращению соответствует мода T1, а медленному — T2.

Группы гринвичского типа doubles, составляющие по численности не более 13% от общего числа рассмотренных групп, занимают промежуточное положение между модами вращения. Можно предположить, что для них оказывается существенным вклад собственных движений пятен внутри группы.

Таким образом, пренебрегая группами типа doubles, можно заключить, что “раздвоение” кривых дифференциального вращения на моды T1 и

T2 у крупных долгоживущих групп, обнаруженное ранее, обусловлено различием их морфологической структуры.

Работа выполнена при поддержке Программы крупных проектов Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2020-780). Авторы благодарят рецензентов за ценные замечания.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен К.У., *Астрофизические величины* (М.: Мир, 1977).
2. Бальтазар и др. (H. Balthasar, M. Vazquez, and H. Woehl), *Astron. Astrophys.* **155**, 87 (1986).
3. Говард (R. Howard), *Astrophys. J.* **93**, L159 (1976).
4. Годоли, Маццукони (G. Godoli and P. Mazzucconi), *Solar Phys.* **64**, 247 (1979).
5. Гокхэйл, Сивараман (M.H. Gokhale and K.R. Sivaraman), *J. Astrophys. Astron.* **2**, 365 (1981).
6. Гокхэйл, Хиремат (M.H. Gokhale and K.M. Hiremath), *Astron. Soc. India*, **12**, 398 (1984).
7. Джа и др. (B.K. Jha, A. Priyadarshi, S. Mandal, S. Chatterjee, and D. Banerjee), *Solar Phys.* **296**, 25 (2021).
8. Куценко, Абраменко (A.S. Kutsenko and V.I. Abramenko), *Open Astron.* **30**, 219 (2021).
9. Кэмбри, Нишикава (M.A. Kambry and J. Nishikawa), *Solar Phys.* **126**, 89 (1990).
10. Леверберг (K. Levenberg), *Quarterly of Appl. Math.* **2**, 164 (1944).
11. Маквардт (D. Marquardt), *SIAM J. Appl. Math.* **11**, 431 (1963).
12. Наговицын и др. (Y.A. Nagovitsyn, A.A. Osipova, and A.A. Pevtsov), *MNRAS* **501**, 2782 (2021).

13. Наговицын и др. (Y.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and A.A. Osipova), *Astron. Nachr.* **338**, 26 (2017).
14. Наговицын и др. (Y.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and W. Livingston), *Astrophys. J. Lett.* **758**, L20 (2012).
15. Наговицын Ю.А., Певцов А.А., Осипова А.А. и др., *Письма в Астрон. журн.* **42**, 773 (2016) [Y.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, A.A. Osipova, A.G. Tlatov, E.V. Miletskii, and E.Yu. Nagovitsyna, *Astron. Lett.* **42**, 703 (2016)].
16. Наговицын Ю.А., Певцов А.А., Осипова А.А., *Письма в Астрон. журн.* **44**, 229 (2018) [Yu.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, A.A. Osipova, *Astron. Lett.*, **44**, 202 (2018)].
17. Наговицын, Певцов (Y.A. Nagovitsyn and A.A. Pevtsov), *Astrophys. J.* **833**, 94 (2016).
18. Ньютон, Нанн (H.W. Newton and M.L. Nunn), *MNRAS* **111**, 413 (1951).
19. Обридко В.Н., Наговицын Ю.А., *Солнечная активность, цикличность и методы прогноза* (СПб: ВВМ, 2017).
20. Стьюдент (Student), *Biometrika*, **6**, 1 (1908).
21. Тернулло и др. (M. Ternullo, R.A. Zappala, and P. Zuccarello), *Solar Phys.* **74**, 111 (1981).
22. Уиллис и др. (D.M. Willis, H.E. Coffey, R. Henwood, E.H. Erwin, D.V. Hoyt, M.N. Wild, and W. Denig), *Solar Phys.* **288**, 117 (2013).
23. Уорд (F. Ward), *Astrophys. J.* **145**, 416 (1966).
24. Хатавей и др. D.H. (Hathaway, R.M. Wilson, and E.J. Reichmann), *Solar Phys.* **211**, 357 (2002).
25. Ховард и др. (R. Howard, P.I. Gilman, and P.A. Gilman), *Astrophys. J.* **283**, 373 (1984).
26. Хэйс (W. Hays), *Statistics* (Cengage Learning, 1994).
27. <https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>

**ПАМЯТИ  
ВАЛЕРИЯ АНАТОЛЬЕВИЧА РУБАКОВА  
16.02.1955–19.10.2022**



19 октября 2022 года ушел из жизни выдающийся физик-теоретик, крупнейший специалист в области физики элементарных частиц, квантовой теории поля и космологии, главный научный сотрудник Института ядерных исследований Российской академии наук, руководитель Секции ядерной физики Отделения физических наук РАН, академик Рубаков Валерий Анатольевич. Его научные работы во многом определили дальнейшее развитие этих областей, открыли несколько новых направлений развития теоретических исследований и инициировали широкомасштабную экспериментальную проверку теоретических предсказаний на стыке физики частиц и космологии.

Валерий Анатольевич Рубаков родился в Москве, окончил в 1972 году широко известную физико-математическую школу № 57. В том же году поступил на Физический факультет Москов-

ского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ), затем, в 1978 г., в аспирантуру Института ядерных исследований АН СССР (сейчас ИЯИ РАН). Работая здесь, он защитил кандидатскую и докторскую диссертации, прошел путь от младшего до главного научного сотрудника и несколько лет в сложные перестроечные годы (1987–1994) проработал в должности заместителя директора по науке.

Еще в университете он начал заниматься научной работой, его первой целью на студенческой скамье была ни много ни мало, а задача о квантовании гравитации. Полученные результаты в контексте космологических моделей получили развитие и навсегда привили ему любовь к гравитации, космологии и задачам в смежных областях.

Исследования непертурбативных процессов с нарушением барионного и лептонных чисел в калибровочных теориях привели к появлению ре-

зультатов, навсегда золотыми буквами вписавших имя молодого физика-теоретика в мировую историю развития естествознания. Для объяснения отсутствия античастиц вокруг нас требуется выполнение в ранней Вселенной условий Сахарова. Одно из них состоит в необходимости нарушения барионного числа на микроскопическом уровне, и такую возможность предоставляли обобщения Стандартной модели физики элементарных частиц (далее, Стандартная модель) в рамках идеи о теории Великого объединения калибровочных взаимодействий. В 1981 г. В.А. Рубаков показал, что предсказываемые в таких моделях магнитные монополи (аналоги частиц с электрическим зарядом) приводят при попадании в протон к его распаду. Это принесло ему мировую славу и подстегнуло поиски таких объектов и таких процессов в космических лучах и подземных лабораториях.

На самом деле барионное число нарушается и в Стандартной модели за счет аномальных квантовых процессов. В 1985 г. совместно с В.А. Кузьминым и М.Е. Шапошниковым В.А. Рубаков показал, что в ранней Вселенной до эпохи электрослабого перехода эти аномальные процессы находятся в равновесии в плазме: сфалеронные переходы приводят к микроскопическому нарушению барионного заряда. Это открыло путь к построению моделей электрослабого бариогенезиса, в которых асимметрия между материей и антиматерией появляется в эпоху электрослабого перехода. Поиски новой физики на Большом адронном коллайдере мотивированы в том числе желанием прямой проверки этого механизма бариогенезиса. Наконец, тогда же указанными авторами было понято, что сфалероны, помимо барионного, нарушают также и лептонные квантовые числа, а в плазме той эпохи барионные и лептонные заряды перемешиваются. Из этого наблюдения скоро возникла идея лептогенезиса — создания асимметрии в лептонном секторе, а затем перераспределения этой асимметрии в барионный сектор сфалеронными переходами. Идея получила популярность в связи с растущими набором экспериментальных данных, указывающих на нейтринные осцилляции (переходы нейтрино одного типа в другие), что требовало модификации Стандартной модели в лептонном секторе. Она получила элегантное воплощение в рамках моделей со стерильными нейтрино и механизмом типа качелей, где асимметрия появляется в распадах этих новых электрически нейтральных фермионов с массами близкими масштабу теорий Великого объединения. Впоследствии были найдены условия успешного производства асимметрии и в моделях с более легкими частицами. В 1998 г. в работе с Е.К. Ахмедовым и А.Ю. Смирновым В.А. Рубаков предложил альтернативный вариант появления асимметрии в результате осцилляций стерильных и ак-

тивных нейтрино в первичной плазме. Здесь асимметрия возникала между активными и стерильными компонентами, и часть активных нейтрино переводилась в барионную асимметрию сфалеронными переходами. Такой вариант работает в моделях с легкими стерильными нейтрино, кинематически доступными в экспериментах по прямому поиску. Это привело к созданию многочисленных моделей с легкими новыми частицами, необходимыми для объяснения нейтринных осцилляций, барионной асимметрии Вселенной, темной материи и других нерешенных загадок современной фундаментальной физики. В то же время, это инициировало поиски таких легких частиц на работающих установках и развитие многочисленных проектов будущих экспериментов для осуществления непосредственной проверки широкого набора предсказаний наиболее перспективных моделей новой физики с легкими частицами.

