СОДЕРЖАНИЕ

Том 46, номер 3, 2020

-

Г. А. Хорунжев, А. В. Мещеряков, Р. А. Буренин, А. Р. Ляпин, П. С. Медведев, С. Ю. Сазонов, М. В. Еселевич, Р. А. Сюняев, М. Р. Гильфанов	155
$BVI_cg'r'i'$ наблюдения и поиск эволюционных изменений периода цефеиды V1467 Cyg	
Л. Н. Бердников, А. А. Белинский, Е. Н. Пастухова, М. А. Бурлак, Н. П. Иконникова, Е. О. Мишин	163
Сверхбыстрая переменность профилей линий в спектрах $ ho$ Leo: новые результаты	
А. Ф. Холтыгин, Н. П. Иконникова, А. В. Додин, О. А. Циопа	175
Активность молодого солнечного аналога — звезды с экзопланетой DS Tuc И. С. Саванов, Е. С. Дмитриенко	184
Управляемое движение солнечного паруса в окрестности коллинеарной точки либрации Д. В. Шиманчук, А. С. Шмыров, В. А. Шмыров	193
Спектральный режим камеры ASTRONIRCAM	
С. Г. Желтоухов, А. М. Татарников, Н. И. Шатский	201
Предметный указатель (том 45, 2019 г.)	212
Правила для авторов	223

ПЕРВЫЕ ДАЛЕКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ КВАЗАРЫ (*z*~4) СРЕДИ ИСТОЧНИКОВ, ОТКРЫТЫХ ТЕЛЕСКОПОМ еРОЗИТА ОРБИТАЛЬНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ СРГ В ХОДЕ ГЛУБОКОГО ОБЗОРА ОБЛАСТИ ДЫРЫ ЛОКМАНА

© 2020 г. Г. А. Хорунжев^{1*}, А. В. Мещеряков^{1,2}, Р. А. Буренин¹, А. Р. Ляпин¹, П. С. Медведев¹, С. Ю. Сазонов¹, М. В. Еселевич³, Р. А. Сюняев^{1,4}, М. Р. Гильфанов^{1,4}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия ²Казанский федеральный университет, Казань, Россия ³Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия ⁴Институт астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг, Германия Поступила в редакцию 02.02.2020 г. После доработки 25.02.2020 г.

В ходе глубокого обзора внегалактической области неба *Дыра Локмана* площадью 18.5 кв. град, проведенного во время перелета обсерватории СРГ в точку L2, телескоп еРОЗИТА зарегистрировал около семи тысяч рентгеновских источников. Эти объекты были затем предварительно отождествлены и классифицированы, используя общедоступные данные оптических и инфракрасных обзоров неба, с помощью разработанной для этой цели в ИКИ РАН системы машинного обучения SRGz. В результате был отобран ряд новых кандидатов в далекие квазары ($z \sim 4$). Проведенные на 1.6-метровом телескопе АЗТ-33ИК Саянской обсерватории спектроскопические наблюдения первых двух кандидатов из этого списка подтвердили, что эти объекты действительно являются далекими квазарами на красных смещениях 3.878 и 4.116 и характеризуются высокой рентгеновской светимостью $\sim 10^{45}$ эрг/с (2–10 кэВ). Полученные результаты позволяют рассчитывать на обнаружение большого количества далеких квазаров в ходе начатого в декабре 2019 г. четырехлетнего обзора всего неба обсерватории СРГ.

Ключевые слова: активные ядра галактик, рентгеновские обзоры, фотометрические красные смещения, спектроскопия, XMM-Newton

DOI: 10.31857/S0320010820030031

ВВЕДЕНИЕ

Запущенная 13 июля 2019 г. рентгеновская обсерватория СРГ (Сюняев и др., 2020) успешно работает на орбите вокруг точки Лагранжа L2 системы Земля—Солнце. Основная цель обсерватории — обзор всего неба в широком диапазоне энергий 0.2—30 кэВ продолжительностью 4 года. В ходе обзора предполагается открыть около трех миллионов активных ядер галактик (АЯГ), в том числе далеких квазаров (Колодзиг и др., 2013а,b), около ста тысяч скоплений и групп галактик, а также сотни тысяч рентгеновских источников различной природы в нашей Галактике. Ожидается, что обзор неба обсерватории СРГ будет примерно в 25 раз чувствительней в мягком рентгеновском

диапазоне (0.5–2 кэВ) предыдущего обзора всего неба, который был проведен спутником РОСАТ в начале 90-х годов XX века, и поможет решить ряд важнейших задач современной астрофизики и космологии. Одними из них являются измерение эволюции функции светимости АЯГ с красным смещением и восстановление истории роста сверхмассивных черных дыр во Вселенной.

Во время перелета обсерватории СРГ в точку Лагранжа L2 проводились включение и тестирование телескопов АРТ-ХС и еРОЗИТА, после чего началась фаза калибровочных и проверочных наблюдений (Calibration and Performance Verification Phase, Cal/PV-фаза) различных объектов и участков неба, которая продлилась до 8 декабря 2019 г., когда начался обзор неба. Для проверочных наблюдений выбирались мишени, представляющие

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

самостоятельный научный интерес, а целью этих наблюдений являлись проверка функционирования научной аппаратуры в различных режимах в условиях реальных наблюдений, уточнение фактических характеристик телескопов, настройка и отладка математического обеспечения для обработки данных, а также получение оригинальных научных данных.

Одной из мишеней российской части PV-фазы телескопа ePO3ИTA был участок неба вокруг Дыры Локмана (Lockman Hole, LH) — области на небе, где поглощение межзвездного газа и пыли в нашей Галактике минимально (колонковая плотность атомов водорода на луче зрения $N_{\rm H} \sim 5 \times 10^{19}~{\rm cm}^{-2}$). Это уникальный участок на небе — "окно" с максимальной прозрачностью для мягких рентгеновских лучей, сквозь которое мы можем наблюдать объекты за пределами нашей Галактики с минимальными искажениями в их спектре. В этой области газ и пыль нашей Галактики слабее всего поглощают мягкий рентген и меньше всего мешают обнаружению скоплений галактики и АЯГ.

Проведен глубокий рентгеновский обзор Дыры Локмана площадью 18.5 кв. град и чувствительностью $\sim 4 \times 10^{-15}$ эрг/с/см² в диапазоне 0.5-2 кэВ. Общая продолжительность обзора составила 180 000 с. Обзор обсерватории СРГ стал самым большим по площади обзором области Дыры Локмана. Кроме того, это первый внегалактический рентгеновский обзор такой площади и чувствительности, данные которого полностью принадлежат российским ученым. На настоящий момент существует всего лишь один обзор с аналогичными характеристиками — это обзор XMM-XXL (Пьерр и др., 2016; Менцель, 2016; Георгакакис и др., 2015) обсерватории XMM-Newton, состоящий из двух площадок размером 25 кв. град каждая, расположенных в северном и южном полушариях: XMM-XXL-North и XMM-XXL-South. В обзоре XMM-XXL удалось достигнуть высокой средней чувствительности $\sim 5 \times 10^{-15}$ эрг/с/см², но при этом потрачено в несколько раз больше времени, чем потребовалось телескопу еРОЗИТА на обзор сравнимой глубины и площади.

Одними из главных задач обзора Дыры Локмана являются создание статистически значимой выборки далеких рентгеновских квазаров с контролируемой полнотой и оценка их функции светимости с целью исследования истории роста сверхмассивных черных дыр в ранней Вселенной.

В данной статье представлены результаты первых спектроскопических наблюдений на телескопе АЗТ-ЗЗИК Саянской обсерватории двух кандидатов в далекие рентгеновские квазары, открытых в ходе наблюдений Дыры Локмана телескопом еРОЗИТА обсерватории СРГ. Поиск кандидатов в далекие квазары в каталоге рентгеновских источников, зарегистрированных телескопом еРОЗИТА, осуществлялся системой оптического отождествления рентгеновских источников SRGz (Мещеря- ков и др., 2020). Система SRGz осуществляет автоматический поиск наиболее вероятного оптического партнера рентгеновского источника и его классификацию, а также определяет фотометрическое красное смещение объекта (в виде точечного прогноза и полного распределения вероятности) на основе фотометрических признаков оптических источников в обзорах неба с помощью методов машинного обучения. Система SRGz создана в рабочей группе по поиску рентгеновских источников, их отождествлению и составлению каталога по данным телескопа еРОЗИТА в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ РАН в рамках подготовки к обзору всего неба обсерватории СРГ.

РЕНТГЕНОВСКИЕ ДАННЫЕ

Наблюдения Дыры Локмана проводились в режиме растрового сканирования. Этот режим имеет заметные преимущества по сравнению со стандартным для большинства современных рентгеновских обсерваторий мозаичным режимом наблюдения, при котором поле обзора покрывается отдельными точечными наведениями. Режим растрового сканирования позволяет получать рентгеновские изображения участков неба большой площади с примерно постоянными по изображению чувствительностью и функцией отклика на точечный источник.

Область покрытия обзора составила 5 × imes 3.7 кв. град с координатами центра $\mathrm{RA} = 10\mathrm{h}35'$ и DEC = +57d38'. Общая продолжительность обзора составила 180 кс, а среднее время экспозиции — около 8 кс. Это позволило достигнуть глубины по потоку около 4×10^{-15} эрг/с/см² в диапазоне 0.5-2 кэВ. Регистрация источников проводилась с помощью программного обеспечения обработки данных рентгеновского телескопа еРОЗИТА. Всего было обнаружено около 6900 рентгеновских источников. Средняя поверхностная плотность на небе рентгеновских источников в обзоре составила примерно 370 ист./кв. град, что сравнимо с плотностью источников в известных рентгеновских обзорах обсерваторий Чандра и XMM-Newton с близкими к обзору Дыры Локмана характеристиками: XBootes площадью 9.3 кв. град (Мюррей, 2005) и XMM-XXL-North площадью 18.5 кв. град (Менцель, 2016). Примерно 20% площади обзора Дыры Локмана было ранее исследовано обсерваториями POCAT, XMM-Newton и Чандра.

ПЕРВЫЕ ДАЛЕКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ

Name	RA	DEC	POS_ERR	DET_LIKE	ML_FLUX
SRGe J104738.0+561019	161.90853	+56.17184	3.4	12.6	$(0.50 \pm 0.14) \times 10^{-14}$
SRGe J105028.2+554611	162.61743	+55.76975	4.2	7.2	$(0.42 \pm 0.16) \times 10^{-14}$

Таблица 1. Рентгеновские свойства канидидатов в далекие квазары

Примечание. Name — название рентгеновского источника, RA и DEC — координаты рентгеновского источника на эпоху J2000, POS_ERR — 1σ ошибка на положение рентгеновского источника, DET_LIKE — значение функции максимального правдоподобия детектирования источника, ML_FLUX — рентгеновский поток и соответствующая ошибка в диапазоне 0.5–2 кэВ в единицах эрг/с/см².

ОТБОР ОПТИЧЕСКИХ КАНДИДАТОВ

Мы провели кросс-корреляцию в радиусе 10 угл. сек для всех рентгеновских источников СРГ/еРОЗИТА из обзора Дыры Локмана с каталогом оптических источников SDSS DR14 (Аболфати и др., 2018), имеющих принудительную фотометрию WISE (Лэнг, 2016) в инфракрасном диапазоне. Радиус 10 угл. сек в \sim 2 раза превышает характерную ошибку локализации источников еРОЗИТЫ. Полученный фотометрический каталог оптических кандидатов рентгеновских источников был обработан системой SRGz версии 1.7, которая оперирует в области покрытия фотометрического обзора SDSS и анализирует данные широкополосной оптической (фильтры u, g, r, i, z SDSS) и инфракрасной (фильтры W1 и W2 WISE) фотометрии.

