СОДЕРЖАНИЕ

Том 47, номер 2, 2021

-

Спектроскопические измерения красных смещений скоплений галактик из обзора	
И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев, И. М. Хамитов, Г. А. Хорунжев, А. Р. Ляпин, М. В. Еселевич, Н. С. Лыскова, П. С. Медведев, М. Р. Гильфанов, Р. А. Сюняев	79
Оптическое отождествление кандидатов в активные ядра галактик, обнаруженных телескопом ART-XC им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ в ходе рентгеновского обзора всего неба	
И. А. Зазнобин, Г. С. Усков, С. Ю. Сазонов, Р. А. Буренин, П. С. Медведев, Г. А. Хорунжев, А. Р. Ляпин, Р. А. Кривонос, Е. В. Филиппова, М. Р. Гильфанов, Р. А. Сюняев, М. В. Еселевич, И. Ф. Бикмаев, Э. Н. Иртуганов, Е. А. Николаева	89
Поиск периодического сигнала в излучении Крабовидной туманности в области высоких энергий	
Б. А. Низамов, М. С. Пширков	107
Слежение за высокоэнергичными нейтрино на байкальском нейтринном телескопе Baikal-GVD	
А. В. Аврорин, А. Д. Аврорин, В. М. Айнутдинов, П. Банах, З. Бардачова, И. А. Белолаптиков, В. Б. Бруданин, Н. М. Буднев, А. Р. Гафаров, К. В. Голубков, Н. С. Горшков, Т. И. Гресь, Р. Дворницкий, В. Я. Дик, ЖА. М. Джилкибаев, Г. В. Домогацкий, А. А. Дорошенко, А. Н. Дьячок, Е. Еркелова, Т. В. Елжов, Д. Н. Заборов, Р. А. Иванов, М. С. Катулин, К. Г. Кебкал, О. Г. Кебкал, В. А. Кожин, М. М. Колбин, К. В. Конищев, К. А. Копанский, А. В. Коробченко, А. П. Кошечкин, М. В. Круглов, М. К. Крюков, В. Ф. Кулепов, М. В. Миленин, Р. Р. Миргазов, В. Назари, Д. В. Наумов, В. Нога, Д. П. Петухов, Е. Н. Плисковский, М. И. Розанов, В. Д. Рушай, Е. В. Рябов, Г. Б. Сафронов, Ф. Симкович, А. В. Скурихин, А. Г. Соловьев, М. Н. Сороковиков, И. Стекл, О. В. Суворова, Е. О. Сушенок, В. А. Таболенко, Б. А. Таращанский, Л. Файт, С. В. Фиалковский, Е. В. Храмов, Б. А. Шайбонов, М. Д. Шелепов, Ю. В. Яблокова, С. А. Яковлев	114 125
О зависимости магнитного поля низкоширотной корональной дыры от ее площади	
3. С. Ахтемов, Ю. Т. Цап	138
Исправление к статье А. Г. Куранова, К. А. Постнова, Л. Р. Юнгельсона "Популяционный синтез ультраярких рентгеновских источников с замагниченными нейтронными звездами"	
(Том 46, № 10, стр. 702—720, 2020 г.)	145
Авторский указатель (Том 45, 2019 г.)	146

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ КРАСНЫХ СМЕЩЕНИЙ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК ИЗ ОБЗОРА ОБСЕРВАТОРИИ им. ПЛАНКА И НАБЛЮДЕНИЕ ЭТИХ СКОПЛЕНИЙ В ОБЗОРЕ СРГ/еРОЗИТА

© 2021 г. И. А. Зазнобин^{1*}, Р. А. Буренин¹, И. Ф. Бикмаев^{2,3}, И. М. Хамитов^{2,4}, Г. А. Хорунжев¹, А. Р. Ляпин¹, М. В. Еселевич⁵, Н. С. Лыскова¹, П. С. Медведев¹, М. Р. Гильфанов^{1,6}, Р. А. Сюняев^{1,6}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия ²Казанский федеральный университет, Казань, Россия ³Академия наук Татарстана, Казань, Россия ⁴Государственная обсерватория ТУБИТАК, Анталья, Турция ⁵Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия ⁶Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия Поступила в редакцию 26.11.2020 г. После доработки 26.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик, обнаруженных ранее по данным обзора всего неба обсерватории им. Планка, а также по данным Слоановского обзора и обзора всего неба обсерватории WISE. Измерения красных смещений получены для 23 скоплений, в том числе для четырех скоплений галактик из второго каталога источников Сюняева-Зельдовича обзора обсерватории им. Планка. Основные спектроскопические наблюдения проводились в течение 2019 г. — начале 2020 г. на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН и 1.5-м российско-турецком телескопе (PTT-150). Некоторые данные были получены ранее на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто. Из 23 скоплений данной выборки 14 объектов расположены на половине неба, где права на данные обзора неба телескопа еРОЗИТА на борту орбитальной рентгеновской обсерватории СРГ принадлежат российской стороне. Все эти скопления были обнаружены при помощи телескопа еРОЗИТА в ходе обзора неба в течение 2020 г. В целом в рамках нашей программы оптического отождествления скоплении галактик из каталога обсерватории им. Планка в течение нескольких лет были измерены спектроскопические красные смещения для 220 скоплений галактик. Многие из них уже обнаружены в обзоре СРГ/еРОЗИТА, значительная часть этих объектов входит в число наиболее массивных скоплений галактик обзора неба телескопа еРОЗИТА и, скорее всего, войдет в космологические выборки скоплений этого обзора.

Ключевые слова: скопления галактик, обзоры неба, оптические наблюдения, красные смещения.

DOI: 10.31857/S0320010821020066

ВВЕДЕНИЕ

Изучение скоплений галактик позволяет получать новые фундаментальные знания о строении Вселенной на больших масштабах, устанавливать новые ограничения на параметры космологической модели, такие как средняя плотность вещества во Вселенной, амплитуда возмущений плотности, параметры уравнения состояния темной материи и темной энергии (см., например, Вихлинин и др., 2009а; Сообщество Планка, 2014а, 2016а). Для решения таких задач требуются большие выборки массивных скоплений галактик. Составление таких выборок скоплений является одной из основных задач рентгеновского обзора всего неба космической обсерватории Спектр—Рентген—Гамма (СРГ), которая была запущена в июле 2019 г. (Сюняев и др., 2021).

В июне 2020 г. был завершен первый полный обзор всего неба обсерватории СРГ. Предполагается, что до декабря 2023 г. обсерватория СРГ совершит еще семь полных обзоров всего неба. Ожидается, что в результате восьми полных обзоров всего неба при помощи телескопа еРОЗИТА

^{*}Электронный адрес: zaznobin@iki.rssi.ru

на борту обсерватории СРГ будет обнаружено порядка 100 000 скоплений галактик, в том числе все скопления галактик с массой выше $\sim 3 \times 10^{14} M_{\odot}$ в наблюдаемой части Вселенной (Мерлони и др., 2012; Чуразов и др., 2015; Предель и др., 2020; Сюняев и др., 2021). Для того чтобы на основе этих данных составить космологические выборки массивных скоплений галактик, потребуется провести большой объем дополнительных оптических наблюдений. В частности, для большого числа массивных скоплений галактик потребуется получить спектроскопические измерения красных смещений.

Наиболее массивные скопления во Вселенной — с массами выше $\sim 6 \times 10^{14}$ M_{\odot} — были обнаружены ранее по наблюдению эффекта Сюняева-Зельдовича (Сюняев, Зельдович, 1972) в обзоре обсерватории им. Планка (Сообшество Планка, 20146, 20166). Все эти скопления. скорее всего, будут также обнаружены в обзоре СРГ/еРОЗИТА и войдут в космологические выборки этого обзора. В основном, именно по этой причине наша группа принимала активное участие в работах по оптическому отождествлению скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка (Сообщество Планка, 2014б, 2015а, б, 2016б; Воробьев и др., 2016; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2019, 2020; Хамитов и др., 2020). Отметим, что для значительного числа скоплений из обзора обсерватории им. Планка оптические отождествления были получены также другими группами (см., например, Сообщество Планка, 2016в; Стреблянска и др., 2018, 2019; Агуадо-Барахон и др., 2019; Баррена и др., 2020).

Используя дополнительные данные обзоров в оптическом и ИК-диапазонах, выборка скоплений обзора обсерватории им. Планка была расширена скоплениями меньшей массы (Б17, Буренин, 2017). Предполагалось, что большинство этих скоплений также будет обнаружено впоследствии в обзоре СРГ и также войдет в космологические выборки этого обзора. Поэтому нами была начата программа спектроскопических измерений красных смещений скоплений галактик из этой выборки. Использование этой выборки, фактически, позволило начать программу оптической поддержки обзора СРГ в части измерения красных смещений массивных скоплений галактик еще до запуска обсерватории СРГ.

В нашей предыдущей статье (Зазнобин и др., 2020) мы представили результаты спектроскопических измерений красных смещений более чем 70 скоплений галактик из расширенного каталога обзора обсерватории им. Планка, Б17. В этой статье представлены результаты спектроскопических измерений красных смещений еще для 23 скоплений галактик, в том числе для четырех скоплений из второго каталога обзора обсерватории им. Планка. Спектроскопические данные получены в 2019—2020 гг. на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории, а также на 1.5-м российскотурецком телескопе (РТТ-150). Некоторые данные были получены ранее на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто. Эти наблюдения позволят повысить качество космологических выборок скоплений галактик, которые будут получены по данным обзора СРГ.

Кроме того, в этой статье подводится итог нашей многолетней программы наблюдений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка и приводятся предварительные результаты поиска этих скоплений в первом полугодовом обзоре телескопа еРОЗИТА на борту космической обсерватории СРГ. Показано, что наблюдения по нашей программе позволили заранее получить значительную часть необходимых измерений красных смещений для наиболее массивных скоплений галактик из обзора СРГ/еРОЗИТА.

ОТБОР ОБЪЕКТОВ

Список объектов был взят из расширения каталога обзора им. Планка, Б17 (см.: http://hea.iki. rssi.ru/psz/). В каталоге указаны координаты (α , δ) оптического центра скоплений галактик по данным обзора WISE, отождествленного с источником Сюняева–Зельдовича, смещение по координатам оптического центра относительно источника Сюняева–Зельдовича, а также фотометрическая оценка красных смещений скоплений галактик.

На изображениях обзора WISE скопления галактик видны как множество инфракрасных источников, локализованных в небольшой области размером несколько десятков угловых секунд. Поэтому для поиска области локализации галактик скоплений мы использовали изображения обзора WISE в фильтре W1 3.4 мкм (Райт и др., 2010; Мейснер и др., 2017), очищенные от звезд и сглаженные при помощи бета-модели радиуса 22". Примеры таких изображений показаны на рис. 1 вместе с псевдоцветными изображениями в оптическом диапазоне, полученными по данным Pan-STARRS1 (Чэмберс идр., 2016) и DESI LIS (Дейидр., 2019). На изображениях обзора WISE скопления галактик видны как протяженные области превышения ИКяркости над фоном (см., например, Буренин, 2015). Поиск галактик, входящих в скопление, осуществлялся среди источников, расположенных внутри этой области.

Отбор галактик для получения их спектроскопических изображений проводился путем поиска 0209 - 1253, z = 0.2594



1710 + 6844, z = 0.3335



1801 + 3952, z = 0.6184



Рис. 1. Слева: псевдоцветные изображения обзора DESI LIS полей скоплений галактик в фильтрах zrg (RGB), в центре: изображения обзора WISE в полосе 3.4 мкм, очищенные от звезд и свернутые с β-моделью радиусом 22", справа: рентгеновское изображение обзора СРГ/еРОЗИТА, сглаженное гауссианой радиусом 20", по состоянию на ноябрь 2020 г. Центр изображений совпадает с оптическим центром скоплений, размер полей изображений 10' × 10'.

красной последовательности галактик на диаграмме цвет—величина для объектов в поле превышения ИК-яркости. В центральной области скоплений галактик обычно находится очень массивная эллиптическая галактика, так называемая сD- галактика. Красное смещение cD-галактики с высокой точностью совпадает с красным смещением всего скопления галактик в целом, поэтому для спектроскопических наблюдений мы в первую очередь отбирали центральные cD-галактики скоплений. В случае, когда однозначно определить cDгалактику невозможно, мы отбирали несколько наиболее ярких галактик на красной последовательности, которые находятся в центрах областей повышенной ИК-яркости. Ранее было показано (см., например, Зазнобин и др., 2020), что спектроскопические измерения красных смещений, полученные таким способом, являются точными, и такой отбор позволяет сэкономить большое количество наблюдательного времени.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения проводились в 2019 г. и в начале 2020 г. на телескопе 1.6-м АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН при помощи спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016), а также на 1.5-м российско-турецком телескопе (РТТ-150) с помощью спектрографа TFOSC¹.

Спектрограф АДАМ имеет высокую общую квантовую эффективность, что позволяет получать спектры низкого разрешения сD-галактик далеких массивных скоплений вплоть до красных смещений $z \approx 0.8$ (Буренин и др., 2018). В качестве диспергирующего элемента в его оптической схеме содержится колесо с тремя пропускающими объемными фазовыми голографическими решетками (VPHG). Решетка VPHG600G имет спектральный диапазон 3800-7250 Å, VPHG600R - 6450-11 000 Å, обе решетки имеют 600 штрихов на миллиметр и разрешение в пределах R = 600 -1300. Также мы использовали решетку VPHG400 (спектральный диапазон 4300-9900 Å 400 штрихов на миллиметр) чуть меньшего разрешения. Для получения спектральных изображений галактик мы использовали все три решетки. На спектрографе TFOSC использовалась решетка спектрального диапазона 3230—9120 Å с разрешением $R \approx 500$.

Наблюдения проводились по заранее подготовленной программе. Программа содержит графические изображения и координаты отобранных объектов для наведения объектов на щель, оптимальное время и количество экспозиций для каждого телескопа, величину объекта в фильтрах Слоановского обзора, фотометрическое красное смещение. Для наблюдений на телескопе АЗТ-ЗЗИК указывался размер щели спектрографа. Для получения изображений спектров мы использовали щель размером 2", но при качестве прямых изображений хуже 2" мы увеличивали суммарное время экспозиции и использовали щель размером 3".

Для наблюдений на спектрографе АДАМ решетка для получения спектроскопических изображений выбиралась оптимальным образом с учетом того, чтобы на спектре присутствовали линии поглощения К, Н кальция, 4000 Å — провал, а также G-линию фраунгоферовской серии. Для этого мы использовали фотометрическую оценку красного смещения. Для получения спектроскопических изображений скоплений галактик с фотометрическим красным смещением z < 0.55 мы использовали решетку VPHG600G, для z > 0.65мы использовали решетку VPHG600R и решетку VPHG400 при промежуточных значениях фотометрического красного смещения. При наблюдениях на телескопе A3T-33ИК в решетке VPHG600R также использовался фильтр OS11, который убирает со спектральных изображений второй порядок интерференции.

Координаты положения центра и величина позиционного угла щели выбирались таким образом, чтобы свет как можно большего числа галактик красной последовательности (в том числе cD-галактик) попал в щель спектрографа. Общее время экспозиции спектральных изображений для каждого объекта выбиралось из соотношения сигнал/шум $\sigma > 10$. Время экспозиции выбиралось равным 600, 900 или 1200 с. После каждой экспозиции телескоп смещался таким образом, чтобы свет от объектов изменял свое положение вдоль щели на величину 10"-15". В случае, если наблюдаемый объект слабее 20^m, ориентация щели выбиралась таким образом, чтобы в щель спектрографа попал свет яркой звезды. Это необходимо, чтобы совместить спектральные изображения при их сложении. После окончания серии спектральных изображений одного объекта мы получали несколько изображений калибровочных ламп.

Обработка спектральных изображений проводилась с использованием программного пакета $IRAF^2$, а также собственного программного обеспечения. Из спектральных изображений вычитались изображения тока смещения усилителя. Вычитание темнового тока не производилось, так как матрицы всех используемых спектрографов обладают низкими показателями темнового тока для требуемых экспозиций. Проводилось вычитание изображения нормированного плоского поля, которое создавалось излучением ламп спектрографов. После чего для каждого объекта находилось двумерное дисперсионное решение линейного спектра галогеновых ламп спектрографа, это решение применялось к спектральным изображениям объектов. Положения спектров объектов на изображениях совмещались и комбинировались. Извлеченный спектр объекта нормировался на спектр

¹ http://hea.iki.rssi.ru/rtt150/ru/index.php?page=tfosc

² http://iraf.noao.edu/



Рис. 2. Примеры спектроскопических измерений красных смещений скоплений. Слева: спектр ярчайшей галактики скопления с указанием некоторых спектральных особенностей, полученный на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК при помощи спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ. Справа: значение χ^2 , полученное в результате сравнения этого спектра с шаблоном спектра эллиптической галактики.

спектрофотометрических стандартов из списка Европейской южной обсерватории³.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Полученные одномерные спектры мы сравнили с шаблоном спектра синтетического звездного населения возрастом 11 млрд лет и металличностью Z = 0.02 из работы Брузуал и Шарло (2003). На диаграмме χ^2 распределения значение выраженного локального минимума с большой вероятностью является значением спектроскопического красного смещения галактики. Как правило, на полученном спектре с учетом красного смещения мы можем наблюдать линии фраунгоферовской серии К, Н линии кальция, 4000 Å провал, G — линию, линии MgI, а так же D — дублет натрия. На рис. 2 приведены примеры спектров галактик скоплений, а также распределений χ^2 , которые получаются при сравнении наблюдаемого спектра с шаблоном.

³ https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards.html

	Координаты (J2000)		Применания	
α	δ	z	N_g	примечания
02 09 35.6	-125456	0.2594	2	
02 17 06.1	+295123	0.3636	1	
03 33 04.7	-065123	0.5691	1	SDSS
07 41 26.7	+255829	0.1571	2	
07 50 15.7	-082433	0.2398	1	*, PSZ2G227.30+09.00
08 00 45.0	$+65\ 12\ 45$	0.3894	1	*
08 14 59.8	+662616	0.1459	3	Abell 0629
$08\ 29\ 55.9$	$+06\ 46\ 30$	0.3938	1	SDSS
08 40 20.6	+22 35 11	0.2169	2	ZwCl 0837.4+2245
09 14 42.9	$+27\ 58\ 56$	0.4384	1	
10 15 47.8	+80 10 54	0.2093	2	
10 41 49.9	$+32\ 56\ 30$	0.4453	1	RMJ104149.9+325631.9
12 47 37.6	+22 17 51	0.4166	1	
12 51 19.3	$+19\ 55\ 09$	0.3312	1	
16 00 42.3	$+57\ 36\ 07$	0.2958	2	
16 27 29.7	+062257	0.3930	1	*
16 34 06.6	+632016	0.5172	1	
17 04 44.2	$+09\ 57\ 00$	0.2756	1	
17 10 40.3	$+68\ 44\ 43$	0.3335	1	*, PSZ2G099.55+34.23
18 01 07.4	$+39\ 52\ 06$	0.6184	4	*, PSZ2G066.34+26.14, A19
20 58 43.5	$+06\ 05\ 28$	0.1641	2	
21 11 08.2	$+07\ 35\ 06$	0.1517	1	
22 37 21.7	+41 15 57	0.0564	3	PSZ2G097.52-14.89

Таблица 1. Скопления галактик из расширенного каталога скоплений галактик, обнаруженных по данным обзора обсерватории им. Планка

Примечание. * Обсуждается в тексте; PSZ2 — объект отождествлен со скоплением галактик из второго каталога обсерватории им. Планка Сообщество Планка (2016б); Abell — объект отождествлен со скоплением галактик из работы Эйбл и др. (1989); ZwCl — объект отождествлен со скоплением галактик из работы Эйбл и др. (1989); ZwCl — объект отождествлен со скоплением галактик из работы Рыкофф и др. (2014); A19 — спектроскопическое красное смещение скопления галактик согласуется со значением спектроскопического красного смещения из работы Агуадо-Барахон и др. (2019). SDSS — значения спектроскопического красного смещения сланского обзора (Сообщество СДСС, 2017).

Результаты измерений приведены в табл. 1. В первых двух столбцах указаны координаты (α , δ) оптических центров скоплений галактик, определенных по данным изображений WISE и Pan-STARRS1. В третьем и четвертом столбцах указаны измеренные нами спектроскопические красные смещения скоплений галактик и количество галактик, по которым было определено красное смещение. Красное смещение каждого скопления галактик мы определяли как спектроскопическое

красное смещение cD-галактики или среднее значение спектроскопических красных смещений всех галактик скопления, для которых эти значения известны.

На рис. З показано сравнение измеренных нами спектроскопических красных смещений скоплений галактик с фотометрическими оценками из каталога Б17. Видно, что точность фотометрических оценок красных смещений из каталога Б17 составляет $\delta z/(z+1) \approx 0.03$, что хорошо согласуется с



Рис. 3. Сравнение фотометрических оценок красных смещений скоплений галактик из работы Б17 (по вертикали) со спектроскопическими красными смещениями, полученными в этой работе (по горизонтали).

результатами, полученными ранее (Буренин, 2017; Зазнобин и др., 2020). Отметим, что для 20 из 23 скоплений галактик результаты спектроскопических красных смещений скоплений галактик также хорошо согласуются с фотометрическими оценками красных смещений из работы Вэнь и др. (2012).

Замечания по отдельным объектам

0750–0824. Это скопление галактик PSZ2 G227.30 + 09.00 из второго каталога источников Сюняева—Зельдовича обзора обсерватории им. Планка. Мы получили спектр наиболее яркой галактики скопления, ее красное смещение оказалось равным $z_{\rm spec} = 0.2398$, что согласуется с фотометрической оценкой красного смещения $z_{\rm phot} = 0.24 \pm 0.03$ из работы Агуадо-Барахон и др. (2019).

0800–6512. В предыдущей работе Зазнобина и др. (2020) мы публиковали результаты спектроскопического красного смещения z = 0.3636 для скопления галактик с координатами оптического центра 07 59 56.7 +65 12 08. В поле этого источника Сюняева—Зельдовича мы обнаружили еще одну область превышения ИК-яркости с координатами центра 08 00 45.0 +65 12 45, отождествляемую со скоплением галактик. Эти скопления галактик находятся на угловом расстоянии около 5' друг относительно друга (рис. 4) и, скорее всего, дают сравнимый вклад в сигнал Сюняева— Зельдовича, который наблюдается в обзоре обсерватории им. Планка. Отметим также наличие яркой звезды ТҮС 4132-205-1, излучение которой также может искажать сигнал Сюняева—Зельдовича в обзоре обсерватории им. Планка.

Нами были проведены спектроскопические наблюдения cD-галактики этого скопления на телескопе A3T-33ИК с использованием решетки VPHG600G на спектрографе AДAM. Спектроскопическое красное смещение этой галактики оказалось равным z = 0.3894. Скорость удаления этого скопления более чем на 5000 км/с превышает скорость удаления скопления галактик с координатами 08 00 45.0 +65 12 45. Поэтому эти скопления, скорее всего, не являются гравитационно связанными.

1627–0622. В радиусе 6' от источника Сюняева–Зельдовича находятся две области повышенной яркости в ИК-диапазоне, которые мы отождествили с двумя скоплениями галактик. Для скопления галактик, которое имеет наибольшую яркость в полосе W1, мы получили спектроскопическое красное смещение наиболее яркой галактики. Полученное нами значение $z_{\rm spec} = 0.3930$ согласуется с данными фотометрической оценки красного смещения из каталога Б17. Стоит отметить, что находящаяся на расстоянии чуть менее 4' яркая звезда



Рис. 4. Изображения поля источника Сюняева—Зельдовича с координатами 08 00 31.1 +65 13 22. Слева: изображения Слоановского обзора в фильтре <u>i</u>. Справа: изображения обзора WISE в полосе 3.4 мкм, очищенные от звезд и свернутые с β-моделью радиусом 24". Синими стрелочками указаны галактики, для которых были измерены спектроскопические красные смещения в работе Зазнобина и др. (2020). Красной стрелочкой обозначена cD-галактика, для которой мы измерили спектроскопическое красное смещение в этой работе.

BD+06 3231 может искажать сигнал Сюняева-Зельдовича в обзоре обсерватории им. Планка.

1710–6844. Это скопление галактик PSZ2 G099.55 + 34.23 из второго каталога Планка. Мы получили спектр наиболее яркой галактики скопления, ее красное смещение оказалось равным $z_{\text{spec}} = 0.3335$, что согласуется с фотометрической оценкой красного смещения $z_{\text{phot}} = 0.31 \pm 0.03$ из работы Агуадо-Барахон и др. (2019).

1801-3952. Это скопление галактик PSZ2 G066.34 + 26.14 из второго каталога Планка. Для этого скопления были получены спектры четырех галактик скопления на 3.5-м телескопе обсерватории Калар-Альто. Спектроскопическое красное смещение этого скопления галактик было принято равным среднему значению красных смещений этих четырех галактик: $z_{\text{spec}} = 0.6184$. Эта величина согласуется со значением $z_{\text{spec}} =$ = 0.622 из работы Агуадо-Барахон и др. (2019). Более того, полученное нами красное смещение наиболее яркой галактики скопления $z_{
m spec} = 0.6174$ также хорошо согласуется со значением красного смещения для наиболее яркой галактики $z_{\rm spec,BCG} = 0.6167$ из работы Агуадо-Барахон и др. (2019).

НАБЛЮДЕНИЯ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК В ОБЗОРЕ СРГ/еРОЗИТА

Из 23 скоплений, отобранных для оптического отождествления, результаты которого излагаются

в настоящей статье, 14 находятся на той половине неба, за обработку которой отвечает Российский консорциум телескопа еРОЗИТА обсерватории СРГ. Все эти скопления были обнаружены при помощи телескопа еРОЗИТА в ходе обзора неба в течение 2020 г., с потоками в интервале от нескольких 10^{-14} эрг/с/см² до нескольких 10^{-13} эрг/с/см². На рис. 1 приведены примеры рентгеновских изображений, полученных телескопом еРОЗИТА в диапазоне 0.3–2.2 кэВ. Подробное исследование рентгеновских свойств этих скоплений галактик выходит за рамки данной работы.

Программа оптических наблюдений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка выполнялась нашей группой, начиная с лета 2011 г. (Сообщество Планка, 2014б, 2015а, б. 2016б; Воробьев и др., 2016; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2019, 2020; Хамитов и др., 2020). В рамках этой программы спектроскопические измерения красных смещений были получены для 220 скоплений галактик. Исследование рентгеновских свойств этих скоплений выходит за рамки этой статьи и будет представлено в последующих работах. Однако уже сейчас можно сказать, что значительная часть этих скоплений будет обнаружена в рентгеновском обзоре СРГ/еРОЗИТА. Так, согласно предварительным результатам обработки данных первого полугодового обзора СРГ/еРОЗИТА, на российской половине неба в качестве протяженных рентгеновских источников было обнаружено 134 скопления из нашей программы. В дальнейшем, по мере увеличения глубины обзора СРГ/еРОЗИТА, это число должно увеличиться. Таким образом, хотя отбор скоплений галактик для нашей программы проводился по сигналу Сюняева—Зельдовича и по данным в оптическом и ИК-диапазонах, результаты наших наблюдений будут полезны в будущем и при работе с даными обзора СРГ/еРОЗИТА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье представлены спектроскопические измерения красных смещений для списка из 23 массивных скоплений галактик, отобранных из расширенного каталога обзора всего неба обсерватории им. Планка, которые были получены в течение конца 2019 г.—начала 2020 г. на 1.6-м телескопе АЗТ-33ИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН, а также на 1.5-м телескопе РТТ-150. Кроме того, представлены спектроскопические измерения красных смещений четырех скоплений из второго каталога обсерватории им. Планка, измеренные нами ранее.

Программа оптических наблюдений скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка выполнялась нашей группой в течение последних нескольких лет (Сообщество Планка, 2014б, 2015а, б, 2016б; Воробьев и др., 2016; Буренин и др., 2018; Зазнобин и др., 2019, 2020; Хамитов и др., 2020). За это время были получены оптические отождествления и спектроскопические измерения красных смещений для 220 скоплений галактик. Из них 140 скоплений входят также во второй каталог источников Сюняева-Зельдовича обзора обсерватории им. Планка, при этом 96 скоплений были отобраны из расширения каталога скоплений галактик обзора обсерватории им. Планка, Б17. Для сравнения отметим, что во втором каталоге обсерватории им. Планка имеется 1653 источника Сюняева-Зельдовича, из которых 1203 были подтверждены как скопления галактик на момент публикации каталога. Таким образом, в рамках нашей программы была проведена примерно четверть всех необходимых дополнительных оптических наблюдений объектов из этого каталога. При этом для около 10% скоплений галактик из этого каталога спектроскопические измерения красных смещений были получены нашей группой.