В течение всей своей научной карьеры, параллельно с развитием новых идей в области физики элементарных частиц, В.А. Рубаков работал над вопросами из области гравитации, и эта работа была не менее продуктивной. Его продуктивности как генератора новых идей невозможно не удивляться. С самого момента возникновения моделей ранней инфляционной стадии развития Вселенной, его заинтересовал вопрос о физических процессах той эпохи. В 1982 г. совместно с А.В. Веряским и М.В. Сажиним он нашел, что рождаемые на инфляционной стадии гравитационные волны приводят к появлению специфической анизотропии температуры реликтового излучения. Этот эффект и сейчас является основным для экспериментального ограничения амплитуды первичных гравитационных волн, а значит, и темпа расширения, и плотности энергии Вселенной инфляционной эпохи. В 1983 г. совместно с М.Е. Шапошниковым им была предложена концепция многомерного пространства, где наш трехмерный мир — это топологический дефект, трехмерная доменная стенка, на которой за счет взаимодействия с образующим стенку полем локализованы наши частицы. У такой модели существует аналог в физике твердого тела, когда электромагнитное взаимодействие в ряде случаев делает электроны эффективно двумерными, позволяя свободно двигаться лишь вдоль плоскости. В рамках такого подхода предлагалось также решение фундаментальной проблемы космологической постоянной: получение мира с нулевой энергией вакуума. Спустя 15 лет такое решение действительно было найдено, многомерные модели стали активно развиваться, а сама концепция получила название “мир на бране”. Кроме того, были предложены различные варианты реализации идеи с большими дополнительными пространственными измерениями, локализации полей

Стандартной модели и ее обобщений, гравитации. Получены многочисленные предсказания в астрофизике, космологии, для прецизионных измерений, ускорительных экспериментов, которые активно проверялись и проверяются в том числе на Большом адронном коллайдере. Здесь В.А. Рубакова интересовали процессы с эффективным (с точки зрения трехмерного наблюдателя) несохранением зарядов, нарушением унитарности, исчезновением массы, а также построение реалистичных космологических моделей и получение специфических для этих моделей предсказаний (например, диффузных гравитационных волн), подходы к решению проблемы большой разницы между гравитационным и электрослабым энергетическими масштабами за счет понижения гравитационного масштаба.

В 1984 г. В.А. Рубаков начал работать над изучением процессов рождения частиц в туннельных квантовых переходах в расширяющейся Вселенной. Им с Г.В. Лаврелашвили и П.Г. Тиняковым было исследовано нарушение когерентности в изменяющих топологию туннельных процессах во Вселенной, и показана его критичность в том числе для процессов с квантовым рождением новых вселенных. Перспективы создать новую Вселенную “в лаборатории” вдохновляли Рубакова на протяжении всей научной карьеры. В начале 90-х годов он исследовал влияние непертурбативных процессов, таких как инстантонные переходы, на рассеяние частиц. Потом встал вопрос о возможном усилении сечения множественного рождения частиц и вызванной этим потери унитарности при высоких энергиях, что было актуально, в частности, для множественного рождения хиггсовских бозонов на будущих высокоэнергетических адронных коллайдерах. Задача представляла интерес и в связи с открывающейся перспективой прямого обнаружения процессов с нарушением барионного числа в столкновениях на Большом адронном коллайдере. В ходе многолетней работы им с коллегами удалось показать несправедливость таких ожиданий: множественное рождение не усиливается, процесс с нарушением барионного числа на коллайдерах ожидать не следует. Тем не менее, непертурбативные процессы вполне могут иметь наблюдаемые в физических процессах следствия. Именно возможность экспериментальной проверки (пусть и в перспективе) новых физических идей всегда привлекала В.А. Рубакова. Так в 1998 г. он совместно с В.А. Кузьминым обратил внимание, что события космических лучей сверхвысоких энергий могут содержать продукты распадов сверхтяжелых реликтовых частиц (возможно частиц темной материи), происходящих на непертурбативном уровне из-за инстантонных переходов.

Начиная с 2000-х годов много внимания В.А. Рубаков уделял развитию моделей с моди-

фицированной гравитацией. Здесь были и многомерные теории, и попытки построить теоретически непротиворечивую модель с массивным гравитоном. Интерес к последней задаче возобновился в связи с открытием на рубеже столетий ускоренного расширения современной Вселенной. Хотя и просто построение теории с массивным гравитоном оказалось очень сложной задачей, изучение космологии в таких моделях показало, что связь динамики расширения Вселенной с массой гравитона тут куда более сложная, чем ожидалось. На этом пути у Рубакова появился интерес к моделям с модифицированной гравитацией и нестандартной материей, не укладывающейся в простое представление о совокупности релятивистских (радиация) и нерелятивистских (пыль) частиц. Теории эти представлялись перспективными в том числе для создания реалистичных гравитационных моделей с проходимыми “кротовыми норами”, открывающими возможность научных фантазий (теория не обязана реализовываться в природе) на тему путешествий на космологически большие расстояния без нарушения причинно-следственных связей. Исследования в этом направлении привели его, в частности, к предложению новых, альтернативных инфляционному, механизмов генерации неоднородностей материи в расширяющейся Вселенной, согласующихся с современными космологическими наблюдениями. Последние годы жизни В.А. Рубаков с молодыми коллегами активно работал над развитием космологических моделей с альтернативными инфляционными решениями проблем теории горячего Большого взрыва: циклических моделей развития Вселенной и моделей с отскоком, когда стадия сжатия сменяется стадией расширения.

Научные заслуги Валерия Анатольевича Рубакова были отмечены многочисленными международными и российскими премиями и наградами: Золотая медаль с премией для молодых ученых Академии наук СССР (1984), Премия им. А.А. Фридмана РАН (1999), Премия им. И.Я. Померанчука ИТЭФ (2003), Премия им. М.А. Маркова ИЯИ РАН (2005), Премия им. Б.М. Понтекорво ОИЯИ (2008), Премия Солвейских физических кафедр (Брюссель, 2009), Премия им. Х.Д. Йенсена ИТФ Университета Рупрехта-Карла (Гайдельберг, 2009), Премия им. Ю. Весса от Технологического института (Карлсруэ, 2010), Премия им. М.В. Ломоносова МГУ (2012), Премия им. Н.Н. Боголюбова ОИЯИ (2014), Демидовская премия (2016), Гамбургская премия по теоретической физике (2020). В возрасте 35 лет в 1990 г. он был избран членом-корреспондентом РАН (самый молодой в то время) и стал действительным членом в 1997 г. В 2015 г. он стал членом Гамбургской

академии наук и Американской академии наук и искусств (США).

Нельзя не отметить учебники, написанные В.А. Рубаковым по теории поля и калибровочным полям, по космологии (совместно с Д.С. Горбуновым) и по теории групп и симметрий (совместно с А.П. Исаевым): “Классические калибровочные поля” (1999), “Классические калибровочные поля: Теории с фермионами. Некоммутативные теории” (2005), “Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва” (2008), “Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория” (2009), “Теория групп и симметрий: Конечные группы. Группы и алгебры Ли” (2017), “Теория групп и симметрий: Представления групп Ли и алгебр Ли. Приложения” (2020). Эти издания стали настольными книгами специалистов, работающих в этих быстроразвивающихся областях теоретической физики.

Заметное время он уделял и организации научной деятельности. Рубаков стоял у истоков создания и на разных этапах принимал активное участие в работе Российского фонда фундаментальных исследований, фонда “Базис”, других научных фондов, входил в редколлегии нескольких российских и зарубежных журналов, много лет возглавлял журнал “Успехи физических наук” и Секцию ядерной физики Отделения физических наук РАН, длительное время работал в составе Наблюдательных научных советов CERN (Женева) и ИСТР (Триест). На протяжении трех десятков лет он руководил организацией серии Международных семинаров “QUARKS”, проводившихся в разных городах России и неизменно собиравших сильнейших ученых со всего мира. Но еще больше времени он уделял преподавательской деятельности, работе с молодежью, воспитанию нового поколения физиков-теоретиков, чтению научных и научно-популярных лекций. Он был профессором МГУ,

более десяти лет руководил Кафедрой физики частиц и космологии на Физическом факультете. У него несколько десятков учеников, которые работают в ведущих мировых научных центрах России, Европы, США и продолжают дело своего учителя.

Валерий Анатольевич обладал, казалось, неиссякаемым источником энергии. Он любил физику во всех ее проявлениях, с большим энтузиазмом начинал разбираться в самых разных научных вопросах, с которыми к нему обращались коллеги. И всегда совместное обсуждение с ним приоткрывало одно, а нередко и несколько направлений возможного решения вопроса. Общение с ним каждый раз оказывалось полезным и создавало позитивный настрой на дальнейшую работу. При этом за какое бы дело он ни брался, будь то научное исследование или административная работа, публичная лекция или учебный семинар, он всегда работал на результат, и результат этот был оказывался востребованным.

Таким энергичным, поразительно талантливым, ярким ученым, при этом очень отзывчивым и великодушным человеком навсегда останется он в наших сердцах.

*Д.С. Горбунов, Е.Х. Ахмедов,  
Ф.Л. Безруков, В.В. Белокуров,  
В.А. Березин, Р.А. Буренин,  
С.А. Гребенев, А.В. Иванчик,  
А.Л. Катаев, В.В. Кочаровский,  
Д.Г. Левков, М.В. Либанов,  
В.А. Матвеев, А.Д. Миронов,  
С.А. Миронов, В.Ф. Муханов,  
К.А. Постнов, Г.И. Рубцов,  
М.В. Сажин, О.С. Сажина,  
Д.В. Семикоз, А.Ю. Смирнов,  
А.А. Старобинский, Р.А. Сюняев,  
И.И. Тимирязев, П.Г. Тиняков,  
И.И. Ткачев, Е.М. Чуразов,  
М.Е. Шапошников, Д.Т. Шон,  
Л.Р. Юнгельсон*

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ (Том 47, 2021 г.)