SRGz представляет собой набор программных компонент, последовательно решающих задачи автоматического поиска (кросс-отождествления) наиболее вероятного оптического компаньона рентгеновского источника, его классификации (по схеме звезда/квазар/галактика) и измерения фотометрического красного смещения (photo-z). SRGz построен на использовании ансамблевых древовидных алгоритмов машинного обучения (градиентный бустинг и случайный лес деревьев решений, см. Мещеряков и др. (2018)), которые обучаются на выборках квазаров, галактик и звезд из спектроскопического каталога (SDSS и других обзоров). Для обучения эмпирической модели кросс-отождествления используются выборки оптических источников в окрестности рентгеновских объектов из "случайного" обзора обсерватории XMM-Newton (XMM-Newton Serendipitous Source Catalog DR8, Розен и др. (2016)). Подробнее принципы работы системы SRGz и реализованные в ней алгоритмы будут представлены в отдельной статье (Мещеряков и др., 2020).

С помощью SRGz для всех оптических кандидатов была рассчитана вероятность ассоциации с рентгеновским источником match p, в которой учитывалась информация об ошибке положения рентгеновского объекта, плотности оптических источников в поле и фотометрических признаках оптического объекта. В качестве наиболее вероятного оптического компаньона для каждого рентгеновского источника отбирался оптический объект с максимальным значением match p. Далее, были отсеяны все оптические объекты, имеющие класс "звезда" (cph = STAR), согласно фотометрическому классификатору SRGz. Наконец, мы отобрали объекты с измерением фотометрического красного смещения $z_{\rm ph} > 3$ и достоверностью прогноза zConf > 0.5. Под достоверностью прогноза photo-z принималась величина zConf, которая рассчитывалась стандартным образом как интеграл плотности вероятности P(z) в окрестности прогноза $z_{\rm ph} \pm 0.06(1+z_{\rm ph})$.

В полученный таким образом список кандидатов в далекие квазары попали: 31 объект с ранее известным спектроскопическим красным смещением z > 3 и 20 источников, для которых ранее не было спектральных измерений. Для этих новых кандидатов в далекие квазары нами была начата программа спектроскопических наблюдений на оптических телескопах.

Для первых наблюдений на 1.6-м телескопе A3T-33ИК Саянской обсерватории были отобраны два объекта: SRGe J104738.0+561019 и SRGe J105028.2+554611 (табл. 1). На рис. 1 представлены изображения возможных оптических компаньонов этих рентгеновских источников, взятые из архива обзора Pan-STARRS в фильтре i_{PS} . Все эти оптические объекты регистрируются также и в обзоре SDSS. На рис. 2 показаны рентгеновские изображения участков неба размером 2×2 угл. мин вокруг источников SRGe J104738.0++561019 и SRGe J105028.2+554611.

В область локализации рентгеновского источника SRGe J104738.0+561019 попадает несколько оптических источников (табл. 2). Наиболее вероятный (согласно значению *match_p*) кандидат

Name SRGe	№	OBJID SDSS	RAopt	DECopt	sep	i'_{psf}	$match_p$	cph	$z_{ m ph}$	zConf
J104738.0+561019	1	1237657771787092008	161.90789	+56.17127	2.4	19.89	0.641	QSO	4.125	0.84
	2	1237657771787092007	161.91056	+56.17272	5.2	17.00	0.007			
	3	1237657771787092010	161.90568	+56.17394	9.5	22.59	0.025			
J105028.2+554611	1	1237657771250352523	162.61453	+55.76926	6.1	20.61	0.746	QSO	3.874	0.91

Таблица 2. Свойства возможных оптических партнеров

Примечание. Name SRGe — название рентгеновского источника, $\mathbb{N}_{\mathbb{P}}$ — порядковый номер оптического источника на соответствующем изображении, OBJID SDSS — уникальный номер в фотометрическом каталоге SDSS DR14, RAopt и DECopt — координаты источника в фотометрическом каталоге SDSS, sep — угловое расстояние между положениями рентгеновского и оптического источников (угл. сек), i'_{psf} — видимая звездная величина в фильтре i' SDSS, $match_p$ — вероятность того, что данный оптический источник является компаньоном рентгеновского источника, cph — фотометрический класс (QSO — квазар), z_{ph} — фотометрическое красное смещение, zConf — достоверность измерения z_{ph} .

(источник № 1, см. рис. 1), проходящий под номером OBJID 1237657771787092008 в каталоге SDSS, находится ближе других к центру локализации рентгеновского источника. Он классифицируется системой SRGz как квазар на $z_{\rm ph} = 4.125$ с высокой достоверностью фотометрической оценки красного смещения zConf = 0.84. Отметим, что ранее этот объект уже рассматривался как кандидат в далекие квазары в каталоге Ричардс и др. (2015), причем тоже с $z_{\rm ph} = 4.125$. Остальные оптические объекты, попадающие в область локализации, имеют на порядок меньшие значения match р и находятся дальше от положения рентгеновского источника. Интересно, что оптический источник № 2 примерно в 14 раз ярче в оптике, чем источник № 1, но при этом имеет более низкую вероятность отождествления с рентгеновским источником и, кроме того, является звездой по классификации SRGz. Поиск по базе данных Vizier (Охзенбейн, 2000) подтвердил эту гипотезу: источник № 2 имеет значимый параллакс в астрометрическом каталоге GAIA DR2 и является звездой класса F9, согласно спектроскопическим данным проекта LAMOST (Баи и др., 2018).

В область локализации рентгеновского источника SRGe J105028.2+554611 попадает только один оптический источник (объект № 1, см. рис. 1 и табл. 2). Он же имеет максимальное значение вероятности отождествления с рентгеновским источником *match_p*. Полученная для него фотометрическая оценка красного смещения составляет $z_{\rm ph} = 3.874$. Отметим, что этот оптический объект упоминается также в каталоге Ричардс и др. (2015), где для него приводится оценка $z_{\rm ph} = 3.700$.

НАБЛЮДЕНИЯ НА АЗТ-ЗЗИК

Мы получили спектры обоих кандидатов в квазары на $z \sim 4$ на 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК (Камус и др., 2002), расположенном в Саянской солнечной обсерватории Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ССО ИСЗФ СО РАН). Телескоп входит в комплекс наземной поддержки рентгеновской обсерватории СРГ. В 2015 г. он был оборудован спектрографом низкого и среднего разрешения АДАМ (Афанасьев и др., 2016; Буренин и др., 2016). С помощью этого оборудования можно уверенно определять красные смещения квазаров с контрастными эмиссионными линиями ярче i' < 21 вплоть до красных смещений $z \sim 6$ (Буренин и др., 2016; Хорунжев и др., 2017, 2020).

Телескоп АЗТ-ЗЗИК имеет диаметр главного зеркала 1.6 метра. Спектрограф АДАМ изготовлен в Специальной астрофизической обсерватории (САО) по заказу ИКИ РАН при поддержке "Роскосмоса". Основные конструктивные элементы спектрографа: ПЗС-матрица Andor Newton 920 с эффективностью около 90% в диапазоне от 4000 до 8500 Å и набор диспергирующих элементов (объемно-фазовых голографических решеток). Квантовая эффективность всей системы (зеркала телескопа, спектрограф, решетки и ПЗС-матрица) достигает 50% (Буренин и др., 2016).

Для описываемых наблюдений использовались щель шириной 2 угл. сек и решетка VPHG600G (диапазон 3700–7340 Å, разрешение 8.8 Å). Наблюдения проводились в темное время (фаза Луны меньше 0.3) и при средних величинах дрожания атмосферы меньше 2 угл. сек.



Рис. 1. Изображение в фильтре *i*_{PS} Pan-STARRS возможных оптических компаньонов рентгеновских источников SRGe J104738.0+561019 и SRGe J105028.2+554611. Крестом отмечен наиболее вероятный оптический партнер для данного рентгеновского источника. Круг радиусом 10 угл. сек обозначает область гарантированной локализации рентгеновского источника. Для возможных оптических кандидатов за пределами этой области вероятность *match_p* меньше 0.001.



Рис. 2. Изображения источников SRGe J104738.0+561019 и SRGe J105028.2+554611 в рентгеновском диапазоне 0.5–2 кэВ. Размер изображений 1.5 × 1.5 угл. мин. Пронумерованными кружками помечены положения оптических источников из табл. 2. Красный круг имеет радиус 10 угл. сек.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные на АЗТ-ЗЗИК спектры предполагаемых оптических компаньонов — кандидатов в далекие квазары SRGe J104738.0+561019 и SRGe J105028.2+554611 — показаны на рис. 3. Их обработка проводилась с помощью стандартного математического обеспечения IRAF¹. Спектральный поток поправлялся за щель. Форма

¹ http://iraf.noao.edu

SRGeJ104738.0 + 561019 z = 4.116 $\times 10$ SRGeJ105028.2 + 554611 z = 3.8787 4.06 3.5 SiIV 5 3.0 F_{λ} , erg/s/cm²/Å r_{λ} , erg/s/cm²/Å 4 2.5 3 2.0 2 1.5 1.0 1 0 0.5 0 $^{-1}$ 4500 5000 5500 6000 6500 7000 5000 5500 6000 6500 7000 4500 Wavelength, Å Wavelength, Å

Рис. 3. Спектры квазаров СРГ/еРОЗИТА, полученные на телескопе АЗТ-ЗЗИК. Соседние спектральные каналы сгруппированы по два вдоль оси длин волн.

спектров исправлена с использованием наблюдений спектрофотометрических стандартов из списка (Массей и др., 1988).

SRGeJ104738.0 + 561019

В полученном спектре хорошо видны эмиссионные линии Ly α и [NV] (а также, возможно, линия [OVI]), по положению пиков которых уверенно определяется красное смещение объекта: $z_{\text{spec}} =$ = 4.116 ± 0.008 (среднеарифметическое значение по указанным двум ярким линиям). Полученное значение прекрасно согласуется с фотометрической оценкой красного смещения ($z_{\text{ph}} = 4.125$), полученной с помощью системы SRGz.

$$SRGeJ105028.2 + 554611$$

Как и в предыдущем случае, в полученном спектре выделяются эмиссионные линии Ly α и [NV] (кроме того, есть указание на присутствие линии [SiIV]), по которым удалось надежно измерить красное смещение объекта: $z_{\rm spec} = 3.878 \pm 0.009$. Это значение хорошо согласуется с нашей оценкой $z_{\rm ph} = 3.874$. Отметим, что объект имеет видимую звездную величину $i'_{\rm psf} = 20.61$. Получение спектра столь слабого источника является выдающейся задачей для телескопа 1.5-метрового класса.

Спектральные свойства и светимость квазаров

Таким образом, проведенные спектральные наблюдения подтвердили, что оба исследованных объекта являются далекими квазарами на $z \sim 4$. Измеренные красные смещения, а также потоки в рентгеновском и оптическом диапазонах позволяют определить светимость этих объектов в соответствующих диапазонах.