Большинство скоплений галактик из обзора обсерватории им. Планка, наблюдения которых проводились в рамках нашей программы, будут обнаружены в обзоре всего неба телескопа еРОЗИТА на борту космической обсерватории СРГ и, скорее всего, войдут в космологические выборки скоплений этого обзора. Предварительные результаты обработки данных обзора СРГ/еРОЗИТА показывают, что большое число скоплений из нашей программы уже обнаружено в качестве протяженных рентгеновских источников в этом обзоре. В дальнейшем, по мере увеличения глубины обзора СРГ/еРОЗИТА, это число должно еще увеличиться. Таким образом, хотя отбор скоплений галактик для нашей программы проводился по данным обзора обсерватории им. Планка, наши наблюдения позволили заранее получить спектроскопические измерения красных смещений для значительного числа наиболее массивных скоплений галактик обзора СРГ/еРОЗИТА.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-12-00520. Авторы благодарят ТЮБИТАК, ИКИ РАН, КФУ и АН РТ за поддержку наблюдений на российско-турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150). Измерения на телескопе АЗТ-ЗЗИК выполнены в рамках базового финансирования программы ФНИ II.16 и получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара"⁴. В этом исследовании использованы данные наблюдений телескопа еРозита на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ 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 СРГ/еРозита изготовлен консорциумом германских институтов во главе с Институтом внеземной астрофизики Общества им. Макса Планка (МРЕ) при поддержке DLR. Космический аппарат СРГ 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. Использованные в настоящей работе данные телескопа еРозита обработаны с помощью программного обеспечения eSASS, разработанного германским консорциумом еРозита и программного обеспечения для обработки и анализа данных, разработанного российским консорциумом телескопа еРозита.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Агуадо-Барахон и др. (А. Aguado-Barahona, R. Barrena, A. Streblyanska, A. Ferragamo, J.A. Rubino-Martin, D. Tramonte, and H. Lietzen), Astron. Astrophys. 631, A148 (2019); arXiv:1909.06235.

⁴ http://ckp-rf.ru/ckp/3056/

- Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Амирханян В.Р., Моисеев А.В., Астрофиз. бюлл. 71, 514 (2016). [V.L. Afanasiev, et al., Astrophys. Bull. 71, 479 (2016)].
- Баррена и др. (R. Barrena, A. Ferragamo, J.A. Rubiño-Martín, A. Streblyanska, A. Aguado-Barahona, et al.), Astron. Astrophys. 638, A146 (2020).
- Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. 41, 167 (2015). [R.A. Burenin, Astron. Letters 41, 167 (2015)].
- Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С. и др., Письма в Астрон. журн. 42, 333 (2016). [R.A. Burenin et al., Astron. Lett. 42, 295 (2016)].
- Буренин Р.А., Письма в Астрон. журн. 43, 559 (2017). [R.A. Burenin, Astron. Letters 43, 507 (2017)].
- Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Зазнобин И.А., Хорунжев Г.А., Еселевич М.В. и др., Письма в Астрон. журн. 44, 297 (2018). [R.A. Burenin et al., Astron. Lett. 44, 297 (2018)].
- 8. Брузуал, Шарло, (G. Bruzual and S. Charlot), MNRAS 344, 1000 (2003).
- 9. Вихлинин и др. (A. Vikhlinin, R.A. Burenin, H. Ebeling, W.R. Forman, A. Hornstrup, C. Jones, A.V. Kravtsov, et al.), Astrophys. J. **692**, 1033 (2009a).
- Воробьев В.С., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Додонов С.Н., Жучков Р.Я. и др., Письма в Астрон. журн. 42, 81 (2016). [V.S. Vorobyev et al., Astron. Lett. 42, 63 (2016)].
- 11. Вэнь и др. (Z.L. Wen, J.L. Han, and F.S. Liu), Astroophys. J. Suppl. Ser. **199**, 2(34) (2012).
- 12. Дей и др. (A. Dey, D.J. Schlegel, D. Lang, R. Blum, K. Burleigh, X. Fan, et al.), Astron. J. **157**, 168 (2019).
- Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Коноплев В.В. и др., Письма в Астрон. журн. 45, 77 (2019). [I.A. Zaznobin et al., Astron. Lett. 45, 49 (2019)].
- Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Ляпин А.Р., и др., Письма в Астрон. журн. 46, 79 (2020). [I.A. Zaznobin et al., Astron. Lett. 46, 79 (2020)].
- 15. Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Böhringer, T. Boller, H. Brunner, et al.), arXiv:1209.3114 (2012).
- 16. Мейснер и др. (А.М. Meisner, D. Lang, and D.J. Schlegel), Astron. J. **154**, 161 (2017).
- 17. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, W. Becker, et al.), Astron. Astrophys., in press, arXiv:2010.03477 (2020).
- Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, T. Jarrett, J.D. Kirkpatrick, D. Padgett, et al.), Astron. J. 140, 1868 (2010).

- 19. Рыкофф и др. (E.S. Rykoff, E. Rozo, M.T. Busha, C.E. Cunha, A. Finoguenov, A. Evrard, et al.), Astrophys. J. **758**, 2 (2014).
- 20. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), Astron. Astrophys. **571**, A20 (2014a).
- 21. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXIX: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), Astron. Astrophys. **571**, A29 (20146).
- 22. Сообщество Планка (Planck Internediate Results XXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), Astron. Astrophys. **582**, A29 (2015a).
- 23. Сообщество Планка (Planck 2013 Results XXXII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, C. Armitage-Caplan, et al.), Astron. Astrophys. **581**, A14 (20156).
- 24. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXIV: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), Astron. Astrophys. **594**, A24 (2016a).
- 25. Сообщество Планка (Planck 2015 Results XXVII: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), Astron. Astrophys. **594**, A27 (20166).
- 26. Сообщество Планка (Planck Intermediate Results XXXVI: P.A.R. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud, et al.), Astron. Astrophys. **586**, A139 (2016в).
- 27. Сообщество СДСС (SDSS Collaboration: F.D. Albareti, C.A. Prieto, A. Almeida, et al.), Astroophys. J. Suppl. Ser. **233**, 25 (2017).
- 28. Стреблянска и др. (A. Streblyanska, R. Barrena, J.A. Rubiño-Martín, R.F. van der Burg, N. Aghanim, A. Aguado-Barahona, et al.), Astron. Astrophys. **617**, A71 (2018).
- 29. Стреблянска и др. (A. Streblyanska, A. Aguado-Barahona, A. Ferragamo, R. Barrena, J.A. Rubiño-Martín, et al.), Astron. Astrophys. **628**, A13 (2019).
- 30. Сюняев, Зельдович (R.A. Sunyaev and Ya.B. Zeldovich), Comm. Astrophys. Space Phys. 4, 173 (1972).
- 31. Сюняев и др. (R.A. Sunyaev, et al.), Astron. Astrophys., готовится к печати (2021).
- Хамитов И.М., Бикмаев И.Ф., Буренин Р.А., Глушков М.В., Мельников С.С., Ляпин А.Р., Письма в Астрон. журн. 46, 3 (2020). [I.M. Khamitov et al., Astron. Lett. 46, 1 (2020)].
- 33. Цвикки и др. (F. Zwicky, E. Herzog, P. Wild, M. Karpowicz, C.T. Kowal), *Catalogue of galaxies and of clusters of galaxies*, V. I (California Inst. Technol., Pasadena, 1961).
- 34. Чуразов и др. (E. Churazov, A. Vikhlinin, and R. Sunyaev), MNRAS **450**, 1984 (2015).
- 35. Чэмберс и др. (K.C. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, C.Z. Waters, et al.), arxiv.org:1612.05560
- 36. Эйбл и др. (G.O. Abell, H.G.Jr. Corwin, and R.P. Olowin), Astrophys. J. Suppl. Ser. **70**, 1 (1989).

ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ КАНДИДАТОВ В АКТИВНЫЕ ЯДРА ГАЛАКТИК, ОБНАРУЖЕННЫХ ТЕЛЕСКОПОМ ART-XC им. М.Н. ПАВЛИНСКОГО ОБСЕРВАТОРИИ СРГ В ХОДЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ОБЗОРА ВСЕГО НЕБА

© 2021 г. И. А. Зазнобин^{1*}, Г. С. Усков¹, С. Ю. Сазонов¹, Р. А. Буренин¹, П. С. Медведев¹, Г. А. Хорунжев¹, А. Р. Ляпин¹, Р. А. Кривонос¹, Е. В. Филиппова¹, М. Р. Гильфанов^{1,2}, Р. А. Сюняев^{1,2}, М. В. Еселевич³, И. Ф. Бикмаев^{4,5}, Э. Н. Иртуганов⁴, Е. А. Николаева⁴

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия ²Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия ³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия ⁴Казанский федеральный университет, Казань, Россия ⁵Академия наук Татарстана, Казань, Россия Поступила в редакцию 26.11.2020 г. После доработки 26.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Представлены результаты отождествления восьми объектов из предварительного каталога рентгеновских источников, зарегистрированных в диапазоне энергий 4-12 кэВ телескопом ART-ХС им. М.Н. Павлинского обсерватории СРГ в ходе первого обзора всего неба. Из них три (SRGA J005751.0+210846, SRGA J014157.0-032915, SRGA J232446.8+440756) открыты телескопом ART-XC, а пять уже были известны ранее как рентгеновские источники, но их природа оставалась не установленной. Последние пять источников были зарегистрированы также в мягких рентгеновских лучах телескопом eROSITA обсерватории СРГ. Оптические наблюдения проводились на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН и 1.5-м российско-турецком телескопе (РТТ-150). Все исследованные объекты оказались активными ядрами галактик (АЯГ) на красных смещениях от 0.019 до 0.283. Из них шесть — сейфертовские галактики второго типа (включая один объект типа 1.9), один (SRGA J005751.0+21084) — "скрытое" АЯГ (в галактике, наблюдаемой с ребра) и один (SRGA J224125.9+760343) — сейфертовская галактика первого типа с узкими линиями. Последний объект характеризуется высокой рентгеновской светимостью (~(2- $(-13) \times 10^{44}$ эрг/с в диапазоне 4–12 кэВ) и, согласно полученной оценке массы черной дыры $(\sim\!2 \times 10^7 M_{\odot})$, близким к эддингтоновскому пределу темпом аккреции. Все три АЯГ, открытые телескопом ART-XC (которые не регистрируются телескопом eROSITA), характеризуются большим поглощением на луче зрения ($N_{\rm H}\gtrsim 3\times 10^{23}~{\rm cm}^{-2}$). Полученные результаты подтверждают ожидания, что телескоп ART-XC является эффективным инструментом для поиска сильно поглощенных и других интересных АЯГ в близкой ($z \lesssim 0.3$) Вселенной. Обзор неба обсерватории СРГ продлится еще больше 3 лет, что должно позволить открыть еще много таких объектов.

Ключевые слова: активные ядра галактик, обзоры неба, оптические наблюдения, красные смещения, рентгеновские наблюдения.

DOI: 10.31857/S0320010821020078

ВВЕДЕНИЕ

Российский телескоп ART-XC им. М.Н. Павлинского (Павлинский и др., 2021) в составе российской орбитальной обсерватории СРГ (Сюняев и др., 2021) начиная с декабря 2019 г. проводит рентгеновский обзор всего неба на энергиях от 4 до 30 кэВ. В телескопе используются зеркала, работающие по принципу косого падения рентгеновских лучей, и полупроводниковые детекторы на основе кристаллов теллурида кадмия, что обеспечивает

^{*}Электронный адрес: zaznobin@iki.rssi.ru

уникальные характеристики для указанного диапазона энергий: большое поле зрения (36 угл. мин) и хорошее угловое разрешение (лучше 1 угл. мин в режиме сканирования неба). Благодаря этому в ходе четырехлетнего обзора ожидается получить уникальную по глубине и четкости карту всего неба на энергиях 4—12 кэВ и, в частности, обнаружить не менее 5000 активных ядер галактик (АЯГ), что в несколько раз больше, чем удалось найти на таких энергиях в предыдущих обзорах всего неба.

В июне 2020 г. обсерватория СРГ завершила первое (из запланированных восьми) сканирование неба, и по полученным данным телескопа ART-XC был составлен предварительный каталог зарегистрированных источников (всего более 600 объектов). Этот каталог был скоррелирован с: 1) каталогами источников, обнаруженных в предыдущих рентгеновских обзорах неба; 2) предварительным каталогом источников, обнаруженных на половине небесной сферы $0 < |l| < 180^{\circ 1}$ в мягком рентгеновском диапазоне энергий в ходе первого обзора телескопа eROSITA обсерватории СРГ; 3) каталогами астрофизических объектов в других диапазонах длин волн (от радио до ультрафиолета). В результате был составлен список объектов, состоящий из источников, открытых телескопом ART-ХС, и ранее известных рентгеновских источников не установленной природы. Часть этих объектов зарегистрирована также телескопом eROSITA (Предель и др., 2020) обсерватории СРГ.

Для отождествления этих потенциально интересных источников ART-XC проводятся спектроскопические наблюдения на российских оптических телескопах. Первые результаты этой наблюдательной кампании представлены в данной статье. Восемь источников ART-XC, о которых идет речь ниже, оказались AЯГ 1-го или 2-го типа, включая объекты с сильным внутренним поглощением. Последнее было выявлено в результате анализа рентгеновских спектров, построенных по данным телескопов ART-XC и eROSITA.

Представленные оценки светимостей основаны на модели плоской Вселенной с параметрами $H_0 = 70, \Omega_m = 0.3.$

выборка объектов

Исследуемые объекты (см. табл. 1) были отобраны среди точечных рентгеновских источников, обнаруженных телескопом ART-XC в ходе первого обзора неба (12 декабря 2019 г.–10 июня 2020 г.), с отношением сигнала к шуму не менее 4.5 в диапазоне энергий 4–12 кэВ. По данным ART-XC были измерены положения источников на небе и их потоки в указанном диапазоне энергий. Типичная ошибка локализации (на уровне достоверности 95%) составляет 30 угл. сек.

Для этих объектов по данным телескопа eROSITA были получены потоки либо верхние пределы на поток в трех диапазонах энергий: 0.3–2, 2–6 и 4–9 кэВ. Из восьми источников, зарегистрированных телескопом ART-XC, 5 были зарегистрированы также телескопом eROSITA либо во всех трех, либо в первых двух из указанных диапазонов. Для них по данным eROSITA удалось уточнить положение источника на небе. Остальные три объекта не детектируются телескопом eROSITA.

В табл. 1 для всех объектов приведены: координаты источника ART-XC, координаты предполагаемого оптического партнера, расстояния между положением оптического партнера и положениями рентгеновского источника по данным ART-XC и eROSITA (если имеется), рентгеновская обсерватория, которая впервые обнаружила рентгеновский источник.

РЕНТГЕНОВСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Рентгеновское излучение АЯГ может испытывать фотопоглощение в газопылевом торе вокруг сверхмассивной черной дыры (СМЧД) и в межзвездной среде родительской галактики. Одной из целей этого исследования было оценить для обсуждаемых объектов колонку нейтрального (или слабоионизованного) вещества вдоль луча зрения $N_{\rm H}$. Хотя количества рентгеновских фотонов, зарегистрированных телескопами ART-XC и eROSITA (за короткое время сканирования источника во время обзора неба обсерватории СРГ), оказывается недостаточно для проведения детального спектрального анализа, эти данные все же позволяют, в большинстве случаев, получить достаточно надежные ограничения на величину $N_{\rm H}$.

Аппроксимация рентгеновских спектров проводилась в диапазоне 0.3-12 кэВ с помощью программы XSPEC v12.9.0n² совместно по данным телескопов ART-XC и eROSITA. Спектры телескопа eROSITA были предварительно разбиты на спектральные бины 0.3-0.5, 0.5-0.7, 0.7-1, 1-1.5, 1.5-2, 2-4, 4-6, 6-9 кэВ.

Мы предполагали, что рентгеновский спектр АЯГ описывается степенным законом с фиксированным наклоном $\Gamma = 1.8$ (типичное значение для сейфертовских галактик) и завалом на низких энергиях в результате фотопоглощения в Галактике

¹ За обработку данных телескопа eROSITA (Германия) на этой части неба отвечают российские ученые.

² https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/

Истоиник АРТ-ХС	Оптические координаты		r(APT-XC)	r(eROSITA)	Otkdut
HEIOMINK AI(1-AG	α	δ	$T(\mathbf{A}(1^{-}\mathbf{A}\mathbf{C}))$	/ (C(OSTIA)	Открыт
SRGA J005751.0+210846	$00\ 57\ 52.1$	+210846	15.4''	_	СРГ
SRGA J014157.0–032915	$01\ 41\ 59.4$	-032934	40.6''	—	СРГ
SRGA J043209.6+354917	$04\ 32\ 08.0$	+354929	22.9''	2.3''	ROSAT
SRGA J045049.8+301449	$04\ 50\ 48.0$	+301503	27.2''	3.2''	Swift
SRGA J152102.3+320418	152101.8	+320414	7.5''	2.9"	Swift
SRGA J200431.6+610211	$20\ 04\ 32.4$	+610231	$20.8^{\prime\prime}$	5.3''	ROSAT
SRGA J224125.9+760343	$22\ 41\ 25.8$	+760353	10.0''	4.6''	ROSAT
SRGA J232446.8+440756	$23\ 24\ 48.4$	+440757	17.3''	—	СРГ

Таблица 1. Список объектов спектроскопических наблюдений

Примечание. Столбец 1: название источника в предварительном каталоге ART-XC (используемые в названиях координаты рентгеновских источников даны для эпохи J2000.0). Столбцы 2 и 3: координаты предполагаемого оптического партнера. Столбец 4: расстояние между координатами источника ART-XC и координатами оптического объекта. Столбец 5: расстояние между координатами источника eROSITA и координатами оптического объекта (прочерк означает, что данный источник не детектируется телескопом eROSITA). Столбец 6: рентгеновская обсерватория, открывшая источник.

и в самом объекте. Таким образом, использовалась следующая модель в XSPEC:

phabs(zphabs(powerlaw)),

где phabs — поглощение в Галактике по данным обзора HI4PI (Бехти и др., 2016), zphabs — поглощение на красном смещении *z* данного АЯГ (измеренном по оптическому спектру объекта). Для всех источников достигнуто удовлетворительное качество аппроксимации.

Полученные рентгеновские спектры представлены на графиках ниже в единицах $F_E(E)$. При этом для пересчета отсчетов на детекторе в фотоны использовалась степенная модель с наклоном $\Gamma = 1.8$. Следует иметь в виду, что такие рисунки не должны использоваться для получения точных значений потоков.

ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Спектроскопия объектов проводилась на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН с использованием спектрографа низкого и среднего разрешения АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016) и на 1.5-м российско-турецком телескопе (РТТ-150) с использованием спектрографа TFOSC³. На обоих спектрографах для получения спектров используется набор длинных щелей.

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 47 № 2 2021

На спектрографе АДАМ для получения спектров нами использовались объемные фазовые голографические решетки (VPHG), 600 штрихов на миллиметр. В качестве диспергирующего элемента мы использовали решетки VPHG600G спектрального диапазона 3650-7250 Å с разрешающей способностью 4.3 Å и решетку VPHG600R спектрального диапазона 6460-10050 Å с разрешающей способностью 6.1 Å. При использованиии решетки VPHG600R устанавливался фильтр OS11, который убирает с изображения второй порядок интерференции. На спектрографе установлена толстая ПЗС-матрица e2v CCD30-11, изготовленная по технологии глубокого обеднения. Это позволяет получать спектральные изображения на длине волны 1 мкм без интерференции на тонкой подложке матрицы. На спектрографе доступен набор щелей, для получения спектроскопических изображений мы использовали щель шириной 2". Все наблюдения выполнялись с позиционным углом щели, равным нулю. После каждой серии спектроскопических изображений для каждого объекта мы получали калибровочные изображения лампы с непрерывным спектром и линейчатого спектра Не-Ne-Ar лампы.

На спектрографе TFOSC в качестве диспергирующего элемента использовалась дифракционная пропускающая решетка № 15 со спектральным диапазоном 3700-8700 Å, обеспечивающая спектральное разрешение 12 Å. Эта решетка позволяет

³ http://hea.iki.rssi.ru/rtt150/en/index.php?page=tfosc

Линия	Длина волны, Å	Поток, 10^{-16} эрг с ⁻¹ см ⁻²	Экв. ширина ¹ , Å	FWHM, км/с
$H\alpha$	6880	9.9 ± 6.0	-5.0 ± 3.0	$(3.6\pm0.3)\times10^2$
NII $\lambda 6584$	6901	8.8 ± 5.0	-4.4 ± 2.5	$(3.8\pm0.2)\times10^2$

Таблица 2. Спектральные особенности SRGA J005751.0+210846 = LEDA 1643776

¹ Отрицательные значения соответствуют эмиссионным линиям.

получать на спектральных изображениях яркие линии бальмеровской серии для галактик вплоть до красного смещения z = 0.32. Для получения спектроскопических изображений использовалась щель шириной 2". Позиционный угол щели спектрографа равен 90 градусов. До и после получения серии спектроскопических изображений для каждого объекта мы получали изображения лампы с непрерывным спектром и линейчатого спектра Fe-Ar лампы.

Все наблюдения проводились в темное безлунное время. Перед получением спектроскопических изображений мы старались как можно точнее расположить ядро галактики по центру щели спектрографа. После каждой экспозиции мы изменяли положение объекта вдоль щели на 10-15'' в случайном направлении вверх или вниз при помощи фотогида. Каждую ночь на обоих телескопах мы получали спектр спектрофотометрических стандартов из списка ESO^4 для всех используемых наборов дифракционных решеток и щелей. Обработка производилась при помощи пакета программ IRAF⁵ и собственного программного обсепечения.

Для того чтобы оценить уширение линий излучения, их профили аппроксимировались нормальным распределением, при этом фон аппроксимировался полиномом. Ширина линии определялась как $FWHM = \sqrt{FWHM_{mes}^2 - FWHM_{res}^2}$, где $FWHM_{mes}$ — измеренная ширина линии, а $FWHM_{res}$ — спектральное уширение прибора, значения которого были приведены выше для каждого используемого диспергирующего элемента.

Классификация сейфертовских галактик по оптическим спектрам проводилась стандартным образом (Остерброк, 1981; Верон-Сетти и др., 2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Ниже приводятся подробности оптических и рентгеновских наблюдений, а также полученные результаты для каждого объекта выборки. SRGA J005751.0+210846. Этот рентгеновский источник был открыт в диапазоне 4–12 кэВ телескопом ART-XC обсерватории СРГ и при этом не был зарегистрирован в более мягком рентгеновском диапазоне телескопом eROSITA той же обсерватории.

Вероятным оптическим партнером рентгеновского источника является галактика LEDA 1643776, которая попадает в область локализации ART-XC (рис. 1). Галактика ориентирована ребром к наблюдателю. Ранее для нее уже был получен спектр в ходе Слоановского обзора неба (выпуск 12, Сообщество СДСС 2015), по которому было измерено ее красное смещение ($z = 0.04798 \pm 0.00002$). Однако полученный спектр не позволяет надежно классифицировать объект как АЯГ.

Оптические наблюдения объекта проводились 22 октября 2020 г. на телескопе АЗТ-ЗЗИК с помощью решетки VPHG600G. Было получено шесть спектральных изображений с экспозицией по 300 с, общая экспозиция составила 30 мин.

Полученный спектр галактики показан на рис. 1. На нем видны узкие эмиссионные линии Н α , [NII] λ 6584 и дублета серы. Линии Н β , [OIII] λ 4959, [OIII] λ 5007 отсутствуют. Верхняя граница максимума интенсивности на уровне 2σ в этих линиях составляет 5.5×10^{-17} эрг/с/см²/Å. В табл. 2 представлены характеристики двух наиболее ярких линий. По этим двум линиям было измерено красное смещение объекта: $z = 0.04795 \pm 0.00005$, что в пределах ошибки согласуется с красным смещением, измеренным в Слоановском обзоре.

Из-за отсутствия в спектре линии Н β и дублета [OIII] невозможно установить положение галактики LEDA 1643776 на стандартной ВРТ-диаграмме (Балдвин и др. 1981, см. рис. 9), а следовательно, и ее оптический тип. Тем не менее большая рентгеновская светимость (~5 × 10⁴³ эрг/с в диапазоне 4–12 кэВ по данным ART-XC) объекта не оставляет сомнений, что это АЯГ. Вероятно, слабость наблюдаемых линий связана с тем, что мы наблюдаем галактику LEDA 1643776 с ребра, так что оптическое излучение из активного ядра (и, в частности, из области образования узких линий) практически полностью поглощено в толще межзвездного газа галактики.

⁴ https://www.eso.org/sci/observing/tools/standards/spectra/stanlis.html

⁵ http://iraf.noao.edu/

SRGA J005751.0 + 210846



Рис. 1. Вверху слева: картинка наведения для источника SRGA J005751.0+210846, взятая из обзора Pan-STARRS1 (Чэмберс и др., 2016). Стрелкой показан объект, для которого был получен оптический спектр, синей окружностью обозначена область локализации источника телескопом ART-XC, радиусом 30". Вверху справа: рентгеновский спектр по данным телескопов ART-XC (красным) и eROSITA (синим), а также модель (степенной закон с поглощением) наилучшей аппроксимации (черная линия). Стрелками показаны верхние пределы. Внизу: оптический спектр с указанием некоторых линий излучения и поглощения.

Отсутствие детектирования телескопом eROSITA в сочетании с потоком в диапазоне 4–12 кэВ, измеренным телескопом ART-XC (рис. 1), позволяет поставить нижний предел (на уровне достоверности 90%) на колонку поглощения на луче зрения: $N_{\rm H} > 10^{24}$ см⁻². Возможно, значительная часть этого поглощения возникает в толще межзвездного газа галактики, а не в газопылевом торе, окружающем СМЧД.

SRGA J014157.0–032915. Этот рентгеновский источник был открыт в диапазоне 4–12 кэВ телескопом ART-XC обсерватории СРГ и при этом не был зарегистрирован в более мягком рентгеновском диапазоне телескопом eROSITA.

Вероятным оптическим партнером является галактика LEDA 1070544 (рис. 2). Хотя ее центр находится на расстоянии около 40" от координат рентгеновского источника (табл. 1), такие ошибки локализации могут происходить в случае источников на пороге детектирования телескопа ART-XC.

Оптические наблюдения проводились 13 октября 2020 г. на телескопе АЗТ-ЗЗИК с использованием решетки VPHG600G. Было получено три спектральных изображения с экспозицией по 600 с, общее время экспозиции составило 30 мин.

В полученном спектре (рис. 2) видны эмиссионные линии Н β , [OIII] λ 4959, [OIII] λ 5007, Н α , дублет серы [SII]. Линию азота [NII] λ 6584 сложно отделить от линии Н α . В табл. 3 приведены характеристики эмиссионных линий. Все они являются узкими. Красное смещение, определенное по четырем линиям, составляет $z = 0.01878 \pm 0.00003$. SRGA J014457.0 - 032915



Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для SRGA J014157.0–032915. На графике с рентгеновским спектром не показано никакой спектральной модели из-за большого разброса в параметрах модели.

Отсутствие широких линий в спектре и достаточно высокая рентгеновская светимость ($\sim 3 \times \times 10^{42}$ эрг/с в диапазоне 4–12 кэВ по данным ART-XC) указывают на то, что это сейфертовская галактика 2-го типа. Однако, согласно измеренным отношениям потоков в линиях lg([OIII] λ 5007/H β) = 0.49 ± 0.09, lg([NII] λ 6584/ H α) < -0.86, объект оказывается в области звездообразующих галактик на ВРТ-диаграмме (рис. 9), хотя и рядом (в пределах трех стандартных отклонений) с областью сейфертовских галактик. По всей видимости, мы имеем дело с галактикой, в которой наряду с активностью СМЧД происходит активное звездообразование.

Отсутствие детектирования телескопом eROSITA в сочетании с потоком в диапазоне 4– 12 кэВ, измеренным телескопом ART-XC (рис. 2), позволяет поставить нижний предел на колонку поглощения на луче зрения: $N_{\rm H} > 3 \times 10^{23}$ см⁻². Однако этот предел пока нельзя считать надежным, так как он получен лишь на уровне значимости 68%. Чтобы удостовериться в наличии большого поглощения в этом объекте, необходимо получить рентгеновский спектр с существенно большим количеством фотонов.

SRGA J043209.6+354917. Этот рентгеновский источник впервые упоминается под названием 1WGA J0432.1+3549 в каталоге источников, открытых в мягком рентгеновском диапазоне энергий в ходе направленных наведений обсерватории ROSAT (Вайт и др., 2000). Он присутствует также в каталоге источников, обнаруженных при перенаведениях обсерватории XMM-Newton (Исследовательский научный центр XMM-Newton, 2018). Однако природа этого объекта до сих пор оставалась неизвестной. Источник надежно зарегистрирован как телескопом ART-XC, так и телескопом eROSITA обсерватории CPГ.