DOI: 10.31857/S0320010822100011

**Abouelmagd E.I.** см. Pal A.K.

**Abdullah A.H., Kroupa P.** The Dichotomy of the Mass-Radius Relation and the Number of Globular Clusters, № 3, 205–205 (170–174)

**Авакян А.Л., Липунова Г.В., Маланчев К.Л., Шакура Н.И.** Изменение орбитального периода двойной системы из-за вспышки аккреционного диска с ветром, № 6, 403–415 (377–389)

**Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М., Банах П., Бардачова З., Белолоптиков И.А., Бруданин В.Б., Буднев Н.М., Гафаров А.Р., Голубков К.В., Горшков Н.С., Гресь Т.И., Дворницкий Р., Дик В.Я., Джилкибаев Ж.-А.М., Домогацкий Г.В., Дорошенко А.А., Дьячок А.Н., Еркелова Е., Елжов Т.В., Заборов Д.Н., Иванов Р.А., Катулин М.С., Кебкел К.Г., Кебкел О.Г., Кожин В.А., Колбин М.М., Конищев К.В., Копанский К.А., Коробченко А.В., Кошечкин А.П., Круглов М.В., Крюков М.К., Кулепов В.Ф., Миленин М.В., Миргазов Р.Р., Назари В., Наумов Д.В., Нога В., Петухов Д.П., Плисковский Е.Н., Розанов М.И., Рушай В.Д., Рябов Е.В., Сафронов Г.Б., Симкович Ф., Скурихин А.В., Соловьев А.Г., Сороковиков М.Н., Стекл И., Суворова О.В., Сушенок Е.О., Таболенко В.А., Таращанский Б.А., Файт Л., Филалковский С.В., Храмов Е.В., Шайбонов Б.А., Шелепов М.Д., Яблокова Ю.В., Яковлев С.А.** Слежение за высокоэнергичными нейтрино на Байкальском нейтринном телескопе Baikal-GVD, № 2, 114–124 (94–104)

**Аврорин А.Д.** см. Аврорин А.В.

**Аитов В.Н.** см. Колбин А.И.

**Айнутдинов В.М.** см. Аврорин А.В.

**Aksaker N.** см. Pogo A.

**Akyuz A.** см. Pogo A.

**Aladag Y.** см. Pogo A.

**Alicavus F.** см. Pogo A.

**Ананьева В.И.** см. Иванова А.Е.

**Арефьев В.А.** см. Семена А.Н.

**Арсентьева А.А., Шевченко И.И.** Родительские звезды планет на диаграмме Герцшпрунга–Рассела, № 9, 670–680 (651–660)

**Архипова В.П.** см. Иконникова Н.П.

**Атапин К.Е.** см. Додин А.В.

**Афанасьев В.Л.** см. Хорунжев Г.А.; см. Зазнобин И.А.

**Ahangarani Farahani F.** см. Davoudi F.

**Ахтемов З.С., Цап Ю.Т.** О зависимости магнитного поля низкоширотной корональной дыры от ее площади, № 2, 138–144 (117–122)

**Байкова А.Т., Смирнов А.А., Бобылев В.В.** Исследование влияния эволюционирующего потенциала галактики на орбитальные свойства 152 шаровых скоплений с данными из каталога Gaia EDR3, № 7, 472–492 (454–473)

**Байкова А.Т.** см. Бобылев В.В.

**Бакланов П.В.** см. Цветков Д.Ю.

**Банах П.** см. Аврорин А.В.

**Бардачова З.** см. Аврорин А.В.

**Барков М.В.** см. Позаненко А.С.

**Барсунова О.Ю.** см. Дмитриев Д.В.

**Basturk O.** см. Pogo A.

**Бельведерский М.И.** см. Додин А.В.

**Белинский А.А.** см. Бердников Л.Н.; см. Иконникова Н.П.; см. Додин А.В.

**Белолоптиков И.А.** см. Аврорин А.В.

**Беляев А.А.** см. Зубко В.А.; см. Эйсмонт Н.А.

**Бердников Л.Н., Белинский А.А., Пастухова Е.Н., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Мишин Е.О., Шатский Н.И.** Поиск эволюционных изменений периодов цефеид CEa Cas и CEb Cas, № 1, 31–45 (28–42)

**Бердников Л.Н.** Изменения периода V420 Cep — цефеиды типа WVir, № 2, 125–137 (105–116)

**Бердников Л.Н., Пастухова Е.Н.** Изменения периода SU Sct-цефеиды населения II, № 4, 290–299 (252–261)

**Бердников Л.Н.** Поиск эволюционных изменений периода классической цефеиды CE Pup, № 6, 438–447 (420–429)

**Бердников Л.Н., Белинский А.А., Пастухова Е.Н., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Мишин Е.О., Шатский Н.И.** Поиск эволюционных изменений периодов бимодальной цефеиды AS Cas, № 6, 448–458 (4340–441)



- Бердников Л.Н., Пастухова Е.Н.** Поиск эволюционных изменений периодов бимодальной цефеиды TU Cas, № 8, 568–583 (544–559)
- Берто Ж.-Л.** см. Иванова А.Е.
- Бескин В.С., Загоруля Д.С., Истомин А.Ю.** Магнитные поля нейтронных звезд, № 10, 709–717 (686–694)
- Бикмаев И.Ф., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А., Сахибуллин Н.А., Гумеров Р.И., Склянов А.С., Глушков М.В., Хамитов И.М., Борисов В.Д., Буренин Р.А., Зазнобин И.А., Кривonos Р.А., Ляпин А.Р., Медведев П.С., Мещеряков А.В., Сазонов С.Ю., Сюняев Р.А., Хорунжев Г.А., Гильфанов М.Р.** Спектроскопическое определение красных смещений выборки далеких квазаров обсерватории СРГ по наблюдениям на РТТ-150. II, № 5, 311–324 (277–290)
- Бикмаев И.Ф.** см. Зазнобин И.А.; см. Буренин Р.А.; см. Габдеев М.М.
- Блинников С.И.** см. Лютых А.В.; см. Поташов М.Ш.; см. Цветков Д.Ю.; см. Урвачев Е.М.
- Бобылев В.В., Байкова А.Т.** Изучение тесных сближений звезд с солнечной системой по данным каталога Gaia EDR3, № 3, 211–219 (180–187)
- Бобылев В.В., Байкова А.Т.** Анализ избранных убегающих звезд в туманности Ориона по данным каталога Gaia EDR3, № 4, 260–271 (224–234)
- Бобылев В.В., Байкова А.Т.** Оценка радиальной и вертикальной шкал тонкого диска Галактики по цефеидам, № 8, 557–567 (534–543)
- Бобылев В.В., Байкова А.Т.** Особенности трехмерной кинематики классических цефеид, № 9, 634–645 (607–617)
- Бобылев В.В.** см. Байкова А.Т.
- Борисов В.Д.** см. Хорунжев Г.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Додин А.В.
- Борисов Н.В.** см. Дёминова Н.Р.; см. Колбин А.И.
- Борман Г.А.** см. Цветков Д.Ю.
- Bouaziz-Kellil F.** Three-Dimensional Version of Hill's Problem with Variable Mass, № 4, 300–300 (262–276)
- Boudesh A.** см. Pogo A.
- Бруданин В.Б.** см. Аврорин А.В.
- Буднев Н.М.** см. Аврорин А.В.
- Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Гильфанов М.Р., Гроховская А.А., Додонов С.Н., Еселевич М.В., Зазнобин И.А., Иртуганов Э.Н., Лыскова Н.С., Медведев П.С., Мещеряков А.В., Моисеев А.В., Сазонов С.Ю., Старобинский А.А., Сюняев Р.А., Уклеин Р.И., Хабибуллин И.И., Хамитов И.М., Чуразов Е.М.** Наблюдение скопления галактик очень большой массы на  $z = 0.76$  в обзоре всего неба СРГ/eРОЗИТА, № 7, 461–471 (443–453)
- Буренин Р.А.** см. Зазнобин И.А.; см. Хорунжев Г.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Додин А.В.
- Бурлак М.А.** см. Бердников Л.Н.; см. Иконникова Н.П.; см. Додин А.В.
- Возякова О.В.** см. Цветков Д.Ю.
- Вольнова А.А.** см. Позаненко А.С.
- Габдеев М.М., Бикмаев И.Ф., Шиманский В.В., Жучков Р.Я., Иртуганов Э.Н.** Наблюдение кандидатов в затменные катаклизмические переменные на телескопе РТТ-150, № 10, 718–727 (695–704)
- Габдеев М.М.** см. Дёминова Н.Р.
- Галиуллин И.И., Гильфанов М.Р.** Рентгеновские наблюдения источников классических новых телескопом eРозита орбитальной обсерватории СРГ в ходе обзора неба, № 9, 613–633 (587–606)
- Гасилов В.А.** см. Шарова Ю.С.
- Гафаров А.Р.** см. Аврорин А.В.
- Гильфанов М.Р.** см. Зазнобин И.А.; см. Хорунжев Г.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Буренин Р.А.
- Гильфанов М.Р.** см. Галиуллин И.И.; см. Додин А.В.
- Глазырин С.И.** см. Шарова Ю.С.
- Глушков М.В.** см. Бикмаев И.Ф.
- Годенко Е.А., Измоленов В.В.** Влияние дисперсии скоростей пыли в межзвездной среде на ее распределение внутри гелиосферы, № 1, 53–65 (50–60)
- Голубков К.В.** см. Аврорин А.В.
- Горбан А.С., Мольков С.В., Цыганков С.С., Лутовинов А.А.** Исследование рентгеновского пульсара XTE J1946+274 по данным обсерватории NuSTAR, № 6, 416–427 (390–401)
- Горинов Д.А.** см. Эйсмонт Н.А.
- Горшков Н.С.** см. Аврорин А.В.
- Гресь Т.И.** см. Аврорин А.В.
- Гринин В.П.** см. Дмитриев Д.В.
- Громов А.О., Никифоров И.И.** Построение штеккелевской модели Галактики: решение проблемы реалистичности вертикального распределения плотности, № 6, 383–402 (357–376)
- Гроховская А.А.** см. Зазнобин И.А.; см. Буренин Р.А.
- Гумеров Р.И.** см. Бикмаев И.Ф.
- Ghalee A.** см. Davoudi F.
- Ghanbarzadehchaleshtori M.** см. Pogo A.
- Davoudi F., Mirshafie Khozani P., Paki E., Roshana M., Hasheminasab F., Mazidabadi Farahani A., Ahangarani Farahani F., Farjadnia T., Nasrollahzadeh F., Rezvanpanah S., Mousavi S.M., Foroughi R., Pogo A., Ghalee A.** Refined Ephemeris for Four Hot Jupiters using Ground-Based and TESS Observations, № 9, 670–680 (638–650)
- Davoudi F.** см. Pogo A.