Для расчета рентгеновских светимостей в диапазоне 2-10 кэВ в системе покоя источника L_x использовались следующие космологические параметры: 69.6 км/с/Мпк и $\Omega_M = 0.286$. Предполагалось, что рентгеновские спектры квазаров описываются степенным законом с наклоном Г = = 1.8. Кроме того, в тех же предположениях были рассчитаны рентгеновская $(L_{2 \text{ keV}})$ и оптическая (L_{2500 Å}) монохроматические светимости. При расчете L_{2500 Å} дополнительно предполагалось, что оптический спектр может быть описан шаблоном среднего спектра квазаров Ванден Берк и др. (2001), нормировка которого определялась видимой звездной величиной в фильтре z' SDSS. Полученные значения светимостей приведены в табл. З.

Оказалось, что отношение рентгеновской и оптической светимостей обоих квазаров попадает в типичный диапазон значений для квазаров и хорошо согласуется с известной зависимостью этого отношения от светимости, приведенной в статье Люссо и др. (2010).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найдены первые далекие квазары среди рентгеновских источников, открытых телескопом еРОЗИТА орбитальной обсерватории СРГ в ходе глубокого обзора области Дыры Локмана. Проведена проверка системы отождествления, классификации и фотометрического определения красных смещений SRGz. Система SRGz создана

ПЕРВЫЕ ДАЛЕКИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ

Name SRGe	OBJID SDSS	z'_{psf}	$z_{ m spec}$	DATE	EXP	FX/FO	LX	$L_{2 \rm keV}$	$L_{2500~{\rm \AA}}$
J104738.0+561019	1787092008	19.82	4.116 ± 0.008	05/12/2019	3600	0.27	0.97	27.02	31.28
J105028.2+554611	1250352523	20.32	3.878 ± 0.009	05/12/2019	7200	0.36	0.71	26.89	31.03

Таблица 3. Спектральные свойства обнаруженных квазаров

Примечание. Name SRGe — название рентгеновского источника, OBJID SDSS — уникальный номер оптического партнера в фотометрическом каталоге SDSS DR14, z'_{psf} — видимая psf звездная величина в фильтре z' SDSS, z_{spec} — измеренное спектроскопическое красное смещение и его ошибка, DATE — день/месяц/год наблюдения источника, EXP — общее время экспозиции в секундах, FX/FO — отношение наблюдаемых рентгеновского (0.5–2 кэВ) и оптического (z'_{psf} SDSS) потоков, LX — рентгеновская светимость $\times 10^{45}$ эрг/с в диапазоне 2–10 кэВ в системе покоя квазара, $L_{2 \text{ keV}}$ — десятичный логарифм монохроматической рентгеновской светимости на энергии 2 кэВ в системе покоя квазара в эрг/с/Гц, $L_{2500 \text{ Å}}$ — десятичный логарифм монохроматической оптической светимости на длине волны 2500 Å

в рабочей группе по поиску и отождествлению рентгеновских источников и составлению каталогов по данным телескопа еРОЗИТА в отделе астрофизики высоких энергий ИКИ РАН. Первые спектральные наблюдения кандидатов в далекие рентгеновские квазары, открытых телескопом еРОЗИТА обсерватории СРГ, показали, что система SRGz правильно отождествляет такие объекты, а ее результаты по фотометрическому измерению красных смещений рентгеновских источников хорошо согласуются с результатами оптической спектроскопии. Оба исследованных объекта действительно оказались квазарами на $z \sim 4$.

Стоит отметить, что в недавно вышедший спектральный каталог SDSS DR16 (Ахумада, 2019), в область покрытия которого входит область Дыры Локмана, было включено несколько новых квазаров на z > 3. Однако в нем нет квазаров, обнаруженных в настоящей работе.

Спектроскопическая проверка кандидатов в далекие рентгеновские квазары СРГ будет продолжена на 6-м телескопе БТА, 1.6-м телескопе АЗТ-ЗЗИК и на 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150. Программное обеспечение SRGz продолжает совершенствоваться и будет использовано для оптического отождествления источников, открываемых телескопами обсерватории СРГ в ходе обзора всего неба.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на АЗТ-33ИК проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Ангара" http://ckp-rf.ru/ckp/ 3056. Работа оборудования телескопа АЗТ-33ИК осуществляется в рамках базового финансирования программы ФНИ II.16. При обработке данных телескопа еРОЗИТА обсерватории СРГ использовалось программное обеспечение, в частности eSASS, разработанное в институте внеземной физики общества им. Макса Планка (Германия).

Космический аппарат "Спектр-РГ" (СРГ) разработан в АО "НПО Лавочкина" (входит в Госкорпорацию "Роскосмос"). "Спектр-РГ" создан с участием Германии в рамках Федеральной космической программы России по заказу Российской академии наук. Оперативное управление КА "Спектр-РГ" осуществляется АО "НПО Лавочкина".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Алам и др. (S. Alam, F. Albareti, C. Prieto, F. Anders, S. Anderson, B. Andrews, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **219**, 12 (2015).
- 2. Аболфати и др. (B. Abolfathi, D. Aguado, G. Aguilar, P. Allende, A. Almeida, T. Ananna, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **235**, 42 (2018).
- 3. Ахумада и др. (R. Ahumada, C. Allende, A. Almeida, F. Anders, A. Scott, B. Andrews, et al.), https://arxiv.org/abs/1912.02905
- Афанасьев В., Додонов С., Амирханян В., Моисеев А. Астрофизич. Бюлл. Астрофизич. Бюлл. 71, 514 (2016).
- 5. Бай (Y. Bai, J. Liu, J. Wicker, S. Wang, J. Guo, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **235**, 16 (2018).
- 6. Браун (A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. de Bruijne, C. Babusiax, C. Bailer-Jones, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 1 (2018).
- Буренин и др. (Р.А. Буренин, А.Л. Амвросов, М.В. Еселевич, В.М. Григорьев, В.А. Арефьев, В.С. Воробьев, и др.), Письма в Астрон. журн. 42, 333, 2016. [R. A. Burenin, et al., Astron. Lett. 42, 295 (2016)].
- 8. Ванден Берк и др. (D. Vanden Berk, G. Richards, A. Bauer, M. Strauss, D. Schneider, and T. Heckman). Astron. J. **122**, 549 (2001).

- 9. Георгакакис и др. (A. Georgakakis, J. Aird, J. Buchner, M. Salvato, M. Menzel, W. Brandt, et al.), MNRAS. 453, 1946 (2015).
- Камус С.Ф., Тергоев В.И., Папушев П.Г., Дружинин С.А., Караваев Ю.С., Палачев Ю.М., Денисенко С.А., Липин Н.А., Оптический журн. 69, 84 (2002). [S.F. Kamus, S.A. Denisenko, N.A. Lipin, V.I. Tergoev, P.G. Papushev, S.A. Druzhinin, Yu.S. Karavaev, Yu.M. Palachev, J. Optical Technology 69, 674 (2002)].
- 11. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, R. Sunyaev, S. Sazonov, and M. Brusa), Astron. Astrophys. **558**, A89 (2013).
- 12. Колодзиг и др. (A. Kolodzig, M. Gilfanov, G. Huetsi, and R. Sunyaev), Astron. Astrophys. **558**, A90 (2013).
- 13. Лэнг (D. Lang) Astron. J. 147, 108 (2014).
- 14. Лэнг и др. (D. Lang, D. Hogg, and D. Schlegel), Astron. J. **151**, 36 (2016).
- 15. Люссо и др. (E. Lusso, A. Comastri, C. Vignali, G. Zamorani, M. Brusa, R. Gilli, K. Iwasawa, M. Salvato, et al.), Astron. Astrophys. **512**, 34 (2010).
- 16. Массей и др. (Р. Massey, K. Strobel, J. Barnes, and E. Anderson), Astrophys. J. **328**, 315 (1988).
- 17. Мейснер и др. (A. Meisner, D. Lang, and D. Schlegel), arXiv:1705.06746.
- 18. Менцель и др. (M. Menzel, A. Merloni, A. Georgakakis, M. Salvato, E. Aubourg, W. Brandt, et al.), MNRAS. **457**, 110 (2016).
- Мерлони и др. (A. Merloni, P. Predehl, W. Becker, H. Bohringer, T. Boller, H. Brunner, et al.), eROSITA Science Book, (2014). http://arxiv.org/pdf/ 1209.3114v2.pdf
- 20. Мещеряков (А. Мещеряков), in preparation (2020).
- Мещеряков А., Глазкова В., Герасимов С., Буренин Р., Письма в Астрон. журн. 41, 339 (2015), [A. Mescheryakov, et al., Astrom. Lett. 41, 307 (2015)].
- 22. Мещеряков и др. (А. Мещеряков, В. Глазкова, С. Герасимов, И. Машечкин), Письма в Астрон.

журн. **44**, 801 (2018). [A. Mescheryakov, et al., Astron. Lett. **44**, 735 (2018)].

- 23. Мюррей и др. [(S. Murray, A. Kenter, W. Forman, C. Jones, P. Green, C. Kochanek, et al.), Astrophys. J. **161**, 1 (2005)].
- 24. Охзенбейн и др. (F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 143, 23 (2000).
- 25. Павлинский и др. (M. Pavlinsky, V. Akimov, V. Levin, I. Lapshov, A. Tkachenko, N. Semena, et al.), Proceedings of the SPIE **8147**, 5 (2011).
- 26. Прусти и др. (T. Prusti, J. de Bruijne, A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, C. Bailer-Jones, et al.), Astron. Astrophys, **595**, 1 (2016).
- 27. Пьерр и др. (M. Pierre, F. Pacaud, C. Adami, S. Alis, B. Altieri, N. Baran, et al.), Astron. Astrophys. **592**, 1 (2016).
- 28. Райт и др. (E. Wright, P. Eisenhardt, A. Mainzer, M. Ressler, R. Cutri, T. Jarrett, et al.), Astron. J. **140**, 1868 (2010).
- 29. Розен и др. (S. Rosen, N. Webb, M. Watson, J Ballet, D. Barret, V. Braito, et al.), Astron. Astrophys. **590**, A1 (2016).
- 30. Ричардс и др. (G. Richards, A. Myers, C. Peters, C. Krawczyk, G. Chase, N. Ross, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **219**, 39 (2015).
- 31. Сюняев и др. (R. Sunyaev, et al.), готовится к печати (2020).
- Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, Р.А. Буренин, С.Ю. Сазонов, А.Л. Амвросов, М.В. Еселевич), Письма в Астрон. журн. 43, 159 (2017).
 [G.A. Khorunzhev, et al., Astron. Lett. 43, 135 (2017)].
- Хорунжев и др. (Г.А. Хорунжев, Р.А. Буренин, С.Ю. Сазонов., И.А. Зазнобин, М.В. Еселевич), подана в печать (2020).

BVIcg'r'i НАБЛЮДЕНИЯ И ПОИСК ЭВОЛЮЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПЕРИОДА ЦЕФЕИДЫ V1467 Суд

© 2020 г. Л. Н. Бердников^{1*}, А. А. Белинский¹, Е. Н. Пастухова², М. А. Бурлак¹, Н. П. Иконникова¹, Е. О. Мишин¹

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

> ²Институт астрономии РАН, Москва, Россия Поступила в редакцию 20.02.2020 г. После доработки 20.02.2020 г.; принята к публикации 25.02.2020 г.

На 60-см телескопе Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ получены $BVI_cg'r'i'$ наблюдения классической цефеиды V1467 Суg. Привлечение всей доступной фотометрии позволило построить O-C диаграмму, охватывающую временной интервал 107 лет. Это позволило впервые вычислить скорость эволюционного уменьшения периода V1467 Суg $dP/dt = -431.5 ~(\pm 8.2) ~c/$ год, что согласуется с результатами модельных расчетов для второго пересечения полосы нестабильности. Тест на стабильность пульсаций, предложенный Ломбардом и Коэном, подтвердил реальность эволюционных изменений периода.