Рентгеновский источник надежно отождествляется с галактикой 2MASX J04320796+3549287 = WISEA J043207.95+354928.8 (рис. 3), цвета которой в близком ИК-диапазоне (W1 - W2 =

ОПТИЧЕСКОЕ ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ КАНДИДАТОВ

Линия	Длина волны, Å	Поток, 10^{-16} эрг с ⁻¹ см ⁻²	Экв. ширина, Å	FWHM, км/с
$H\beta$	4954	27 ± 5	-17.8 ± 3.0	$(6.0\pm0.7)\times10^2$
$OIII\lambda 4960$	5054	31 ± 3	-14.5 ± 1.5	$(5.0 \pm 0.7) \times 10^2$
$OIII\lambda 5007$	5102	84 ± 9	-38 ± 4	$(4.9\pm0.7)\times10^2$
$H\alpha$	6689	88 ± 8	-50 ± 5	$(3.9\pm0.5)\times10^2$
NII $\lambda 6584$	6709	<12	>-7.3	_

Таблица 3. Спектральные особенности SRGA J014157.0-032915 = LEDA 1070544

Таблица 4. Спектральные особенности SRGA J043209.6+354917 = 2MASX J04320796+3549287

Линия	Длина волны, Å	Поток, 10^{-16} эрг с ⁻¹ см ⁻²	Экв. ширина, Å	FWHM, км/с
${ m H}eta$, узкая	5112	<2	>-4.3	_
${ m H}eta$, широкая	5112	28 ± 7	-64 ± 16	$(5.8\pm0.6)\times10^3$
$OIII\lambda 4960$	_	<3	>-6.5	_
$OIII\lambda 5007$	5260	12 ± 2	-27 ± 5	$(6.4\pm1.2)\times10^2$
NII $\lambda 6548$	6854	2 ± 2	-2 ± 2	$(5.8\pm0.9)\times10^2$
${ m H}lpha$, узкая	6893	9 ± 2	-9 ± 2	$(5.8\pm0.9)\times10^2$
${ m H}lpha$, широкая	6893	282 ± 8	-278 ± 8	$(6.0\pm0.2)\times10^3$
NII $\lambda 6584$	6919	14 ± 2	-14 ± 2	$(5.8\pm0.9)\times10^2$

= 0.68) (Райт и др., 2010) указывают на присутствие активного ядра.

Оптические наблюдения проводились 15 сентября 2020 г. на телескопе РТТ-150. Было получено пять спектральных изображений с экспозицией по 900 с, общее время экспозиции составило 75 мин.

В спектре объекта (рис. 3) видны эмиссионные линии бальмеровской серии водорода, а также запрещенные линии излучения кислорода и азота. В табл. 4 приведены характеристики эмиссионных линий. Красное смещение определено по трем линиям H α , [OIII] λ 5007 и [NII] λ 6584 и равно z == 0.0506 ± 0.0010. Линии H α и H β имеют широкую компоненту, на поток в узкой компоненте линии H β можно поставить только верхний предел. По соотношениям lg([OIII] λ 5007/H β) > 0.77, lg([NII] λ 6584/H α) = 0.19 ± 0.11 (рис. 9) и потокам в широких и узких компонентах линий H α и H β объект классифицируется как сейфертовская галактика 1-го типа.

В рентгеновском спектре объекта (рис. 3) детектируется небольшое поглощение: $N_{\rm H} \sim 3 \times 10^{21}$ см⁻².

SRGA J045049.8+301449. Этот объект был открыт в жестком рентгеновском диапазоне (источник SWIFT J0450.6+3015) прибором ВАТ обсерватории Swift им. Нила Джерельса (О и др., 2018) и присутствует в каталоге точечных рентгеновских источников, обнаруженных телескопом XRT той же обсерватории (Эванс и др., 2020). Однако его природа до сих пор оставалась неизвестной. Источник надежно зарегистрирован как телескопом ART-XC, так и телескопом eROSITA обсерватории СРГ.

Рентгеновский источник надежно отождествляется (рис. 4) с галактикой LEDA 1896296 = = WISEA J045048.00+301502.8 (цвет W1 - W2 = 0.38).

SRGA J043209.6 + 354917



Рис. 3. То же, что на рис. 1, но для SRGA J043209.6+354917. На картинке наведения синей окружностью показана область локализации ART-XC, красной окружностью — область локализации eROSITA.

Оптические наблюдения проводились 22 октября 2020 г. на телескопе АЗТ-ЗЗИК с использованием решетки VPHG600G. Было получено четыре спектральных изображения с экспозицией по 600 с вблизи кульминации объекта, общее время экспозиции 40 мин.

В спектре объекта (рис. 4) видны эмиссионные линии [OIII] λ 4960, λ 5007, H α , [NII] λ 6584, дублет серы. Линия Н β не видна. Верхний предел на соотношение lg([OIII] λ 5007/H β) > 0.92. Отношение lg([NII] λ 6584/H α) = -0.04 ± 0.16 . Все линии узкие, кроме линии Н α , в которой можно выделить широкую компоненту. Характеристики эмиссионных линий приведены в табл. 5. По шести эмиссионным линиям измерено красное смещение объекта: $z = 0.03308 \pm 0.00004$. По расположению на ВРТ-диаграмме (рис. 9) и наличию широкой компоненты только у линии Н α бальмеровской

серии, объект может быть классифицирован как сейфертовская галактика типа 1.9.

В рентгеновском спектре объекта (рис. 4) регистрируется заметное поглощение: $N_{\rm H} \sim 4 \times 10^{22}$ см⁻².

SRGA J152101.9+320430. Этот рентгеновский источник присутствует в каталоге точечных рентгеновских источников, обнаруженных телескопом XRT обсерватории Swift им. Нила Джерельса (Эванс и др., 2020), однако его природа до сих пор оставалась неизвестной. Источник надежно зарегистрирован как телескопом ART-XC, так и телескопом eROSITA обсерватории СРГ.

Рентгеновский источник надежно отождествляется (рис. 5) с галактикой (по данным Слоановского обзора) WISEA J152101.83 + 320414.6, ИКцвет которой (W1 - W2 = 1.20) указывает на возможное наличие активного ядра.





Рис. 4. То же, что на рис. 3, но для SRGA J045049.8+301449.

Оптические наблюдения проводились 27 февраля и 24 апреля 2020 г. на телескопе АЗТ-ЗЗИК. 27 февраля 2020 г. было получено пять спектральных изображений с экспозицией по 600 с, общее время экспозиции составило 50 мин; 24 апреля 2020 г. было получено два спектральных изображения с экспозицией по 1200 с в решетке VPHG600G и три спектральных изображения с экспозицией по 1200 с в решетке VPHG600R, общее время экспозиции составило 100 мин.

В полученном спектре (рис. 5) видны 14 узких эмиссионных линий водорода, кислорода, азота, серы и гелия. Информация по этим линиям собрана в табл. 6. Красное смещение галактики, определенное по 14 линиям, равно $z = 0.11425 \pm 0.00031$. Отношения $lg([NII]\lambda 6584/H\alpha) = -0.61 \pm 0.03$, $lg([OIII]\lambda 5007/H\beta) = 0.88 \pm 0.05$. По положению на ВРТ-диаграмме (рис. 9) и отсутствию широких линий объект классифицируется как сейфертовская галактика 2-го типа.

В рентгеновском спектре объекта (рис. 5) регистрируется заметное поглощение: $N_{\rm H}\sim 2.5\times \times 10^{22}~{\rm cm}^{-2}.$

SRGA J200431.6+610211. Этот рентгеновский источник был открыт в ходе обзора всего неба обсерватории ROSAT: 2RXS J200433.8+610235 (Боллер и др., 2016). Однако его природа до сих пор оставалась неизвестной. Источник зарегистрирован как телескопом ART-XC, так и телескопом eROSITA обсерватории СРГ.

Рентгеновский источник надежно отождествляется (рис. 6) с галактикой 2MASX J20043237 + +6102311=WISEA J200432.40 + 610230.8, ИК-цвет которой (W1 - W2 = 0.89) указывает на возможное наличие активного ядра.

Оптические наблюдения проводились 22 октября 2020 г. на телескопе АЗТ-ЗЗИК с использованием решетки VPHG600G. Было получено пять спектральных изображений по 300 с, общее время экспозиции составило 25 мин.

ЗАЗНОБИН и др.

Линия	Длина волны, Å	Поток, 10^{-16} эрг с $^{-1}$ см $^{-2}$	Экв. ширина, Å	FWHM, км/с
Hβ	5037	<2	>-1.3	_
$OIII\lambda 4960$	5124	5.9 ± 0.8	-3.7 ± 0.5	$(6.5\pm0.6)\times10^2$
$OIII\lambda 5007$	5173	17 ± 2	-10.3 ± 1.2	$(6.8\pm0.6)\times10^2$
${ m H}lpha$, узкая	6781	24 ± 8	-7 ± 2	$(4.7\pm0.5)\times10^2$
${ m H}lpha$, широкая	6781	25 ± 4	-7.1 ± 1.2	$(2.8\pm0.4)\times10^3$
NII $\lambda 6584$	6803	22 ± 3	-6.7 ± 0.9	$(4.8\pm0.5)\times10^2$
$SII\lambda 6718$	6940	15 ± 2	-4.2 ± 0.6	$(5.2 \pm 0.8) \times 10^2$
SIIλ6732	6956	10 ± 2	-2.7 ± 0.6	$(4.8\pm0.8)\times10^2$

Таблица 5. Спектральные особенности SRGA J045049.8+301449 = LEDA 1896296

Таблица 6. Спектральные особенности SRGA J152101.9+320430 = WISEA J152101.83+320414.6

Линия	Длина волны, Å	Поток, 10^{-16} эрг с ⁻¹ см ⁻²	Экв. ширина, Å	FWHM, км/с
$OII\lambda 3729$	4155	112 ± 7	$(-1.8^{+1.7}_{-0.8}) \times 10^2$	$(6.8\pm0.8)\times10^2$
HeIλ3889	4312	33 ± 7	-9^{+9}_{-4}	$(6.2\pm0.8)\times10^2$
Hδ	4573	<11	>-27	_
$H\gamma$	4837	14 ± 2	-31^{+12}_{-6}	$(6.7\pm0.7)\times10^2$
$OIII\lambda 4364$	4863	7.1 ± 1.5	$-15.4^{+1.2}_{-2.7}$	$(6.3\pm0.7)\times10^2$
$H\beta$	5418	30 ± 3	-67^{+24}_{-13}	$(5.7\pm0.6)\times10^2$
$OIII\lambda 4960$	5527	75 ± 3	$(-1.23^{+0.45}_{-0.11}) \times 10^2$	$(6.1\pm0.6)\times10^2$
$OIII\lambda 5007$	5580	$(2.3\pm0.1)\times10^2$	$(-3.6\pm0.4)\times10^2$	$(6.3\pm0.6)\times10^2$
$OI\lambda 6302$	7022	14.9 ± 0.7	-41^{+8}_{-7}	$(6.1\pm0.5)\times10^2$
$OI\lambda 6365$	7086	<7	>-7.6	_
NII $\lambda 6548$	7298	<20	>-22	_
$H\alpha$	7316	$(3.0\pm0.1)\times10^2$	$(-2.4^{+0.8}_{-0.7}) \times 10^2$	$(5.6\pm0.4)\times10^2$
$\mathrm{NII}\lambda6584$	7339	73 ± 4	-56^{+29}_{-28}	$(7.2\pm0.8)\times10^2$
SIIλ6718	7487	62 ± 7	-58 ± 8	$(5.9\pm0.4)\times10^2$
$SII\lambda 6732$	7504	53 ± 7	-50 ± 8	$(5.8\pm0.4)\times10^2$

SRGA J152101.9 + 320430



Рис. 5. То же, что на рис. 3, но для SRGA J152101.9+320430. Оптический спектр показан на двух нижних рисунках: слева — спектр, полученный в решетке VPGH600G, справа — спектр, полученный в решетке VPGG00R.

На полученном спектре (рис. 6) видны узкие эмиссионные линии Н β , [OIII] λ 4959, [OIII] λ 5007, Н α , NII6584, дублет серы. Характеристики линий приведены в табл. 7. По семи линиям было определено красное смещение: $z = 0.05866 \pm 0.00013$. Соотношения lg([OIII] λ 5007/H β) = 1.04 \pm 0.03 и lg([NII] λ 6584/H α) = 0.00 \pm 0.06. По положению на BPT-диаграмме (рис. 9) и отсутствию широких линий объект можно отнести к сейфертовским галактикам 2-го типа.

В рентгеновском спектре объекта (рис. 6) регистрируется небольшое поглощение: $N_{\rm H}\sim 5\times 10^{21}~{\rm cm}^{-2}.$

SRGA J224125.9+760343. Этот рентгеновский источник был открыт в ходе обзора всего неба обсерватории ROSAT: 2RXS J224124.5+760346 (Боллер и др., 2016), однако его природа до сих пор оставалась неизвестной. Источник зарегистрирован как телескопом ART-XC, так и телескопом eROSITA обсерватории СРГ.

Рентгеновский источник надежно отождествляется (рис. 7) с инфракрасным источником WISEA J224125.79 + 760353.8, ИК-цвет которого (W1 - W2 = 0.97) указывает на возможное наличие активного ядра.

Оптические наблюдения проводились 21 июня 2020 г. на телескопе РТТ-150. Было получено три спектральных изображения по 1800 с, общее время экспозиции составило 90 мин.

На полученном спектре (рис. 7) видны эмиссионные линии бальмеровской серии $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$, имеющие узкие и широкие компоненты. Линия $H\alpha$ слилась с линиями азота [NII] λ 6548 и [NII] λ 6584. Очевидно поэтому измеренная ширина FWHM широкой компоненты $H\alpha$ несколько превышает ширину соответствующей компоненты линии $H\beta$. В спектре присутствуют также эмиссионные линии [OIII] λ 4960, [OIII] λ 5007 и комплекс линий Fe II λ 4570 (λ 4434– λ 4684). Характеристики всех линий представлены в табл. 8. Красное



Рис. 6. То же, что на рис. 3, но для SRGA J200431.6+610211.

смещение, определенное по шести линиям излучения, равно $z = 0.2834 \pm 0.0003$. Отношение потоков в узких линиях lg([OIII] λ 5007/H β) = 0.66, а отношение lg([NII] λ 6584/H α) трудно оценить из-за слияния линий. Относительная узость широких компонент бальмеровских линий (*FWHM* (H β) < 2000 км/с) и наличие заметной эмиссии Fe II свидетельствуют о том, что этот объект является сейфертовской галактикой 1-го типа с узкими линиями (Narrow Line Seyfert 1 Galaxy).

В рентгеновском спектре объекта (рис. 7) нет признаков дополнительного поглощения, кроме поглощения в нашей Галактике. При фиксированном наклоне степенного спектра $\Gamma = 1.8$ получается строгий верхний предел на внутреннее поглощение: $N_{\rm H} < 4 \times 10^{20}$ см⁻².

SRGA J232446.8+440756. Этот рентгеновский источник был открыт в диапазоне 4–12 кэВ телескопом ART-XC обсерватории СРГ и при этом

не был зарегистрирован в более мягком рентгеновском диапазоне телескопом eROSITA.

Рентгеновский источник можно отождествить с неправильной галактикой 2MASX J23244834 + 4407564 = WISEA J232448.36 + 440756.5 (рис. 8). Известно ее красное смещение: z = 0.04634 (Хучра и др., 2012), а ИК-цвет (W1 - W2 = 0.83) указывает на наличие активного ядра. Однако до сих пор галактика не классифицировалась как АЯГ по данным оптической спектроскопии.

Оптические наблюдения проводились 10 июня 2020 г. на телескопе РТТ-150. Было получено девять спектральных изображений с экспозицией по 600 с, общее время экспозиции составило 90 мин.

На полученном спектре (рис. 8) видны узкие эмиссионные линии Н α , Н β , [OIII] λ 4959, λ 5007, [NII] λ 6584, а так же дублет [SII]. Характеристики линий приведены в табл. 9. Красное смещение определено по пяти эмиссионным лини-

		101

Линия	Длина волны, Å	Поток, 10^{-16} эрг с ⁻¹ см ⁻²	Экв. ширина, Å	FWHM, км/с
Hβ	5147	18.0 ± 1.2	-6.7 ± 0.5	$(4.7\pm0.7)\times10^2$
$OIII\lambda 4959$	5250	57 ± 5	-19 ± 4	$(4.8 \pm 0.7) \times 10^2$
$OIII\lambda 5007$	5302	196 ± 7	-59 ± 3	$(4.8\pm0.7)\times10^2$
$H\alpha$	6950	110 ± 11	-23 ± 2	$(4.7\pm0.5)\times10^2$
NII $\lambda 6584$	6972	111 ± 11	-23 ± 2	$(5.0\pm0.5)\times10^2$
SIIλ6718	7113	31 ± 3	-7.7 ± 0.6	$(5.5\pm0.4)\times10^2$
SIIλ6732	7129	31 ± 3	-7.7 ± 0.6	$(5.2\pm0.4)\times10^2$

Таблица 7. Спектральные особенности SRGA J200431.6+610211 = 2MASX J20043237+6102311

Таблица 8. Спектральные особенности SRGA J224125.9+760343 = WISEA J224125.79+760353.8

Линия	Длина волны, Å	Поток, 10^{-16} эрг с ⁻¹ см ⁻²	Экв. ширина	FWHM, км/с
$ m H\gamma$, узкая	5579	<0.8	>-1.2	_
$ m H\gamma$, широкая	5579	17.4 ± 0.8	-26 ± 1	$(2.1\pm0.2)\times10^3$
$FeII\lambda 4570$	5982	18.6 ± 1.3	_	_
${ m H}eta$, узкая	6239	4.4 ± 0.3	-6.4 ± 0.4	$(3.8\pm0.9)\times10^2$
${ m H}eta$, широкая	6239	51 ± 1	-35 ± 2	$(1.5\pm0.2)\times10^3$
$OIII\lambda 4959$	6365	7.7 ± 0.2	-11.3 ± 0.3	$(3.7\pm0.9)\times10^2$
$OIII\lambda 5007$	6428	20.1 ± 0.3	-29 ± 1	$(3.7\pm0.9)\times10^2$
${ m H}lpha$, узкая	8429	6.0 ± 0.9	-8.8 ± 1.3	$(2.8\pm0.7)\times10^2$
${ m H}lpha$, широкая	8429	197 ± 3	-288 ± 5	$(2.3\pm0.1)\times10^3$

Таблица 9. Спектральные особенности SRGA J232446.8+440756 = 2MASX J23244834+4407564

Линия	Длина волны, Å	Поток, 10^{-16} эрг·с ⁻¹ см ⁻²	Экв. ширина, Å	FWHM, км/с
$H\beta$	5087	27 ± 4	-12 ± 3	$(7.4\pm1.0)\times10^2$
$OIII\lambda 4959$	5189	74 ± 9	-42 ± 9	$(6.8\pm1.0)\times10^2$
$OIII\lambda 5007$	5239	196 ± 12	-102 ± 17	$(7.3 \pm 1.0) \times 10^2$
$H\alpha$	6865	134 ± 9	-41 ± 6	$(5.3\pm0.8)\times10^2$
NII $\lambda 6584$	6887	46 ± 7	-17 ± 3	$(1.5^{+3.7}_{-1.5}) \times 10^2$



Рис. 7. То же, что на рис. 3, но для SRGA J224125.9+760343. В отличие от других источников, показана степенная модель с наклоном $\Gamma = 2.4$, которая обеспечивает лучшее качество аппроксимации, чем модель со стандартным наклоном $\Gamma = 1.8$.

ям и равно $z = 0.04624 \pm 0.00020$, что согласуется с ранее измеренным значением Хучра и др. (2012). Отношения $lg([NII]\lambda 6584/H\alpha) = -0.46 \pm \pm 0.07$, $lg([OIII]\lambda 5007/H\beta) = 0.86 \pm 0.07$. По положению на ВРТ-диаграмме (рис. 9) и отсутствию широких линий объект может быть отнесен к сейфертовским галактикам 2-го типа.

Отсутствие детектирования телескопом eROSITA в сочетании с потоком в диапазоне 4–12 кэВ, измеренным телескопом ART-XC (рис. 8), позволяет поставить строгий нижний предел на колонку поглощения на луче зрения: $N_{\rm H} > 3 \times 10^{23}$ см⁻².

СВОЙСТВА ОБНАРУЖЕННЫХ АЯГ

В табл. 10 представлены основные свойства активных ядер галактик, которые удалось отождествить в данной работе. Помимо красного смещения и оптического типа, для каждого объекта приводится оценка колонковой плотности холодного вещества внутри объекта вдоль луча зрения $N_{\rm H}$ и его рентгеновская светимость $L_{\rm X}$ в диапазоне энергий 4–12 кэВ.

Рентгеновская светимость была получена на основе потока в диапазоне энергий 4–12 кэВ, измеренного телескопом ART-XC обсерватории СРГ, и фотометрического расстояния до объекта, рассчитанного по его красному смещению. Приведенные значения L_X не учитывают k-поправки и не поправлены за поглощение на луче зрения. Первая из этих поправок не должна быть существенной, принимая во внимание небольшие красные смещения объектов и то, что наклон рентгеновских спектров АЯГ не сильно отличается от $\Gamma = 2$. Что касается поправки за поглощение, то, хотя она может оказаться большой для трех объектов выборки с большой колонкой поглощения ($N_H > 10^{23}$ см⁻²), ее практически невозможно надежно учесть на

SRGA J232446.8 + 440756



Рис. 8. То же, что рис. 1, но для SRGA J232446.8+440756.

основе существующих данных телескопов ART-XC и eROSITA (слишком мало зарегистрированных фотонов). Поэтому надо иметь в виду, что истинная светимость этих сильно поглощенных АЯГ может быть в несколько раз больше, чем указано в таблице.

Как видно из табл. 10, большинство обсуждаемых объектов — сейфертовские галактики со светимостью $L_{\rm X} \sim 10^{42} - 10^{44}$ эрг/с в близкой Вселенной (z < 0.1), за исключением источника SRGA J224125.9+760343 на красном смещении z = 0.28 со светимостью $L_{\rm X} \sim 10^{45}$ эрг/с, который, используя традиционную терминологию, можно отнести к квазарам.

Практически все исследованные объекты попадают в область сейфертовских галактик на стандартной ВРТ-диаграмме (рис. 9) отношений потоков в линиях [OIII] λ 5007/H β , [NII] λ 6484/H α . SRGA J005751.0+210846 не помещен на эту диаграмму, потому что по имеющимся оптическим спектрам невозможно получить требуемую информацию о линиях излучения. В этом случае мы имеем дело с галактикой (LEDA 1643776), наблюдаемой с ребра, так что области линейчатого излучения в ее активном ядре могут быть полностью скрыты от наблюдателя. SRGA J224125.9+760343 тоже не попал на ВРТ-диаграмму, так как широкая компонента линии Н α слилась с линией [NII] λ 6484, из-за чего оценить параметры линии не представляется возможным. При этом оба объекта несомненно являются АЯГ, так как характеризуются большой рентгеновской светимостью. Как уже обсуждалось выше, объект SRGA J014157.0-032915 располагается на ВРТ-диаграмме в области звездообразующих галактик, но рядом с областью сейфертовских галактик. Вероятно, узкие эмиссионные линии в его спектре формируются не только в результате аккреции вещества на СМЧД в ядре галактики, но и в результате мощного звездообразования в галактике.

Таблица 10. Свойства активных ядер галактик

Объект	Оптический тип ¹	z	$N_{ m H}^2$	$\log L_{\rm X}^3$
SRGA J005751.0+210846	$Sy2^4$	0.04798 ± 0.00002	$>1 \times 10^3$	$43.7_{-0.3}^{+0.2}$
SRGA J014157.0-032915	Sy2	0.01878 ± 0.00003	$> 3 \times 10^2$	$42.5_{-1.2}^{+0.3}$
SRGA J043209.6+354917	Sy1	0.0506 ± 0.0010	$3.0^{+0.8}_{-0.7}$	$43.8_{-0.3}^{+0.2}$
SRGA J045049.8+301449	Sy1.9	0.03308 ± 0.00004	38^{+11}_{-10}	$43.4_{-0.3}^{+0.2}$
SRGA J152102.3+320418	Sy2	0.1143 ± 0.0003	25^{+6}_{-6}	$44.1_{-0.4}^{+0.2}$
SRGA J200431.6+610211	Sy2	0.05866 ± 0.00013	$4.7^{+2.2}_{-1.4}$	$43.6_{-0.3}^{+0.2}$
SRGA J224125.9+760343	NLSy1	0.2834 ± 0.0004	< 0.4	$44.9_{-0.6}^{+0.2}$
SRGA J232446.8+440756	Sy2	0.0462 ± 0.0002	$> 3 \times 10^2$	$43.5_{-0.3}^{+0.2}$

¹ Sy1, Sy1.9, Sy2 — сейфертовская галактика типа 1, 1.9, 2 соответственно, NLSy1 — сейфертовская галактика 1-го типа с узкими линиями.

² В единицах 10²¹ см⁻², погрешности и пределы соответствуют уровню достоверности 90%, а для источника SRGA J014157.0– 032915 представлен 68% уровень.

³ Не поправленная за поглощение светимость в наблюдаемом диапазоне энергий 4–12 кэВ в единицах эрг/с.

⁴ Классификация условная, так как галактика наблюдается с ребра.

Шесть из восьми исследованных объектов (если включить наблюдаемый с ребра SRGA J005751.0+ 210846) оказались сейфертовскими галактиками 2-го или промежуточного типа (1.9). Обнаружение заметного поглощения в их рентгеновских спектрах является вполне ожидаемым.

Один из объектов (SRGA J224125.9+760343) оказался сейфертовской галактикой 1-го типа с узкими линиями. Мы можем оценить массу СМЧД в этом объекте по формуле (Вестергард и Петерсон, 2006):

$$\begin{split} &\lg M_{\rm BH} = \\ &= \lg \left[\left(\frac{FWHM({\rm H}\beta)}{1000 \ {\rm Km/c}} \right)^2 \left(\frac{L({\rm H}\beta)}{10^{42} \ {\rm spr/c}} \right)^{0.63} \right] + \\ &\quad + 6.67. \end{split}$$

В нашем случае $FWHM(H\beta) = (1.5 \pm 0.2) \times 10^3 \text{ км/с}$, поток в линии $F(H\beta) = (1.30 \pm 0.02) \times 10^{-14}$ эрг с⁻¹ см⁻² (см. табл. 8), что при z = 0.2834 позволяет оценить светимость в линии $L(H\beta) \approx 3.3 \times 10^{42}$ эрг/с. В итоге находим $M_{\rm BH} \approx \approx 2.3 \times 10^7 M_{\odot}$.

Для такой относительно небольшой черной дыры критическая эддингтоновская светимость составляет $L_{\rm Edd} \approx 3 \times 10^{45}$ эрг/с. При этом измеренная светимость источника SRGA J224125.9+760343 в рентгеновском диапазоне энергий (4–12 кэВ)

составляет $L_{\rm X} \sim (2-13) \times 10^{44}$ эрг/с. Так как болометрическая светимость $L_{\rm bol}$ АЯГ обычно превышает рентгеновскую светимость как минимум в несколько раз (см., например, Сазонов и др., 2004), то мы приходим к выводу, что в случае SRGA J224125.9+760343 $L_{\rm bol} \sim L_{\rm Edd}$. Это соответствует общепризнанной парадигме (см., например, Матхур, 2000), что в сейфертовских галактиках 1-го типа с узкими линиями аккреция вещества СМЧД происходит в темпе, близком к критическому.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нам удалось отождествить восемь новых активных ядер галактик среди рентгеновских источников, зарегистрированных в ходе первого обзора неба с помощью телескопа ART-XC обсерватории СРГ. Были измерены красные смещения этих объектов, а также изучены их оптические и рентгеновские свойства. Большинство объектов оказались сейфертовскими галактиками 2-го типа, с заметным поглощением в рентгеновском спектре. Для трех АЯГ колонка поглощения на луче зрения превышает 3×10^{23} см $^{-2}$, из-за чего они регистрируются только в достаточно жестком рентгеновском диапазоне с помощью телескопа ART-XC и не регистрируются в более мягком рентгеновском диапазоне с помощью телескопа eROSITA. В одном из этих объектов (SRGA J005751.0+210846)



Рис. 9. Расположение исследуемых АЯГ (красные точки и пределы) на ВРТ-диаграмме (Балдвин и др., 1981), полученной по данным Слоановского обзора (выпуск 7, Сообщество СДСС 2009). Разграничительные линии между разными классами галактик взяты из работ: Кауффманн и др. (2003) — штриховая линия, Кеули и др. (2001) — тонкая линия, Жавински и др. (2007) — толстая линия. Показаны только шесть объектов, для которых нам удалось определить параметры требуемых линий. Диаграмма построена с помощью сайта http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/SDSS/DR7/Data/gal_line_dr7_v5_2.ft.gz.

поглощение, возможно, связано в основном с толщей межзвездного газа в родительской галактике, которая наблюдается с ребра. Один из объектов (SRGA J224125.9+760343) оказался сейфертовской галактикой 1-го типа с узкими линиями и светимостью, близкой к эддингтоновскому пределу.

Результаты данной работы подтверждают ожидания, что телескоп ART-XC является эффективным инструментом для поиска сильно поглощенных и других интересных активных ядер галактик в относительно близкой ($z \leq 0.3$) Вселенной. Обзор неба обсерватории СРГ продлится еще более трех лет, что должно позволить открыть множество таких объектов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 19-12-00396. Авторы благодарят TÜBITAK, ИКИ РАН, КФУ и АН РТ за поддержку наблюдений на российско-турецком 1.5-м телескопе (РТТ-150). Измерения на телескопе АЗТ-ЗЗИК выполнены в рамках базового финансирования программы ФНИ II.16 и получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара"⁶. Работа ИФБ, ЭНИ, ЕАН выполнена за счет средств субсидии (проект № 0671-2020-0052), выделенной Казанскому федеральному университету, для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Амирханян В.Р., Моисеев А.В., Астрофиз. бюлл. 71, 514 (2016) [V.L. Afanasiev, et al., Astrophys. Bull. 71, 479].
- 2. Балдвин и др. (J.A. Baldwin, M.M. Phillips, and R. Terlevich), Publ. Astron. Soc. Pacific **93** (1981).
- 3. Бехти и др. (N. Ben Bekhti, L. Flöer, R. Keller, J. Kerp, D. Lenz, B. Winkel, et al.), Astron. Astrophys. **594**, A116 (2016).
- 4. Боллер и др. (Th. Boller, M.J. Freyberg, J. Trümper, F. Haberl, W. Voges, and K. Nandra), Astron. Astrophys. **588**, A103 (2016).