- Дворницкий Р.** см. Аврорин А.В.
- Демидова Т.В., Шевченко И.И.** Эволюция хаотических зон планет в планетезимальных дисках, № 11, 800–811 (771–781)
- Дёмина Н.Р., Шиманский В.В., Борисов Н.В., Габдеев М.М.** Определение характеристик Lsp 30 по оптическим наблюдениям, № 5, 342–351 (307–315)
- Джилкибаев Ж.-А.М.** см. Аврорин А.В.
- Дик В.Я.** см. Аврорин А.В.
- Дмитриев Д.В., Гринин В.П., Барсунова О.Ю.** Показатели цвета звезд типа Т Тельца в моделях переменной околозвездной экстинкции, № 1, 22–30 (19–27)
- Добровославский А.В., Красильников П.С.** Об эволюции орбит в фотогравитационной круговой задаче трех тел. Внутренняя задача, № 5, 369–380 (345–356)
- Додин А.В., Шатский Н.И., Белинский А.А., Атапин К.Е., Бурлак М.А., Желтоухов С.Г., Татарников А.М., Постнов К.А., Черепашук А.М., Бельведерский М.И., Борисов В.Д., Буренин Р.А., Гильфанов М.Р., Кривонос Р.А., Медведев П.С., Мещеряков А.В., Сазонов С.Ю., Сюняев Р.А., Хорунжев Г.А.** Оптическая спектроскопия квазаров, открытых телескопом SRG/eROZITA, на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ, № 10, 683–696 (661–673)
- Додин А.В.** см. Иконникова Н.П.
- Додонов С.Н.** см. Хорунжев Г.А.; см. Зазнобин И.А.; см. Буренин Р.А.
- Домогацкий Г.В.** см. Аврорин А.В.
- Дорошенко А.А.** см. Аврорин А.В.
- Дунин-Барковская О.В., Сомов Б.В.** Об одном из возможных механизмов образования спикул в спокойных областях на Солнце, № 10, 728–732 (705–709)
- Дьячок А.Н.** см. Аврорин А.В.
- Елжов Т.В.** см. Аврорин А.В.
- Еркелова Е.** см. Аврорин А.В.
- Ершов А.А.** О рассеянии гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности, № 9, 657–666 (628–637)
- Еселевич М.В.** см. Зазнобин И.А.; см. Буренин Р.А.
- Есипов В.Ф.** см. Иконникова Н.П.
- Esteg E.M.** см. Рого А.
- Желтоухов С.Г.** см. Иконникова Н.П.; см. Додин А.В.
- Жучков Р.Я.** см. Габдеев М.М.
- Заборов Д.Н.** см. Аврорин А.В.
- Загоруля Д.С.** см. Бескин В.С.
- Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Ляпин А.Р., Еселевич М.В., Лыскова Н.С., Медведев П.С., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А.** Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и наблюдение этих скоплений в обзоре SRG/eROZITA, № 2, 79–88 (61–70)
- Зазнобин И.А., Усков Г.С., Сазонов С.Ю., Буренин Р.А., Медведев П.С., Хорунжев Г.А., Ляпин А.Р., Кривонос Р.А., Филиппова Е.В., Гильфанов М.Р., Сюняев Р.А., Еселевич М.В., Бикмаев И.Ф., Иртуганов Э.Н., Николаева Е.А.** Оптическое отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории SRG в ходе рентгеновского обзора всего неба, № 2, 89–106 (71–87)
- Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Ляпин А.Р., Хорунжев Г.А., Афанасьев В.Л., Гроховская А.А., Додонов С.Н., Еселевич М.В., Уклеин Р.И., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Гильфанов М.Р., Лыскова Н.С., Медведев П.С., Сюняев Р.А.** Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора поля Локмана телескопа eROZITA на борту обсерватории SRG, № 3, 174–182 (141–149)
- Зазнобин И.А.** см. Бикмаев И.Ф.; см. Буренин Р.А.
- Засова Л.В.** см. Эйсмонт Н.А.
- Захаров В.Ю., Чернова Т.Г.** К вопросу о холловской неустойчивости в протозвездных дисках, № 8, 606–610 (581–585)
- Золотухин И.Ю.** см. Пширков М.В.
- Зубко В.А., Суханов А.А., Федяев К.С., Корянов В.В., Беляев А.А.** Анализ оптимальных траекторий перелета к транснептуновому объекту (90377) Седна, № 3, 220–228 (188–195)
- Зубко В.А.** см. Эйсмонт Н.А.
- Иванов Р.А.** см. Аврорин А.В.
- Иванова А.Е., Яковлев О.Я., Ананьева В.И., Шашкова И.А., Тавров А.В., Берто Ж.-Л.** Метод “окна видимости” для учета наблюдательной селекции в статистике экзопланет, открытых по измерениям лучевых скоростей, № 1, 46–52 (43–49)
- Иванчик А.В.** см. Куричин О.А.
- Измоденов В.В.** см. Годенко Е.А.
- Иконникова Н.П., Шенаврин В.И., Комиссарова Г.В., Бурлак М.А., Шапошников И.А., Белинский А.А., Есипов В.Ф., Татарников А.М., Додин А.В., Желтоухов С.Г.** Многоцветная фотометрия и особенности спектра кандидата в post-AGB объекты AU Лисички (IRAS 20160+2734), № 7, 505–524 (485–504)