Ключевые слова: цефеиды, изменяемость периодов, эволюция звезд.

DOI: 10.31857/S0320010820030018

ВВЕДЕНИЕ

Согласно теории, О-С диаграммы цефеид за время пересечения полосы нестабильности могут быть аппроксимированы многочленом степени три или выше (Ферни 1990), которые на типично наблюдаемом интервале времени (порядка столетия) выглядят как параболы или, в редких случаях, кубические параболы. Обнаружение парабол на О-С диаграммах позволяет вычислить скорости наблюдаемых эволюционных изменений периодов. Сравнение их с модельными расчетами для разных пересечений полосы нестабильности позволяет идентифицировать номер пересечения, что, в перспективе, даст возможность построить зависимость период-светимость отдельно для каждого пересечения, что, в свою очередь, приведет к более точному определению расстояний цефеид.

Согласно теории звездной эволюции, чем больше масса (а значит, и период) цефеиды, тем быстрее она эволюционирует и тем легче обнаружить параболу на ее O-C диаграмме; в частности, для цефеид с периодами больше 30 дней параболы должны быть обнаружимы уже на 30-летнем интервале времени (Ферни, 1990; Фадеев, 2014). Мы изучили стабильность пульсаций 11 таких цефеид, и оказалось, что случайные флуктуации перидов шести из них искажают их O-C диаграммы настолько, что их параболическая форма становится обнаружимой только на интервале времени порядка столетия, а для двух цефеид (EV Aql и V1496 Aql) не заметна вообще. Чтобы понять причину такого несоответствия, необходимо увеличить статистику. Поэтому в данной работе мы исследуем поведение пульсаций цефеиды V1467 Cyg, период изменения блеска которой составляет 48.6.

МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗУЕМЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для изучения изменяемости периодов цефеид мы применяем общепринятую методику анализа O-C диаграмм, а самым точным методом определения остатков O-C является метод Герцшпрунга (1919), машинная реализация которого описана в работе Бердникова (1992а). Для подтверждения реальности обнаруженных изменений периода мы используем метод, описанный Ломбардом и Коэном (1993).

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

Таблица 1. ПЗС-наблюдения V1467 Суд

HJD, 2400000+	Фильтр	Блеск	HJD, 2400000+	Фильтр	Блеск	HJD, 2400000+	Фильтр	Блеск
58719.386	i'	11.397	58719.386	r'	12.611	58719.387	g'	14.833
58719.388	I_c	10.785	58719.389	В	16.191	58719.390	V	13.697
58723.371	i'	11.037	58723.371	r'	12.138	58723.372	g'	14.123
58723.373	I_c	10.425	58723.375	В	15.377	58723.378	V	13.110
58723.378	i'	11.023	58723.379	r'	12.139	58723.380	g'	14.133
58724.352	i'	10.981	58724.352	r'	12.089	58724.353	g'	14.071
58724.354	I_c	10.381	58724.356	В	15.296	58724.359	i'	10.967
58724.359	r'	12.097	58724.360	g'	14.079	58724.361	I_c	10.387
58724.363	В	15.300	58724.366	V	13.066	58724.366	i'	10.990
58724.367	r'	12.085	58724.368	g'	14.075	58724.368	I_c	10.356
58724.370	В	15.312	58724.373	V	13.066	58727.347	i'	10.959
58727.348	r'	12.075	58727.348	g'	14.082	58727.349	I_c	10.355
58727.351	В	15.351	58727.354	V	13.071	58727.355	i'	10.984
58727.355	r'	12.088	58727.356	g'	14.099	58727.357	I_c	10.345
58727.359	В	15.350	58727.361	V	13.069	58727.362	i'	10.961
58727.362	r'	12.082	58727.363	g'	14.097	58727.364	I_c	10.358
58727.366	В	15.348	58727.368	V	13.073	58729.292	i'	10.968
58729.292	r'	12.096	58729.293	g'	14.132	58729.294	I_c	10.359
58729.296	В	15.432	58729.299	i'	10.978	58729.300	r'	12.107
58729.300	g'	14.119	58729.301	I_c	10.349	58729.303	В	15.422
58729.307	i'	10.974	58729.307	r'	12.104	58729.308	g'	14.135
58729.309	I_c	10.355	58729.310	В	15.428	58730.274	i'	10.973
58730.274	r'	12.120	58730.275	g'	14.194	58730.276	I_c	10.369

Переменность V1467 Суд открыли Пинто и Романо (1972) и классифицировали ее как классическую цефеиду с периодом 48^d6. Бердников (1994), добавив к фотографическим данным Пинто и Романо (1972), полученные им фотоэлектрические наблюдения (Бердников, 1986,1987,19926-е,1993),

сделал попытку поиска эволюционных изменений периода V1467 Cyg. Но из-за небольшого интервала времени, охваченного наблюдениями, и низкой точности моментов максимального блеска, определенных по единичным фотографическим поярчаниям, парабола на *O*-*C* диаграмме была практически не видна. Поэтому был сделан вывод о



Рис. 1. ПЗС-наблюдения V1467 Суд в фильтрах BVIcg'r'i', свернутые с текущими элементами (1).

необходимости получения нового наблюдательного материала, особенно по старым фотопластинкам.

Для нового изучения периода V1467 Суд мы использовали дополнительные фотоэлектрические наблюдения (Бердников и др., 1997,1998; Игнатова и Возякова, 2000), данные проекта DASCH (Гриндлей, 2009), полученные на оцифрованных старых фотографических пластинках университета Гарварда (США), сделанные нами глазомерные оценки блеска на фотопластинках ГАИШ МГУ (РФ), а также ПЗС наблюдения из обзоров NSVS (Возниак и др., 2004), ASAS–SN (Яясингхе и др., 2018) и ZTF (Маски и др., 2019), полученные в полосах, близких к V, g' и r'. Кроме того, на 60-см телескопе Кавказской Горной Обсерватории (КГО) (Бердников и др., 2020) нами были получены ПЗС наблюдения в системе BVI_c (Казинс, 1976) и в системе g'r'i' обзора ZTF (Маски

Источник данных	Число наблюдений	Полоса наблюдений	Интервал JD
DASCH	40	PG	2419756-2434366
Данная работа (ГАИШ)	138	PG	2433129-2450284
Литература	297	В	2445174-2451042
Литература	388	V	2445174-2451042
Данная работа (Табл. 1)	190	В	2458719-2458828
Данная работа (Табл. 1)	181	V	2458719-2458828
Данная работа (Табл. 1)	188	g'	2458719-2458825
Данная работа (Табл. 1)	192	r'	2458719-2458825
NSVS	55	r'	2451328-2451600
ASAS-SN	645	V	2457069-2458445
ASAS-SN	600	g'	2458220-2458815
ZTF	177	g'	2458206-2458663

Таблица 2. Наблюдательный материал цефеиды V1467 Суд

и др., 2019), которая привязана к системе Pan-STARRS1 (Флевеллинг и др., 2019).

Хорошо 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. Одновременно никто не наблюдал V1467 Суд в системах АВ и Джонсона-Казинса, поэтому мы провели такие наблюдения в полосах g'r'i' и BVI_c .

Мы наблюдали V1467 Суд с 22 августа по 18 декабря 2019 г. (интервал JD 2458719-825), и был сделан 751 ПЗС-кадр. Методика обработки наблюдений описана нами ранее (Бердников и др., 2020). Результаты обработки всех наблюдений помещены в табл. 1. Здесь приведен лишь фрагмент таблицы, а полностью она представлена в электронном виде (http://cdsarc.ustrasbg.fr/vizbin/Cat). Полученные кривые изменения блеска приведены на рис. 1, для построения которого использовались определенные нами текущие элементы:

 $\max HJD = 2457995.57 + 48.64555E.$ (1)

Рассеяние точек на кривых блеска говорит о том, что ошибки наблюдений близки к 0^m01.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сведения о количестве использованных наблюдений приведены в табл. 2. Самая старая фотопластинка с изображением V1467 Суд, хранящаяся в Гарварде, была получена в 1912 г., а последние ПЗС наблюдения были сделаны в 2019 г. Следовательно, наши данные охватывают временной интервал 107 лет.

Результаты обработки сезонных кривых V1467 Суд приведены в табл. З. В первой и второй колонке даны моменты максимального блеска и ошибки их определения, в третьей — тип используемых наблюдений, в четвертой и пятой — номер эпохи Eи значение остатка O-C, а в шестой и седьмой число наблюдений N и источник данных. Прочерк во второй колонке означает, что используется не момент максимума, а эпоха фотопластинки, на которой яркость звезды близка к максимальной. Данные табл. З изображены на O-C диаграмме (рис. 2) пустыми и заполненными квадратиками для фотографических наблюдений Гарварда и ГАИШ

Таблица 3. Моменты максимума блеска V1467 Суд

	-	-				
Максимум, HJD	Ошибка, сут	Фильтр	E	O-C, сут	N	Источник данных
2420286.814	_	PG	-361	-76.736	1	DASCH
2422985.004	0.532	PG	-306	-51.547	9	DASCH
2426162.783	_	PG	-241	-32.768	1	DASCH
2430991.438	1.193	PG	-142	-15.513	40	DASCH
2432212.761	2.013	PG	-117	-9.190	14	DASCH
2432357.759	_	PG	-114	-9.991	1	DASCH
2432412.725	_	PG	-113	-3.626	1	DASCH
2432504.475	_	PG	-111	-9.075	1	DASCH
2434205.333	0.715	PG	-76	-9.218	18	DASCH
2434310.543	_	PG	-74	-1.208	1	DASCH
2436841.300	_	PG	-22	2.349	1	Пинто и Романо (1972)
2437226.300	_	PG	-14	-1.451	1	Пинто и Романо (1972)
2437519.322	1.352	PG	-8	-0.028	11	Данная работа
2437519.400	_	PG	-8	0.049	1	Пинто и Романо (1972)
2437908.400	_	PG	0	0.249	1	Пинто и Романо (1972)
2437957.200	_	PG	1	0.449	1	Пинто и Романо (1972)
2440093.300	_	PG	45	-1.851	1	Пинто и Романо (1972)
2445186.324	0.066	В	150	-11.827	35	Бердников (1986)
2445186.615	0.062	V	150	-11.785	35	Бердников (1986)
2445817.096	0.084	V	163	-13.104	26	Бердников (1986)
2445864.945	0.089	В	164	-13.606	20	Бердников (1986)
2446253.633	0.062	В	172	-13.718	42	Бердников (1987)
2446253.840	0.052	V	172	-13.760	46	Бердников (1987)
2446642.527	0.115	В	180	-13.623	26	Бердников (1992б)
2446642.820	0.078	V	180	-13.580	30	Бердников (1992б)
2447030.576	0.108	V	188	-14.624	18	Бердников (1992в)
2447418.942	0.093	В	196	-14.808	27	Бердников (1992г)
2447419.197	0.075	V	196	-14.803	30	Бердников (1992г)
2447756.164	0.355	PG	203	-17.787	59	Данная работа
2447757.926	0.075	В	203	-16.025	34	Бердников (1992д)
2447758.131	0.079	V	203	-16.069	41	Бердников (1992д)
2448532.436	0.097	V	219	-19.364	21	Бердников (1992е)