⁶ http://ckp-rf.ru/ckp/3056/

- Буренин Р.А., Амвросов А.Л., Еселевич М.В., Григорьев В.М., Арефьев В.А., Воробьев В.С. и др., Письма в Астрон. журн. 42, 5 (2016). [R.А. Burenin, A.L. Amvrosov, M.V. Eselevich, V.M. Grigor'ev, V.A. Aref'ev, V.S. Vorob'ev, et al., Astron. Lett. 42, 333 (2016)].
- 6. Вайт и др. (N.E. White, P. Giommi, and L. Angelini), VizieR On-line Data Catalog IX/31, (2000).
- 7. Верон-Сетти и др. (M.-P.Véron-Cetty, P. Véron, and A.C. Gonçalves), Astron. Astrophys. **372** (2001).
- 8. Вестергард, Петерсон (M. Vestergaard and B.M. Peterson), Astron. Astrophys. **641**, 2 (2006).
- Жавински и др. (К. Schawinski, D. Thomas, M. Sarzi, C. Maraston, S. Kaviraj, S.-J. Joo, S.K. Yi, and J. Silk), MNRAS 382, 4 (2007).
- Исследовательский научный центр XMMNewton, VizieR On-line Data Catalog IX/53, (2018). [The XMM-Newton Survey Science Centre]
- 11. Кауффманн и др. (G. Kauffmann, T.M. Heckman, C. Tremonti, J. Brinchmann, S. Charlot, S.D.M. White, et al.), MNRAS **346**, 4 (2003).
- 12. Кеули и др. (L.J. Kewley, M.A. Dopita, R.S. Sutherland, C.A. Heisler, and J. Trevena), Astron. J. **556**, 1 (2001).
- 13. C. Matxyp (S. Mathur), MNRAS 314, 4 (2000).
- 14. О и др. (К. Oh, M. Koss, C.B. Markwardt, K. Schawinski, W.H. Baumgartner, S.D. Barthelmy, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **235**, 1 (2018).
- 15. Остерброк (D.E. Osterbrock), Astrophys. J. **241**, 462 (1981).
- 16. Павлинский и др. (M.N. Pavlinski et al.), готовится к публикации (2021).

- 17. Предель и др. (P. Predehl, R. Andritschke, V. Arefiev, V. Babyshkin, O. Batanov, M. Becker, et al.), Astron. Astrophys. in press, (2020); arxiv.org:2010.03477.pdf
- Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, M.E. Ressler, R.M. Cutri, T. Jarrett, J.D. Kirkpatrick, D. Padgett, et al.), Astron. J. 140, 1868 (2010).
- 19. Сазонов и др. (S.Yu. Sazonov, J.P. Ostriker, and R.A. Sunyaev), MNRAS **347**, 1 (2004).
- Сообщество СДСС, Astrophys. J. Suppl. Ser. 182, 2 (2009) [SDSS Collaboration: K.N. Abazajian, J.K. Adelman-McCarthy, M.A. Agüeros, S.S. Allam, P.C. Allende Prieto et al.]
- 21. Сообщество СДСС, Astrophys. J. Suppl. Ser. **219**, 1 (2015) [SDSS Collaboration: S. Alam, F.D. Albareti, P.C. Allende, F. Anders, S.F. Anderson, et al.]
- 22. Сообщество СДСС, Astrophys. J. Suppl. Ser. 233, 25 (2017) [SDSS Collaboration: F.D. Albareti, C.A. Prieto, A. Almeida, et al.]
- 23. Сюняев и др. (R.A. Sunyaev et al.), готовится к публикации (2021).
- 24. Хучра и др. (J.P. Huchra, L.M. Macri, K.L. Masters, T.H. Jarrett, P.C. Berlind, M. Calkins, A.C. Crook, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **199**, 2 (2012).
- 25. Чэмберс и др. (К.С. Chambers, E.A. Magnier, N. Metcalfe, H.A. Flewelling, M.E. Huber, C.Z. Waters, et al.), arxiv.org:1612.05560.pdf. (2016).
- 26. Эванс и др. (P.A. Evans, K.L. Page, J.P. Osborne, A.P. Beardmore, R. Willingale, D.N. Burrows, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **247**, 2 (2020).

ПОИСК ПЕРИОДИЧЕСКОГО СИГНАЛА В ИЗЛУЧЕНИИ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

© 2021 г. Б. А. Низамов^{1,2}, М. С. Пширков^{1,3,4*}

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

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

⁴Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Пущинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Пущино, Россия

> Поступила в редакцию 20.11.2020 г. После доработки 26.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Излучение Крабовидной туманности демонстрирует существенную переменность в гамма-диапазоне. В данной работе мы проанализировали эту переменность с точки зрения периодичности. Используя эфемериды пульсара, построенные по радиоданным, мы получили кривую блеска Крабовидной туманности с подавленным вкладом пульсара в диапазоне энергий 100–300 МэВ с августа 2008 по март 2020 г. С помощью метода дисперсионного анализа мы обнаружили указание на периодичность вспышек в туманности с периодом 49 недель. Статистическая значимость сигнала составила 0.02 (2.1σ) , если учитывать только наибольший пик в периодограмме, и 0.003 (2.7σ) , если учитывать два пика — наибольший и пик на удвоенном периоде (98 недель), которые могут вызываться одним и тем же сигналом. Если найденная нами периодичность реальна, то новых периодов повышенной активности туманности следует ждать в августе 2021 и 2022 гг.

Ключевые слова: Крабовидная туманность, туманности пульсарного ветра, гамма-астрономия.

DOI: 10.31857/S0320010821020042

ВВЕДЕНИЕ

Крабовидная туманность и пульсар в ней являются одними из наиболее изучаемых объектов во всей астрофизике. Наблюдение процессов, протекающих в них, помогает изучить два таких важных класса астрофизических источников, как пульсары и туманности пульсарного ветра. Особенно это важно во втором случае, когда можно утверждать, что без наблюдений Крабовидной туманности наши знания о туманностях пульсарного ветра были бы во много раз меньше.

Суммарное излучение пульсара и туманности долгое время считалось постоянным с высокой степенью точности и даже выступало в качестве эталонного источника и единицы измерений в области высоких энергий (рентген и гамма). Это предположение естественным образом вытекало из значительной пространственной протяженности туманности и подтверждалось данными наблюдений.

Однако наблюдения с помощью новых, более чувствительных инструментов показали, что поток от туманности не является постоянным. Вопервых, в наблюдениях в диапазоне 15-50 кэВ детекторами Fermi/GBM, Swift/BAT, RXTE/PCA и INTEGRAL/IBIS было обнаружено падение потока на уровне 7% за два года (2008-2010) (Вилсон-Ходж и др., 2011). Во-вторых, еще более непредвиденным стало открытие телескопами AGILE и Fermi/LAT мощных вспышек в гамма-диапазоне (100-500 МэВ) (Тавани и др., 2011; Абдо и др., 2011). Во время самой яркой из детектированных на данный момент вспышек, которая произошла в апреле 2011 г., и продолжительность которой составила 9 дней, пиковый поток от туманности на энергиях выше 100 МэВ вырос в 30 раз по сравнению со средним (Бюлер и др., 2012).

В предыдущей работе (Пширков и др., 2020) мы детально исследовали переменность потока от туманности в промежуток времени с августа 2008 по март 2019 г. Кроме мощных известных вспышек, мы обнаружили продолжительные

^{*}Электронный адрес: pshirkov@sai.msu.ru



Рис. 1. Спектры пульсара и двух компонент пульсарной туманности по данным каталога 4FGL: штрихпунктирная линия — спектр пульсара, штриховая линия — спектр синхротронной компоненты туманности, пунктирная линия — спектр обратной комптоновской компоненты туманности, сплошная линия — суммарный спектр всех компонент.

уменьшения уровня потока и редкие быстрые на временном масштабе одной-двух недель падения потока до уровня, совместного с отсутствием излучения. Также были обнаружены указания на присутствие (квази)периодической компоненты в кривой блеска — в периодограмме Ломба—Скаргла (Ломб, 1976; Скаргл, 1982) наблюдался пик на частоте, соответствующей периоду 95 нед. В данной работе мы осуществили тщательное исследование этого вопроса. В последующих разделах описаны использованные данные, метод поиска периодичности и оценки статистической значимости обнаруженного сигнала, а также краткое обсуждение полученных результатов.

НАБЛЮДЕНИЯ

Мы расширили наблюдательный материал, который использовался в предыдущей статье (Пширков и др., 2020), добавив еще один год наблюдений. Были использованы наблюдения космической гамма-обсерватории Fermi-LAT с 4 августа 2008 по 17 марта 2020 г. Для анализа мы выбрали фотоны класса SOURCE с направлениями прихода в радиусе 15 градусов от пульсарной туманности ($\alpha_{J2000} = 83^{\circ}6331, \delta_{J2000} = 22^{\circ}0145$) в диапазоне энергий 100–300 МэВ. Из рассмотрения были исключены фотоны, у которых направление прихода имеет зенитный угол более 90°.

В последней, четвертой версии каталога FGL, построенного по восьми годам наблюдений Fermi-LAT, гамма-излучение Крабовидной туманности описывается суммой трех компонент. Одна из них относится к излучению пульсара, а две другие (синхротронная и обратная комптоновская) к пульсарной туманности. Несмотря на то что



Рис. 2. Нормированное распределение потоков пульсара и туманности, свернутых с периодом вращения пульсара. Максимум распределения приходится на фазу 0.915. Вертикальные штриховые линии на фазах 0.45 и 0.8 выделяют интервал, из которого брались фотоны для анализа излучения туманности.

компонента, соответствующая обратному комптоновскому рассеянию, выделяется как протяженный источник размером 0.06°, пространственного разрешения телескопа недостаточно, чтобы разделить пульсар и синхротронную компоненту туманности. Однако все три компоненты имеют разную форму спектра, что позволяет уверенно их разделять. На рис. 1 показаны спектры этих компонент в диапазоне 100-1000 МэВ. Видно, что в интересующем нас диапазоне энергий 100-300 МэВ пульсар гораздо ярче туманности (их потоки в этом диапазоне соответственно 1.58×10^{-6} и $0.58 \times$ $\times 10^{-6}$ фотон см⁻²с⁻¹), и вклад излучения от него необходимо максимально подавить. Как известно, излучение пульсара зависит от его фазы: оно намного сильнее во время импульса и несколько менее яркого интер-импульса и слабее в остальное время. Чтобы из всех фотонов от пульсара и туманности выделить те, которые пришли вне импульсов пульсара, мы использовали эфемериды, которые строятся на основе радионаблюдений в обсерватории "Джодрелл Бэнк" (Лайн и др., 1993). Это позволяет каждому гамма-фотону приписать фазу в зависимости от времени его регистрации. После этого мы исключили все фотоны, фаза которых соответствует импульсу либо интеримпульсу. Считая, что максимум яркости пульсара приходится на фазу 0.915, использовались фотоны с фазами от 0.45 до 0.8. На рис. 2 изображен фазовый профиль излучения пульсара и туманности, а вертикальными линиями выделен интервал фаз, использованный в работе. Далее отсчеты детектора были реконструированы с использованием инструментальной функции P8R3 методом максимального правдоподобия в стандартном программном пакете Fermitools. Модели источников взяты из



Рис. 3. Кривые блеска пульсара (вверху) и пульсарной туманности (внизу) в диапазоне 100–300 МэВ с временным разрешением 1 неделя. Вертикальными линиями отмечены эпохи активности, найденные из анализа периодичности. Тонкими линиями показаны фрагменты данных, которые не использовались в анализе, а использовались для проверки предсказания (см. раздел "Результаты и обсуждение").

каталога 4FGL (Абдоллахи и др., 2020). В качестве моделей для галактического и изотропного фона выбраны соответственно модели gll_iem_v07.fits и iso_P8R3_SOURCE_V2_v1.txt¹. Излучение пульсарной туманности мы описали степенным законом, параметры которого подбирались из наблюдений. Также из наблюдений определялись нормировки галактического и изотропного фона, а все остальные параметры модели (в том числе описывающие все другие источники) были зафиксированы. Представленным способом мы построили кривую блеска пульсарной туманности с временным разрешением, равным одной неделе. Она показана на рис. З вместе с кривой блеска пульсара.

¹ http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/ access/lat/BackgroundModels.html

ПОИСК ПЕРИОДИЧНОСТИ

Задача поиска во временном ряду периодического компонента, в свою очередь, состоит из двух подзадач: 1) выбор оптимального метода собственно для поиска периодического сигнала; 2) оценка статистической значимости найденного периодического компонента. В последующих подразделах мы подробнее остановимся на каждой из этих подзадач.

Метод поиска периодичности

Разные методы поиска периодичности бывают более или менее чувствительны в зависимости от свойств сигнала. Если периодический сигнал "квазисинусоидальный", т.е. демонстрирует плавную переменность, то разумно применить периодограмму Ломба—Скаргла. В случае, когда периодичность связана с резкими и кратковременными всплесками (вспышками), чувствительность этого



Рис. 4. Периодограмма для пульсарной туманности, построенная методом дисперсионного анализа.

метода существенно снижается, и тогда выгоднее использовать, например, дисперсионный анализ (в английской литературе analysis of variance, AoV, ANOVA).

Кроме того, периодический сигнал может присутствовать в данных как на протяжении всего времени наблюдений, так и, вообще говоря, в течение меньшего интервала времени. В первом случае оптимальным будет глобальный поиск сигнала, как, например, в периодограмме Ломба—Скаргла, во втором же следует воспользоваться методом, дающим не только спектральную, но и временну́ю информацию о сигнале, например, оконным преобразованием Фурье или вейвлет-преобразованием, в этом случае неизбежны потери в частотном разрешении.

Очевидно, что заранее свойства периодического сигнала, если он вообще существует, неизвестны, поэтому необходимо осуществить его поиск разными методами. Мы применили к нашим данным три метода поиска периодичности: периодограмму Ломба-Скаргла, взвешенное вейвлетное Zпреобразование (Фостер, 1996) и дисперсионный анализ. Первые два метода не выявили скольконибудь значимого сигнала ни за все время наблюдений, ни в каком-то его промежутке, поэтому в дальнейшем речь будет идти только о методе дисперсионного анализа.

Данный метод в приложении к астрономическим наблюдениям описан в работе (Шварценберг-Черны, 1989). Пусть имеется ряд из n наблюдений x_i , каждому из которых приписан момент времени t_i , а их среднее значение равно \bar{x} . Для некоторого пробного периода P определим фазу каждого наблюдения как остаток от деления t_i на P. Разобьем фазы на r бинов. Пусть в i-й бин попало n_i наблюдений, их среднее \bar{x}_i . Пусть также $x_{ij} - j$ -е наблюдение в i-м бине. Определим величины s_1^2, s_2^2 следующим образом:

$$s_1^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2, \qquad (1)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n-r} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2.$$
 (2)

Как видно из определений, s_1^2 показывает, насколько среднее по отдельным бинам отличается от глобального среднего, а s_2^2 характеризует дисперсию данных. Если пробный период Р далек от периода реального сигнала (если он существует), то измерения, попавшие в один бин, будут иметь случайные значения, а их среднее будет мало отличаться от среднего по всем наблюдениям. Если же Р близко к периоду присутствующего в данных сигнала, то измерения с близкими фазами будут иметь близкие значения, а значит, средние значения в бинах будут сильнее отличаться от глобального среднего. Поэтому величина $\Theta_{
m AoV} = s_1^2/s_2^2$, вычисляемая для каждого пробного периода, показывает, какие из них могут соответствовать реальному периодическому сигналу в данных.

Важной особенностью метода является его способность детектировать периодические процессы как с плавной переменностью, так и с резкими всплесками, в нашем случае вспышками гаммаизлучения. В этой работе мы использовали метод дисперсионного анализа, реализованный в программном пакете vartools (Хартман, Бакос, 2016; Девор, 2005). На рис. 4 показана периодограмма кривой блеска пульсарной туманности в пределах от 30 до 300 нед. Видны несколько выраженных пиков, расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга. Самым статистически значимым (об оценке значимости см. ниже) оказывается первый из этих пиков, соответствующий периоду 49 нед.

В оригинальной работе (Шварценберг-Черны, 1989) показано, что распределение величины Θ_{AoV} можно записать аналитически, но это возможно только в том случае, когда данные представляют собой сумму периодического сигнала и белого шума. Как будет показано ниже, наш ряд данных имеет спектр мощности, отличный от спектра белого шума. Это означает, что у нас нет аналитической оценки статистической значимости получаемых значений Θ_{AoV} . Мы применили другой способ оценки статистической значимости, который описан в следующем подразделе.

Оценка статистической значимости

Для оценки статистической значимости периодограмм, получаемых разными методами, если



Рис. 5. Спектр мощности для кривой блеска пульсарной туманности. Сплошная линия построена методом, описанным в работе Пападакиса, Лоуренса (1993).

аналитические формулы недоступны, обычно используется метод Монте-Карло. В данной работе мы также применили этот метод. Для этого мы сгенерировали 10⁵ кривых блеска, следуя методу, изложенному в статье Эмманулопулос и др. (2013). Он заключается в том, чтобы строить такие кривые блеска, у которых, во-первых, будет такая же спектральная плотность мощности, как у наблюдаемого ряда данных, и, во-вторых, такое же распределение амплитуд потоков. Выполнение двух этих условий позволяет говорить, что симулированные ряды данных статистически идентичны наблюдаемому в том смысле, что применение к ним метода дисперсионного анализа (или другого метода поиска периодичности) дает эмпирическую статистику для величин Θ_{AoV} . Спектр мощности для кривой блеска туманности показан на рис. 5. Для симуляции мы использовали код, написанный Коннолли (2015)².

Прежде всего определим некоторые понятия. Вероятность того, что значение периодограммы Θ_{AoV} на периоде P не меньше Θ_0 , мы называем локальным p-значением сигнала для указанного периода:

$$p_P^{\text{loc}} = \mathcal{P}\left(\Theta_{\text{AoV}}(P) \ge \Theta_0\right). \tag{3}$$

Вероятность того, что минимальное локальное *р*значение, достигаемое в случайной (симулированной) кривой блеска при переборе всех периодов, меньше или равно *p*, мы называем глобальной значимостью этого сигнала. Отметим, что все указанные вероятности имеют частотный (еще точнее эмпирический) смысл. Например, $\mathcal{P}(\Theta_{AoV}(P) \ge$ $\ge \Theta_0)$ — это просто доля симулированных кривых блеска, в которых значение статистики Θ_{AoV} для периода *P* не менее Θ_0 . Аналогично глобальная



Рис. 6. Распределение логарифма минимальных локальных *р*-значений периодических сигналов, достигаемых в симулированных данных. Доля симуляций, где это значение меньше, чем в наблюдаемых данных (т.е. правее вертикальной линии), равна глобальной значимости найденного сигнала.

значимость — это доля симуляций, где минимальное локальное p-значение сигнала меньше или равно p. Описанный способ определения глобальной статистической значимости при поиске периодичности применен в работе (Фрескура и др., 2008). На рис. 6 показано распределение логарифма минимальных локальных p-значений (с обратным знаком), достигаемых в симулированных кривых блеска. Вертикальной линией обозначено локальное p-значение сигнала, достигаемое в наблюдаемой кривой блеска на периоде 49 нед. Глобальная значимость этого сигнала оказывается равной 0.02 (2.1 σ).

Как следует из рис. 4, за максимальным пиком в периодограмме следуют еще несколько равноотстоящих пиков. Когда сигнал состоит из узких равноотстоящих всплесков, периодограмма может выявлять не только период, равный наименьшему расстоянию между всплесками, но и кратные ему³. Поэтому, полагая, что равноотстоящие пики в периодограмме могут быть "гармониками" одного и того же периодического сигнала и давать вклад в его глобальную значимость, мы несколько модифицировали описанный выше метод, чтобы учесть одновременно значимость главного (максимального) пика и его возможной гармоники. Пусть минимальное локальное *p*-значение сигнала достигается на периоде P и равно p_1 . Пусть также локальное pзначение сигнала на периоде 2P равно p_2 . Теперь мы оцениваем глобальную значимость не по распределению минимальных локальных р-значений, а по распределению значений $p_1 \cdot p_2$, вычисленных для каждой симулированной кривой блеска, по следующему алгоритму: 1) в каждом симулированном ряду данных определяется период P_{max}, для

² https://github.com/samconnolly/DELightcurveSimulation

³ Условно назовем их "гармониками".



Рис. 7. Распределение величины $-\lg p_{P_{\text{max}}}^{\text{loc}} \cdot p_{2P_{\text{max}}}^{\text{loc}}$. Вертикальная линия соответствует значению этой величины для наблюдаемой кривой блеска.

которого локальное *p*-значение минимально (оно равно $p_{P_{\text{max}}}^{\text{loc}}$); 2) определяется локальное *p*-значение сигнала на удвоенном периоде $p_{2P_{\text{max}}}^{\text{loc}}$; 3) по всем симуляциям строится распределение величины $p_{P_{\text{max}}}^{\text{loc}}$. $\cdot p_{2P_{\text{max}}}^{\text{loc}}$ и по нему определяется глобальная значимость, достигаемая в периодограмме для пульсарной туманности. На рис. 7 показано распределение логарифма величины $p_{P_{\text{max}}}^{\text{loc}} \cdot p_{2P_{\text{max}}}^{\text{loc}}$ (с обратным зна-ком), а вертикальной линией обозначено значение, достигаемое в наблюдаемых данных. Его глобальная значимость оказалась на уровне 0.003 (2.7 σ).

Отметим, что найденный сигнал связан именно с пульсарной туманностью, а не самим пульсаром. Мы проделали описанный анализ для кривой блеска пульсара и не обнаружили значимого периодического сигнала; это неудивительно, поскольку пульсар не демонстрирует вспышек, а статистическая значимость оценивалась нами по симулированным кривым блеска, содержащим вспышки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Наш анализ позволяет заподозрить некоторую периодичность в излучении туманности, причем эта периодичность связана со вспышками. На рис. 3 мы вертикальными линиями обозначили эпохи, разделенные найденным периодом 49 недель. Видно, что в некоторые из этих эпох действительно наблюдалось увеличение яркости туманности. Более того, если из данных исключить промежутки с мощными вспышками, то значимость найденного сигнала сильно уменьшится. Отметим, что некоторые из найденных ранее вспышек Крабовидной туманности (в апреле 2011 г., марте 2013 г., июне 2009 г.; см. Аракава и др., 2020) как раз попадают на периоды активности, отмеченные на рис. 3. Кроме того, мы можем сделать предсказание о последующих таких периодах активности, а именно, в сентябре 2020 г., августе 2021 г. и августе 2022 г. Эфемериды пульсара на сентябрь 2020 г. появились, когда данная работа была отправлена в редакцию, поэтому эти данные не были использованы для анализа, но мы привели их на рис. З тонкими линиями для проверки предсказания. На эпоху повышенной активности не приходится какой-либо значительной вспышки, хотя через четыре недели имело место умеренное повышение потока. Однако, как видно из рис. З, и в прошлом не всегда в эпоху повышенной активности случались мощные вспышки, поэтому для проверки гипотезы о периодичности следует дождаться нескольких следующих предсказанных эпох повышенной активности.

Обнаруженная периодичность в кривой блеска туманности может вызываться осцилляциями стоячей ударной волны пульсарного ветра, где происходит ускорение основной доли частиц, являющихся источником наблюдаемого синхротронного гамма-излучения. Такая интерпретация переменности была предложена в работах по численному моделированию излучения Крабовидной туманности (Камю и др., 2009; Порт и др., 2014), где в ходе двух- и трехмерных симуляций наблюдались квазипериодические изменения кривой блеска с квазипериодом P = 1.5-3 г. Величина этого квазипериода определяется поперечником области ударной волны, который примерно равен световому году (Камю и др., 2009).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведен поиск периодичности в излучении Крабовидной туманности в диапазоне энергий 100—300 МэВ за промежуток времени с августа 2008 по март 2020 г. С помощью метода дисперсионного анализа мы нашли указания на переменность с периодом ~49 недель. Статистическая значимость обнаруженной периодичности была оценена с помощью Монте-Карло симуляций — на основании 10^5 реализаций кривой блеска *р*-значение сигнала было найдено равным 3×10^{-3} . Если обнаруженная периодичность является реальной, то новые фазы активности ожидаются в августе 2021 и 2022 гг.

Поддержано Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта "Наука" (грант 075-15-2020-778). Авторы благодарят за поддержку Фонд развития теоретической физики и математики "БАЗИС". Обработка данных была выполнена на вычислительном кластере Отдела теоретической физики ИЯИ РАН.
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдо и др. (А. Abdo, М. Ackermann, М. Ajello, A. Allafort, L. Baldini, J. Ballet, et al.), Science 331 (6018), 739 (2011).
- Абдоллахи и др. (S. Abdollahi, F. Acero, M. Ackermann, M. Ajello, W. Atwood, M. Axelsson, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. 247 (1), 33 (2020).
- Бюлер и др. (R. Buehler, J. Scargle, R. Blandford, L. Baldini, M. Baring, A. Belfiore, et al.), Astrophys. J. 749 (1), 26 (2012).
- 4. Вилсон-Ходж и др. (С. Wilson-Hodge, M. Cherry, G. Case, W. Baumgartner, E. Beklen, P. Narayana Bhat, et al.), Astrophys. J. Lett. **727** (2), L40 (2011).
- 5. Девор (J. Devor), Astrophys. J. 628 (1), 411 (2005).
- 6. Камю и др. (N. Camus, S. Komissarov, N. Bucciantini, and P. Hughes), MNRAS **400** (3), 1241 (2009).
- 7. Коннолли (S. Connolly) (2015).
- 8. Лайн и др. (A. Lyne, R. Pritchard, and F. Graham Smith), MNRAS **265**, 1003 (1993).

- 9. Ломб (N. Lomb), Astrophys. Sp. Sci. **39** (2), 447 (1976).
- 10. Порт и др. (О. Porth, S. Komissarov, and R. Keppens), MNRAS **438** (1), 278 (2014).
- 11. Пширков и др. (M. Pshirkov, B. Nizamov, A. Bykov, and Y. Uvarov), MNRAS **496** (4), 5227 (2020).
- 12. Скаргл (J. Scargle), Astrophys. J. 263, 835 (1982).
- 13. Тавани и др. (M. Tavani, A. Bulgarelli, V. Vittorini, A. Pellizzoni, E. Striani, P. Caraveo, et al.), Science **331** (6018), 736 (2011).
- 14. Фостер (G. Foster), Astron. J. 112, 1709 (1996).
- 15. Фрескура и др. (F. Frescura, C. Engelbrecht, and B. Frank), MNRAS **388** (4), 1693 (2008).
- 16. Хартман, Бакос (J. Hartman and G. Bakos), Astronomy and Computing **17**, 1 (2016).
- 17. Шварценберг-Черны (A. Schwarzenberg-Czerny), MNRAS **241**, 153 (1989).
- Эмманулопулос и др. (D. Emmanoulopoulos, I. McHardy, and I. Papadakis), MNRAS 433 (2), 907 (2013).

СЛЕЖЕНИЕ ЗА ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫМИ НЕЙТРИНО НА БАЙКАЛЬСКОМ НЕЙТРИННОМ ТЕЛЕСКОПЕ BAIKAL-GVD

© 2021 г. А. В. Аврорин¹, А. Д. Аврорин¹, В. М. Айнутдинов¹, П. Банах², З. Бардачова³, И. А. Белолаптиков⁴, В. Б. Бруданин⁴, Н. М. Буднев⁵, А. Р. Гафаров⁵, К. В. Голубков¹, Н. С. Горшков⁴, Т. И. Гресь⁵, Р. Дворницкий⁴, В. Я. Дик⁴, Ж.-А. М. Джилкибаев^{1*}, Г. В. Домогацкий¹, А. А. Дорошенко¹, А. Н. Дьячок⁵, Е. Еркелова³, Т. В. Елжов⁴, Д. Н. Заборов¹, Р. А. Иванов⁴, М. С. Катулин⁴, К. Г. Кебкал², О. Г. Кебкал², В. А. Кожин⁶, М. М. Колбин⁴, К. В. Конищев⁴, К. А. Копанский⁷, А. В. Коробченко⁴, А. П. Кошечкин¹, М. В. Круглов⁴, М. К. Крюков¹, В. Ф. Кулепов⁸, М. В. Миленин⁴, Р. Р. Миргазов⁵, В. Назари⁴, Д. В. Наумов⁴, В. Нога⁷, Д. П. Петухов¹, Е. Н. Плисковский⁴, М. И. Розанов⁹, В. Д. Рушай⁴, Е. В. Рябов⁵, Г. Б. Сафронов¹, Ф. Симкович^{4,3}, А. В. Скурихин⁶, А. Г. Соловьев⁴, М. Н. Сороковиков⁴, И. Стекл¹⁰, О. В. Суворова^{1**}, Е. О. Сушенок⁴, Б. А. Таболенко⁵, Б. А. Таращанский⁵, Л. Файт¹⁰, С. В. Фиалковский⁸, Е. В. Храмов⁴, Б. А. Шайбонов⁴, М. Д. Шелепов¹, Ю. В. Яблокова⁴, С. А. Яковлев²

¹Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия ²EvoLogics GmbH, Берлин, Германия

³Comenius University, Братислава, Словакия

⁴Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

⁵Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

⁶Институт ядерной физики им. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁷The Institute of Nuclear Physics of the Polish Academy of Sciences (IFJ PAN) in Kraków, Краков, Польша

⁸Нижегородский государственный технический университет, Нижний Новгород, Россия

⁹Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург,

Россия

¹⁰Czech Technical University in Prague, Прага, Чешская Республика

Поступила в редакцию 20.11.2020 г.