- Иконникова Н.П., Шапошников И.А., Есипов В.Ф., Бурлак М.А., Архипова В.П., Додин А.В., Потанин С.А., Шатский Н.И.** Спектральная переменность компактной планетарной туманности Nб 12, № 8, 584–605 (560–580)
- Иконникова Н.П.** см. Бердников Л.Н.
- Иртуганов Э.Н.** см. Зазнобин И.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Буренин Р.А.; см. Габдеев М.М.
- Истомин А.Ю.** см. Бескин В.С.
- Катулин М.С.** см. Аврорин А.В.
- Кебкал К.Г.** см. Аврорин А.В.
- Кебкал О.Г.** см. Аврорин А.В.
- Кислицын П.А.** см. Куричин О.А.
- Киссер А.Э., Кречет В.Г.** Орбиты визуально-двойных звезд каталога П. Куто, определенные с учетом данных GAIA DR2 и GAIA EDR3, № 11, 782–797 (754–764)
- Кожин В.А.** см. Аврорин А.В.
- Колбин А.И., Борисов Н.В., Москвитин А.С., Аитов В.Н., Котов С.С.** MLS120126:042313+212951 — новая затменная катаклизмическая переменная в пробеле периодов, № 7, 493–504 (474–484)
- Колбин М.М.** см. Аврорин А.В.
- Комиссарова Г.В.** см. Иконникова Н.П.
- Конищев К.В.** см. Аврорин А.В.
- Копанский К.А.** см. Аврорин А.В.
- Коробченко А.В.** см. Аврорин А.В.
- Корянов В.В.** см. Зубко В.А.
- Котов С.С.** см. Колбин А.И.
- Кошечкин А.П.** см. Аврорин А.В.
- Крамарев Н.И., Юдин А.В.** Структура релятивистских звезд, состоящих из несжимаемого вещества, в отсутствие строгой электронейтральности, № 9, 646–656 (618–627)
- Красильников П.С.** см. Доброславский А.В.
- Кречет В.Г.** см. Киссер А.Э.
- Кривонос Р.А.** см. Зазнобин И.А.; см. Хорунжев Г.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Додин А.В.
- Кгоира Р.** см. Abdullah А.Н.
- Круглов М.В.** см. Аврорин А.В.
- Крюков М.К.** см. Аврорин А.В.
- Кузнецова Е.А., Лутовинов А.А., Семена А.Н.** Фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745–2900 по данным обсерватории NuSTAR, № 4, 250–259 (214–223)
- Кулепов В.Ф.** см. Аврорин А.В.
- Кудряшов А.Д.** см. Чугай Н.Н.
- Куранов А.Г., Постнов К.А., Юнгельсон Л.Р.** Популяции ультраярких рентгеновских источников в галактиках: происхождение и эволюция, № 12, 866–891 (831–855)
- Куричин О.А., Кислицын П.А., Иванчик А.В.** Определение металличности зон III применительно к проблеме оценки распространенности первичного  ${}^4\text{He}$ , № 10, 697–708 (674–685)
- Ларионова Е.Г.** см. Цветков Д.Ю.
- Lashgari E.** см. Pого А.
- Липунова Г.В.** см. Авакян А.Л.
- Лутовинов А.А.** см. Кузнецова Е.А.; см. Горбан А.С.; см. Семена А.Н.
- Лыскова Н.С.** см. Зазнобин И.А.; см. Буренин Р.А.
- Лютых А.В., Пружинская М.В., Блинников С.И.** Кривые блеска сверхновых Ia, № 1, 3–13 (1–11)
- Ляпин А.Р.** см. Зазнобин И.А.; см. Бикмаев И.Ф.
- Mazidabadi Farahani A.** см. Davoudi F.
- Маланчев К.Л.** см. Авакян А.Л.
- Медведев П.С.** см. Зазнобин И.А.; см. Хорунжев Г.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Буренин Р.А.; см. Додин А.В.
- Мереминский И.А.** см. Семена А.Н.
- Мещеряков А.В.** см. Хорунжев Г.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Буренин Р.А.; см. Додин А.В.
- Микрюков Д.В.** К вопросу об определении астроцентрических координат в планетной задаче, № 11, 812–820 (782–789)
- Миленин М.В.** см. Аврорин А.В.
- Минаев П.Ю.** см. Мозгунов Г.Ю.; см. Позаненко А.С.
- Миргазов Р.Р.** см. Аврорин А.В.
- Mirshafie Khozani P.** см. Davoudi F.
- Мишин Е.О.** см. Бердников Л.Н.
- Modarres S.** см. Pого А.
- Мозгунов Г.Ю., Минаев П.Ю., Позаненко А.С.** Продленное излучение космических гамма-всплесков, зарегистрированных экспериментом SPI-ACS/INTEGRAL, № 3, 183–196 (150–162)
- Моисеев А.В.** см. Буренин Р.А.
- Мольков С.В.** см. Горбан А.С.
- Москвитин А.С.** см. Колбин А.И.
- Mousavi S.M.** см. Davoudi F.
- Назари В.** см. Аврорин А.В.
- Назиров Р.Р.** см. Эйсмонт Н.А.
- Nasrollahzadeh F.** см. Davoudi F.
- Наумов Д.В.** см. Аврорин А.В.
- Низамов Б.А., Пширков М.С.** Поиск периодического сигнала в излучении Крабовидной туманности в области высоких энергий, № 2, 107–113 (88–93)
- Никифоров И.И.** см. Громов А.О.
- Никифорова А.А.** см. Цветков Д.Ю.
- Николаева Е.А.** см. Зазнобин И.А.; см. Бикмаев И.Ф.

- Нога В.** см. Аврорин А.В.
- Номото К.** см. Урвачев Е.М.
- Нуриждинов С.Н., Расторгуев А.С.** К проблеме классификации шаровых скоплений. Расчет степени концентрации звезд для 26 скоплений, № 3, 197–204 (163–169)
- Павлюк Н.Н.** см. Цветков Д.Ю.
- Раки Е.** см. Davoudi F.
- Пастухова Е.Н.** см. Бердников Л.Н.
- Петухов Д.П.** см. Аврорин А.В.
- Плисковский Е.Н.** см. Аврорин А.В.
- Позаненко А.С., Барков М.В., Минаев П.Ю., Вольнова А.А.** Космические гамма-всплески: многоволновые исследования и модели, № 12, 823–865 (791–830)
- Позаненко А.С.** см. Мозгунов Г.Ю.
- Pal A.K., Abouelmagd E.I.** Dynamical Substitutes and Energy Surfaces in the Bicircular Sun-Earth-Moon System, № 5, 368–368 (331–344)
- Попов С.Б.** см. Пширков М.С.
- Потанин С.А.** см. Иконникова Н.П.
- Поташов М.Ш., Блинников С.И., Сорокина Е.И.** Непрозрачность разлетающегося вещества в расчетах кривых блеска сверхновых, № 4, 239–249 (204–213)
- Pogo A., Davoudi F., Alicavus F., Khakpash S., Esmer E.M., Basturk O., Lashgari E., Rahimi J., Aladag Y., Aksaker N., Boudesh A., Ghanbarzadehchaleshtori M., Akyuz A., Modarres S., Sojoudizadeh A., Tekes M., Solmaz A.** The First Light Curve Solutions and Period Study of BQ Ari, № 6, 428–428 (402–410)
- Pogo A.** см. Davoudi F.
- Постнов К.А.** см. Додин А.В.; см. Куранов А.Г.
- Прохоренко С.А., Сазонов С.Ю.** Темп роста сверхмассивных черных дыр и его зависимость от массы звездного населения галактик в современную эпоху, № 8, 537–556 (515–533)
- Пружинская М.В.** см. Лютых А.В.
- Пширков М.С., Попов С.Б., Золотухин И.Ю.** Поиск в галактике М31 магнитаров как периодических рентгеновских источников по данным XMM-Newton, № 1, 14–21 (12–18)
- Пширков М.С.** см. Низамов Б.А.
- Расторгуев А.С.** см. Нуриждинов С.Н.
- Rahimi J.** см. Pogo A.
- Rezvanpanah S.** см. Davoudi F.
- Решетняк М.Ю.** Параметрическая тепловая модель эволюции Земли, № 7, 525–534 (505–514)
- Розанов М.И.** см. Аврорин А.В.
- Roshana M.** см. Davoudi F.
- Рушай В.Д.** см. Аврорин А.В.
- Рябов Е.В.** см. Аврорин А.В.
- Саванов И.С.** Активность звезды с экзопланетой AB Pic из молодой ассоциации Tuc-Hog, № 3, 206–210 (175–179)
- Сазонов С.Ю.** см. Зазнобин И.А.; см. Хорунжев Г.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Буренин Р.А.; Прохоренко С.А.; см. Додин А.В.
- Сафонов Г.Б.** см. Аврорин А.В.
- Сахибуллин Н.А.** см. Бикмаев И.Ф.
- Семена А.Н., Мереминский И.А., Арефьев В.А., Лутовинов А.А.** GX339-4: согласуется ли модель прецессии горячего течения с инфракрасной переменностью в маломассивных рентгеновских двойных системах?, № 12, 892–899 (856–862)
- Семена А.Н.** см. Кузнецова Е.А.
- Симкович Ф.** см. Аврорин А.В.
- Симонов А.В.** см. Эйсмонт Н.А.
- Склянов А.С.** см. Бикмаев И.Ф.
- Скопал А.** см. Тарасова Т.Н.
- Скурихин А.В.** см. Аврорин А.В.
- Смирнов А.А.** см. Байкова А.Т.
- Sojoudizadeh A.** см. Pogo A.
- Solmaz A.** см. Pogo A.
- Соловьев А.Г.** см. Аврорин А.В.
- Сомов Б.В.** см. Дунин-Барковская О.В.
- Сорокина Е.И.** см. Поташов М.Ш.
- Сорокинов М.Н.** см. Аврорин А.В.
- Старобинский А.А.** см. Буренин Р.А.
- Стекл И.** см. Аврорин А.В.
- Суворова О.В.** см. Аврорин А.В.
- Суханов А.А.** см. Зубко В.А.
- Сушенок Е.О.** см. Аврорин А.В.
- Сюняев Р.А.** см. Зазнобин И.А.; см. Хорунжев Г.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Буренин Р.А.; см. Додин А.В.
- Таболенко В.А.** см. Аврорин А.В.
- Тавров А.В.** см. Иванова А.Е.
- Таджибаев И.У.** см. Нуриждинов С.Н.
- Татарников А.М.** см. Иконникова Н.П.
- Тарасова Т.Н., Скопал А.** Спектрофотометрический мониторинг активности симбиотической звезды CN Sgr в период с 2008 по 2018 г., № 4, 272–289 (235–251)
- Таращанский Б.А.** см. Аврорин А.В.
- Татарникова А.М.** см. Цветков Д.Ю.; см. Додин А.В.
- Tekes M.** см. Pogo A.
- Тихонов Н.А.** TRGB-расстояния до галактик на основе снимков космического телескопа Хаббла (HST) в одном фильтре F814W, № 11, 747–764 (721–737)