Таблица 3. Окончание

Максимум, HJD	Ошибка, сут	Фильтр	E	O-C, сут	N	Источник данных
2448532.989	0.155	В	219	-18.562	18	Бердников (1992е)
2448824.214	0.257	PG	225	-18.937	68	Данная работа
2448873.555	0.173	В	226	-18.195	25	Бердников (1993)
2448873.624	0.148	V	226	-18.376	27	Бердников (1993)
2449940.523	0.098	V	248	-20.677	33	Бердников и др. (1997)
2450329.552	0.106	В	256	-20.198	30	Бердников и др. (1998)
2450329.735	0.090	V	256	-20.265	35	Бердников и др. (1998)
2450814.525	0.303	В	266	-21.225	40	Игнатова и Возякова (2000)
2450815.334	0.228	V	266	-20.666	46	Игнатова и Возякова (2000)
2451447.583	0.250	r'	279	-20.643	55	NSVS
2457217.088	0.187	V	397	14.488	138	ASAS-SN
2457606.928	0.214	V	405	15.528	180	ASAS-SN
2457946.618	0.168	V	412	15.018	186	ASAS-SN
2458335.913	0.042	g'	420	15.593	141	ZTF
2458336.507	0.256	V	420	16.107	141	ASAS-SN
2458529.616	0.198	g'	424	14.897	368	ASAS-SN
2458627.655	0.099	g'	426	15.736	36	ZTF
2458676.530	0.208	g'	427	16.010	232	ASAS-SN
2458773.825	0.015	В	429	16.274	190	Данная работа
2458774.015	0.017	g'	429	16.295	188	Данная работа
2458774.095	0.026	V	429	16.295	181	Данная работа
2458774.522	0.025	r'	429	16.295	192	Данная работа

соответственно и кружками для остальных наблюдений с вертикальными черточками, указывающими пределы ошибок определения остатков *O*-*C*.

По моментам максимального блеска из табл. З получены кубические элементы изменения блеска цефеиды V1467 Cyg:

 $\max HJD = 2439557.619(\pm 0.409) + (2)$ $+ 48^{4}564601767(\pm 0.00272)E -$ $- 0.332001 10^{-3} (\pm 0.636 10^{-5})E^{2} +$ $+ 0.58194833 10^{-6} (\pm 0.238 10^{-7})E^{3},$

линейная часть которых использована для вычислений остатков O-C в пятом столбце табл. 3. Элементы (2) использовались для проведения кубической параболы на верхней части рис. 2, на нижней части которого показаны отклонения от этой параболы.

По фотоэлектрическим и ПЗС наблюдениям было найдено, что максимумы в фильтре B и g' наступают раньше, чем в фильтре V, на 0^d249 и 0^d045 соответственно, а в фильтре r' — на 0^d831 позже. Эти поправки учитывались при построении рис. 2 и определении элементов (2), которые, таким образом, относятся к системе V.

Для подтверждения реальности изменений периода пульсаций мы используем метод, опубликованный Ломбардом и Коэном (1993). Для это-



Рис. 2. *О*-*С* диаграмма для цефеиды V1467 Суд относительно линейных (вверху) и кубических (внизу) элементов (2). Линия — кубическая парабола, соответствующая элементам (2).



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 (аппроксимация многочленом четвертой степени) соответствует поведению остатков O-C на рис. 2.

Taominga I. Chandaphible Aphible VIIO Gyg b whilibipar D, V, Y HV
--

Phase	В	V	g'	r'	Phase	В	V	g'	r'
0.000	15.278	13.032	14.042	12.056	0.500	16.315	13.637	14.853	12.523
0.005	15.280	13.033	14.043	12.057	0.505	16.323	13.644	14.861	12.530
0.010	15.283	13.035	14.046	12.058	0.510	16.331	13.650	14.868	12.536
0.015	15.288	13.038	14.050	12.061	0.515	16.340	13.657	14.877	12.543
0.020	15.295	13.042	14.055	12.064	0.520	16.348	13.664	14.885	12.550
0.025	15.304	13.047	14.062	12.068	0.525	16.358	13.671	14.893	12.556
0.030	15.314	13.052	14.069	12.072	0.530	16.367	13.678	14.902	12.563
0.035	15.324	13.058	14.077	12.077	0.535	16.376	13.686	14.911	12.570
0.040	15.335	13.064	14.086	12.082	0.540	16.386	13.694	14.920	12.577
0.045	15.347	13.070	14.095	12.087	0.545	16.396	13.702	14.929	12.584
0.050	15.359	13.077	14.104	12.092	0.550	16.406	13.710	14.939	12.591
0.055	15.371	13.083	14.113	12.098	0.555	16.416	13.719	14.949	12.598
0.060	15.384	13.090	14.122	12.103	0.560	16.426	13.727	14.958	12.605
0.065	15.396	13.096	14.131	12.108	0.565	16.437	13.736	14.968	12.612
0.070	15.409	13.103	14.140	12.113	0.570	16.447	13.745	14.978	12.619
0.075	15.421	13.109	14.149	12.118	0.575	16.458	13.755	14.988	12.627
0.080	15.434	13.115	14.158	12.123	0.580	16.468	13.764	14.997	12.634
0.085	15.446	13.121	14.167	12.127	0.585	16.478	13.773	15.007	12.641
0.090	15.458	13.127	14.175	12.131	0.590	16.489	13.782	15.016	12.648
0.095	15.470	13.133	14.184	12.135	0.595	16.498	13.791	15.026	12.656
0.100	15.483	13.139	14.192	12.139	0.600	16.508	13.800	15.035	12.663
0.105	15.495	13.145	14.200	12.142	0.605	16.518	13.809	15.044	12.670
0.110	15.507	13.151	14.208	12.145	0.610	16.527	13.818	15.052	12.677
0.115	15.519	13.156	14.216	12.148	0.615	16.536	13.827	15.061	12.685
0.120	15.531	13.162	14.224	12.151	0.620	16.544	13.836	15.070	12.692
0.125	15.543	13.168	14.233	12.154	0.625	16.553	13.844	15.078	12.700
0.130	15.555	13.173	14.241	12.156	0.630	16.561	13.852	15.086	12.707
0.135	15.567	13.179	14.249	12.158	0.635	16.568	13.861	15.094	12.715
0.140	15.579	13.185	14.257	12.161	0.640	16.576	13.869	15.102	12.722
0.145	15.591	13.190	14.266	12.163	0.645	16.583	13.877	15.110	12.730
0.150	15.603	13.196	14.274	12.166	0.650	16.591	13.885	15.118	12.738
0.155	15.615	13.201	14.283	12.168	0.655	16.598	13.893	15.125	12.746
0.160	15.627	13.207	14.291	12.170	0.660	16.605	13.901	15.133	12.753

Таблица 4. Продолжение

Phase	В	V	g'	r'	Phase	В	V	g'	r'
0.165	15.639	13.213	14.300	12.173	0.665	16.613	13.908	15.141	12.761
0.170	15.651	13.218	14.309	12.176	0.670	16.620	13.916	15.149	12.769
0.175	15.663	13.224	14.317	12.179	0.675	16.628	13.924	15.157	12.778
0.180	15.675	13.230	14.326	12.182	0.680	16.635	13.932	15.165	12.786
0.185	15.688	13.235	14.335	12.185	0.685	16.643	13.941	15.173	12.794
0.190	15.700	13.241	14.343	12.188	0.690	16.651	13.949	15.181	12.802
0.195	15.712	13.246	14.352	12.192	0.695	16.659	13.957	15.189	12.811
0.200	15.724	13.252	14.360	12.196	0.700	16.667	13.966	15.197	12.819
0.205	15.736	13.258	14.369	12.200	0.705	16.675	13.974	15.206	12.827
0.210	15.748	13.263	14.377	12.204	0.710	16.684	13.982	15.214	12.835
0.215	15.760	13.269	14.386	12.208	0.715	16.692	13.991	15.222	12.843
0.220	15.772	13.274	14.394	12.213	0.720	16.700	13.999	15.231	12.851
0.225	15.784	13.280	14.402	12.218	0.725	16.708	14.007	15.239	12.858
0.230	15.796	13.285	14.410	12.223	0.730	16.716	14.015	15.247	12.865
0.235	15.808	13.291	14.418	12.228	0.735	16.724	14.022	15.254	12.871
0.240	15.819	13.297	14.426	12.233	0.740	16.731	14.029	15.262	12.877
0.245	15.831	13.302	14.434	12.238	0.745	16.737	14.035	15.268	12.882
0.250	15.843	13.308	14.442	12.244	0.750	16.743	14.040	15.274	12.886
0.255	15.854	13.314	14.450	12.249	0.755	16.748	14.045	15.279	12.890
0.260	15.865	13.319	14.458	12.255	0.760	16.752	14.049	15.283	12.892
0.265	15.877	13.325	14.466	12.261	0.765	16.755	14.052	15.286	12.893
0.270	15.888	13.331	14.474	12.266	0.770	16.757	14.053	15.288	12.893
0.275	15.899	13.336	14.482	12.272	0.775	16.757	14.054	15.289	12.891
0.280	15.910	13.342	14.490	12.278	0.780	16.756	14.052	15.288	12.888
0.285	15.920	13.349	14.498	12.283	0.785	16.753	14.050	15.285	12.884
0.290	15.931	13.355	14.505	12.289	0.790	16.747	14.045	15.280	12.878
0.295	15.941	13.361	14.514	12.294	0.795	16.740	14.039	15.273	12.870
0.300	15.952	13.368	14.522	12.300	0.800	16.730	14.031	15.264	12.860
0.305	15.962	13.374	14.530	12.305	0.805	16.718	14.021	15.252	12.849
0.310	15.972	13.381	14.538	12.311	0.810	16.703	14.009	15.238	12.835
0.315	15.982	13.388	14.546	12.316	0.815	16.685	13.995	15.221	12.820
0.320	15.992	13.395	14.555	12.321	0.820	16.664	13.979	15.202	12.803
0.325	16.003	13.403	14.563	12.327	0.825	16.641	13.961	15.179	12.784