После доработки 26.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Глубоководный нейтринный эксперимент Baikal-GVD участвует в международной программе мультимессенджер по обнаружению астрофизических источников космических частиц высоких и сверхвысоких энергий, находясь на стадии развертывания установки и поэтапного увеличения эффективного объема телескопа до масштаба кубического километра. В настоящее время телескоп состоит из семи кластеров, содержащих 2016 фотодетекторов. Эффективный объем детектора достиг 0.35 км³ в задаче выделения ливневых событий от взаимодействия нейтрино в байкальской воде. С 2015 г. набор экспериментальных данных ведется в режиме постоянной экспозиции, что позволяет реализовать оперативный анализ данных и программу мониторинга небесной сферы в реальном времени. В статье обсуждается структура системы сбора данных, описана процедура восстановления физических событий в режиме быстрого отклика на оповещение (алерт), и представлены результаты анализа девяти алерт событий полярного телескопа IceCube с начала сентября до конца октября 2020 г.

Ключевые слова: астрофизические нейтрино, оповещения, Байкал.

DOI: 10.31857/S0320010821020017

^{*}Электронный адрес: djilkib@yandex.ru

^{*}Электронный адрес: suvorova@inr.ru

ВВЕДЕНИЕ

За последние несколько лет астрономия и астрофизика получили значительное развитие благодаря результатам исследований в рамках международной программы многоканального (мультимессенджер) поиска источников космического излучения на разных длинах волн. Создана и расширяется роботизированная сеть телескопов с оптимизированной системой связи между ними, обеспечивающей быстрый обмен оповещениями о регистрации сигнала на одной из установок, и наблюдение за его источником на всех остальных. Сканирование одной и той же области небесной сферы на разных длинах волн: в электромагнитном излучении от радиоволн до гамма-излучения, в потоках частиц космических лучей и нейтрино, в гравитационных волнах, улавливаемых антеннамиинтерферометрами, — обеспечивает более полную информацию о природе и свойствах наблюдаемых источников.

Измерениям на нейтринных телескопах с объемом порядка кубического километра доступны энергии нейтрино выше ста тераэлектронвольт (ТэВ). В этой области энергий присутствие нейтринной компоненты внеатмосферного происхождения впервые было обнаружено в экспериментах на нейтринном телескопе IceCube на Южном полюсе (Арстен и др., 2013а,б) и подтверждено его данными за семь лет наблюдений (Арстен и др., 2019). Кроме того, на это указывает и результат совместного анализа с данными глубоководного телескопа ANTARES в Средиземном море за десять лет измерений (Алберт и др., 2020). Однако астрофизические источники зарегистрированных высокоэнергичных нейтрино не идентифицированы. Возможное решение проблемы в настоящее время видится в формировании широкой сети оповещений о нейтринном событии для совместного анализа результатов разных детекторов. Нейтринный алерт ІС170922А с энергией выше 300 ТэВ, зарегистрированный телескопом IceCube в направлении блазара TXS 0506+05 в период его активности в 2017 г. (Арстен и др., 2018), мотивировал мультиволновые наблюдения данного астрофизического источника (Арстен и др., 2018) и большое число теоретических работ о механизмах генерации нейтринных потоков от таких объектов, как активные галактические ядра (из недавних работ см., например, статьи (Плавин и др., 2020а,б). Автоматическая система ТАТоО (Дорник и др., 2011), реализованная на телескопе ANTARES, формирует алертный триггер и реконструкцию направления траекторий мюонов в реальном времени с точностью до 0.5° от взаимодействия нейтрино с энергиями выше нескольких ТэВ. Коллаборация Baikal-GVD получает оповещения ANTARES с декабря 2018 г. Предварительный

результат совместного анализа был представлен в работе (Гаррэ и др., 2020). Автоматизированная сеть AMON (Смит и др., 2013) принимает информацию телескопа IceCube онлайн и при восстановлении мюонной траектории с оценкой энергии выше сотни ТэВ передает алерт в циркуляр оповещений астрономических событий GCN (сайт архива). В статье представлены результаты отслеживания алертов на Baikal-GVD по девяти событиям телескопа IceCube с начала осени 2020 г. Полученные ограничения на нейтринный поток в направлении алертов относятся к анализу данных кластеров Baikal-GVD как независимых детекторов нейтрино.

ГЛУБОКОВОДНЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП BAIKAL-GVD

Глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD создается в южной части оз. Байкал (Аврорин и др., 2020а). Географические координаты установки 51.77° северной широты и 104.415° восточной долготы. Телескоп имеет модульную структуру и состоит из кластеров. Каждый кластер представляет собой полнофункциональный детектор, оснащенный системами регистрации, формирования триггера, калибровки, позиционирования и сбора данных. В состав кластера входит 288 фотодетекторов (оптических модулей). предназначенных для регистрации черенковского излучения, генерированного продуктами взаимодействия нейтрино высоких энергий в воде: мюонами и каскадными ливнями. Светочувствительным элементом оптического модуля является фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R7081-100 с полусферическим фотокатодом диаметром 25 см. Оптические модули (ОМ) кластера размещены равномерно на восьми гирляндах в диапазоне глубин от 1275 до 750 м. Расстояние между гирляндами в кластере составляет 60 м, расстояние между центрами кластеров 300 м. Эффективный объем одного кластера в задаче регистрации каскадных ливней высокой энергии составляет около 0.05 км³.

Помимо системы регистрации черенковского излучения, кластер оснащен рядом вспомогательных систем, необходимых для калибровки измерительных каналов детектора и определения координат ОМ. Калибровка осуществляется при помощи светодиодных источников света, установленных в каждом оптическом модуле, и матриц светодиодов, размещенных на каждой гирлянде кластера (Аврорин и др., 2020б). Для определения координат ОМ используется акустическая система позиционирования. На каждой гирлянде размещены 4 акустических модема. Это обеспечивает точность восстановления координат оптических модулей, расположенных между модемами, на уровне 20 см (Аврорин и др., 2019а).

Основным структурным элементом системы сбора данных Baikal-GVD является секция OM, в состав которой входят 12 оптических модулей, до двух акустических модемов системы позиционирования и отдельный модуль сбора данных. В настоящее время на каждой гирлянде кластера Baikal-GVD размещаются по три секции. Триггерная логика модуля сбора данных секции анализирует амплитуды входных сигналов и, в случае коррелированного во времени превышения заданных порогов на двух соседних оптических модулях, формирует сигнал *запрос*. Сигналы *запрос* от всех секций поступают в центр сбора данных кластера, где формируется сигнал подтверждение (триггер кластера), который одновременно передается на все секции, обеспечивая синхронность их работы.

Сбор данных осуществляется под управлением трех независимых программных модулей, которые формируют три канала сбора информации. По первому каналу передаются результаты измерений сигнало-откликов ОМ: о форме, суммарном заряде и времени регистрации всех импульсов, которые были сформированы фотоэлектронными умножителями ОМ в интервале времени ±2.5 мкс по отношению ко времени поступления триггерного сигнала. Второй канал предназначен для передачи результатов измерений координат акустических модемов. На основании этих данных восстанавливаются координаты ОМ, которые используются в процессе реконструкции характеристик физических событий. Третий канал используется для передачи данных мониторинга параметров аппаратуры измерительных каналов, состояния и пространственной ориентации ОМ в горизонтальной плоскости и относительно вертикальной оси.

Для синхронизации кластеров друг с другом в центр сбора данных каждого кластера из Берегового центра по индивидуальным оптическим линиям (каналам синхронизации) передается общая тактовая частота, что обеспечивает синхронный ход часов кластеров (Голубков и др., 2019). Для определения временных сдвижек между ходом часов измеряются задержки прохождения сигналов по каналам синхронизации. Привязка к мировому времени осуществляется при помощи GPS.

Первый полномасштабный кластер Baikal-GVD был введен в эксплуатацию в 2016 г., после успешной работы демонстрационного кластера "Dubna", с числом модулей 192 в течение 2015 г. (Аврорин и др., 2015). В 2020 г. введены в эксплуатацию семь кластеров. В настоящее время байкальский глубоководный детектор представляет собой крупнейший нейтринный телескоп Северного полушария Земли.

Система сбора данных

Для первичной обработки, реконструкции событий и дальнейшего анализа данных Baikal-GVD разработано специализированное программное обеспечение BARS (Baikal Analysis and Reconstruction Software) (Шайбонов и др., 2017а). Оно состоит из двух программных пакетов. Первый из них — это набор С++ программ, написанный в единой программной среде на базе ROOT (Брюн, Радемейкерс, 1997) и выполняющий задачи обработки данных, зависящих друг от друга в том смысле, что выходные данные одной программы используются в качестве входных данных другими программами. Второй из них — это набор программ, написанный на Python на базе пакета luigi (сайт луиджи), который занимается запуском С++ программ в нужной последовательности и отслеживанием их исполнения. В течение осени 2020 г. Байкальский телескоп Baikal-GVD впервые вышел на режим онлайн анализа первичных данных. Обработка внешнего оповещения и формирование собственного оповещения о высокоэнергичном нейтрино осуществляются в результате реконструкции событий после завершения последовательной цепочки передачи данных от подводного телескопа на берег по оптоволоконному кабелю в г. Байкальск по радиоканалу (300 Мб/сек) и далее по каналу Internet в центр обработки и хранения данных ОИЯИ. На данный момент полностью реализован и эксплуатируется так называемый порановый режим обработки информации, когда старт обработки наступает при получении всех файлов сеанса набора данных. Длительность обработки сеанса и, соответственно, задержка формирования оповещения о событии с заданными характеристиками зависят от числа файлов в сеансе (который, в свою очередь, зависит от уровня фонового свечения озера) и, как правило, составляют 3-5 ч. Для того чтобы уменьшить задержку между реальным временем события и доступностью обработанных данных, разрабатывается так называемый пофайловый режим работы, когда обработка начинается сразу же, как только отдельный файл сеанса появится в основном хранилище данных. Как правило, временной интервал с момента формирования файла на Береговом центре и до появления его в хранилище данных составляет менее 1 мин. Обработка одного файла занимает несколько минут.

РЕКОНСТРУКЦИЯ СОБЫТИЙ

Эксперименты по регистрации нейтрино на глубоководных либо подледных нейтринных телескопах базируются на регистрации черенковского из-



Рис. 1. Распределение событий по углу между разыгранным направлением нейтрино со спектром E^{-2} и восстановленным направлением мюона, усредненное по изотропному распределению разыгранных направлений.

лучения вторичных мюонов и каскадов заряженных частиц, образующихся в результате взаимодействия нейтрино с веществом. Мюонная мода применима для регистрации мюонных нейтрино при взаимодействии нейтрино с веществом через заряженные токи. Каскадная мода применяется при взаимодействии электронных и тау нейтрино через заряженные токи и при взаимодействии всех трех типов нейтрино через нейтральные токи. Следует отметить, что в случае взаимодействия мюонных нейтрино в чувствительном объеме телескопа через заряженные токи также возникает адронный каскад, который регистрируется фотодетекторами установки.

Восстановление мюонных треков

Процедура восстановления траектории одиночного мюона была разработана и применялась ранее для обработки данных Байкальского нейтринного телескопа НТ-200 (Белолаптиков и др., 1997; Балканов и др., 1999). Аналогичная схема восстановления траекторий мюонов в случае одного кластера Baikal-GVD была реализована и встроена в общую программную среду BARS обработки и анализа данных Байкальского эксперимента. Предварительными этапами анализа экспериментальных данных байкальского нейтринного телескопа в задачах регистрации мюонов и ливней высоких энергий являются подавление фоновых импульсов и выделение импульсов оптических модулей, инициированных мюонами и ливнями. Частота срабатывания фотоэлектронного умножителя (ФЭУ)



Рис. 2. Распределение событий по углу между разыгранным и восстановленным направлениями ливней, усредненное по изотропному распределению разыгранных направлений. Вертикальная линия на рисунке указывает на значение медианного угла распределения, равного 4.5°.

от естественного свечения байкальской воды зависит от глубины и времени года и составляет 20— 50 кГц на нижних и средних секциях телескопа. На верхних секциях в летние месяцы темп счета может достигать 100 кГц. Критерии предварительного отбора импульсов, используемых для восстановления траекторий мюонов, базируются на характеристиках фотодетекторов, и в первую очередь на их угловой чувствительности и расположении в пространственной решетке всех оптических модулей. Процедура отбора импульсов снижает вклад фоновых срабатываний до 1%.

Траектория мюона описывается пятью параметрами: координаты точки пересечения мюона с плоскостью, проходящей через геометрический центр кластера перпендикулярно траектории мюона, зенитный и азимутальный углы и время прохождения мюоном заданной точки в пространстве. Алгоритм восстановления траектории мюона заключается в минимизациии функционала Q(t, r, q) = $=\chi^2(t)+w\cdot f(q,r)$, где $\chi^2(t)=\Sigma(t_{
m exp}-t_{
m th})^2/\sigma^2,$ $t_{\rm exp}$ — измеренное время импульса в оптическом модуле, t_{th} — ожидаемое время от данного трека в предположении прямого черенковского света от мюона, σ — точность измерения времени, f(q, r) сумма произведений заряда, зарегистрированного в оптическом модуле, и расстояния от оптического модуля до трека, а величина w — относительный вклад ("вес") этого слагаемого, пропорциональный величине заряда.

Основным источником фона при выделении нейтрино снизу являются события от атмосферных мюонов, реконструированные как события снизу.



Рис. 3. Суточные траектории фиксированных экваториальных направлений девяти алертов в горизонтальных координатах телескопа Baikal-GVD.

Для выделения событий от нейтрино и подавления фоновых событий от мюонов был разработан набор критериев на оценку качества восстановления трека. Ограничение сверху на величину функционала Q(t, r, q), приведенную на число свободных параметров, является одним из наиболее эффективных условий для отбора нейтрино, как представлено на рис. З в работе (Заборов и др., 2020). Другими важными параметрами в отборе событий снизу являются ограничения на значения вероятностей сработавшим каналам кластера сработать и несработавшим каналам не сработать. Кроме того, для обеспечения достаточной длины трека в одном кластере отбирались события с зенитными углами $\Theta_{\text{zenith}} > 120^{\circ}$. Медианное угловое разрешение для треков, прошедших отбор, составляет 1.27°, как видно на рис. 1, в распределении углов разлета между направлениями нейтрино, симулированными методом Монте-Карло с энергетическим спектром E^{-2} , и восстановленными траекториями мюона. Алгоритм восстановления треков и отбор нейтринных событий на Baikal-GVD представлены в работах (Заборов и др., 2020, Сафронов и др., 2020). Следует отметить, что в задаче поиска нейтрино от локальных источников, ассоциированных с алертами от других установок, фоновые ограничения существенно мягче, что позволяет вести наблюдения в области горизонта.

Выделение ливней высоких энергий

Поиск нейтрино высоких энергий астрофизической природы по каскадной моде предполагает выделение и восстановление параметров вторичных ливней высоких энергий, возникающих при взаимодействии нейтрино с веществом в чувствительном объеме телескопа. Подавление фоновых импульсов от собственного свечения среды в данной задаче достигается в значительной степени за счет повышения допустимого значения заряда импульсов электронных фотоумножителей, используемых в анализе данных. Благодарая тому, что уровень собственного свечения водной среды составляет порядка одного фотоэлектрона (ф.э.), пороговое значение в 1.5 ф.э. позволяет подавить число фоновых импульсов до уровня 1-2%. Восстановление координат, энергии и ориентации ливней, регистрируемых телескопом Baikal-GVD, проводится в два этапа (Аврорин и др., 2009, Шайбонов и др., 2017б). На первом этапе восстанавливаются координаты ливня. Процедура восстановления заключается в минимизации функционала χ_t^2 с использованием временной информации сработавших каналов телескопа. На втором этапе проводится восстановление энергии и направления оси ливня, используя амплитудную информацию от ОМ и характерное угловое распределение черенковского поля фотонов каскада, методом наибольшего правдоподобия с использованием восстановленных на первом этапе координат ливня. В ка-



Рис. 4. Частота мультикластерных событий в сутки. По оси абсцисс — число кластеров в совпадении событий во временном окне, соответствующем расстоянию между кластерами.

честве полярного и азимутального углов, характеризующих направление развития ливня, и энергии ливня выбираются значения переменных θ , ϕ и $E_{\rm sh}$, соответствующие максимальному значению функционала оптимизации. Распределение событий по углу ψ между разыгранным и восстановленным направлениями ливней для одного кластера Baikal-GVD приводится на рис. 2. Медианный угол этого распределения равен 4.5°. Точность восстановления энергии ливня для одного кластера составляет 26-30% в зависимости от энергии ливня и числа сработавших оптических модулей в событии. Дальнейшее повышение качества процедур выделения ливневых событий и восстановления параметров ливней достигается за счет применения дополнительных ограничений на значения специальных параметров, характеризующих событие.

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ОПОВЕЩЕНИЯ

Алерты осенней серии измерений на телескопе IceCube

За сентябрь—октябрь 2020 г. число оповещений о регистрации высокоэнергичных нейтрино телескопом IceCube на Южном полюсе оказалось рекордным по частоте в месяц за все время наблюдений: шесть событий в сентябре, три в октябре. Источники алертов зарегистрированы в Северной небесной полусфере. Алертные события трековые, с направлением снизу вверх для IceCube, с хорошей точностью восстановления направления мюона: около 0.5° (категория "gold") и до 2.5° ("bronze") (Блоуфас и др., 2019). Оценка энергии этих событий приводится в табл. 1, все они выше 100 ТэВ и два значения - выше 600 ТэВ. Нейтринные алерты являются хорошими кандидатами на астрофизические события, при том что вероятность их внеатмосферного происхождения около 50% для категории "gold" и ~30% для "bronze" (Блоуфас и др., 2019). Потоки нейтрино от источников северного неба на Baikal-GVD наблюдаются в большинстве случаев как нисходящие. Соответственно, в направлении алертов от IceCube на Baikal-GVD восстановление ливневых событий эффективнее трековых, но фон в обоих случаях зависит от временного окна относительно оповещения.

В настоящее время информация об алертах телескопа IceCube считывается по сообщениям циркуляра GCN (сайт архива). Суточные траектории наблюдения алертов в горизонтальных координатах Baikal-GVD показаны на рис. 3, где фиксированные координаты алертов обозначены цветными символами "прямой крестик". Как видно, для телескопа Baikal-GVD шесть событий находятся в верхней полусфере, три — в нижней. Однако алерты IC200921A, IC200926A и IC20107A расположены недостаточно низко под горизонтом, чтобы в трековой моде реконструкции выделить вокруг



Рис. 5. Суточные траектории алертов IC200916А, IC201014А, IC201021А (обозначение цветом и "крестиком" в рамке легенды) в горизонтальных координатах телескопа Baikal-GVD. Звездочкой показано положение восстановленного ливневого события (красным цветом). Подробнее в тексте.

них восстановленные траектории по критериями качества нейтринных событий на Baikal-GVD (см. предыдущий раздел). Критерии отбора окологоризонтных нейтрино по мюонным траекториям в настоящее время на стадии исследования как на отдельном кластере, так и в мультикластерных событиях. Пример распределения событий на разных кластерах по кратности совпадения времен показан на рис. 4. Предварительный анализ восстановленных треков во временных совпадениях кластеров не выявил их общих событий.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном разделе обсуждаются результаты поиска нейтрино, ассоциированных с девятью оповещениями IceCube, основанные на выделении и анализе каскадных событий. Среди рассматриваемых алертов триплет IC200916А, IC201014А и IC201021А выделяется тем, что есть совпадение значений их склонений с точностью до десятых долей градуса. Соответственно, суточные траектории их наблюдения в горизонтальных координатах одинаковы, что видно на общем графике траекторий на рис. 3. На рис. 5 представлена траектория для этих событий IceCube вместе с координатами ливневого события (светло-синий крестик), зарегистрированного на Baikal-GVD через 4.96 часа после алерта IC201014А на угловом расстоянии менее пяти градусов от направления на положение алерта на небесной сфере. Восстановленные координаты этого события в экваториальной системе: 221° (восхождение) и 14.8° (склонение). В событии восемь сработавших модулей, а его восстановленная энергия составляет 5 ТэВ. Вероятность появления такого события в конусе углового разрешения оценивается на уровне фона от атмосферных мюонов.

В поиске событий на совпадение с алертами ІС по каскадной моде из соответствующих наборов экспериментальных данных отбирались события, удовлетворяющие критериям отбора ливней с множественностью сработавших оптических модулей $N_{\rm hit} > 7$, проводилась реконструкция направления и энергии ливней, и определялся угол ψ между направлением на положение источника нейтрино на небесной сфере и направлением на возможный источник выделенного каскада. В качестве событий, ассоциированных с соответствующим алертом IC, выбирались каскады со значением $\psi < 5^{\circ}$. В результате анализа наборов данных для девяти ІС алертов (см. табл. 1) были выделены три каскадных события для алертов ІС200926В, ІС200929А и IC201014A во временных интервалах ± 12 ч, и не было выявлено событий во временных интервалах ±1 ч. Основным источником фоновых событий в данном анализе являются группы атмосферных мюонов и каскады, генерируемые атмосферными

Алерт	Событие GCN	Тип	Энергия, ТэВ	Высота, градусы	$N_{obs} \pm 12$ ч	N_{bg} в сутки	Уровень значи- мости	Предел $E^2 \cdot F(E)$, ТэВ см ^{-2}
IC200911A	28411	Bronze	110.79	23.2	_	0.33	_	1.43×10^{-3}
IC200916A	28433	Bronze	110.48	30.3	_	0.29	_	1.12×10^{-3}
IC200921A	28468	Bronze	117.17	-10.6	_	0.36	_	1.13×10^{-3}
IC200926A	28504	Gold	670.50	-28.2	_	0.19	_	1.14×10^{-3}
IC200926B	28509	Bronze	121.42	22.3	1	0.39	0.32	2.5×10^{-3}
IC200929A	28532	Gold	182.89	41.1	1	0.35	0.29	2.5×10^{-3}
IC201007A	28575	Gold	682.65	-32.5	—	0.25	_	1.12×10^{-3}
IC201014A	28616	Bronze	146.93	29.5	1	0.44	0.36	2.44×10^{-3}
IC201021A	28715	Bronze	105.27	47.1	—	0.37	_	1.37×10^{-3}

Таблица 1. Верхние пределы на 90% д.у. на потоки нейтрино $E^2 \cdot F(E)$ [ТэВ см⁻²] в направлениии прихода алертов для спектра в источнике E^{-2}

мюонами высоких энергий. Ожидаемое число фоновых событий $N_{\rm bg}$ в конусе 5° для каждого алерта определялось по полному набору данных Baikal-GVD за 2019 г. (апрель 2019 г. — февраль 2020 г.), соответствующему 1495.19 дням эффективного набора данных одним кластером телескопа. Вероятность принадлежности к фону трех зарегистрированных событий для IC200926B, IC200929A и IC201014A составляет, соответственно, 0.32 (0.99 σ), 0.29 (1.11 σ) и 0.36 (0.85 σ). Таким образом, в данных Baikal-GVD не выявлено статистически значимого превышения числа зарегистрированных каскадных событий, ассоциированных с алертами IC, над ожидаемым числом фоновых событий.

На рис. 6 в качестве иллюстрации представлено распределение 113 выделенных ливневых событий во временном интервале ± 12 ч около события IC200929A. Распределение этих событий по углу представлено на рис. 7. Для данного алерта выделено одно ливневое событие со значением $\psi < 5^{\circ}$. На рис. 8 приводятся траектория источника IC200929A в локальных координатах телескопа, и координаты зарегистрированных ливней в интервале ± 12 ч.

В отсутствие статистически значимого превышения числа зарегистрированных событий над ожидаемым фоном, для каждого из IC алертов можно установить ограничение на число ожидаемых событий. Согласно (Фелдман, Кузинс, 1998), при нулевом числе измеренных событий в

конусе на источник, предельное значение числа ожидаемых событий на 90% доверительном уровне (д.у.) составляет $n_{90\%} = 2.44$, а в случае алертов IC200926B, IC200929A и IC201014A, когда было зарегистрировано по одному событию, $n_{90\%} =$ = 4.36. На рис. 9 представлена зависимость от косинуса зенитного угла эффективных площадей регистрации изотропных потоков нейтрино трех ароматов в окрестности Земли, усредненных по спектру E^{-2} в диапазоне энергий 1 ТэВ-10 ПэВ, с учетом ослабления потоков нейтрино в Земле. Методика вычисления эффективной площади телескопа Baikal-GVD для ливневых событий от нейтрино и функциональные зависимости от энергии нейтрино и направления его прихода на установку подробно описаны в работах (Аврорин и др., 2009; Шайбонов и др., 20176; Дворницкий и др., 2019). Используя значения $n_{90\%}$ и эффективные площади регистрации нейтрино, были получены ограничения на 90% доверительном уровне на зависящий от энергии поток нейтрино одного типа F(E) в единицах измерения [Тэ B^{-1} см $^{-2}$] со спектром E^{-2} в предположении о равной доле типов нейтрино в полном потоке. Все полученные ограничения приведены в табл. 1 в направлении всех алертов.

В заключение отметим, что анализ данных телескопа Baikal-GVD впервые выполнен в режиме онлайн слежения за нейтринными алертами. Совпадений по направлению и времени регистра-



Рис. 6. Временное распределение событий для алерта IC200929А. Красным цветом отмечено положение каскада со значением $\psi < 5^{\circ}$.



Рис. 7. Распределение событий по углу ψ между направлениями прихода нейтрино и каскада для алерта IC200929А.

ции восстановленных событий на Baikal-GVD не выявлено, получены предельные значения потоков нейтрино в девяти направлениях источников Северной небесной полусферы. Выработка своих алертов в реальном времени является задачей на ближайшее время.

Поддержано Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта "Наука" (грант номер



Рис. 8. Траектория источника нейтрино для алерта IC200929A и координаты выделенных каскадов в интервале времени ±12 ч. Красный прямоугольник соответствует каскаду со значением угла $\psi < 5^{\circ}$.



Рис. 9. Эффективная площадь регистрации нейтрино, усредненная по спектру E^{-2} , для трех ароматов нейтрино.

075-15-2020-778). Эта работа была поддержана облачной вычислительной инфраструктурой ОИ-ЯИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аврорин А.В., Аврорин А.Д., Айнутдинов В.М., Баннаш Р., Бардачова З., Белолаптиков М.А., Бруданин В.Б., Буднев Н.М. и др., Ядерная физика 83, 511 (2020а).
- 2. Аврорин и др. (A.V. Avrorin, A.D. Avrorin, V.M. Ainutdinov, R. Bannasch, Z. Bardacova,

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 47 № 2 2021

I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, N.M. Budnev, et al. (Baikal-GVD Collab.)), Instr. Exper. Tech. **63**, 551 (20206).

- Аврорин и др. (A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, N.M. Budnev, N.S. Gorshkov, et al.), EPJ Web of Conf. 207 (20196).
- Аврорин и др. (A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, D.Yu. Bogorodsky, V.B. Brudanin, N.M. Budnev, et al.), PoS EPSHEP2015 418 (2015).