- Уклеин Р.И.** см. Хорунжев Г.А.; см. Зазнобин И.А.; см. Буренин Р.А.
- Урвачев Е.М., Блинников С.И., Номото К.** Транзиент AT2018cow: сценарий с экваториальным диском, № 11, 765–772 (738–745)
- Усков Г.С.** см. Зазнобин И.А.
- Ушакова М.Г.** см. Цветков Д.Ю.
- Фадеев Ю.А.** Эффекты металличности при переключении моды колебаний цефеид, № 6, 429–437 (411–419)
- Фадеев Ю.А.** Гидродинамическая модель затухания радиальных пульсаций RU Cam, № 11, 793–799 (765–770)
- Файт Л.** см. Аврорин А.В.
- Farjadnia T.** см. Davoudi F.
- Федяев К.С.** см. Зубко В.А.; см. Эйсмонт Н.А.
- Фиалковский С.В.** см. Аврорин А.В.
- Филиппова Е.В.** см. Зазнобин И.А.
- Foroughi R.** см. Davoudi F.
- Хабибуллин И.И.** см. Буренин Р.А.
- Khakraborty S.** см. Рого А.
- Хамитов И.М.** см. Зазнобин И.А.; см. Бикмаев И.Ф.; см. Буренин Р.А.
- Haheminasab F.** см. Davoudi F.
- Хорунжев Г.А., Мещеряков А.В., Медведев П.С., Борисов В.Д., Буренин Р.А., Кривонос Р.А., Уклеин Р.И., Шабловинская Е.С., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Сюняев Р.А., Сазонов С.Ю., Гильфанов М.Р.** Открытие самого мощного в рентгене квазара SRGE J170245.3+130104 на красном смещении  $z = 5.5$ , № 3, 174–182 (141–149)
- Хорунжев Г.А.** см. Зазнобин И.А.; см. Додин А.В.
- Храмов Е.В.** см. Аврорин А.В.
- Цап Ю.Т.** см. Ахметов З.С.
- Цветков А.С.** Кинематические свойства каталога Gaia EDR3 № 12, 900–908 (863–871)
- Цветков Д.Ю., Павлюк Н.Н., Возякова О.В., Шатский Н.И., Татарников А.М., Никифорова А.А., Бакланов П.В., Блинников С.И., Ушакова М.Г., Ларионова Е.Г., Борман Г.А.** Сверхновая типа II-P SN 2018aog в NGC 4151: кривые блеска, модели и расстояние, № 5, 325–341 (291–306)
- Цыганков С.С.** см. Горбан А.С.
- Черепашук А.М.** см. Додин А.В.
- Чернова Т.Г.** см. Захаров В.Ю.
- Чугай Н.Н., Кудряшов А.Д.** Аннигиляция позитронов  $^{22}\text{Na}$  в новых звездах, № 4, 231–238 (197–203)
- Чуразов Е.М.** см. Буренин Р.А.
- Шабловинская Е.С.** см. Хорунжев Г.А.
- Шайбонов Б.А.** см. Аврорин А.В.
- Шакура Н.И.** см. Авакян А.Л.
- Шапошников И.А.** см. Иконникова Н.П.
- Шарова Ю.С., Глазырин С.И., Гасилов В.А.** Исследование влияния фоновой нейтральной компоненты на динамику оболочки в остатках сверхновых, № 11, 773–781 (746–753)
- Шатский Н.И.** см. Бердников Л.Н.; см. Цветков Д.Ю.; см. Иконникова Н.П.; см. Додин А.В.
- Шашкова И.А.** см. Иванова А.Е.
- Шевченко И.И.** см. Арсентьева А.А.; см. Демидова Т.В.
- Шелепов М.Д.** см. Аврорин А.В.
- Шенаврин В.И.** см. Иконникова Н.П.
- Шиманчук Д.В., Шмыров А.С., Шмыров В.А.** Орбитальное маневрирование в окрестностях коллинеарных точек либрации с использованием сил светового давления, № 10, 733–742 (710–719)
- Шиманский В.В.** см. Деминаева Н.Р.; см. Габдеев М.М.
- Шмыров А.С.** см. Шиманчук Д.В.
- Шмыров В.А.** см. Шиманчук Д.В.
- Эйсмонт Н.А., Назиров Р.Р., Федяев К.С., Зубко В.А., Беляев А.А., Засова Л.В., Горинов Д.А., Симонов А.В.** Резонансные орбиты в задаче расширения достижимых областей посадки на поверхности Венеры, № 5, 352–367 (316–330)
- Юдин А.В.** см. Крамарев Н.И.
- Юнгельсон Л.Р.** см. Куранов А.Г.
- Яблокова Ю.В.** см. Аврорин А.В.
- Яковлев О.Я.** см. Иванова А.Е.
- Яковлев С.А.** см. Аврорин А.В.

## ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ (Том 47, 2021 г.)\*

### АККРЕЦИЯ, ТЕОРИЯ ДЖЕТОВ И ЗВЕЗДНЫЙ ВЕТЕР

	№	Стр.
Популяционный синтез ультраярких рентгеновских источников с замагниченными нейтронными звездами (исправление к статье 2020 г., т. 46, с. 702) <i>А. Г. Куранов, К. А. Постнов, Л. Р. Юнгельсон</i>	2	145
Изменение орбитального периода двойной системы из-за вспышки аккреционного диска с ветром <i>А. Л. Авакян, Г. В. Липунова, К. Л. Маланчев, Н. И. Шакура</i>	6	403
К вопросу о холловской неустойчивости в протозвездных дисках <i>В. Ю. Захаров, Т. Г. Чернова</i>	8	606
Популяции ультраярких рентгеновских источников в галактиках: происхождение и эволюция <i>А. Г. Куранов, К. А. Постнов, Л. Р. Юнгельсон</i>	12	866
GX339-4: согласуется ли модель прецессии горячего течения с инфракрасной переменностью в маломассивных рентгеновских двойных системах? <i>А. Н. Семена, И. А. Мереминский, В. А. Арефьев, А. А. Лутовинов</i>	12	892

### АКТИВНЫЕ ЯДРА ГАЛАКТИК, КВАЗАРЫ И РАДИОГАЛАКТИКИ

Оптическое отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ в ходе рентгеновского обзора всего неба <i>И. А. Зазнобин, Г. С. Усков, С. Ю. Сазонов и др.*</i>	2	89
Открытие самого мощного в рентгене квазара SRGE J170245.3+130104 на красном смещении $z = 5.5$ <i>Г. А. Хорунжев, А. В. Мещеряков, П. С. Медведев и др.*</i>	3	155
Спектроскопическое определение красных смещений выборки далеких квазаров обсерватории СРГ по наблюдениям на РТТ-150. II <i>И. Ф. Бикмаев, Э. Н. Иртуганов, Е. А. Николаева и др.*</i>	5	311
Темп роста сверхмассивных черных дыр и его зависимость от массы звездного населения галактик в современную эпоху <i>С. А. Прохоренко, С. Ю. Сазонов</i>	8	537
Оптическая спектроскопия квазаров, открытых телескопом СРГ/еРОЗИТА, на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ <i>А. В. Додин, Н. И. Шатский, А. А. Белинский и др.</i>	10	683

\* Полный перечень фамилий к статьям с более чем тремя авторами см. в Авторском указателе за 2021 г.

**ГАЛАКТИКА (МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ)**

Построение штеккелевской модели Галактики: решение проблемы реалистичности вертикального распределения плотности <i>А. О. Громов, И. И. Никифоров</i>	6	383
Исследование влияния эволюционирующего потенциала Галактики на орбитальные свойства 152 шаровых скоплений с данными из каталога Gaia EDR3 <i>А. Т. Байкова, А. А. Смирнов, В. В. Бобылев</i>	7	472
Оценка радиальной и вертикальной шкал тонкого диска Галактики по цефеидам <i>В. В. Бобылев, А. Т. Байкова</i>	8	557

**ГАЛАКТИКИ, ГРУППЫ И СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК,  
МЕЖГАЛАКТИЧЕСКИЙ ГАЗ**

Поиск в галактике M31 магнитаров как периодических рентгеновских источников по данным ХММ-Newton <i>М. С. Пширков, С. Б. Попов, И. Ю. Золотухин</i>	1	14
Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и наблюдение этих скоплений в обзоре СРГ/еРОЗИТА <i>И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев и др.</i>	2	79
Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора поля Локмана телескопа еРОЗИТА на борту обсерватории СРГ <i>И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, А. Р. Ляпин и др.</i>	3	174
Наблюдение скопления галактик очень большой массы на $z = 0.76$ в обзоре всего неба СРГ/еРОЗИТА <i>Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев, М. Р. Гильфанов и др.</i>	7	461
TRGB-расстояния до галактик на основе снимков космического телескопа Хаббла (HST) в одном фильтре F814W <i>Н. А. Тихонов</i>	11	747
Популяции ультраярких рентгеновских источников в галактиках: происхождение и эволюция <i>А. Г. Куранов, К. А. Постнов, Л. Р. Юнгельсон</i>	12	866

**ГАММА-ВСПЛЕСКИ, ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ  
И НЕЙТРИННЫЕ СОБЫТИЯ**

Слежение за высокоэнергичными нейтрино на Байкальском нейтринном телескопе Baikal-GVD <i>А. В. Аврорин, А. Д. Аврорин, В. М. Айнутдинов и др.</i>	2	114
Продленное излучение космических гамма-всплесков, зарегистрированных экспериментом SPI-ACS/INTEGRAL <i>Г. Ю. Мозгунов, П. Ю. Минаев, А. С. Позаненко</i>	3	183
Космические гамма-всплески: многоволновые исследования и модели <i>А. С. Позаненко, М. В. Барков, П. Ю. Минаев, А. А. Вольнова</i>	12	823

### ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ И АССОЦИАЦИИ, ЗВЕЗДНАЯ ДИНАМИКА

К проблеме классификации шаровых скоплений. Расчет степени концентрации звезд для 26 скоплений <i>С. Н. Нуритдинов, И. У. Таджибаев, А. С. Рассторгуев</i>	3	197
The Dichotomy of the Mass-Radius Relation and the Number of Globular Clusters <i>А. Н. Abdullah, P. Kroupa</i>	3	205
Исследование влияния эволюционирующего потенциала галактики на орбитальные свойства 152 шаровых скоплений с данными из каталога Gaia EDR3 <i>А. Т. Байкова, А. А. Смирнов, В. В. Бобылев</i>	7	472
Особенности трехмерной кинематики классических цефеид <i>В. В. Бобылев, А. Т. Байкова</i>	9	634
Кинематические свойства каталога Gaia EDR3 <i>А. С. Цветков</i>	12	900