Таблица 4. Окончание

Phase	В	V	g'	r'	Phase	В	V	g'	r'
0.330	16.012	13.410	14.572	12.332	0.830	16.614	13.940	15.154	12.764
0.335	16.022	13.418	14.580	12.337	0.835	16.583	13.917	15.126	12.742
0.340	16.032	13.425	14.589	12.342	0.840	16.550	13.892	15.096	12.718
0.345	16.042	13.433	14.598	12.348	0.845	16.513	13.865	15.062	12.693
0.350	16.052	13.441	14.607	12.353	0.850	16.473	13.835	15.026	12.666
0.355	16.062	13.449	14.616	12.358	0.855	16.429	13.804	14.988	12.639
0.360	16.071	13.457	14.625	12.363	0.860	16.383	13.771	14.947	12.610
0.365	16.081	13.465	14.635	12.368	0.865	16.334	13.736	14.904	12.580
0.370	16.091	13.473	14.644	12.373	0.870	16.283	13.699	14.860	12.550
0.375	16.100	13.481	14.653	12.378	0.875	16.229	13.661	14.814	12.519
0.380	16.110	13.488	14.663	12.383	0.880	16.174	13.623	14.767	12.488
0.385	16.119	13.496	14.672	12.389	0.885	16.117	13.583	14.718	12.457
0.390	16.129	13.503	14.682	12.394	0.890	16.059	13.543	14.670	12.426
0.395	16.139	13.511	14.691	12.399	0.895	16.000	13.503	14.621	12.396
0.400	16.148	13.518	14.700	12.404	0.900	15.941	13.463	14.572	12.366
0.405	16.157	13.524	14.709	12.410	0.905	15.882	13.424	14.524	12.336
0.410	16.166	13.531	14.718	12.415	0.910	15.825	13.385	14.477	12.308
0.415	16.175	13.538	14.727	12.421	0.915	15.768	13.347	14.431	12.280
0.420	16.184	13.544	14.735	12.426	0.920	15.713	13.311	14.387	12.254
0.425	16.193	13.550	14.743	12.432	0.925	15.661	13.276	14.344	12.229
0.430	16.202	13.556	14.752	12.438	0.930	15.611	13.243	14.304	12.206
0.435	16.211	13.562	14.759	12.443	0.935	15.563	13.212	14.266	12.184
0.440	16.219	13.568	14.767	12.449	0.940	15.519	13.184	14.231	12.164
0.445	16.227	13.574	14.775	12.455	0.945	15.479	13.158	14.199	12.146
0.450	16.236	13.580	14.782	12.461	0.950	15.442	13.134	14.170	12.129
0.455	16.244	13.585	14.789	12.467	0.955	15.409	13.113	14.144	12.114
0.460	16.252	13.591	14.797	12.473	0.960	15.379	13.095	14.121	12.101
0.465	16.260	13.596	14.804	12.479	0.965	15.354	13.079	14.101	12.090
0.470	16.268	13.602	14.811	12.485	0.970	15.333	13.066	14.085	12.080
0.475	16.275	13.608	14.817	12.491	0.975	15.315	13.055	14.071	12.072
0.480	16.283	13.613	14.824	12.498	0.980	15.301	13.046	14.060	12.066
0.485	16.291	13.619	14.831	12.504	0.985	15.291	13.040	14.052	12.062
0.490	16.299	13.625	14.839	12.510	0.990	15.284	13.035	14.046	12.058
0.495	16.307	13.631	14.846	12.517	0.995	15.280	13.033	14.043	12.057



Рис. 4. Стандартные кривые цефеиды V1467 Суд в системе BVg'r'.

го мы вычислили разности $\Delta(O-C)_i$ последовательных остатков O-C из табл. З, $\Delta(O-C)_i = (O-C)_{i+1} - (O-C)_i$, и построили график зависимости $D_i = \Delta(O-C)_i/(E_{i+1} - E_i)$ от $E'_i = (E_i + E_{i+1})/2$ (рис. З). Разности D_i , которые имеют смысл изменений периода в интервале эпох $E_i - E_{i+1}$, соответствуют поведению остатков O-Cна рис. 2.

Квадратичный и кубический члены элементов (2) дают возможность вычислить скорость эволюционного уменьшения периода $dP/dt = -431.5 ~(\pm 8.2)$ с/год, что соответствует теоретическим расчетам для второго пересечения полосы нестабильности (Тэрнер и др., 2006; Фадеев, 2014).

Следует отметить, что полученные здесь результаты основаны на конкретных стандартных кривых. Поэтому мы приводим их в табл. 4 с тем, чтобы их можно было использовать в будущих исследованиях, а также для установления связи с нашими данными, если будут использоваться другие стандартные кривые. Табл. 4 содержит звездные величины V1467 Суд для фаз от 0 до 0.995 с шагом 0.005 в системе BVg'r'; эти стандартные кривые графически изображены на рис. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения изменяемости периода V1467 Суд использовались 178 оценок блеска на старых фотопластинках университета Гарварда (США) и ГАИШ МГУ, а также 751 ПЗС снимок в фильтрах BVg'r', полученных на 60-см телескопе Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ; кроме того, было собрано 2162 опубликованных наблюдений. Все имеющиеся данные были обработаны методом Герцшпрунга (1919), и были определены 54 момента максимального блеска для построения О-С диаграммы, охватывающей временной интервал 107 лет. Это позволило определить кубические элементы изменения блеска (2) и вычислить скорость эволюционного уменьшения периода dP/dt = -431.5 (±8.2) с/год, что согласуется с результатами теоретических расчетов для второго пересечения полосы нестабильности (Тэрнер и др., 2006; Фадеев, 2014). Тест на стабильность пульсаций, предложенный Ломбардом и Коэном (1993), подтвердил реальность уменьшения периода.

Данная работа осуществлялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты номер 18-02-00890 и 19-02-00611). Работа ААБ и ЕОМ поддержана грантом Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова "Ведущая научная школа "Физика звезд, релятивистских объектов и галактик". Работа ЕОМ частично поддержана грантом РНФ 17-12-01241. Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бердников Л.Н., Переменные Звезды **22**, 369 (1986).
- 2. Бердников Л.Н., Переменные Звезды **22**, 530 (1987).
- Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. 18, 519 (1992a) [L.N. Berdnikov, Sov. Astron. 18, 207 (1992a)].
- Бердников (L.N. Berdnikov), Astron. Astrophys. Trans. 2, 1 (19926).
- 5. Бердников (L.N. Berdnikov), Astron. Astrophys. Trans. **2**, 31 (1992в).

- 6. Бердников (L.N. Berdnikov), Astron. Astrophys. Trans. **2**, 43 (1992г).
- 7. Бердников (L.N. Berdnikov), Astron. Astrophys. Trans. 2, 107 (1992д).
- Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. 18, 325 (1992) [L.N. Berdnikov, Sov. Astron. 18, 130 (1992e)].
- Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. 19, 210 (1993) [L.N. Berdnikov, Astron. Lett. 19, 84 (1993)].
- Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. 20, 285 (1994) [L.N. Berdnikov, Astron. Lett. 20, 232 (1994)].
- Бердников Л.Н., Белинский А.А., Шатский Н.И., Бурлак М.А., Иконникова Н.П., Мишин Е.О., Черясов Д.В., Жуйко С.В., Astron. Rep. 97, 284 (2020) [L.N. Berdnikov, A.A. Belinskij, N.I. Shatskij, M.A. Burlak, N.P. Ikonnikova, E.O. Mishin, D.V. Cheryasov, and S.V. Zhuiko, Astron. Rep. 64, 310 (2020)]
- 12. Бердников и др. (L.N. Berdnikov, V.V. Ignatova, and O.V. Vozyakova), Astron. Astrophys. Trans. 14, 237 (1997).
- Бердников и др. (L.N. Berdnikov, V.V. Ignatova, and O.V. Vozyakova), Astron. Astrophys. Trans. 17, 87 (1998).
- 14. Возниак и др. (P.R. Wozniak, W.T. Vestrand, C.W. Akerlof, R. Balsano, J. Bloch, D. Casperson, S. Fletcher, G. Gisler, et al.), Astron. J. **127**, 2436 (2004).
- 15. Герцшпрунг (E. Hertzsprung), Astron. Nachr. 210, 17 (1919).

- 16. Гриндлей и др. (J. Grindlay, Sumin Tang, E. Los, and M. Servilla), ASP Conf. Ser. **410**, 101 (2009).
- 17. Игнатова, Возякова (V.V. Ignatova, and O.V. Vozyakova), Astron. Astrophys. Trans. **19**, 133 (2000).
- 18. Казинс (A.W.J. Cousins), Mem. RAS 81, 25 (1976).
- 19. Ломбард, Коен (F. Lombard, and C. Koen), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **263**, 309 (1993).
- 20. Маски и др. (F.J. Masci, R.R. Laher, B. Rusholme, D.L. Shupe, S. Groom, J. Surace, E. Jackson, S. Monkewitz, et al.), Publ. Astron. Soc. Pacific 131:018003 (2019).
- 21. Пинто, Романо (G. Pinto, and G. Romano), Mem. RAS 43, 135 (1972).
- 22. Тэрнер и др. (D.G. Turner, M. Abdel-Sabour Abdel-Latif, and L.N. Berdnikov), Publ. Astron. Soc. **118**, 410 (2006).
- 23. Фадеев Ю.А., Письма Астрон. Журн. **40**, 341 (2014) [Yu.A. Fadeyev, Astron. Lett. **40**, 301 (2014)].
- 24. Ферни (J.D. Fernie), Publ. Astron. Soc. **102**, 905 (1990).
- 25. Флевеллинг и др. (H.A. Flewelling, E.A. Magnier, K.C. Chambers, J.N. Heasley, C. Holmberg, M.E. Huber, W. Sweeney, C.Z. Waters, et al.), arXiv:1612.05243.
- 26. 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.), Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **485**, 961 (2019).

© 2020 г. А. Ф. Холтыгин^{1,2*}, Н. П. Иконникова², А. В. Додин², О. А. Циопа³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный Астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Главная (Пулковская) обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия Поступила в редакцию 03.02.2020 г.

После доработки 24.02.2020 г.; принята к публикации 25.02.2020 г.

Представлены результаты наблюдений сверхвысокого временного разрешения ($\Delta T \sim 12$ с) В1Іаb сверхгиганта ρ Leo на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ. Обнаружены регулярные вариации профилей линий с периодами 15–30 мин. Детектированы значительные изменения средних профилей линий на промежутках времени 1–3 дня. Приводятся свидетельства в пользу существования коротко-периодических вариаций профилей линий на шкалах времени 15–25 мин. Обсуждается природа коротко-периодических вариаций профилей линий. Отмечена возможность изучения быстрых вариаций профилей широких линий (главным образом Бальмеровских линий водорода и линий HeI) при использовании спектрографов низкого разрешения с R = 1000-2000 на 1–2-метровых телескопах.

Ключевые слова: звезды — индивидуальные, *р* Leo — спектры, профили линий — переменность.

DOI: 10.31857/S032001082003002X

ВВЕДЕНИЕ

Профили линий в спектрах OBA звезд переменны на временных шкалах от дней до часов (Капер, 1997; Холтыгин и др., 2003; Душин и др., 2013). Вариации профилей на минутных шкалах времени до последнего времени не были известны. Впервые Хубриг и др. (2014) обнаружили изменения профилей линий Si II и Fe II в спектрах A0 сверхгиганта HD 92207 на промежутках времени 1–2 мин.

Эта работа стимулировала наши исследования сверхбыстрой переменности (на минутных и секундных шкалах) в спектрах звезд ранних спектральных классов. Чтобы проверить, широко ли распространены короткопериодические спектральные вариации среди OBA-звезд, мы проанализировали вариации профилей линий в спектрах ряда OBA-звезд, полученных с высоким (минута и меньше) временным разрешением при использовании редуктора светосилы 6-м телескопа БТА SCORPIO (Афанасьев, Моисеев, 2005).

Холтыгин и др. (2017) представили результаты анализа сверхбыстрой переменности в спектре звезды HD 93521 (O9.5III) по наблюдениям на БТА в 2015 г. Были обнаружены регулярные вариации профилей линий с периодами 4–5 и 32–36 мин. Результаты поиска быстрых вариаций в спектрах химически пекулярной A0VpSiEu звезды α^2 CVn описаны Холтыгиным и др. (2020).

Анализ спектральной переменности Ве звезды λ Eri по наблюдениям на ESO VLT со спектрографом FORS 1/2 представлен Хубриг и др. (2017). Обзор выполненных по программе поиска сверхбыстрых вариаций профилей линий в спектрах OBA-звезд представлен в статье Циопы и др. (2020).