- 5. Аврорин и др. (A. Avrorin, V. Aynutdinov, V. Balkanov, I. Belolaptikov, D. Bogorodsky, N. Budnev, I. Danilchenko, G. Domogatsky, et al.), Astron. Lett. **35**, 651 (2009).
- Алберт и др. (ANTARES Collab.: A. Albert, M. Andre, M. Anghinolfi, G. Anton, M. Ardid, J.-J. Aubert, J. Aublin, B. Baret, et al., IceCube Collab.: M.G. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, C. Alispach, K. Andeen, et al.) Astrophys. J. 892, 92 (2020).
- 7. Арстен и др. (M.G. Aarsten, R. Abbasi, Y. Abdou, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, D. Altmann, et al., (IceCube Collab.)), Phys. Rev. Lett. **111**, 021103 (2013a).
- 8. Арстен и др. (M.G. Aarsten, R. Abbasi, Y. Abdou, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, D. Altmann, et al. (IceCube Collab.)), Science **342**, 1242856 (20136).
- 9. Арстен и др. (M.G. Aarsten, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, D. Altmann, K. Andeen, et al. (IceCube Collab.)), Eur. Phys. J. **C79**, 234 (2019).
- 10. Арстен и др. (M. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, I.A. Samarai, D. Altmann, et al. (IceCube Collab.)), Science **361**, 147 (2018a).
- 11. Арстен и др. (M. Aartsen, M. Ackermann, J. Adams, J.A. Aguilar, M. Ahlers, M. Ahrens, I.A. Samarai, D. Altmann, et al. (The IceCube, Fermi-LAT, MAGIC, AGILE, ASAS-SN, HAWC, H.E.S.S, INTEGRAL, Kanata, Kiso, Kapteyn, Liverpool telescope, Subaru, Swift/NuSTAR, VERITAS, VLA/17B-403 teams)), Science **361**, iss. 6398, 1378 (20186).
- 12. Балканов и др. (V. A. Balkanov, I. A. Belolaptikov, L. B. Bezrukov, N. M. Budnev, et al.), Astropart. Phys. 12, 75 (1999).
- Белолаптиков и др. (I.A. Belolaptikov, L.B. Bezrukov, B.A. Borisovets, N.M. Budnev, E.V. Bugaev, A.G. Chensky, I.A. Danilchenko, J.-A.M. Djilkibaev, et al.), Astropart. Phys. 7, 263 (1997).
- 14. Блоуфас и др. (E. Blaufuss, Th. Kintscher, L. Lu, Ch.F. Tung for IceCube Collab.), PoS(ICRC2019) 1021 (2019).
- 15. Брюн, Радемейкерс (R. Brun and F. Rademakers), Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **389**, 81 (1997).
- Гаррэ и др. (S.A. Garre, F. Versari, A.D. Avrorin, Zhan-Arys M. Dzhilkibaev, M.D. Shelepov, and O.V. Suvorova), https://indico.fnal.gov/event/ 19348/contributions/186451/ (2020).

- 17. Голубков и др. (K. Golubkov, L. Fajt, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, et al.), PoS(ICRC2019) 877 (2019).
- Дворницкий и др. (R. Dvornicky, Z.A.M. Dzhilkibaev, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, et al. (Baikal-GVD Collab.)), PoS ICRC2019 (2020) 873 (2019), arXiv:1908.05430 [astro-ph.HE], also in preparation to Astrophys. J.
- 19. Дорник и др. (D. Dornic, J. Brunner, S. Basa, I.A. Samarai, V. Bertin, M. Boer, J. Busto, S. Escoffier, et al., (ANTARES and TAROT Collab.)), Nucl. Instrum. Meth. A **S183**, 626 (2011).
- 20. Заборов и др. (D. Zaborov, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, Z. Bardacova, R. Bannasch, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin et al. (Baikal-GVD Collab.)), Proc. of ICPPA2020, arXiv:2011.09209 [astro-ph.HE] (2020).
- 21. Плавин А.В. и др. (A.V. Plavin, Y.Y. Kovalev, Y.A. Kovalev, and S.V. Troitsky), Astrophys. J. **894**, 101 (2020а).
- 22. Плавин А.В. и др. (A.V. Plavin, Y.Y. Kovalev, Y.A. Kovalev, and S.V. Troitsky), submitted to Astrophys. J. 2020, arXiv:2009.08914 [astro-ph.HE] (20206).
- 23. Сайт архива (GCN, Gamma-ray Coordination Network),

https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3archive.html.

- 24. Сайт луиджи (https://luigi.readthedocs.io).
- 25. Сафронов и др. (G. Safronov, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, Z. Bardacova, R. Bannasch, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin et al. (Baikal-GVD Collab.)), PoS(ICHEP2020) **606** (2020) and prepared to Astrophys. J. (2021).
- 26. Смит и др. (M.W.E. Smith, D.B. Fox, D.F. Cowena, P. Meszaros, G. Tesic, J. Fixelle, I. Bartos, P. Sommers et al.), Astron. Part. Phys. 45, 56 (2013).
- 27. Фелдмин, Кузинс (G. Feldman and R. Cousins), Phys. Rev. D 57, 3873 (1998).
- 28. Шайбонов и др. (B. Shaybonov, A.D. Avrorin, A.V. Avrorin, V.M. Aynutdinov, R. Bannash, I.A. Belolaptikov, V.B. Brudanin, N.M. Budnev, et al.), PoS(ICRC2017) **1046** (2017a).
- 29. Шайбонов и др. (B. Shaybonov, A.D. Avrorin, A.V. Avrovin, V. Aynutdinov, R. Bannash, I. Belolaptikov, V. Brudanin, N.M. Budnev et al. (Baikal-GVD Collab.)), PoS (ICRC2017) **962** (20176).

ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА V420 Cen — ЦЕФЕИДЫ ТИПА W Vir

© 2021 г. Л. Н. Бердников^{1*}

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия Поступила в редакцию 16.12.2020 г. После доработки 16.12.2020 г.; принята к публикации 29.12.2020 г.

Обработка всей имеющейся фотометрии цефеиды V420 Сеп позволила построить ее диаграмму O-C, охватывающую временной интервал в 131 год. Полученные данные свидетельствуют в пользу существования больших случайных флуктуаций периода ($\varepsilon/P \approx 0.021$). Аппроксимация остатков O-C кубической параболой позволила оценить скорость векового уменьшения периода $dP/dt = -353.0(\pm 3.6)$ с/год. Тест на стабильность пульсаций, предложенный Ломбардом и Коэном в 1993 г., подтвердил реальность уменьшения периода.

Ключевые слова: цефеиды населения II, периоды пульсаций, эволюция звезд.

DOI: 10.31857/S0320010821020029

ВВЕДЕНИЕ

Переменность V420 Сеп открыла Ливит (Пикеринг, 1906, 1907), а Мергенталер (1939) классифицировал ее как классическую цефеиду с перидом 24^d7568. Однако Петит (1958) причислила звезду к цефеидам населения II, и в Общем Каталоге Переменных Звезд (Самусь и др., 2017) V420 Сеп числится цефеидой типа W Vir (CWA).

Изменения периода V420 Сеп изучали Васильяновская и Ерлексова (1970) на интервале времени около трех десятков лет и заподозрили скачкообразное изменение периода. Период цефеиды СС Lyr, которая тоже принадлежит к типу СWA с близким (24^d0) периодом, показывает значительные скачкообразные и вековые изменения (Бердников и др., 2020). Поэтому мы сравнили период V420 Сеп из работы Мергенталера (1939) с периодом, полученным по данным обзора ASAS-SN (Яясингхе и др., 2019), который оказался равен 24^d:58, т.е. период уменьшился на ~0^d:18.

Такое большое изменение периода побудило нас провести новое изучение изменяемости периода V420 Cen на основе существенно увеличенного объема наблюдательных данных, включая наблюдения, полученные как на старых фотопластинках, так и в ходе выполнения современных фотометрических обзоров.

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для нового изучения периода V420 Сеп мы собрали фотоэлектрические наблюдения в фильтрах *В* и *V* из литературы (Вальравен и др., 1958; Ирвин, 1961; Дин и др., 1977; Бердников, Тэрнер, 1998) и из обзора Hipparcos (ЕКА, 1997), а также ПЗС-наблюдения из обзоров ASAS (Поймански, 2002) и ASAS–SN (Яясингхе и др., 2019), полученные в полосах, близких к *V* и *g*'.

Кроме того, мы использовали данные проекта DASCH (Гриндлей и др., 2009), полученные на оцифрованных старых фотографических пластинках университета Гарварда (США), а также сделанные нами глазомерные оценки блеска на этих же фотопластинках. Отметим, что глазомерные оценки позволяют лучше отделять различные дефекты, искажающие звездные изображения, следовательно, получить более надежные данные, особенно, на самых старых фотопластинках.

Сведения о количестве использованных наблюдений приведены в табл. 1. Самая старая фотопластинка с изображением V420 Сеп, хранящаяся в Гарварде, была получена в 1889 г., а последние ПЗС-наблюдения сделаны в 2020 г. Таким образом, наши данные охватывают временной интервал в 131 год.

Для изучения изменяемости периодов мы применяем общепринятую методику анализа диаграмм O-C, а самым точным методом определения остатков O-C является метод Герцшпрунга (1919),

^{*}Электронный адрес: lberdnikov@yandex.ru

Источник данных	Число наблюдений	Полоса наблюдений	Интервал JD
DASCH	2120	Фотографические, pg	2411154-2447707
Данная работа	1735	Фотографические, pg	2411154-2447707
Литература	52	Φ отоэлектрические, BV	2434565 - 2450584
Hipparcos	28	ПЗС, <i>V</i>	2447912-2449038
ASAS	51	ПЗС, V	2451869-2455166
ASAS-SN	4017	ПЗС, <i>Vg</i> ′	2456789-2459180

Таблица 1. Наблюдательный материал цефеиды V420 Сеп

машинная реализация которого описана в работе Бердникова (1992). Для подтверждения реальности обнаруженных изменений периода мы используем метод, описанный Ломбардом и Коэном (1993).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты обработки фотографических наблюдений V420 Сеп по данным проекта DASCH и по нашим глозомерным оценкам блеска приведены в табл. 2 и 3 соответственно. В первом и втором столбцах этих таблиц даны моменты максимального блеска и ошибки их определения, в третьем и четвертом — номер эпохи E и значение остатка O-C, а в пятом — число наблюдений N.

Результаты обработки фотоэлектрических и ПЗС-наблюдений приведены в табл. 4, где в первом и втором столбцах даны моменты максимального блеска и ошибки их определения, в третьем — тип используемых наблюдений, в четвертом и пятом — номер эпохи E и значение остатка O-C, а в шестом и седьмом — число наблюдений N и источник данных.

O-C диаграмма V420 Сеп изображена на рис. 1 кружками с вертикальными черточками, указывающими пределы ошибок (которые в масштабе рисунка меньше размера кружков) определения остатков О-С. На рис. 1 показаны частые и резкие скачки периода, поэтому вычисление остатков О-С по небольшому числу наблюдений на больших интервалах времени особенно вблизи моментов скачка периода может приводить к большим ошибкам и, как следствие, - к просчетам эпох, которые могут иметь место на левом конце диаграммы O-C, а также в окрестностях JD 2438000 и 2456000. Для самых ранних наблюдений мы дополнительно изобразили моменты поярчаний, которые на рис. 1 обозначены точками. К сожалению, отсутствие таких данных между первыми тремя

точками и вблизи JD 2438000 и 2456000 не позволяет полностью решить проблему просчета эпох.

Данные табл. 2–4 позволяют оценить величину случайных флуктуаций пульсационного периода. Для этого вычислялись задержки u(x) = |z(r + x) - z(r)| для максимумов, разделенных x циклами. Средняя величина $\langle u(x) \rangle$, согласно Эддингтону и Плакидису (1929), должна быть связана со случайной флуктуацией периода ε соотношением

$$\langle u(x) \rangle^2 = 2\alpha^2 + x\varepsilon^2, \tag{1}$$

где α характеризует величину случайных ошибок измеренных моментов максимального блеска.

Результаты вычислений представлены на рис. 2 и указывают на существование линейного тренда $\langle u(x) \rangle^2$ для разности циклов x < 15, где формальная подгонка уравнения (1) дает решение в виде

$$\langle u(x) \rangle^2 = -0.160(\pm 0.344) + 0.270(\pm 0.038)x,$$

откуда величина случайной флуктуации периода $\varepsilon = 0.452 \pm 0.419$. Таким образом, полученные нами данные свидетельствуют в пользу существования больших случайных флуктуаций периода ($\varepsilon/P \approx \approx 0.021$), которые, тем не менее, не маскируют вековые изменения периода.

По моментам максимального блеска из табл. 2– 4 получены кубические элементы изменения блеска цефеиды V420 Cen:

$$MaxHJD = 2435200.6355(\pm 0.781) + (2) + 24^{d}.713596(\pm 0.00243)E - - 0.138221 \times 10^{-3}(\pm 0.142 \times 10^{-5})E^{2} + + 0.1650895 \times 10^{-7}(\pm 0.337 \times 10^{-8})E^{3},$$

линейная часть которых использована для вычислений остатков O-C в табл. 2-4. Элементы (2) использовались для проведения кубической параболы на верхней части рис. 1, на нижней части которого показаны отклонения от этой кубической параболы.

ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА V420 Cen

Таблица 2. Моменты максимума блеска V420 Сеп по фотографическим наблюдениям из проекта DASCH

Максимум, HJD	Ошибка, сут	E	<i>О</i> - <i>С</i> , сут	N	Максимум, HJD	Ошибка, сут	E	O-C, сут	Ν
2412664.1783	0.5030	-907	-121.0452	18	2428994.7475	0.2151	-251	-2.5950	72
2415182.1600	0.5455	-806	-99.1367	28	2429167.1699	0.7028	-244	-3.1677	24
2415630.2930	0.8576	-788	-95.8485	26	2429392.5523	0.4102	-235	-0.2077	26
2416249.2640	0.2669	-763	-94.7174	32	2429465.1179	0.4406	-232	-1.7829	23
2416595.5046	0.2736	-749	-94.4671	22	2429589.2128	0.3477	-227	-1.2560	57
2416943.4658	0.1625	-735	-92.4962	33	2429762.5423	0.5130	-220	-0.9216	22
2417441.8608	0.3538	-715	-88.3731	36	2430107.9064	0.2734	-206	-1.5479	23
2417492.5788	0.4604	-713	-87.0823	25	2430108.0351	0.1412	-206	-1.4192	59
2418066.7085	0.1656	-690	-81.3653	40	2430453.7075	0.2302	-192	-1.7371	32
2418514.2601	0.2033	-672	-78.6584	40	2430478.2261	0.1806	-191	-1.9321	25
2418514.3556	0.1820	-672	-78.5630	34	2430478.8829	0.7372	-191	-1.2753	21
2419558.0861	0.3486	-630	-72.8035	33	2430579.7799	0.8886	-187	0.7673	30
2420485.0089	0.1820	-593	-60.2837	47	2430824.5869	0.3372	-177	-1.5617	47
2420982.8747	0.1913	-573	-56.6898	39	2431046.1730	0.1839	-168	-2.3979	40
2421332.1446	0.1888	-559	-53.4103	34	2431070.9365	0.1869	-167	-2.3481	65
2421928.9261	0.5929	-535	-49.7551	23	2431194.4726	0.2220	-162	-2.3799	45
2421956.0636	0.2836	-534	-47.3312	49	2431565.6817	0.4000	-147	-1.8748	37
2422206.5762	2.7899	-524	-43.9545	11	2431590.3925	0.2710	-146	-1.8775	33
2422480.0125	0.2969	-513	-42.3678	26	2431936.1051	0.2692	-132	-2.1553	51
2423201.0767	0.2757	-484	-37.9979	28	2431984.3127	0.4079	-130	-3.3749	43
2423601.1661	0.4010	-468	-33.3260	19	2432009.3350	0.1917	-129	-3.0662	61
2424103.5356	0.3185	-448	-25.2284	26	2432108.1097	0.3096	-125	-3.1458	40
2424328.5521	0.3774	-439	-22.6343	9	2432233.0392	1.6326	-120	-1.7843	11
2424704.2466	0.5525	-424	-17.6437	11	2432279.8835	0.4652	-118	-4.3672	36
2425353.3858	0.5174	-398	-11.0581	18	2432651.1611	0.5268	-103	-3.7936	49
2425948.2450	0.1939	-374	-9.3252	30	2432999.7909	0.3738	-89	-1.1541	28
2426641.5199	0.2245	-346	-8.0310	35	2433221.9391	0.2624	-80	-1.4282	40
2427334.5706	1.6780	-318	-6.9609	5	2433469.0750	0.4585	-70	-1.4284	45
2427582.4126	0.1611	-308	-6.2549	37	2441212.7140	2.2867	244	-17.8585	5
2428175.6693	0.2890	-284	-6.1245	50	2444420.2901	0.3235	374	-23.0499	22
2428645.8142	0.4490	-265	-5.5379	23	2445847.4697	0.3281	432	-29.2588	34
2428796.1191	0.2835	-259	-3.5146	47	2447028.0562	0.1518	480	-34.9249	40

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 47 № 2 2021

БЕРДНИКОВ

					T				
Максимум, HJD	Ошибка, сут	E	O-C, сут	N	Максимум, HJD	Ошибка, сут	E	O-C, сут	N
2411371.6223	0.5092	-959	-128.4942	9	2425724.3769	0.2826	-383	-10.7709	16
2412640.5112	0.3080	-908	-119.9987	16	2426097.3061	0.1862	-368	-8.5456	21
2413758.1705	0.5838	-863	-114.4513	17	2426467.4258	0.3573	-353	-9.1299	20
2415008.0595	0.2187	-813	-100.2420	35	2426839.5914	0.2742	-338	-7.6682	16
2415505.8915	0.5885	-793	-96.6819	16	2427211.6214	0.2578	-323	-6.3422	23
2416000.8393	0.2652	-773	-96.0061	23	2427583.2275	0.4441	-308	-5.4400	17
2416249.3864	0.2294	-763	-94.5949	18	2427953.2295	0.2304	-293	-6.1419	35
2416570.7823	0.1523	-750	-94.4758	30	2428299.2914	0.2261	-279	-6.0704	39
2416943.4194	0.1690	-735	-92.5426	33	2428670.5617	0.2132	-264	-5.5040	34
2417316.9778	0.2818	-720	-89.6881	24	2429019.2676	0.1268	-250	-2.7884	80
2417716.5453	1.4286	-704	-85.5381	12	2429391.8277	0.1655	-235	-0.9323	71
2418066.6517	0.1342	-690	-81.4221	47	2429762.1662	0.2589	-220	-1.2977	59
2418439.5333	0.1263	-675	-79.2445	48	2430108.5314	0.1493	-206	-0.9229	74
2418764.5958	0.2839	-662	-75.4587	26	2430478.8768	0.2198	-191	-1.2814	33
2419208.3515	0.5010	-644	-76.5477	14	2430824.2322	0.1950	-177	-1.9163	35
2419556.5135	0.3478	-630	-74.3761	15	2431219.2007	0.1588	-161	-2.3654	64
2420159.1867	0.4816	-606	-64.8292	30	2431589.9757	0.2178	-146	-2.2944	50
2420634.2395	0.2300	-587	-59.3347	33	2431959.3790	0.2186	-131	-3.5950	40
2420982.7602	0.1579	-573	-56.8043	37	2432305.6808	0.2580	-117	-3.2835	43
2421331.9087	0.2597	-559	-53.6462	33	2432677.9815	0.2495	-102	-1.6868	29
2421730.1350	0.3961	-543	-50.8374	27	2433000.0323	0.3006	-89	-0.9127	37
2422105.6524	0.3289	-528	-46.0240	24	2433395.9591	0.4247	-73	-0.4034	18
2422529.9446	0.3724	-511	-41.8629	24	2433963.2935	0.6608	-50	-1.4817	16
2423201.6495	0.2785	-484	-37.4251	26	2441437.4393	0.3351	253	-15.5555	22
2423550.3684	0.4595	-470	-34.6965	16	2444149.9078	0.5338	363	-21.5826	22
2423902.1575	0.3695	-456	-28.8978	21	2445552.4897	0.4078	420	-27.6757	32
2424279.9255	0.7151	-441	-21.8338	17	2446511.6867	0.2035	459	-32.3089	39
2424678.4159	0.3252	-425	-18.7608	18	2447421.3680	0.2111	496	-37.0306	26
2425378.3846	0.2270	-397	-10.7729	35					

Таблица 3. Моменты максимума блеска V420 Сеп по фотографическим глазомерным оценкам блеска

ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРИОДА V420 Cen

Таблица 4. Моменты максимума блеска V420 Сеп по фотоэлектрическим и ПЗС-наблюдениям

Максимум, HJD	Ошибка, сут	Фильтр	E	O-C, сут	N	Источник данных
2434851.1699	0.0926	В	-14	-3.2948	18	Вальравен и др. (1958)
2434851.4249	0.1375	V	-14	-3.2202	18	Вальравен и др. (1958)
2435220.6125	0.1349	В	1	-4.5562	12	Ирвин (1961)
2435220.7898	0.1276	V	1	-4.5593	12	Ирвин (1961)
2435270.7524	0.0301	В	3	-3.8435	5	Ирвин (1961)
2435270.7630	0.0426	V	3	-4.0132	5	Ирвин (1961)
2442422.9304	0.1373	В	293	-18.6083	31	Дин и др. (1977)
2442423.1140	0.1245	V	293	-18.6051	31	Дин и др. (1977)
2448234.1760	0.0752	V	529	-39.9518	63	Hipparcos
2448676.8684	0.0631	V	547	-42.1041	65	Hipparcos
2450571.3116	0.0853	V	624	-50.6078	20	Бердников и Тэрнер (1998)
2451996.1516	0.0408	V	682	-59.1564	138	ASAS-3
2452241.8076	0.1439	V	692	-60.6363	17	ASAS-3
2452462.2932	0.1260	V	701	-62.5731	20	ASAS-3
2452756.4321	0.0586	V	713	-64.9973	125	ASAS-3
2453075.2861	0.0472	V	726	-67.4201	123	ASAS-3
2453493.2125	0.0621	V	743	-69.6247	127	ASAS-3
2453837.6991	0.0763	V	757	-71.1285	83	ASAS-3
2454230.0145	0.0877	V	773	-74.2307	69	ASAS-3
2454573.3613	0.0532	V	787	-76.8742	86	ASAS-3
2454941.1669	0.1099	V	802	-79.7725	63	ASAS-3
2456903.0503	0.0658	V	882	-94.9768	100	ASAS-SN
2457099.1423	0.0406	V	890	-96.5936	100	ASAS-SN
2457344.0400	0.0514	V	900	-98.8318	100	ASAS-SN
2457442.3836	0.0498	V	904	-99.3426	100	ASAS-SN
2457564.8314	0.0506	V	909	-100.4629	100	ASAS-SN
2457736.4013	0.0717	V	916	-101.8881	100	ASAS-SN
2457784.9887	0.0764	V	918	-102.7279	100	ASAS-SN
2457834.0121	0.0509	V	920	-103.1317	100	ASAS-SN
2457858.6827	0.1226	V	921	-103.1747	100	ASAS-SN
2457932.3876	0.0788	V	924	-103.6105	100	ASAS-SN
2458103.7671	0.0616	V	931	-105.2262	100	ASAS-SN

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 47 № 2 2021

Максимум, HJD	Ошибка, сут	Фильтр	E	O-C, сут	N	Источник данных
2458152.2915	0.0472	g'	933	-105.7324	150	ASAS-SN
2458152.6713	0.0511	V	933	-105.7492	100	ASAS-SN
2458201.6527	0.0405	V	935	-106.1950	100	ASAS-SN
2458250.4703	0.0338	g'	937	-106.4079	150	ASAS-SN
2458275.5859	0.0671	V	938	-106.4026	107	ASAS-SN
2458348.5104	0.0336	g'	941	-107.2222	150	ASAS-SN
2458470.9350	0.0146	g'	946	-108.3657	150	ASAS-SN
2458520.0237	0.0205	g'	948	-108.7041	150	ASAS-SN
2458544.6775	0.0082	g'	949	-108.7639	250	ASAS-SN
2458568.9583	0.0182	g'	950	-109.1967	150	ASAS-SN
2458593.8508	0.0099	g'	951	-109.0178	250	ASAS-SN
2458618.1190	0.0240	g'	952	-109.4632	150	ASAS-SN
2458642.8249	0.0226	g'	953	-109.4709	150	ASAS-SN
2458691.6779	0.0449	g'	955	-110.0451	150	ASAS-SN
2458790.6426	0.0698	g'	959	-109.9348	150	ASAS-SN
2458864.4748	0.0398	g'	962	-110.2434	150	ASAS-SN
2458888.3797	0.0480	g'	963	-111.0520	150	ASAS-SN
2458913.5813	0.0354	g'	964	-110.5640	150	ASAS-SN
2459036.0467	0.0696	g'	969	-111.6666	160	ASAS-SN

Таблица 4. Окончание



Рис. 1. Диаграмма *О*-*С* V420 Сеп относительно линейных (вверху) и кубических (внизу) элементов (2). Линия — кубическая парабола, соответствующая элементам (2). Большие кружки соответствуют данным табл. 2–4, а точки — моментам поярчаний на фотопластинках.



Рис. 2. Зависимость квадрата средней накопленной задержки $\langle u(x) \rangle$ от разности циклов x для цефеиды V420 Сеп. Линия — подгонка уравнения (1) для x < 15, которая дает величину случайных флуктуаций периода $\varepsilon = 0.952 \pm 0.919$ ($\varepsilon/P \approx 0.021$).



Рис. 3. Зависимость $D_i = [(O-C)_{i+1} - (O-C)_i]/(E_{i+1} - E_i)$ от $E'_i = (E_i + E_{i+1})/2$. Линия соответствует поведению остатков O-C на рис. 1.

Известно, что для пульсирующих переменных максимумы блеска наступают позже с ростом эффективной длины волны фотометрической полосы. Поэтому, когда используются данные, полученные в разных полосах, надо выбрать основную (в нашем случае это V) и по одновременным наблюдениям определить величины сдвига моментов максимального блеска в других полосах. По данным табл. 4 было найдено, что максимумы в фильтрах B и g' наступают раньше, чем в фильтре V на 0.43966 соответственно. Эти поправки учтены при вычислении остатков O-C в табл. 2–4, а также при построении рис. 1 и определении элементов (2), которые таким образом относятся к системе V.

Элементы (2) дают возможность вычислить скорость векового уменьшения периода $dP/dt = -353.0 ~(\pm 3.6) ~c/$ год.

Для подтверждения реальности увеличения периода пульсаций мы используем метод, опубликованный Ломбардом и Коэном (1993). Для этого мы вычислили разности $\Delta(O-C)_i$ последовательных остатков O-C из табл. 2-4, $\Delta(O-C)_i = (O-C)_{i+1} - (O-C)_i$, и построили график зависимости $D_i = \Delta(O-C)_i/(E_{i+1} - E_i)$ от $E'_i = (E_i + C_i)$



Рис. 4. Фрагмент рис. 1 для фотографических наблюдений.



Рис. 5. Фрагмент рис. 1 для ССD наблюдений.

 $+ E_{i+1})/2$ (рис. 3). Разности D_i , которые имеют смысл изменений периода в интервале эпох $E_i - E_{i+1}$, соответствуют поведению остатков O-C на рис. 1.

На рис. 1 мы выделили шесть участков, для которых методом наименьших квадратов определили линейные элементы изменения блеска, приведенные в табл. 5; последняя строка в этой таблице дает текущие элементы.

На самом деле, число отрезков прямой на диаграмме O-C гораздо больше шести, как это показано на рис. 4 и 5, которые являются увеличенными фрагментами рис. 1 для фотографических и CCD наблюдений соответственно; эти частые скачки пе-

Интервал JD	Начальная эпоха, HJD	Период, сут
2411000-2425000	2418044.638 ± 0.515	24.91256 ± 0.0034
2425000-2429500	2427409.251 ± 0.193	24.76764 ± 0.0035
2429500-2435000	2432430.354 ± 0.157	24.70352 ± 0.0023
2436000 - 2442500	2438624.779 ± 0.243	24.66359 ± 0.0018
2443000-2451000	2447323.694 ± 0.087	24.60230 ± 0.0011
2451000-2459200	2455430.647 ± 0.117	24.52608 ± 0.0010

Таблица 5. Линейные элементы изменения блеска V420 Сеп



Рис. 6. Изменения кривой блеска V420 Сеп, построенной с удвоенным периодом $2P_0 = 49^{\circ}083$ по данным ASAS-SN.

риода и обусловливают большую величину случайных флуктуаций периода $\varepsilon/P \approx 0.021$.

Кривые блеска многих звезд типа W Vir в отличие от классических цефеид не остаются постоянными. Обычно наблюдается чередование глубоких и мелких минимумов; иногда глубокие и мелкие минимумы меняются местами, и этим звезда напоминает переменную типа RV Tau. Все эти особенности обнаружены и на кривой блеска V420 Cen, построенной с удвоенным периодом $2P_0 = 49$ ^d083 (рис. 6) по данным обзора ASAS-SN. Изменения у цефеид населения II галактического балджа (Смолец и др., 2018), которые объясняются резонансом основной гармоники f_0 и полуцелых субгармоник $f_0/2, 3f_0/2, 5f_0/2...$

К сожалению, для детального изучения изменений кривой блеска V420 Сеп имеющихся наблюдений недостаточно.

Цефеиды CWA являются либо пост-AGB звездами, испытавшими финальную гелиевую вспышку, либо ранними пост-AGB звездами, которые не прошли стадию гелиевой вспышки (Боно и др., 2016; Мёлер, 2019; Фадеев, 2020). Двигаясь от асимптотической ветви гигантов на диаграмме Герцшпрунга—Рассела (ГР), после первого пересечения полосы нестабильности они могут описывать красную петлю (по аналогии с голубой петлей для классических цефеид), пересекая голубую границу полосы нестабильности еще 2 раза, т.е. периоды их пульсаций могут как убывать, так и возрастать.

По данным Gaia EDR3 (Браун и др., 2020) параллах V420 Сеп равен 0.308 \pm 0.018 мсек. дуги, а межзвездное поглощение составляет 0^m25, т.е. абсолютная звездная величина $M_V \simeq -3^m$ 1, что соответствует log L/L_{\odot} =3.1. Таким образом, на диаграмме ГР звезда попадает в область, занимаемую цефеидами СWA с периодами около 25^d (Боно и др., 2020; Фадеев, 2020).