### ЗВЕЗДЫ — СВОЙСТВА, КЛАССИФИКАЦИЯ

Показатели цвета звезд типа Т Тельца в моделях переменной околозвездной экстинкции <i>Д. В. Дмитриев, В. П. Гринин, О. Ю. Барсунова</i>	1	22
Анализ избранных убегающих звезд в туманности Ориона по данным каталога Gaia EDR3 <i>В. В. Бобылев, А. Т. Байкова</i>	4	260
Определение характеристик L <sub>ap</sub> 30 по оптическим наблюдениям <i>Н. Р. Дёминова, В. В. Шиманский, Н. В. Борисов, М. М. Габдеев</i>	5	342
Многоцветная фотометрия и особенности спектра кандидата в post-AGB объекты AU Лисички (IRAS 20160+2734) <i>Н. П. Иконникова, В. И. Шенаврин, Г. В. Комиссарова и др.</i>	7	505

### ЗВЕЗДЫ — ПЕРЕМЕННЫЕ И ПЕКУЛЯРНЫЕ

Показатели цвета звезд типа Т Тельца в моделях переменной околозвездной экстинкции <i>Д. В. Дмитриев, В. П. Гринин, О. Ю. Барсунова</i>	1	22
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид CEa Cas и CEb Cas <i>Л. Н. Бердников, А. А. Белинский, Е. Н. Пастухова и др.</i>	1	31
Изменения периода V420 Cep — цефеиды типа WVir <i>Л. Н. Бердников</i>	2	125



Активность звезды с экзопланетой AB Pic из молодой ассоциации Tuc-Hor <i>И. С. Саванов</i>	3	206
Изменения периода SU Sct-цефеиды населения II <i>Л. Н. Бердников, Е. Н. Пастухова</i>	4	290
The First Light Curve Solutions and Period Study of BQ Ari <i>A. Poro, F. Davoudi, F. Alicavus, et al.</i>	6	428
Эффекты металличности при переключении моды колебаний цефеид <i>Ю. А. Фадеев</i>	6	429
Поиск эволюционных изменений периода классической цефеиды CE Pup <i>Л. Н. Бердников</i>	6	438
Поиск эволюционных изменений периодов бимодальной цефеиды AS Cas <i>Л. Н. Бердников, А. А. Белинский, Е. Н. Пастухова и др.</i>	6	448
Оценка радиальной и вертикальной шкал тонкого диска Галактики по цефеидам <i>В. В. Бобылев, А. Т. Байкова</i>	8	557
Поиск эволюционных изменений периодов бимодальной цефеиды TU Cas <i>Л. Н. Бердников, Е. Н. Пастухова</i>	8	568
Спектральная переменность компактной планетарной туманности Hb 12 <i>Н. П. Иконникова, И. А. Шапошников, В. Ф. Есипов и др.</i>	8	584
Особенности трехмерной кинематики классических цефеид <i>В. В. Бобылев, А. Т. Байкова</i>	9	634
Орбиты визуально-двойных звезд каталога П. Куто, определенные с учетом данных GAIA DR2 и GAIA EDR3 <i>А. Э. Киссер, В. Г. Кречет</i>	11	782
Гидродинамическая модель затухания радиальных пульсаций RU Cam <i>Ю. А. Фадеев</i>	11	793

### ЗВЕЗДЫ — СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ

Поиск эволюционных изменений периодов цефеид CEa Cas и CEb Cas <i>Л. Н. Бердников, А. А. Белинский, Е. Н. Пастухова и др.</i>	1	31
Изменения периода V420 Cep — цефеиды типа WVir <i>Л. Н. Бердников</i>	2	125
Аннигиляция позитронов $^{22}\text{Na}$ в новых звездах <i>Н. Н. Чугай, А. Д. Кудряшов</i>	4	231
Изменения периода SU Sct-цефеиды населения II <i>Л. Н. Бердников, Е. Н. Пастухова</i>	4	290
Поиск эволюционных изменений периода классической цефеиды CE Pup <i>Л. Н. Бердников</i>	6	438
Поиск эволюционных изменений периодов бимодальной цефеиды AS Cas <i>Л. Н. Бердников, А. А. Белинский, Е. Н. Пастухова и др.</i>	6	448

Поиск эволюционных изменений периодов бимодальной цефеиды TU Cas <i>Л. Н. Бердников, Е. Н. Пастухова</i>	8	568
---	---	-----

### КАТАКЛИЗМИЧЕСКИЕ ПЕРЕМЕННЫЕ

Спектрофотометрический мониторинг активности симбиотической звезды СН Суг в период с 2008 по 2018 г. <i>Т. Н. Тарасова, А. Скопал</i>	4	272
Определение характеристик Lap 30 по оптическим наблюдениям <i>Н. Р. Дёминова, В. В. Шиманский, Н. В. Борисов, М. М. Габдеев</i>	5	342
The First Light Curve Solutions and Period Study of BQ Ari <i>А. Poro, F. Davoudi, F. Alicavus, et al.</i>	6	428
MLS120126:042313+212951 — новая затменная катаклизмическая переменная в пробеле периодов <i>А. И. Колбин, Н. В. Борисов, А. С. Москвитин, В. Н. Аитов, С. С. Котов</i>	7	493
Наблюдение кандидатов в затменные катаклизмические переменные на телескопе РТТ-150 <i>М. М. Габдеев, И. Ф. Бикмаев, В. В. Шиманский и др.</i>	10	718

### КОСМОЛОГИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ

Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и наблюдение этих скоплений в обзоре SRG/eРОЗИТА <i>И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев и др.</i>	2	79
Открытие самого мощного в рентгене квазара SRGE J170245.3+130104 на красном смещении $z = 5.5$ <i>Г. А. Хорунжев, А. В. Мещеряков, П. С. Медведев и др.</i>	3	155
Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора поля Локмана телескопа eРОЗИТА на борту обсерватории SRG <i>И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, А. Р. Ляпин и др.</i>	3	174
Спектроскопическое определение красных смещений выборки далеких квазаров обсерватории SRG по наблюдениям на РТТ-150. II <i>И. Ф. Бикмаев, Э. Н. Иртуганов, Е. А. Николаева и др.</i>	5	311
Наблюдение скопления галактик очень большой массы на $z = 0.76$ в обзоре всего неба SRG/eРОЗИТА <i>Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев, М. Р. Гильфанов и др.</i>	7	461
Определение металличности зон НII применительно к проблеме оценки распространенности первичного ${}^4\text{He}$ <i>О. А. Куричин, П. А. Кислицын, А. В. Иванчик</i>	10	697

**МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА, ГАЗОВЫЕ ТУМАННОСТИ**

- Влияние дисперсии скоростей пыли в межзвездной среде на ее распределение внутри гелиосферы  
*Е. А. Годенко, В. В. Измоденов* 1 53
- Определение металличности зон III применительно к проблеме оценки распространенности первичного  $^4\text{He}$   
*О. А. Куричин, П. А. Кислицын, А. В. Иванчик* 10 697

**НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА И АСТРОМЕТРИЯ**

- Анализ оптимальных траекторий перелета к транснептуновому объекту (90377) Седна  
*В. А. Зубко, А. А. Суханов, К. С. Федяев и др.* 3 220
- Three-Dimensional Version of Hill's Problem with Variable Mass  
*F. Bouaziz-Kellil* 4 300
- Резонансные орбиты в задаче расширения достижимых областей посадки на поверхности Венеры  
*Н. А. Эйсмонт, Р. Р. Назиров, К. С. Федяев и др.* 5 352
- Dynamical Substitutes and Energy Surfaces in the Bicircular Sun-Earth-Moon System  
*А. К. Pal, Е. I. Abouelmagd* 5 368
- Об эволюции орбит в фотогравитационной круговой задаче трех тел. Внутренняя задача  
*А. В. Добровославский, П. С. Красильников* 5 369
- Орбитальное маневрирование в окрестностях коллинеарных точек либрации с использованием сил светового давления  
*Д. В. Шиманчук, А. С. Шмыров, В. А. Шмыров* 10 733
- К вопросу об определении астроцентрических координат в планетной задаче  
*Д. В. Микрюков* 11 812

**ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ, КОМПТОНИЗАЦИЯ**

- О рассеянии гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности  
*А. А. Ершов* 9 657
- Исследование влияния фоновой нейтральной компоненты на динамику оболочки в остатках сверхновых  
*Ю. С. Шарова, С. И. Глазырин, В. А. Гасилов* 11 773

**ПЛАЗМЕННАЯ АСТРОФИЗИКА, ГИДРОДИНАМИКА И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

- К вопросу о холловской неустойчивости в протозвездных дисках  
*В. Ю. Захаров, Т. Г. Чернова* 8 606

Исследование влияния фоновой нейтральной компоненты на динамику оболочки в остатках сверхновых <i>Ю. С. Шарова, С. И. Глазырин, В. А. Гасилов</i>	11	773
Гидродинамическая модель затухания радиальных пульсаций RU Cam <i>Ю. А. Фадеев</i>	11	793