Исследование сверхбыстрой переменности профилей линий в спектрах звезд ранних классов требует анализа спектров большого числа OBAзвезд разных типов, что, в свою очередь, связано с получением большого объема наблюдательного времени. Ввиду загруженности больших телескопов целесообразно изучить возможность получения спектров OBA звезд на телескопах меньшего диаметра. Одним из подходящих инструментов для реализации указанного подхода является 1.25-м телескоп ЗТЭ Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ, оснащенный спектрографом низкого

^{*}Электронный адрес: afkholtygin@gmail.com

Параметр	Значение	Ссылка		
$T_{ m eff}$, K	23500	Костенков и др. (2020)		
$\lg g$	2.88	Костенков и др. (2020)		
M/M_{\odot}	28	Костенков и др. (2020)		
R/R_{\odot}	31	Костенков и др. (2020)		
V_{∞}	1110	Кроузе и др. (2006); Ховарт и др. (1997)		
$-\lg \dot{M}/M_{\odot}$	-5.8 - 6.0	Костенков и др. (2020)		
$\lg L/L_{\odot}$	5.45	Костенков и др. (2020)		
$V \sin i$, км/с	49	Симон-Диаз и Херреро (2014)		
$P_{ m rot}$, дней	26.8	Аэртс и др. (2018)		
{C}	7.5	Кроузе и др. (2006)		
{N}	8.3	Кроузе и др. (2006)		
{O}	8.4	Кроузе и др. (2006)		

Таблица 1. Параметры *р* Leo

разрешения (FWHM \sim 7.5 Å), позволяющим получать спектры в области 4200—7200 Å.

В качестве первого объекта изучения переменности профилей линий с помощью 1.25-м телескопа был выбран В11аb сверхгигант ρ Leo. Данная звезда является одним из наиболее ярких объектов в списке программных звезд Холтыгина и др. (2003) для изучения быстрой переменности линий, что позволяет достичь отношения сигнал/шум >500 при экспозициях менее 1 мин на телескопах умеренного диаметра, к которым относится и 1.25-м телескоп.

Звезда ρ Leo наблюдалась на БТА в январефеврале 2004 г. и на 1.8-м телескопе Бохинсанской оптической астрономической обсерватории в Южной Корее (Холтыгин и др., 2007а). Получено 47 спектров звезды с временным разрешением 4— 10 мин, отношением сигнал/шум от 300 до 700 и спектральным разрешением от 45 000 до 60 000. Обнаружена переменность профилей бальмеровских линий водорода, линий HeI, SiII, SiIII и NII. Детектированы регулярные компоненты переменности профилей линий с периодами от $3.8^{\rm h}$ до $1.8^{\rm d}$. Переменность профилей может быть интерпретирована как результат их вращательной модуляции и нерадиальных фотосферных пульсаций.

Звезда ρ Leo включена в программу исследования магнитных полей ярких звезд северного неба (Монин и др., 2002; Холтыгин и др., 2010). В рамках этой программы в 2005 г. были выполнены

наблюдения ρ Leo на БТА с использованием спектрографов NES и ОЗСП с анализатором круговой поляризации (Холтыгин и др., 2007b). Было обнаружено умеренное магнитное поле, которое может быть описано в модели вращающегося магнитного диполя с напряженностью на полюсах 240 ± 50 Гс и углом наклона оси диполя к оси вращения $59^{\circ} \pm \pm 30^{\circ}$.

Выполненные нами наблюдения ρ Leo 19/20 и 20/21.01 2015 г. на БТА с фокальным редуктором SCORPIO со сверхвысоким временным разрешением 6 с анализируются в статье Холтыгина и др. (2018). Сообщается об обнаружении короткопериодических регулярных вариаций профилей линий Н и Не с периодами от 2 до 90 мин и нерегулярные вариации профилей линий на промежутке времени < 1 мин. Установлено, что периоды вариаций профилей линий в области 2–10 мин являются переменными. Наличие таких компонентов регулярных вариаций профилей линий было объяснено в предположении, что высокие моды нерадиальных пульсаций нестабильны и могут как затухать, так и генерироваться на коротких шкалах времени 10-100 мин.

В настоящей статье представлены результаты анализа 163 спектров ρ Leo, полученных на 1.25-м телескопе в октябре-ноябре 2019 г. Статья организована следующим образом. В разделе 2 представлены основные сведения об изучаемом объекте. Выполненные наблюдения и процедура их обработки описаны в разделе 3. Вариации профилей



Рис. 1. Нормированные спектры ρ Leo, усредненные по всем индивидуальным спектрам, полученным в ночи 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г.

линий в спектре ρ Leo обсуждаются в разделе 4. Результаты фурье-анализа вариаций профилей линий представлены в разделе 5. В разделе 6 описаны результаты их Вейвлет-анализа. Обсуждение результатов и выводы из настоящего исследования представлены в разделе 7.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ

Сверхгигант ρ Leo (HD 91316) является относительно медленно вращающейся звездой спектрального класса В1Іаb. Эффективная температура звезды $T_{\rm eff}$ определяется неуверенно: Морел и др. (2004) приводят значение $T_{\rm eff} = 20\,260$ K, в статье Гиес и др. (1992) по величине бальмеровского скачка и из сравнения профилей водородных линий с модельными указывают значение 24 200 K. В результате моделирования спектра звезды с учетом вклада в профили ветра звезды Кроузе и др. (2006) получено значение $T_{\rm eff} = 22\,000$ K.

Параметры звезды были недавно уточнены в работе Костенкова и др. (2020) при аппроксимации спектров звезды, полученных на БТА с использованием спектрографа СКОРПИО и представленных в статье Холтыгина и др. (2018) модельными спектрами, рассчитанными с использованием не-ЛТР кода CMFGEN Хильера и Миллера (1998).

Дата	T_0 (h:m:s), UT	ΔT	$N_{\rm sp}$
27.10.2019	03:09:30	14.03	70
28.10.2019	02:56:04	23.33	120
02.11.2019	02:52:05	14.12	73

Звезда ρ Leo на диаграмме ГР находится в области переменных звезд типа β Сер ранних подклассов спектрального класса В (см., например, Памятных, 1999). Параметры звезды представлены в табл. 1. В таблице $T_{\rm eff}$ — эффективная температура звезды, M — масса звезды, \dot{M} — темп потери массы звездой, L — болометрическая светимость, V_{∞} — терминальная скорость звездного ветра, $V \sin i$ — скорость вращения звезды, $P_{\rm rot}$ период вращения. В фигурных скобках приведено содержание элементов в логарифмической шкале.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения ρ Leo были выполнены на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ в 2 ночи 26/28 октября и в ночь 1/2 ноября 2019 г. Все спектры были получены с экспозицией 10 с. В табл. 2 представлен журнал наблюдений ρ Leo. Для трех наблюдательных ночей указаны время начала экспозиции T_0 , полная длительность наблюдений в минутах ΔT и число спектров $N_{\rm sp}$, полученных за ночь. Все спектры были получены в области λ 4075–5810 Å со спектральным разрешением ~1000.

Наблюдения и первичная стандартная обработка кадров проводились с использованием программы CCDops¹. Одномерные спектры получены путем суммирования отсчетов внутри апертуры в 40 пикселей (79"), при среднем FWHM 26 пикселей, с вычитанием фона неба, который брался по области 60–120 пикселей от центра спектра звезды. Отношение сигнал к шуму получаемых спектров составляет 500–600. Калибровка по длинам волн осуществлялась с использованием Ne– Аг лампы.

¹ http://company7.com/library/sbig/sbwhtmls/ccdopsv5.html



Рис. 2. Средние нормированные профили линий Н β (слева) и HeI 4922 (справа), полученные в разные ночи наблюдений.



Рис. 3. Разностные спектры вариаций профилей линии Н β в ночи наблюдений 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. (слева-направо).

Полученные спектры были нормированы на континуум. Процедура нормировки описана в статье Холтыгина и др. (2006). Усредненные за три наблюдательные ночи нормированные спектры представлены на рис. 1. Отличие средних нормированных спектров за разные ночи не превышает 1%, что свидетельствует о корректности используемой процедуры нормировки.

Глубины линий в средних спектрах ρ Leo, представленных на рис. 1, меньше, чем глубины линий в среднем спектре ρ Leo, полученном нами на БТА со спектрографом SCORPIO (рис. 1 в статье Холтыгина и др., 2018) из-за более высокого спектрального разрешения SCORPIO.

ВАРИАЦИИ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

Профили линий, пригодные для анализа их переменности, были нормированы на локальный континуум. Средние нормированные профили линии $H\beta$ и HeI 4922, полученные в разные ночи наблюдений, показаны на рис. 2. Видно, что профили линий меняются от ночи к ночи на 1-2% в единицах интенсивности соседнего с линией континуума. Несмотря на низкое разрешение спектрографа, при усреднении спектров в спектре ρ Leo видны слабые линии, такие как линия OII 4943 на рис. 2 (справа).

Характер переменности профилей линий хорошо виден на рис. 3, на котором приведены разностные профили линий:

$$d(V, t_i) = F(V, t_i) - \overline{F(V)}.$$
(1)

Здесь $F(V, t_i)$ — профиль линии в момент времени $t = t_i, V = (\lambda - \lambda_0)/c$ — доплеровское смещение от центральной длины волны линии λ_0, c — скорость света, а $\overline{F(V)}$ — профиль линии, усредненный по всем анализируемым спектрам.

Динамические спектры вариаций профилей линий Н β и HeI 4922 (отклонения профилей линий от среднего в зависимости от времени начала экспозиции) в ночи наблюдений 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. показаны на рис. 4. Для большей наглядности все спектры представлены в единой шкале времени, соответствующей максимальной длительности $\Delta T_{\rm max} = 23.33$ мин наблюдений, выполненных 27 октября 2019 г. (см. табл. 2). Как следует из анализа рисунков, характер переменности профилей подобен для разных линий и разных дат наблюдений.

Нерегулярные вариации профилей в центре линий

В спектрах звезды ρ Leo найдены нерегулярные вариации профилей линий на секундных шкалах (Холтыгин и др., 2018). Такого типа вариации профилей линий при наблюдениях на 1.25-м телескопе



Рис. 4. Динамические спектры вариаций профилей линий Нβ (вверху) и HeI 4922 (внизу) в ночи наблюдений 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. (слева-направо).

не обнаружено. Это может быть связано как с тем, что нерегулярные вариации профилей линий являются достаточно редкими событиями, так и с тем, что отношение сигнал/шум в анализируемых в настоящей работе спектрах (~500-600) ниже, чем в спектрах, изучаемых в работе Холтыгина и др. (2018).

ФУРЬЕ-АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

Для поиска периодических компонент в вариациях профилей линий был выполнен фурье-анализ разностных профилей линий в спектре ρ Leo. Для каждой точки на профиле линии, характеризуемой каким-либо значением доплеровского смещения $V = V_k$, совокупность значений $\{d(V_k, t_i)\}, i = 1, 2, ..., N$, где N — число анализируемых профилей, представляет собой анализируемый временной ряд.

Для поиска регулярных компонент каждого из таких рядов для всех значений V_k в пределах профиля линии был использован метод CLEAN (Робертс и др., 1987) с учетом результатов анализа

временных рядов с большими пропусками (Холтыгин и др., 2007с). В силу низкого разрешения спектрографа (разрешение по скорости $\Delta V \approx 140$ км/с) для фурье-анализа следует выбирать достаточно широкие линии. К таковым относятся, как видно из рис. 1, линии Н γ , Н β , HeI 4471 и HeI 4922.