Для определения номера пересечения полосы нестабильности имеющихся данных пока недостаточно: требуются дополнительные модельные

БЕРДНИКОВ

g'10.772 10.777 10.782 10.788 10.793 10.798 10.804 10.809 10.814 10.818 10.823 10.826 10.830 10.832 10.834 10.835 10.836 10.835 10.834 10.832 10.829 10.826 10.821 10.816 10.810 10.803 10.796 10.787 10.778 10.767

Таблица	аблица 6. Стандартные кривые V420 Cen в фильтрах <i>B</i> , <i>V</i> и <i>g</i> '											
Фаза	В	V	g'	Фаза	В	V	g'	Фаза	В	V		
0.000	9.894	9.379	9.490	0.335	10.548	9.854	10.141	0.670	11.301	10.463		
0.005	9.895	9.380	9.492	0.340	10.559	9.860	10.149	0.675	11.303	10.467		
0.010	9.900	9.384	9.498	0.345	10.569	9.865	10.156	0.680	11.305	10.471		
0.015	9.907	9.389	9.507	0.350	10.581	9.871	10.164	0.685	11.306	10.475		
0.020	9.916	9.395	9.519	0.355	10.593	9.876	10.172	0.690	11.308	10.478		
0.025	9.928	9.402	9.533	0.360	10.605	9.881	10.179	0.695	11.309	10.482		
0.030	9.941	9.410	9.548	0.365	10.618	9.886	10.187	0.700	11.310	10.486		
0.035	9.955	9.420	9.566	0.370	10.631	9.891	10.194	0.705	11.311	10.489		
0.040	9.970	9.429	9.584	0.375	10.645	9.896	10.202	0.710	11.312	10.491		
0.045	9.988	9.440	9.603	0.380	10.658	9.902	10.210	0.715	11.312	10.493		
0.050	9.995	9.450	9.622	0.385	10.672	9.908	10.219	0.720	11.312	10.495		
0.055	10.005	9.460	9.640	0.390	10.687	9.913	10.228	0.725	11.312	10.497		
0.060	10.021	9.471	9.659	0.395	10.701	9.919	10.237	0.730	11.311	10.497		
0.065	10.036	9.482	9.676	0.400	10.715	9.925	10.247	0.735	11.309	10.498		
0.070	10.051	9.492	9.693	0.405	10.730	9.932	10.258	0.740	11.307	10.497		
0.075	10.066	9.502	9.709	0.410	10.744	9.938	10.268	0.745	11.304	10.496		
0.080	10.080	9.512	9.724	0.415	10.759	9.945	10.280	0.750	11.301	10.494		
0.085	10.094	9.521	9.738	0.420	10.774	9.952	10.292	0.755	11.296	10.490		
0.090	10.107	9.530	9.751	0.425	10.788	9.960	10.304	0.760	11.290	10.486		
0.095	10.120	9.538	9.764	0.430	10.803	9.968	10.316	0.765	11.282	10.481		
0.100	10.132	9.547	9.775	0.435	10.818	9.976	10.330	0.770	11.273	10.475		
0.105	10.144	9.555	9.786	0.440	10.832	9.986	10.343	0.775	11.261	10.468		
0.110	10.154	9.562	9.796	0.445	10.847	9.995	10.356	0.780	11.249	10.460		
0.115	10.165	9.569	9.806	0.450	10.862	10.005	10.369	0.785	11.230	10.450		
0.120	10.175	9.576	9.816	0.455	10.877	10.015	10.382	0.790	11.210	10.439		
0.125	10.185	9.583	9.825	0.460	10.892	10.026	10.396	0.795	11.190	10.427		
0.130	10.194	9.589	9.834	0.465	10.907	10.037	10.408	0.800	11.170	10.414		
0.135	10.202	9.595	9.843	0.470	10.923	10.049	10.421	0.805	11.148	10.400		
0.140	10.211	9.601	9.852	0.475	10.938	10.062	10.434	0.810	11.124	10.384		
0.145	10.221	9.607	9.861	0.480	10.954	10.074	10.446	0.815	11.098	10.367		

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 47 № 2 2021

0.820

0.825

0.830

11.071

11.043

11.013

10.348

10.329

10.307

10.755

10.741

10.726

10.457

10.469

10.480

10.087

10.101

10.115

10.231

10.240

10.250

0.150

0.155

0.160

9.613

9.619

9.624

9.871

9.880

9.889

0.485

0.490

0.495

10.969

10.985

11.001

Таблица 6. Окончание

Фаза	В	V	g'	Фаза	В	V	g'	Фаза	В	V	g'
0.165	10.260	9.629	9.898	0.500	11.017	10.130	10.491	0.835	10.982	10.285	10.709
0.170	10.270	9.634	9.907	0.505	11.033	10.145	10.502	0.840	10.951	10.261	10.690
0.175	10.280	9.639	9.916	0.510	11.049	10.160	10.512	0.845	10.917	10.235	10.669
0.180	10.291	9.645	9.924	0.515	11.064	10.175	10.522	0.850	10.883	10.208	10.645
0.185	10.301	9.651	9.933	0.520	11.080	10.191	10.533	0.855	10.848	10.180	10.619
0.190	10.312	9.656	9.941	0.525	11.095	10.207	10.543	0.860	10.811	10.150	10.590
0.195	10.322	9.662	9.948	0.530	11.110	10.223	10.553	0.865	10.774	10.118	10.558
0.200	10.332	9.667	9.955	0.535	11.123	10.239	10.563	0.870	10.735	10.085	10.523
0.205	10.343	9.673	9.962	0.540	11.136	10.254	10.573	0.875	10.696	10.052	10.484
0.210	10.353	9.680	9.968	0.545	11.147	10.270	10.584	0.880	10.655	10.016	10.443
0.215	10.363	9.687	9.974	0.550	11.159	10.284	10.594	0.885	10.613	9.979	10.399
0.220	10.372	9.693	9.980	0.555	11.170	10.299	10.604	0.890	10.571	9.942	10.352
0.225	10.382	9.700	9.985	0.560	11.180	10.313	10.615	0.895	10.528	9.904	10.303
0.230	10.391	9.707	9.991	0.565	11.190	10.326	10.625	0.900	10.484	9.865	10.252
0.235	10.400	9.714	9.996	0.570	11.200	10.338	10.635	0.905	10.440	9.826	10.198
0.240	10.408	9.722	10.001	0.575	11.209	10.350	10.645	0.910	10.396	9.787	10.143
0.245	10.416	9.729	10.006	0.580	11.217	10.361	10.655	0.915	10.351	9.748	10.088
0.250	10.424	9.736	10.012	0.585	11.225	10.371	10.664	0.920	10.307	9.710	10.031
0.255	10.431	9.743	10.017	0.590	11.233	10.380	10.673	0.925	10.264	9.673	9.975
0.260	10.438	9.751	10.023	0.595	11.240	10.389	10.682	0.930	10.222	9.638	9.920
0.265	10.445	9.758	10.030	0.600	11.247	10.397	10.690	0.935	10.181	9.603	9.866
0.270	10.451	9.766	10.036	0.605	11.253	10.404	10.698	0.940	10.141	9.571	9.814
0.275	10.458	9.773	10.043	0.610	11.259	10.411	10.706	0.945	10.104	9.540	9.765
0.280	10.464	9.781	10.050	0.615	11.264	10.417	10.713	0.950	10.069	9.512	9.718
0.285	10.470	9.788	10.058	0.620	11.269	10.422	10.719	0.955	10.037	9.486	9.675
0.290	10.477	9.796	10.066	0.625	11.274	10.427	10.726	0.960	10.007	9.463	9.637
0.295	10.483	9.803	10.074	0.630	11.278	10.432	10.731	0.965	9.980	9.443	9.602
0.300	10.490	9.810	10.082	0.635	11.282	10.436	10.737	0.970	9.957	9.426	9.572
0.305	10.497	9.817	10.091	0.640	11.285	10.440	10.742	0.975	9.938	9.411	9.546
0.310	10.504	9.823	10.099	0.645	11.289	10.444	10.747	0.980	9.922	9.400	9.526
0.315	10.512	9.830	10.108	0.650	11.292	10.448	10.752	0.985	9.909	9.391	9.510
0.320	10.520	9.836	10.116	0.655	11.294	10.452	10.757	0.990	9.901	9.384	9.499
0.325	10.529	9.842	10.125	0.660	11.297	10.456	10.762	0.995	9.896	9.380	9.493
0.330	10.538	9.848	10.133	0.665	11.299	10.460	10.767				

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 47 № 2 2021



Рис. 7. Стандартные кривые цефеиды V420 Сеп в системе BVg'.

расчеты, и, кроме того, неизвестна металличность V420 Cen.

Отметим, что полученные здесь результаты основаны на конкретных стандартных кривых. Поэтому мы приводим их в табл. 6 с тем, чтобы их можно было использовать в будущих исследованиях, а также для установления связи с нашими данными, если будут использоваться другие стандартные кривые. В табл. 6 приведены звездные величины V420 Cen для фаз от 0 до 0.995 с шагом 0.005 в системе BVg'; эти стандартные кривые графически изображены на рис. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения изменяемости периода V420 Сеп было использовано 3855 оценок блеска на старых фотопластинках и собрано 5148 опубликованных наблюдений в фильтрах B, V и g'. Все имеющиеся данные обработаны методом Герцшпрунга (1919), и была построена диаграмма O-C, охватывающая временной интервал в 131 год. Полученные нами данные свидетельствуют в пользу существования больших случайных флуктуаций периода ($\varepsilon/P \approx \approx 0.021$), которые не маскируют кубическую параболу на диаграмме O-C, позволяющую оценить скорость векового уменьшения периода dP/dt = $= -353.0 (\pm 3.6)$ с/год. Тест на стабильность пульсаций, предложенный Ломбардом и Коэном (1993), подтвердил реальность уменьшения периода.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (гранты 18-02-00890 и 19-02-00611).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. 18, 519 (1992) [L.N. Berdnikov, Sov. Astron. Lett. 18, 207 (1992)].
- 2. Бердников, Тэрнер (L.N. Berdnikov and D.G. Turner), Astron. Astrophys. Trans. 16, 291 (1998).
- Бердников, Тэрнер (L.N. Berdnikov and D.G. Turner), Astron. Astrophys. Trans. 23, 123 (2004).
- Бердников Л.Н., Якоб А.М., Пастухова Е.Н., Письма в Астрон. журн. 46, 669 (2020) [L.N. Berdnikov, А.М. Yacob, and E.N. Pastukhova, Astron. Lett. 46, 630 (2020)].
- 5. Боно и др. (G. Bono, A. Pietrinferni, M. Marconi, V.F. Braga, G. Fiorentino, P.B. Stetson, R. Buonanno, M. Castellani, et al.), Commun. Konkoly Observ. Hung. Akad. Sci. **14**, 149 (2016).
- 6. Браун и др. (Gaia Collaboration, A. Brown, et al.), arXiv:2012.01533v1, (2020).
- 7. Вальравен и др. (Th. Walraven, A.B. Mueller, and P.Th. Oosterhoff), Bull. Astron. Inst. Netherl. 14, 81 (1958).
- 8. Васильяновская О.П., Ерлексова Г.Е., Бюлл. Инст. Астрофиз. АН Тадж. ССР **Nr 54**, 3 (1970).
- 9. Герцшпрунг (E. Hertzsprung), Astron. Nachr. 210, 17 (1919).
- 10. Гриндлей и др. (J. Grindlay, Sumin Tang, E. Los, and M. Servilla), ASP Conf. Ser. **410**, 101 (2009).
- 11. Дин и др. (J.F. Dean, A.W.J. Cousins, R.A. Bywater, and P.R. Warren), Mem. RAS 83, 69 (1977).
- 12. EKA, The Hipparcos and Tycho catalogues, ESA SP-1200 (ESA, Noordwijk, 1997).
- 13. Ирвин (J.B. Irwin), Astrophys. J. Suppl. Ser. **6**, 253 (1961).
- 14. Ломбард, Коен (F. Lombard and C. Koen), MNRAS **263**, 309 (1993).
- 15. Мёлер и др. (S. Moehler, W.B. Landsman, T. Lanz, and M.M. Miller Bertolami), Astron. Astrophys. **627**, A34 (2019).
- 16. Мергенталер (J. Mergentaler), Contrib. Astron. Observ. Lwow Univ. **Nr.10**, 1 (1939).

- 17. Петит (M. Petit), Ann. Astrophys. 23, 681 (1960).
- 18. Пикеринг (E.C. Pickering), Circ. Astron. Obs. Harvard College Nr 122, 1 (1906).
- 19. Пикеринг (E.C. Pickering), Astron. Nachr. **173**, 379 (1907).
- 20. Поймански (G. Pojmanski), Acta Astron. 52, 397 (2002).
- 21. Самусь и др. (N.N. Samus, E.V. Kazarovets, O.V. Durlevich, N.N. Kireeva, and E.N. Pastukhova), Astron. Rep. **61**, 80 (2017).
- 22. Смолец и др. (R. Smolec, P. Moskalik, E. Plachy, I. Soszynski, and A. Udalski), MNRAS **481**, 3724 (2018).

- 23. Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. **46**, 783 (2020) [Yu.A. Fadeyev, Astron. Lett. **46**, N11 (2020)].
- 24. Эддингтон, Плакидис (A.S. Eddington and S. Plakidis), MNRAS **90**, 65 (1929).
- 25. Яясингхе и др. (Т. Jayasinghe, K.Z. Stanek, C.S. Kochanek, B.J. Shappee, T.W.-S. Holoien, Todd A. Thompson, J.L. Prieto, Dong Subo, et al.), MNRAS **485**, 961 (2019).

О ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НИЗКОШИРОТНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ ОТ ЕЕ ПЛОЩАДИ

© 2021 г. 3. С. Ахтемов^{1*}, Ю. Т. Цап¹

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым, Россия Поступила в редакцию 24.08.2020 г. После доработки 17.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

На основе данных, полученных с помощью алгоритма CHIMERA, рассмотрена эволюция долгоживущей низкоширотной корональной дыры при прохождении центрального меридиана за период с 15.02.2012 по 14.10.2012 г. Коэффициент корреляции между напряженностью фотосферного магнитного поля корональной дыры и ее площадью за девять кэррингтоновских оборотов составил R = -0.55. Он заметно отличается от соответствующего значения R = -0.82, приведенного в работе Хейнеманна и др. Результаты свидетельствуют о существенной зависимости площади корональных дыр от метода определения их границ, что может оказать заметное влияние как на прогноз геомагнитной активности, так и на понимание природы солнечных явлений, связанных с этими образованиями.

Ключевые слова: Солнце, корональные дыры, магнитные поля.

DOI: 10.31857/S0320010821010010

ВВЕДЕНИЕ

Корональные дыры (КД) — это крупномасштабные (~10²⁰ см²) образования солнечной короны, отличающиеся от окружающих спокойных областей открытой конфигурацией магнитного поля, а также пониженной плотностью и температурой плазмы (см., например, Кранмер, 2009). КД наблюдаются в мягком рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом диапазонах на диске Солнца как темные образования, а на изображениях в линии HeI 10830 Å они имеют повышенную яркость. Интерес к КД обусловлен. в первую очередь, тем. что они являются источником быстрого солнечного ветра (Кранмер, 2002, 2009; Ахтемов, Цап, 2018), который оказывает существенное влияние не только на околоземное космическое пространство, но и на Землю. В частности, так называемые

коротирующие области взаимодействия, формируемые в солнечной короне, могут приводить к возникновению слабых и умеренных геомагнитных бурь (Ермолаев и др., 2018).

В последнее время большой интерес вызывают вопросы, связанные с магнитным полем КД (Хейнеманн и др., 2018; Хофмейстер и др., 2017, 2019). В первую очередь, это объясняется тем, что до сих пор нет ясных представлений о том, каким образом происходит ускорение солнечного ветра (Кранмер, 2002, 2009). Считается, что его скорость тесно связана не только с площадью КД (Нольте и др., 1976; Шугай и др., 2009; Раттер и др., 2012; Акияма и др., 2013; Ахтемов, Цап, 2018), но и с величиной магнитного поля в них. В частности, обнаружена корреляция с усредненным значением поля КД и темпом уменьшения его напряженности с высотой, характеризуемым сверхрадиальным расширением потоковой трубки (Ванг, Шили, 1990; Коджима и др., 2007; Ванг, 2010; Фуджики и др., 2015).

Сравнительно недавно Хейнеманн и др. (2018), исследуя в течение восьми месяцев 2012 г. по данным инструментов Atmospheric Imaging Assembly (AIA) и Helioseismic and Magnetic Imager (HMI), размещенных на спутнике Solar Dynamics Observatory (SDO), эволюцию одной из долгоживущих низкоширотных КД, пришли к заключению о существовании высокой корреляции (коэффициент Пирсона R = -0.82) между площадью и усредненным фотосферным магнитным полем КД. Этот вывод несколько противоречит более ранним статистическим результатам для разных КД (см., например, Биленко, Тавастшерна, 2017). Между тем полученная оценка имеет большое феноменологическое значение, поскольку он предполагает, что изменения магнитного поля внутри КД определяют их эволюцию.

Хейнеманн и др. (2018) выделяли границы КД, исходя из принятого авторами пороговой интенсивности излучения относительно медианного значения для солнечного диска в канале AIA/SDO

^{*}Электронный адрес: azis@craocrimea.ru

193 Å. Между тем определение границ КД является довольно сложной и неоднозначной задачей вследствие неоднородности атмосферы и зачастую малой контрастности КД по сравнению с соседними спокойными областями Солнца. Значимую роль играет и то обстоятельство, что на изображениях солнечного диска в разных длинах волн, формируемых приблизительно на одной высоте в переходной области и нижней короне, площади КД могут существенно различаться (Гартон и др., 2018). Определение границ усложняется еще и наложением на низкоширотные КД более ярких и более темных образований, таких как стримеры, джеты, корональные петли и волокна.

Таким образом, методика определения границ КД в работе Хейнеманна и др. (2018), хотя и следует из анализа самых контрастных ультрафиолетовых изображений КД. получаемых на AIA/SDO. тем не менее представляется слишком упрощенной. Более обоснованным выглядит подход, предложенный Гартоном и др. (2018). Разработанный этими авторами метод автоматического обнаружения и выделения КД с помощью программного алгоритма Coronal Hole Identification via Multi-thermal Emission Recognition Algorithm (CHIMERA), позволяет определять контуры границ КД по трем каналам AIA/SDO 171, 193 и 211 Å в крайнем ультрафиолетовом излучении ионов железа, которым соответствуют характерные температуры плазмы 6.3×10^5 , 1.6×10^6 и 2.0×10^6 К (Лемен и др., 2012). При этом особо хотелось бы подчеркнуть, что в алгоритме также учитывается степень открытости конфигурации магнитного поля вплоть до $2.5R_{\odot}$, согласно модели Potential Field Source Surface Model (PFSS), использующей в качестве входных данных магнитограммы HMI/SDO в фотосферной линии FeI 6173 Å.

Цель настоящей работы — исследовать на основе алгоритма CHIMERA связь между площадью и магнитным полем долгоживущей низкоширотной КД при пересечении ее "центра тяжести" нулевого (центрального) меридиана. Затем сравнить полученные результаты с соответствующей зависимостью из работы Хейнеманна и др. (2018). В заключение обсудить следствия проведенного анализа и предложить возможную интерпретацию.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ПЛОЩАДЬЮ И Магнитным полем кд по данным Chimera

Как и в работе Хейнеманна и др. (2018), мы выбрали период с 15.02.2012 по 14.10.2012 г. (кэррингтоновские обороты CR2121-CR2129), соответствующий второй фазе роста солнечной активности 24-го цикла. В это время на диске

Солнца наблюдалась долгоживущая изолированная сравнительно компактная КД в области низких широт (рис. 1), что позволило минимизировать проекционные эффекты. Величины усредненных площадей А_{СН} и продольного магнитного поля В_{СН} мы определяли при прохождении "центра тяжести" КД через нулевой меридиан 15.02.2012, 13.03.2012, 09.04.2012, 06.05.2012, 03.06.2012, 30.06.2012, 26.07.2012. 22.08.2012. 18.09.2012 и 14.10.2012. Однако, в отличие от Хейнеманна и др. (2018), разработавших собственный алгоритм, следующий из анализа AIA-изображений диска Солнца в наиболее контрастной линии 193 Å и принятого порогового значения 35% от медианной интенсивности солнечного диска, мы привлекли программный алгоритм CHIMERA, описанный в работе Гартона и др. (2018) и находящийся в свободном доступе (https://github.com/TCDSolar/CHIMERA) ДЛЯ практического использования. В качестве входных данных для выбранного промежутка времени мы использовали четыре fits-файла из архива SDO: НМІ-магнитограмму и три АІА-изображения в каналах 171, 193 и 211 Å. С помощью программы строились изображения диска Солнца с границами КД и создавался текстовый файл, содержащий информацию о координатах "центра тяжести" (геометрического центра), площади и средней напряженности продольного магнитного поля в основании КД на уровне фотосферы. При каждом прохождении "центром тяжести" КД нулевого меридиана строилось пять изображений КД, заключенных в пределах ±7° по долготе, что соответствует приблизительно ±15 ч. Использование нескольких изображений КД позволяло уменьшить геометрические искажения и увеличить точность измерений. Полученные таким образом данные затем усреднялись и использовались нами в качестве величин, характеризующих КД в момент прохождения центрального меридиана. Такой подход можно считать оправданным, если за указанный промежуток времени параметры КД существенно не меняются. Отметим, что Хейнеманн и др. (2018) радиальное магнитное поле выделенной КД также находили в результате усреднения данных, но в пределах ±18 ч от момента прохождения "центром тяжести" КД нулевого меридиана. В течение отмеченного периода наблюдений контуры КД по данным CHIMERA оставались в пределах $\pm 50^{\circ}$ по широте и $\pm 30^{\circ}$ по долготе.

Связь между площадью КД и усредненным магнитным полем в ней, следуя Хейнеманну и др. (2018), мы характеризовали линейным коэффициентом корреляции Пирсона *R*, определяемого с помощью стандартных обозначений хорошо известным образом (см., например, Айвазян, 1968;



Рис. 1. Слева: магнитограммы HMI/SDO с нанесенными контурами КД из работы Хейнеманна и др. (2018). Справа: синтезированные изображения AIA/SDO в каналах 171, 193 и 211 Å после определения границ КД с учетом PFSS, согласно алгоритму CHIMERA (Гартон и др., 2018).



Рис. 2. Зависимость между усредненной площадью *А*_{CH} и продольным магнитным полем *В*_{CH} КД по данным алгоритма CHIMERA. Площадь *А*_{CH} выражена в процентах от площади диска Солнца.

Гмурман, 1972):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^{n} (Y_i - \bar{Y})^2}}.$$
 (1)

Учитывая малый объем выборки *n*, для оценки доверительного интервала *CI* мы использовали Zпреобразование Фишера (Айвазян, 1968)

$$Z = \operatorname{arcth} R = 0.5 \ln \left(\frac{1+R}{1-R} \right).$$

В этом случае нижняя (Z_L) и верхняя (Z_U) границы соответственно равны (Айвазян, 1968)

$$Z_L = \operatorname{arth} R - \frac{t_{\gamma}}{n-3} - \frac{R}{2(n-1)}, \qquad (2)$$
$$Z_U = \operatorname{arth} R + \frac{t_{\gamma}}{n-3} - \frac{R}{2(n-1)}.$$

Для заданной доверительной вероятности γ квантиль t_{γ} вычислялся из уравнения $\Phi(t_{\gamma}) = \gamma/2$, где функция Лапласа

$$\Phi(t_{\gamma}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{t_{\gamma}} e^{-x^2/2} dx$$

Тогда, как следует из (2), коэффициент корреляции должен быть заключен в пределах

$$\operatorname{th} Z_L < R < \operatorname{th} Z_U, \tag{3}$$

где гиперболический тангенс

$$\operatorname{th} Z = \frac{\exp\left(2Z\right) - 1}{\exp\left(2Z\right) + 1}.$$

На рис. 2 видна полученная нами с помощью алгоритма CHIMERA зависимость между усредненной площадью A_{CH} и продольным магнитным

полем низкоширотной КД ВСН для 10 точек, полученных в результате усреднения измерений вблизи центрального меридиана. Здесь же изображена линия регрессии и регрессионнное уравнение. Согласно уравнению (1), коэффициент линейной корреляции Пирсона R = -0.55. Поскольку для доверительной вероятности $\gamma = 0.95$ значение $t_{\gamma} = 1.96$ (Гмурман, 1972), то с учетом (2) и (3) в этом случае доверительный интервал CI = [-0.32, -0.72].Полученные оценки свидетельствуют о довольно слабой корреляции между площадью КД и средней напряженностью магнитного поля, что несколько противоречит результатам работы Хейнеманна и др. (2018), в соответствии с которыми при $\gamma =$ = 0.95 значение R = -0.82 и CI = [-0.36, -0.97],т.е. сила связи между исследуемыми величинами является высокой.

Нам представляется, что полученное расхождение в результатах, в первую очередь, объясняется сильной зависимостью границ КД от методики их определения. На рис. 1 (верхняя панель) видно, как границы заметно варьируются, и разница в площадях, полученных Хейнеманном и др. (2018) $A_{
m HE}$ и согласно алгоритму CHIMERA $A_{
m CH}$, может достигать 30% (рис. 3), хотя коэффициент корреляции $R = -0.87 \pm 0.17$. Между тем усредненные значения магнитного поля КД имеют меньший разброс. Это подтверждается результатами расчетов (рис. 4), в соответствии с которыми для усредненных магнитных полей ВНЕ и ВСН значение коэффициента $R = 0.90 \pm 0.15$. Отметим, что приведенные оценки R согласуются со сделанным ранее предположением (Ахтемов и др., 2020) о более сильной зависимости магнитного потока КД от их площади, чем от напряженности.



Рис. 3. Зависимость от времени усредненных площадей КД по данным Хейнеманна и др. (2018) А_{НЕ} и алгоритма CHIMERA А_{CH} за период с 15.02.2012 по 14.10.2012 г. (CR2121-CR2129) при прохождении КД центрального меридиана.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

На основе спутниковых данных AIA/SDO и HMI/SDO, полученных с помощью алгоритма CHIMERA для выделенной КД, нам, в отличие от Хенеманн и др. (2018), не удалось обнаружить высокой корреляции между изменениями площади КД и значениями ее магнитного поля на уровне фотосферы в моменты прохождения центрального меридиана за период с 15.02.2012 по 14.10.2012 г. На наш взгляд, даже с учетом малого объема выборки это объясняется тем, что методики определения границ КД в работах Хенеманна и др. (2018) и Гартона и др. (2018) заметно различаются. В первом случае для выделения КД на солнечном диске использовался метод, основанный на изображениях в линии 193 Å, тогда как во втором многоволновые ультрафиолетовые наблюдения и, что особенно важно, магнитограммы HMI/SDO. Можно предположить, что одна из возможных причин столь значимых различий связана с тонкой структурой КД и наложением в области ее границы различных магнитных образований. На наш взгляд, вывод Хейнеманна и др. (2018) о существовании высокой силы связи между площадью КД и напряженностью магнитного поля должен быть пересмотрен. Это также предполагает необходимость разработки единых подходов к проблеме определения границ КД, поскольку иначе трудно будет избежать значительных погрешностей при

прогнозировании космической погоды и адекватной интерпретации явлений, связанных с КД.

Приведенные нами результаты предполагают, что изменения напряженности магнитного поля внутри КД на уровне фотосферы не оказывают определяющего влияния на эволюцию их площади. Данное заключение подтверждают, в частности, результаты работы Сакри и др. (2020), основанные на наблюдениях AIA/SDO, которые предполагают, что плотность и температура ультрафиолетовой плазмы в исследуемой нами КД практически не зависят от ее площади. Поскольку магнитное поле тесно связано с нагревом корональной плазмы, то это свидетельствует о слабых изменениях магнитного поля на корональных высотах. Откуда с учетом доминирующего вклада в магнитный поток КД мелкомасштабных элементов (Хофмейстер и др., 2017, 2019) можно предположить, что контуры КД должны быть тесно связаны с процессами в области границ. В результате перестановочного пересоединения (Шелке, Панде, 1984; Конг и др., 2018) может происходить перезамыкание между открытыми и закрытыми магнитными потоками в результате эволюции глобальных и локальных характеристик во внешней области КД, сопровождаемое изменением конфигурации поля и соответственно площадей КД.

Отметим, что в отличие от солнечных пятен, у которых напряженность магнитного поля увеличивается с ростом их площади (Брей, Лоухед, 1967; Наговицын и др., 2017; Обридко, Наговицын,



Рис. 4. Зависимость от времени усредненных значений магнитного поля КД по данным Хейнеманна и др. (2018) *В*_{НЕ} и алгоритма CHIMERA *B*_{CH} за тот же период, что и на рис. 3, при прохождении КД центрального меридиана.

2017), соответствующей закономерности для КД, нам обнаружить не удалось. Это свидетельствует о разной природе происхождения данных образований, вероятно, связанных с существенным различием в масштабах и высотами формирования этих магнитных структур.