### ПУЛЬСАРЫ, НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ И ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Поиск в галактике M31 магнитаров как периодических рентгеновских источников по данным XMM-Newton <i>М. С. Пширков, С. Б. Попов, И. Ю. Золотухин</i>	1	14
Поиск периодического сигнала в излучении Крабовидной туманности в области высоких энергий <i>Б. А. Низамов, М. С. Пширков</i>	2	107
Фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745-2900 по данным обсерватории NuSTAR <i>Е. А. Кузнецова, А. А. Лутовинов, А. Н. Семена</i>	4	250
Изменение орбитального периода двойной системы из-за вспышки аккреционного диска с ветром <i>А. Л. Авакян, Г. В. Липунова, К. Л. Маланчев, Н. И. Шакура</i>	6	403
Исследование рентгеновского пульсара XTE J1946+274 по данным обсерватории NuSTAR <i>А. С. Горбан, С. В. Мольков, С. С. Цыганков, А. А. Лутовинов</i>	6	416
Темп роста сверхмассивных черных дыр и его зависимость от массы звездного населения галактик в современную эпоху <i>С. А. Прохоренко, С. Ю. Сазонов</i>	8	537
Структура релятивистских звезд, состоящих из несжимаемого вещества, в отсутствие строгой электронейтральности <i>Н. И. Крамарев, А. В. Юдин</i>	9	646
О рассеянии гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности <i>А. А. Ершов</i>	9	657
Оптическая спектроскопия квазаров, открытых телескопом SRG/eROZITA, на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ <i>А. В. Додин, Н. И. Шатский, А. А. Белинский и др.</i>	10	683
Магнитные поля нейтронных звезд <i>В. С. Бескин, Д. С. Загоруля, А. Ю. Истомин</i>	10	709

### РАДИО И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ИСТОЧНИКИ

О рассеянии гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности <i>А. А. Ершов</i>	9	657
--	---	-----

**РЕНТГЕНОВСКИЕ И ГАММА-ИСТОЧНИКИ**

Поиск в галактике M31 магнитаров как периодических рентгеновских источников по данным XMM-Newton <i>М. С. Пиширков, С. Б. Попов, И. Ю. Золотухин</i>	1	14
Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и наблюдение этих скоплений в обзоре SRG/eROZITA <i>И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев и др.</i>	2	79
Оптическое отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории SRG в ходе рентгеновского обзора всего неба <i>И. А. Зазнобин, Г. С. Усков, С. Ю. Сазонов и др.</i>	2	89
Поиск периодического сигнала в излучении Крабовидной туманности в области высоких энергий <i>Б. А. Низамов, М. С. Пиширков</i>		
Популяционный синтез ультраярких рентгеновских источников с замагниченными нейтронными звездами (исправление к статье 2020 г., т. 46, с. 702) <i>А. Г. Куранов, К. А. Постнов, Л. Р. Юнгельсон</i>	2	145
Открытие самого мощного в рентгене квазара SRGE J170245.3+130104 на красном смещении $z = 5.5$ <i>Г. А. Хорунжев, А. В. Мещеряков, П. С. Медведев и др.</i>	3	155
Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора поля Локмана телескопа eROZITA на борту обсерватории SRG <i>И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, А. Р. Ляпин и др.</i>	3	174
Продленное излучение космических гамма-всплесков, зарегистрированных экспериментом SPI-ACS/INTEGRAL <i>Г. Ю. Мозгунов, П. Ю. Минаев, А. С. Позаненко</i>	3	183
Фазированная спектроскопия магнитара SGR J1745-2900 по данным обсерватории NuSTAR <i>Е. А. Кузнецова, А. А. Лутовинов, А. Н. Семена</i>	4	250
Спектроскопическое определение красных смещений выборки далеких квазаров обсерватории SRG по наблюдениям на РТТ-150. II <i>И. Ф. Бикмаев, Э. Н. Иртуганов, Е. А. Николаева и др.</i>	5	311
Исследование рентгеновского пульсара XTE J1946+274 по данным обсерватории NuSTAR <i>А. С. Горбан, С. В. Мольков, С. С. Цыганков, А. А. Лутовинов</i>	6	416
Наблюдение скопления галактик очень большой массы на $z = 0.76$ в обзоре всего неба SRG/eROZITA <i>Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев, М. Р. Гильфанов и др.</i>	7	461

Темп роста сверхмассивных черных дыр и его зависимость от массы звездного населения галактик в современную эпоху <i>С. А. Прохоренко, С. Ю. Сазонов</i>	8	537
Рентгеновские наблюдения источников классических новых телескопом eРозита орбитальной обсерватории СРГ в ходе обзора неба <i>И. И. Галиуллин, М. Р. Гильфанов</i>	9	613
Оптическая спектроскопия квазаров, открытых телескопом СРГ/eРОЗИТА, на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ <i>А. В. Додин, Н. И. Шатский, А. А. Белинский и др.</i>	10	683
Космические гамма-всплески: многоволновые исследования и модели <i>А. С. Позаненко, М. В. Барков, П. Ю. Минаев, А. А. Вольнова</i>	12	823
Популяции ультраярких рентгеновских источников в галактиках: происхождение и эволюция <i>А. Г. Куранов, К. А. Постнов, Л. Р. Юнгельсон</i>	12	866
GX339-4: согласуется ли модель прецессии горячего течения с инфракрасной переменностью в маломассивных рентгеновских двойных системах? <i>А. Н. Семена, И. А. Мереминский, В. А. Арефьев, А. А. Лутовинов</i>	12	892

### СВЕРХНОВЫЕ И НОВЫЕ, ОСТАТКИ СВЕРХНОВЫХ

Кривые блеска сверхновых Ia <i>А. В. Лютых, М. В. Пружинская, С. И. Блинников</i>	1	3
Аннигиляция позитронов $^{22}\text{Na}$ в новых звездах <i>Н. Н. Чугай, А. Д. Кудряшов</i>	4	231
Непрозрачность разлетающегося вещества в расчетах кривых блеска сверхновых <i>М. Ш. Поташов, С. И. Блинников, Е. И. Сорокина</i>	4	239
Сверхновая типа II-P SN 2018aоq в NGC 4151: кривые блеска, модели и расстояние <i>Д. Ю. Цветков, Н. Н. Павлюк, О. В. Возякова и др.</i>	5	325
Рентгеновские наблюдения источников классических новых телескопом eРозита орбитальной обсерватории СРГ в ходе обзора неба <i>И. И. Галиуллин, М. Р. Гильфанов</i>	9	613
Транзиент AT2018cow: сценарий с экваториальным диском <i>Е. М. Урвачев, С. И. Блинников, К. Номото</i>	11	765
Исследование влияния фоновой нейтральной компоненты на динамику оболочки в остатках сверхновых <i>Ю. С. Шарова, С. И. Глазырин, В. А. Гасилов</i>	11	773

### СОЛНЦЕ

О зависимости магнитного поля низкоширотной корональной дыры от ее площади <i>З. С. Ахтемов, Ю. Т. Цан</i>	2	138
---	---	-----

Об одном из возможных механизмов образования спикул в спокойных областях на Солнце

*О. В. Дунин-Барковская, Б. В. Сомов* 10 728

### СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА — ПЛАНЕТЫ, КОМЕТЫ, МАЛЫЕ ТЕЛА, ГЕЛИОСФЕРА

Влияние дисперсии скоростей пыли в межзвездной среде на ее распределение внутри гелиосферы

*Е. А. Годенко, В. В. Измоденов* 1 53

Изучение тесных сближений звезд с солнечной системой по данным каталога Gaia EDR3

*В. В. Бобылев, А. Т. Байкова* 3 211

Анализ оптимальных траекторий перелета к транснептуновому объекту (90377) Седна

*В. А. Зубко, А. А. Суханов, К. С. Федяев и др.* 3 220

Резонансные орбиты в задаче расширения достижимых областей посадки на поверхности Венеры

*Н. А. Эйсмонт, Р. Р. Назиров, К. С. Федяев и др.* 5 352

Dynamical Substitutes and Energy Surfaces in the Bicircular Sun-Earth-Moon System

*А. К. Pal, E. I. Abouelmagd* 5 368

Параметрическая тепловая модель эволюции Земли

*М. Ю. Решетняк* 7 525

### ТЕПЛОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ, АТОМНЫЕ И МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Определение металличности зон III применительно к проблеме оценки распространенности первичного  $^4\text{He}$

*О. А. Куричин, П. А. Кислицын, А. В. Иванчик* 10 697

### ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Метод “окна видимости” для учета наблюдательной селекции в статистике экзопланет, открытых по измерениям лучевых скоростей

*А. Е. Иванова, О. Я. Яковлев, В. И. Ананьева и др.* 1 46

Активность звезды с экзопланетой AB Pic из молодой ассоциации Tuc-Hor

*И. С. Саванов* 3 206

Refined Ephemeris for Four Hot Jupiters using Ground-Based and TESS Observations

*F. Davoudi, P. Mirshafie Khosani, E. Paki, et al.* 9 667

Родительские звезды планет на диаграмме Герцшпрунга—Рассела <i>А. А. Арсентьева, И. И. Шевченко</i>	9	670
Эволюция хаотических зон планет в планетезимальных дисках <i>Т. В. Демидова, И. И. Шевченко</i>	11	800
К опросу об определении астроцентрических координат в планетной задаче <i>Д. В. Микрюков</i>	11	812

### ПЕРСОНАЛИИ

Памяти Владимира Наумовича Жаркова (04.03.1926—26.02.2021)	10	743
--	----	-----