Авторы выражают признательность рецензентам за внимательное прочтение статьи и сделанные полезные замечания, что немало способствовало ее улучшению. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и РФФИ (проект № 20-52-26006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей (М.: Металлургия, 1968).
- Акияма и др. (S. Akiyama, N. Gopalswamy, S. Yashiro, and P. Makela), Publ. Astron. Soc. Japan 65, id.S15 (2013).
- 3. Ахтемов, Цап (Z.S. Akhtemov and Yu.T. Tsap), Geomag. Aeron. **58**, 1149 (2018).
- 4. Ахтемов и др. (Z.S. Akhtemov, Y.T. Tsap, and V.I. Haneychuk), Astrophysics **63**, 399 (2020).
- 5. Биленко, Тавастшерна (I.A. Bilenko and K.S. Tavastsherna), Geomag. Aeron. **57**, 803 (2017).
- 6. Брей, Лоухед (R.J. Bray and R.E. Loughhead), Sunspots, London: Chapman and Hall Ltd. 1964.
- 7. Ванг (Y.-M. Wang), Astrophys. J. 715, L121 (2010).
- 8. Ванг, Шили (Y.-M. Wang and N.R. Sheeley), Astrophys. J. **355**, 726 (1990).

- 9. Гартон и др. (Т.М. Garton, P.T. Gallagher, and S.A. Murray), J. Space Weather and Space Climate, 8, 02 (2018).
- Гмурман В.С., Теория вероятностей и математическая статистика (М.: Высшая школа, 1972).
- Ермолаев и др. (Yu.I. Yermolaev, I.G. Lodkina, N.S. Nikolaeva, M.Yu. Yermolaev, M.O. Riazantseva, and L.S. Rakhmanova), J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 180, 52 (2018).
- Коджима и др. (М. Kojima, M. Tokumaru, K. Fujiki, H. Itoh, T. Murakami, and K. Hakamada), New Solar Physics with Solar-B Mission (Ed. K. Shibata, S. Nagata, T. Sakurai, San Francisco, ASP Conf. Ser. 369, 2009), c. 549.
- 13. Конг и др. (D.F. Kong, G.M. Pan, X.L. Yan, J.C. Wang, and Q.L. Li), Astrophys. J. **863**, id.L22 (2018).
- 14. Кранмер (S.R Cranmer), Space Sci. Rev. **101**, 229 (2002).
- 15. Кранмер (S.R. Cranmer), Liv. Rev. Solar Phys. 6, 3 (2009).
- 16. Лемен и др. (J.R. Lemen, A.M. Title, D.J. Akin, P.F. Boerner, C. Chou, J.F. Drake, D.W. Duncan, Ch.G. Edwards, et al.), Solar Phys. **275**, 17 (2012).
- 17. Наговицын и др. (Y.A. Nagovitsyn, A.A. Pevtsov, and A.A. Osipova), Astron. Nachr. **338**, 26 (2017).
- Нольте и др. (J.T. Nolte, A.S. Krieger, A.F. Timothy, R.E. Gold, E.C. Roelof, G. Vaiana, A.J. Lazarus, and J.D. Sullivan), Solar Phys. 46, 303 (1976).

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 47 № 2 2021

- Обридко В.Н., Наговицын Ю.А., Солнечная активность, цикличность и методы прогноза (СПб: Изд-во ВВМ, 2017).
- 20. Раттер и др. (T. Rotter, A.M. Veronig, M. Temmer, and B. Vrsnak), Solar Phys. **281**, 793 (2012).
- 21. Сакри и др. (J. Saqri, A.M. Veronig, S.G. Heinemann, S.J. Hofmeister, M. Temmer, K. Dissauer, and Y. Su), Solar Phys. **295**, id.6 (2020).
- 22. Фуджики и др. (К. Fujiki, М. Tokumaru, Т. Iju, K. Hakamada, and M. Kojima), Solar Phys. **290**, 2491 (2015).
- 23. Хейнеманн и др. (S.G. Heinemann, S.J. Hofmeister, A.M. Veronig, and M. Temmer), Astrophys. J. **863**, 29 (2018).

- 24. Хофмейстер и др. (S.J. Hofmeister, A. Veronig, M.A. Reiss, M. Temmer, S. Vennerstrom, B. Vrsnak, and B. Heber), Astrophys. J. **835**, id.268 (2017).
- 25. Хофмейстер и др. (S.J. Hofmeister, D. Utz, S.G. Heinemann, A. Veronig, and M. Temmer), Astron. Astrophys. **629**, id.A22 (2019).
- 26. Шелке, Панде (R.N. Shelke and M.C. Pande), Bull. Astron. Soc. India **12**, 404 (1984).
- 27. Шугай и др. (Yu.S. Shugai, I.S. Veselovsky, and L.D. Trichtchenko), Geomagn. Aeron. **49**, 415 (2009).

ИСПРАВЛЕНИЕ К СТАТЬЕ А. Г. Куранова, К. А. Постнова, Л. Р. Юнгельсона "Популяционный синтез ультраярких рентгеновских источников с замагниченными нейтронными звездами" (Том 46, № 10, стр. 702–720, 2020 г.)

DOI: 10.31857/S032001082102008X

В статье А.Г. Куранова, К.А. Постнова, Л.Р. Юнгельсона "Популяционный синтез ультраярких рентгеновских источниковс замагниченными нейтронными звездами" (Письма в Астрономический журнал, 2020, том 46, № 10, с. 702—720) допущена техническая опечатка.

На стр. 719, левая колонка, вторая строка снизу: напечатано "грант 19-12-00229", следует читать "грант 19-02-00790".

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ (Том 45, 2019 г.)

DOI: 10.31857/S0320010821020054

Агханим Н. см. Зазнобин И.А.

Амосов Ф.А. см. Цветков А.С.

Ананьева В.И. см. Иванова А.Е.

Антонюк К.А. см. Пахомов Ю.В.

Архипова В.П. см. Иконникова Н.П.

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

Байкова А.Т. см. Бобылев В.В.

Белан С.П. см. Пахомов Ю.В.

Беляев А.К. см. Машонкина Л.И.

Беннер Л.А. см. Бондаренко Ю.С.

Бердников Л.Н. Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: DX Gem. № 7, 489–498 (435–444)¹.

Бердников Л.Н. Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: BY Cas. № 9, 636–645 (593–601). **Бердников Л.Н.** Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: V532 Cyg. № 10, 731–740 (677–686).

Бердников Л.Н., Князев А.Ю., Ковтюх В.В., Кравцов В.В., Мишенина Т.В., Пастухова Е.Н., Усенко И.А. Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: ВG Сги. № 7, 499–506 (445–452).

Бердников Л.Н., Пастухова Е.Н. Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: CF Cas. № 2, 125–136 (92–103).

Бердников Л.Н., Пастухова Е.Н., Ковтюх В.В., Лемаль Б., Князев А.Ю., Усенко И.А., Боно Д., Гребель Е., Хайду Г., Жуйко С.В., Удовиченко С.Н., Кейр Л.Э. Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: V1033 Cyg — классическая цефеида на первом пересечении полосы нестабильности. № 4, 269–278 (227–236).

Берто Ж.-Л. см. Иванова А.Е.

Bianchini A. см. Scafetta N.

Бикмаев И.Ф. см. Зазнобин И.А.

Блинников С.И. см. Поташов; Юдин А.В.

Бобылев В.В. Параметры связи между оптической и радиосистемами по данным каталога Gaia DR2 и РСДБ-измерениям. № 1, 13–23 (10–19).

Бобылев В.В. см. Шевченко И.И.

Бобылев В.В., Байкова А.Т. Кинематика Галактики по выборке молодых рассеянных звездных скоплений с данными из каталога Gaia DR2. № 3, 151–162 (109–119).

Бобылев В.В., Байкова А.Т. Кинематические свойства рассеянных звездных скоплений с данными из каталога GAIA DR2. № 4, 249–257 (208–216).

Бобылев В.В., Байкова А.Т. Вращение Галактики по ОВ-звездам из каталога Gaia DR2. № 6, 379–389 (331–340).

¹В скобках указаны страницы в английской версии журнала.

Бобылев В.В., Байкова А.Т. Кинематика горячих субкарликов из каталога Gaia DR2. № 9, 622–635 (580–592).

Богачев С.А. см. Ульянов А.С.

Боговалов С.В., Романихин С.М., Тронин И.В. Моделирование гидродинамического звездного ветра от быстро вращающейся звезды. № 2, 113–124 (81–91).

Бондаренко Ю.С., Маршалов Д.А., Медведев Ю.Д., Корниенко Г.И., Кочергин А.В., Желтобрюхов М.С., Беннер Л.А. Оценка физических параметров астероида 2017 VR12 по радиолокационным и фотометрическим наблюдениям. № 2, 137–141 (104–107).

Бондарь Н.И. см. Пахомов Ю.В.

Боно Д. см. Бердников Л.Н.

Борман Г.А. см. Стригунов К.С.

Бранд Я. см. Вольвач Л.Н.

Буренин Р.А. см. Зазнобин И.А.; Карасев Д.И.; Ляпин А.Р.; Мереминский И.А.; Хорунжев Г.А.

Буренков А.Н. см. Каратаева Г.М.

Бурлак М.А. см. Иконникова Н.П.

Быков С.Д., Филиппова Е.В., Мереминский И.А., Семена А.Н., Лутовинов А.А. Исследование вспышечной активности кандидата в черные дыры GRS 1739-278. № 3, 170–191 (127–146).

Венкстерн А.А. см. Иванова А.Е.

Verma V.K., Mittal N. On the Origin of Solar Halo Coronal Mass Ejections. № 3, 210 (164–176).

Веселова А.В. см. Никифоров

Волак П. см. Вольвач Л.Н.

Вольвач А.Е. см. Вольвач Л.Н.

Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н., Ларионов М.Г., МакЛеод Г.К. Обнаружение вспышек мазера метанола вблизи частот 19.9 и 20.9 ГГц в направлении на массивный источник активного звездообразования G358.931-0.030. № 11, 814-820 (764-769).

Вольвач Л.Н. см. Вольвач А.Е.

Вольвач Л.Н., Вольвач А.Е., Ларионов М.Г., МакЛеод Г.К., Волак П., Олеч М., Крамер Б., Ментен К., Краус А., Бранд Я., Заничелли А., Поппи С., Ригини С. Вспышка мазера водяного пара в высокоскоростной линии W49N. № 5, 367–376 (321–330).

Галазутдинова О.А. см. Тихонов Н.А.

Гаскелл К.М. см. Окнянский В.Л.

Гончаров Г.А. О свойствах галактического слоя пыли в радиусе 700 пк от Солнца. № 9, 650-665 (605-619).

Горда С.Ю. см. Пахомов Ю.В.

Грачев С.И. см. Дубрович В.К.

Гребель Е. см. Бердников Л.Н.

Гребенев С.А. см. Позаненко А.С.; Человеков И.В.

Гребенев С.А., Сюняев Р.А. Понижение яркости космического рентгеновского и мягкого гамма-фона в направлении на скопления галактик. № 12, 835–865 (791–820).

Гринин В.П. см. Дмитриев Д.В.; Шульман С.Г.

Грицык П.А., Сомов Б.В. Аналитическая модель распространения тепловых убегающих электронов в солнечных вспышках. № 4, 279–289 (237–247).

Deng X.-F. Color-Density Relation of Galaxies in the Redshift Region of 0.60 < z < 0.75. No 11, 799 (740–749).

Dervisoglu A. см. Sahin T.

Дмитриев Д.В., Гринин В.П., Катышева Н.А. Образование эмиссионных линий водорода в магнитосферах молодых звезд. № 6, 422–434 (371–383).

Додин А.В. см. Сафонов Б.С.

Додонов С.Н. см. Зазнобин И.А.; Хорунжев Г.А.

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 47 № 2 2021

Дорошкевич А.Г. см. Ларченкова Т.И.

Дубрович В.К., Грачев С.И. Абсорбция в линии 21 см в первичных флуктуациях плотности вещества на стадии их нелинейного сжатия. № 11, 759–767 (701–709).

Ермаш А.А. см. Ларченкова Т.И.

Еселевич М.В. см. Зазнобин И.А.; Карасев Д.И.; Хорунжев Г.А. **Есипов В.Ф.** см. Иконникова Н.П.

Желтобрюхов М.С. см. Бондаренко Ю.С.

Жовтан А.В. см. Стригунов К.С.

Жугжда Ю.Д., Сыч Р.В. Мощные поярчения и локальные колебания в солнечных пятнах. № 3, 211-219 (177-185).

Жуйко С.В. см. Бердников Л.Н.

Зазнобин И.А. см. Карасев Д.И.; Хорунжев Г.А.

Зазнобин И.А., Буренин Р.А., Бикмаев И.Ф., Хамитов И.М., Хорунжев Г.А., Коноплев В.В., Еселевич М.В., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н., Рубино-Мартин Х.-А., Агханим Н., Сюняев Р.А. Оптическое отождествление скоплений галактик среди объектов второго каталога источников Сюняева— Зельдовича обсерватории им. Планка. № 2, 77–90 (49–61).

Заничелли А. см. Вольвач Л.Н.

Иванов В.Г. см. Наговицын Ю.А.

Иванова А.Е., Ананьева В.И., Венкстерн А.А., Шашкова И.А., Юдаев А.В., Тавров А.В., Кораблев О.И., Берто Ж.-Л. Распределение транзитных экзопланет по массам с учетом факторов наблюдательной селекции. № 10, 741–748 (687–694).

Измайлов И.С. Орбиты 451 широкой визуально-двойной звезды. № 1, 35-44 (30-38).

Иконникова Н.П., Бурлак М.А., Архипова В.П., Есипов В.Ф. Спектр желтой симбиотической звезды LT Дельфина до, во время и после вспышки 2017 г. № 4, 258–268 (217–226).

Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Архипова В.П. Вторая вспышка желтой симбиотической звезды LT Дельфина. № 6, 412–421 (361–370).

Карасев Д.И., Сазонов С.Ю., Ткаченко А.Ю., Хорунжев Г.А., Кривонос Р.А., Медведев П.С., Зазнобин И.А., Мереминский И.А., Буренин Р.А., Павлинский М.Н., Еселевич М.В. Оптическое отождествление четырех жестких рентгеновских источников из обзоров неба обсерватории ИНТЕГРАЛ. № 12, 882–892 (836–846).

Каратаева Г.М., Меркулова О.А., Шаляпина Л.В., Яковлева В.А., Буренков А.Н. UGC 1198 – галактика с внутренним полярным диском/кольцом. № 4, 227–236 (187–196). Кармакар С. см. Саванов И.С.

Карелин Г.М. см. Шевченко И.И.

Катышева Н.А. см. Дмитриев Д.В.

Кейр Л.Э. см. Бердников Л.Н.

Кириченко А.С. см. Ульянов А.С.

Кичатинов Л.Л. Распад крупномасштабного магнитного поля на трубки у основания конвективной зоны Солнца. № 1, 45–54 (39–48).

Князев А.Ю. см. Бердников Л.Н.

Ковалев В.А., Мельников В.Ф. Ограничения на режимы ускорения электронов в солнечных вспышках. № 8, 586–590 (546–550).

Ковтюх В.В. см. Бердников Л.Н.

Комиссарова Г.В. см. Иконникова Н.П.

Коноплев В.В. см. Зазнобин И.А.

Космодаминский Г.А. Обновленные численные эфемериды галилеевых спутников Юпитера. № 11, 821–829 (770–777).
Кораблев О.И. см. Иванова А.Е.

Корниенко Г.И. см. Бондаренко Ю.С.

Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В., Мартьянов В.Ю., Нечаев А.А. Аналитическая модель токовой структуры границы магнитослоя в бесстолкновительной плазме. № 8, 591–604 (551–564).

Кочаровский Вл.В. см. Кочаровский В.В.

Кочергин А.В. см. Бондаренко Ю.С.

Кравцов В.В. см. Бердников Л.Н.

Крамер Б. см. Вольвач Л.Н.

Красильников А.Д. см. Крымский Г.Ф.

Краснобаев К.В., Тагирова Р.Р. Влияние магнитного поля на волновые движения в термически неустойчивых областях фотодиссоциации. № 3, 192–200 (147–155).

Краснов В.В. см. Цивилев А.П.

Краус А. см. Вольвач Л.Н.

Кривонос Р.А. см. Карасев Д.И.; Мереминский И.А.; Семена А.Н.

Крымский Г.Ф., Правдин М.И., Слепцов И.Е., Красильников А.Д. Наблюдение пучка ультрарелятивистских частиц и черенковский резонанс. № 9, 618–621 (576–579).

Куранов А.Г. см. Постнов К.А.

Ламзин С.А. см. Сафонов Б.С.

Лапшов И.Ю. см. Мереминский И.А.

Ларионов М.Г. см. Вольвач А.Е.; Вольвач Л.Н.

Ларченкова Т.И., Ермаш А.А., Дорошкевич А.Г. Перспективы наблюдений гравитационнолинзированных источников космическими обсерваториями субмиллиметрового диапазона. № 12, 866– 881 (821–835).

Лемаль Б. см. Бердников Л.Н.

Лобода И.П. см. Ульянов А.С.

Логвиненко С.В. см. Цивилев А.П.

Лутовинов А.А. см. Быков С.Д.

Ляпин А.Р., Буренин Р.А. Соотношение между измерениями масс скоплений галактик в рентгеновском диапазоне и по эффекту Сюняева–Зельдовича. № 7, 455–463 (403–410).

Ляпина Д.А. см. Хохрякова А.Д.

МакЛеод Г.К. см. Вольвач А.Е.; Вольвач Л.Н.

Мартьянов В.Ю. см. Кочаровский В.В.

Маршалов Д.А. см. Бондаренко Ю.С.

Матвеенко Л.И., Сиваконь С.С. Сейфертовская галактика NGC 1275 — сверхтонкая структура. № 8, 531–546 (475–489).

Машонкина Л.И. см. Пахомов Ю.В.

Машонкина Л.И., Беляев А.К. Соотношение четных и нечетных изотопов бария у избранных звезд гало Галактики. № 6, 390-402 (341-352).

Медведев П.С. см. Карасев Д.И.

Медведев П.С., Хабибуллин И.И., Сазонов С.Ю. Диагностика параметров рентгеновских струй SS 433 по данным спектроскопии высокого разрешения обсерватории CHANDRA. № 5, 344–366 (299–320).

Медведев Ю.Д. см. Бондаренко Ю.С.

Мельников А.В. см. Шевченко И.И.

Мельников В.Ф. см. Ковалев В.А.

Ментен К. см. Вольвач Л.Н.

Мереминский И.А. см. Быков С.Д; Карасев Д.И.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Мереминский И.А., Буренин Р.А., Кривонос Р.А., Лапшов И.Ю., Павлинский М.Н., Сазонов С.Ю., Ткаченко А.Ю., Филиппова Е.В., Штыковский А.Е. Популяции источников в обзоре галактической плоскости телескопом ART-XC обсерватории СРГ: моделирование. № 2, 91–100 (62–70). Меркулова О.А. см. Каратаева Г.М. Метлова Н.В. см. Окнянский В.Л. Milani F. см. Scafetta N. Минаев П.Ю. см. Позаненко А.С.; Человеков И.В.

Mittal N. см. Verma V.K.

Мишенина Т.В. см. Бердников Л.Н.

Наговицын Ю.А., Иванов В.Г., Осипова А.А. Особенности правила Гневышева-Вальдмайера для различных времен жизни и площадей групп солнечных пятен. № 10, 749–754 (695–699).

Наговицын Ю.А., Иванов В.Г., Скорбеж Н.Н. Уточнение правила Гневышева-Вальдмайера на основе 140-летнего ряда наблюдений

Наливкин М.А. см. Саванов И.С.

Нароенков С.А. см. Саванов И.С.

Нечаев А.А. см. Кочаровский В.В.

Нешпор Ю.И. см. Стригунов К.С.

Никифоров И.И., Веселова А.В. Исправления к статье "Численное исследование статистических свойств оценки расстояния до центра Галактики по геометрии сегментов спиральных рукавов" (2018, т. 44, с. 763–783). № 2, 142 (108).

Ожогина О.А. Необычное светлое образование в тени пятна NOAA 12109. Наблюдения и предварительные результаты. № 9, 673-680 (627-634).

Окнянский В.Л., Шенаврин В.И., Метлова Н.В., Гаскелл К.М. Относительная независимость ИКзапаздываний от длины волны в NGC 4151 в течение 2010—2015 гг. № 4, 237—248 (197—207).

Олеч М. см. Вольвач Л.Н.

Осипова А.А. см. Наговицын Ю.А.

Павлинский М.Н. см. Карасев Д.И.; Мереминский И.А.

Пандей Д.С. см. Саванов И.С.

Пастухова Е.Н. см. Бердников Л.Н.

Пахомов Ю.В., Машонкина Л.И., Ситнова Т.М., Яблонка П. Вклад сверхновых типа Іа в химическое обогащение карликовой галактики ультранизкой светимости Bootes I. № 5, 303–319 (259–275).

Пахомов Ю.В., Шенаврин В.И., Бондарь Н.И., Антонюк К.А., Пить Н.В., Белан С.П., Горда С.Ю. Холодные пятна на поверхности активного гиганта РZ Mon. № 3, 201–209 (156–163).

Пить Н.В. см. Пахомов Ю.В.

Питьев Н.П. см. Питьева Е.В.

Питьева Е.В., Питьев Н.П. Массы троянских групп Юпитера. № 12, 902–908 (855–860). **Позаненко А.С.** см. Человеков И.В.

Позаненко А.С., Минаев П.Ю., Гребенев С.А., Человеков И.В. Наблюдение в гамма-диапазоне второго связанного со слиянием нейтронных звезд события LIGO/Virgo S190425z. № 11, 768–786 (710–727).

Попов С.Б. см. Хохрякова А.Д.

Попова Е.А. см. Шевченко И.И.

Поппи С. см. Вольвач Л.Н.

Постнов К.А., Куранов А.Г., Симкин И.В. Возможные электромагнитные явления при слиянии двойных систем из нейтронной звезды и черной дыры. № 11, 787–798 (728–739).

Поташов М.Ш., Блинников С.И. Аналитическая модель нестационарной ионизации в оболочках сверхновых типа II на фотосферной фазе. № 5, 320–325 (276–281).

Правдин М.И. см. Крымский Г.Ф.

Разинкова Т.Л. см. Юдин А.В.

Расторгуев А.С. см. Сафонов Б.С.

Рева А.А. см. Ульянов А.С.

Решетников В.П., Усачев П.А., Савченко С.С. Видимые с ребра галактики в Сверхглубоком поле Космического телескопа "Хаббл". № 9, 607–617 (565–575).

Ригини С. см. Вольвач Л.Н.

Романихин С.М. см. Боговалов С.В.

Рубино-Мартин Х.-А. см. Зазнобин И.А.

Саванов И.С., Нароенков С.А., Наливкин М.А., Пандей Д.С., Кармакар С. Активность красного карлика FR Спс по данным наблюдений роботизированного телескопа IRT-20 Звенигородской обсерватории ИНАСАН. № 9, 646–649 (602–604).

Савченко С.С. см. Решетников В.П.

Сазонов С.Ю. см. Карасев Д.И.; Медведев П.С.; Мереминский И.А.; Семена А.Н.; Хабибуллин И.И.; Хорунжев Г.А.

Сафонов Б.С., Додин А.В., Ламзин С.А., Расторгуев А.С. Околозвездная оболочка полуправильной переменной звезды V CVn. № 7, 507–516 (453–461).

Sahin T., Dervisoglu A. High Resolution Optical Spectroscopy of a B-type Abundance Standard Candidate in Ori OB1–HD 35039. № 8, 585 (528–545).

Семена А.Н. см. Быков С.Д.

Семена А.Н., Сазонов С.Ю., Кривонос Р.А. Спектральные свойства сильно поглощенных сейфертовских галактик из обзора всего неба обсерватории ИНТЕГРАЛ. № 8, 547–577 (490–520).

Сиваконь С.С. см. Матвеенко Л.Л.

Симкин И.В. см. Постнов К.А.

Ситнова Т.М. см. Пахомов Ю.В.

Scafetta N., Milani F., Bianchini A. Multiscale Analysis of the Instantaneous Eccentricity Oscillations of the Planets of the Solar System from 13.000 BC to 17.000 AD. № 11, 830 (778–790).

Скорбеж Н.Н. см. Наговицын Ю.А.

Слепцов И.Е. см. Крымский Г.Ф.

Сомов Б.В. см. Грицык П.А.

Стригунов К.С., Жовтан А.В., Нешпор Ю.И., Борман Г.А. Многолетние наблюдения блазара Mrk 501 на черенковском телескопе ГТ-48. № 1, 3–12 (1–9).

Сыч Р.В. см. Жугжда Ю.Д.

Сюняев Р.А. см. Гребенев С.А.; Зазнобин И.А.

Тавров А.В. см. Иванова А.Е.

Тагирова Р.Р. см. Краснобаев К.В.

Тихонов Н.А., Галазутдинова О.А. Расстояния до 18 карликовых галактик из обзора Аресибо. № 11, 800–813 (750–763).

Ткаченко А.Ю. см. Карасев Д.И.; Мереминский И.А.

Тронин И.В. см. Боговалов С.В.

Удовиченко С.Н. см. Бердников Л.Н.

Ульянов А.С., Богачев С.А., Рева А.А., Кириченко А.С., Лобода И.П. Распределение энергии нановспышек в минимуме и на фазе роста 24 солнечного цикла. № 4, 290–300 (248–257).

Усачев П.А. см. Решетников В.П.

Усенко И.А. см. Бердников Л.Н.

Фадеев Ю.А. О распределении переменных типа RR Lyr шарового скопления МЗ по периоду. № 6, 403–411 (353–360).

Фадеев Ю.А. Эволюция и пульсации post-AGB звезд населения І. № 8, 578–584 (521–527).

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 47 № 2 2021

Фадеев Ю.А. Радиальные пульсации звезд на стадии финальной гелиевой вспышки. № 10, 706–715 (655–663).

Филиппова Е.В. см. Мереминский И.А.; Быков С.Д.

Хабибуллин И.И., Сазонов С.Ю. Ограничения на коллимированное рентгеновское излучение SS 433 по отражению на молекулярных облаках. № 5, 326–343 (282–298).

Хабибуллин И.И. см. Медведев П.С.

Хайду Г. см. Бердников Л.Н.

Хамитов И.М. см. Зазнобин И.А.

Хорунжев Г.А. см. Зазнобин И.А.; Карасев Д.И.

Хорунжев Г.А., Буренин Р.А., Сазонов С.Ю., Зазнобин И.А., Еселевич М.В., Афанасьев В.Л., Додонов С.Н. Оптическое отождествление новых кандидатов в квазары на 3 < *z* < 5.5 из рентгеновского обзора обсерватории ХММ-Ньютон. № 7, 464–479 (411–426).

Хорунжев Г.А., Сазонов С.Ю., Буренин Р.А. Исправления к статье

"Рентгеновская функция светимости квазаров на 3 < z < 5 по данным Случайного обзора обсерватории XMM-Newton" (2018, т. 44, с. 546–568). № 3, 220–224 (186).

Хохрякова А.Д., Ляпина Д.А., Попов С.Б. Перспективы регистрации рентгеновских вспышек, сопутствующих быстрым радиовсплескам, на телескопе СРГ/еРОЗИТА. № 3, 163–169 (120–126).

Цветков А.С., Амосов Ф.А. Кинематические параметры поля скоростей звезд области вокруг Солнца радиусом до 3 кпк по данным каталога GAIA Data Release 2 with Radial Velocities. № 7, 517–528 (462–473).

Цивилев А.П., Краснов В.В., Логвиненко С.В. Рекомбинационные радиолинии в Орионе А на 8 и 13 мм: ионизационная структура и эффективная температура звезды α^1 С Огі, электронная температура ионизованного газа и турбулентность. № 1, 24–34 (20–29).

Человеков И.В. см. Позаненко А.С.

Человеков И.В., Гребенев С.А., Позаненко А.С., Минаев П.Ю. Новые гамма-всплески, найденные в архивных данных телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL. № 9, 683–705 (635–654).

Чугай Н.Н. Ветер предсверхновой типа IIn SN 1997еg. № 2, 101–112 (71–80).

Чугай Н.Н. Источник свечения сверхновой ASASSN-15пх с продолжительной линейной кривой блеска. № 7, 480-488 (427-444).

Шаляпина Л.В. см. Каратаева Г.М.

Шашкова И.А. см. Иванова А.Е.

Шевченко И.И., Мельников А.В., Попова Е.А., Бобылев В.В., Карелин Г.М. Циркумбинарные планетные системы в Солнечной окрестности: устойчивость и обитаемость. № 9, 666–672 (620–626).

Шенаврин В.И. см. Окнянский В.Л.; Пахомов Ю.В.

Штыковский А.Е. см. Мереминский И.А.

Шульман С.Г., Гринин В.П. Влияние дискового ветра на собственную поляризацию молодых звезд. № 6, 435–446 (384–395).

Шульман С.Г., Гринин В.П. Влияние крупномасштабных возмущений в околозвездных дисках на параметры линейной поляризации звезд типа UX Ori. № 10, 716–730 (664–676).

Юдаев А.В. см. Иванова А.Е.

Юдин А.В., Разинкова Т.Л., Блинников С.И. Маломассивные нейтронные звезды с вращением. № 12, 893-901 (847-854).

Яблонка П. см. Пахомов Ю.В. **Яковлева В.А.** см. Каратаева Г.М.

Памяти Николая Семеновича Кардашева (25.04.1932-03.08.2019). № 10, 755-756. Памяти Леонида Ивановича Матвеенко (20.12.1929-13.10.2019). № 11, 831-832.