В дальнейшем будем анализировать именно эти линии. На рис. 5 представлены фурье-спектры вариаций профилей линий в спектре ρ Leo для уровня значимости $\alpha = 10^{-3}$ отдельно для каждой ночи наблюдений. На рис. 6 демонстрируется подобие фурье-спектров всех анализируемых линий.

В фурье-спектре присутствуют регулярные компоненты с частотами, соответствующими максимумам амплитуды фурье-спектра, которые превышают значение, соответствующее выбранному уровню значимости. В табл. З представлены найденные частоты и периоды возможных гармонических компонент вариаций профилей анализируемых линий.

Знак + указывает, что соответствующая компонента присутствует в фурье-спектре, а знак — то, что на данном уровне значимости он не обнаружен,



Рис. 5. Фурье-спектры вариаций профилей линий Н β для ночей наблюдений 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. (слева-направо).

хотя при большем уровне значимости он может быть зарегистрирован. Компоненты ν_1 и ν_4 присутствуют в фурье-спектре только линии Н β , поэтому реальность этих компонент пока не очевидна. Для решения вопроса об их реальности необходимы более длительные наблюдения.

Компонента ν_3 соответствует периоду P = 24.9 мин, который превосходит максимальную длительность всех анализируемых сетов наблюдений в ночь 28 октября 2019 г. ($\Delta T = 23.33$ мин).

Оставшаяся компонента $\nu_2 = 18.5 \text{ мин}^{-1}$ может быть реальна. В то же время, как следует из анализа рис. 5 и 6, ошибки в определении частот периодических компонент, определяемые шириной лепестков графиков плотности фурье-спектра, весьма велики.

Верхние пределы ошибок частот компонент фурье-спектра могут быть оценены из соотношения $\Delta \nu \leq 1/\Delta T$, где ΔT —полное время наблюдений данного сета, приведенное в табл. 2 (см., например, Витязев, 2001) и находятся в промежутке [0.04-0.07] мин⁻¹. С учетом ошибок частоты компоненты ν_2 она может быть первой гармоникой компоненты $\nu = 0.031$ мин⁻¹,

Таблица 3. Частоты и периоды регулярных компонент вариаций профилей в спектре ρ Leo

No.	u, 1/мин	P, мин	${\rm H}\beta$	${\rm H}\gamma$	HeI 4471	HeI 4922
1	0.067	14.9	+		_	_
2	0.054	18.5	+	+	+	+
3	0.040	24.9	+	+	+	+
4	0.048	21.0	+	_	_	_

обнаруженной в вариациях профилей линий в спектре ρ Leo Холтыгиным и др. (2018). Выяснение природы этой компоненты требует проведения более длительных наблюдений.

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

Анализ разностных профилей линий в спектрах ρ Leo (рис. 3) показывает присутствие в них дискретных компонент. Мелкомасштабные детали профилей, вероятно, связаны с шумовой компонентой профилей, а детали больших масштабов могут относиться как к регулярной, так и нерегулярной компонентам вариаций профилей. Наиболее подходящим математическим аппаратом для исследования образования и эволюции деталей профилей разных масштабов является вейвлет-анализ с анализирующим МНАТ-вейвлетом:

$$\psi(x) = (1 - x^2) \exp(-x^2/2), \qquad (2)$$

с узким энергетическим спектром и равными нулю первым и нулевым моментами.

Используя этот вейвлет, интегральное вейвлетпреобразование разностного профиля линии можно записать в следующем виде (Астафьева, 1996; Короновский, Храмов, 2003):

$$W(s,V,t) = \frac{1}{s^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} d(V',t)\psi\left(\frac{V-V'}{s}\right) dV', \quad (3)$$

где d(V, t) — исследуемая функция (разностный профиль линии), полученная в момент времени t в пространстве скоростей V.

Плотность энергии сигнала $E(s, V, t) = W^2(s, V)$ характеризует распределение энергии исследуемого сигнала в пространстве (s, V) = (macumad, V)



Рис. 6. Фурье-спектры вариации профилей линий Н β , Н γ , HeI 4471 и HeI 4922 (слева-направо) для ночи наблюдений 1/2 ноября 2019 г.



Рис. 7. Динамический вейвлет-спектр вариации профилей линии Н β с МНАТ материнским вейвлетом на масштабах S = 120 км/с (вверху), и S = 240 км/с (внизу) для спектров, полученных 26/27, 27/28 октября и 1/2 ноября 2019 г. (слева-направо).

 $\kappa oopduhama$) в момент времени t. В этом случае масштабная переменная s выражается в км/с.

Для изучения эволюции деталей разностных профилей нами были рассчитаны величины $E(s, V, t) = W^2(s, V, t)$ для бальмеровских линий для всех моментов времени t, в которые получены спектры звезды в наблюдательные ночи 26–28.10.2019 и 1.11.2019. Совокупность функций E(s, V, t) для фиксированных масштабов s назовем динамическим вейвлет-спектром вариаций профиля рассматриваемой линии в спектре звезды.

Настоящее определение динамического вейвлетспектра отличается от принятого в статье Холтыгина и др. (2006), в которой анализировались непосредственно значения амплитуд вейвлетпреобразования W(s, V, t). На рис. 7 представлены динамические вейвлет-спектры линии Н β в спектрах ρ Leo, полученных 27.10.2019, 28.10.2019 и 02.11.2019. Из анализа рисунка видно, что характер вариаций для спектров, полученных в разные ночи, подобен.

На относительно малых масштабах $s \leq 50$ км/с, меньше спектрального разрешения, в вейвлет вариациях профилей виден главным образом вклад шумовой компоненты профиля. В то же время на больших масштабах $s \geq 120$ км/с (близко к разрешению спектрографа в пространстве скоростей) детали вариаций профилей хорошо видны. Наиболее отчетливо характер изменений профилей со временем в динамических вейвлет-спектрах виден на масштабах s = 240 км/с.

Для надежного выявления деталей профилей, связанных с неоднородностью звездного ветра ρ Leo, желательно использовать вейвлеты с масштабом, близким к дисперсии скоростей в неоднородностях. Согласно оценкам в статье Кудряшовой и Холтыгина (2001), дисперсия скоростей ~ 140 км/с соответствует размеру неоднородностей $\sim 1.4R_{\odot}$, что составляет $0.04R_*$, где R_* — радиус ρ Leo. Формирование неоднородностей такого размера в ветре ρ Leo вполне возможно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

К настоящему времени по программе поиска сверхбыстрой переменности профилей линий нами получены и проанализированы спектры 6 звезд: HD 93521 (O9Vp), ρ Leo (B1Iab), λ Eri (B2III), HD92207 (A0Ia), α^2 CVn (A0Vp) и γ UMi (A2III).

Хотя число исследованных объектов мало, можно сделать предварительные выводы о характере переменности профилей линий в спектрах звезд разных спектральных классов, основываясь на результатах работы Циопы и др. (2020) и настоящей работы. Прежде всего отметим уменьшение периодов быстрых вариаций профилей линий в спектрах при переходе от О-звезд к звездам спектрального класса А. Самые быстрые изменения профилей линий с периодами 3–5 мин обнаружены у О-сверхгиганта HD 93521, тогда как периоды быстрых вариаций профилей у А-звезд составляют ~30–120 мин.

Периоды вариаций профилей в спектрах В звезд являются промежуточными по сравнению с найденными для О- и А-звезд. Обнаружение в настоящем исследовании регулярной компоненты вариаций профилей линий в спектре ρ Leo с периодом $\sim 18-19\,$ мин подтверждает этот вывод. В то же время выполненных до настоящего времени исследований пока недостаточно для анализа характера переменности профилей в зависимости от класса светимости звезды.

Следует отметить, что все звезды (за исключением γ UMi), у которых зарегистрирована быстрая спектральная переменность, являются магнитными со среднеквадратичным магнитным полем от ~1 кГс у α^2 CVn до ~50 Гс у ρ Leo. В то же время нельзя исключить, что столь большая доля магнитных звезд с быстрыми вариациями профилей линий в их спектрах связана с малостью выборки.

Все полученные до настоящего времени исследования быстрой спектральной переменности выполнены с использованием спектрографов низкого разрешения R = 1000-2000. При планировании будущих наблюдений важен вопрос, возможно ли увеличить спектральное разрешение, снизив временное разрешение, что может быть важно для анализа того, как меняются мелкие детали профилей линий.

При увеличении $R \to kR$, где k > 1 количество фотонов, попадающих на разрешающий элемент детектора (ПЗС-матрицы) за единицу времени, уменьшается в k раз. Для получения такого же числа фотонов на разрешающий элемент, как при прежнем значении R, требуется увеличение экспозиции в k раз. В то же время использование слишком низкого спектрального разрешения не позволяет анализировать изменение деталей профилей с ширинами $\delta V < 50-100$ км/с. Планируемое авторами работы изучение спектральной переменности одного и того же объекта с использованием спектрографов с разными значениями R при фиксированном значении T/R позволит выбрать оптимальную стратегию наблюдений.

Исходя из анализа вариаций профилей линий сверхгиганта ρ Leo, полученных на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ в октябре-ноябре 2019 г., выполненного в настоящей работе, можно сделать следующие выводы:

- Обнаружены изменения профилей бальмеровских линий и линий HeI в спектре ρ Leo на минутных шкалах времени на уровне 1–2% от потока в соседнем с линией континууме.
- В вариациях профилей линий Ηβ, Ηγ, HeI 4471 и HeI 4922 в спектре ρ Leo, возможно, присутствует регулярная компонента с периодом ~18–19 мин. Эта компонента предположительно является первой гармоникой компоненты с частотой ν = 0.031 мин⁻¹, обнаруженной при анализе вариаций профилей линий в спектре ρ Leo в работе Холтыгина и др. (2018).
- Проведенные спектральные наблюдения *р*Leo и их анализ показывают возможность изучения быстрых вариаций профилей ши- роких линий в спектрах OBA звезд при использовании спектрографов низкого раз- решения с R = 1000-2000 и 1-2 метровых телескопов.

Настоящее исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований (грант 19-02-00311 А). Авторы благодарны рецензенту за замечания, способствующие улучшению текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Астафьева Н.М., Успехи физ. наук **166**, 1145 (1996).
- Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 214 (2005) [V.L. Afanasiev and A.V. Moiseev, Astron. Lett. **31**, 194 (2005)].
- Аэртс и др. (C. Aerts, D.M. Bowman, S. Simon-Diaz, B. Buysschaert, C. Johnston, E. Moravveji, P.G. Beck, P. De Cat, et al.), MNRAS 508, 1234 (2018).
- 4. Витязев В.В., Анализ неравномерных временных рядов (СПб.: Изд. СПбГУ, 2001).
- 5. Гиес, Ламберт (D.R. Gies and D.L. Lambert), Astrophys. J. **387**, 673 (1992).
- 6. Душин и др. (V.V. Dushin, A.F. Kholtygin, G.A. Chuntonov, and D.O. Kudryavtsev), Astrophys. Bull. **68**, 184 (2013).
- 7. Каперидр. (L. Kaper, H.F. Henrichs, A.W. Fullerton, H. Ando, K.S. Bjorkman, D.R. Gies, R. Hirata, E. Kambe, et al.), Astron. Astrophys. **327**, 281 (1997).
- 8. Короновский А.А., Храмов А.Е., *Непрерывный* вейвлетный анализ (М.: Физматлит, 2003).
- 9. Костенков и др. (A. Kostenkov, A. Batrakov, A. Kholtygin, and A. Valeev), Astron. J. Azerbaijan 15, in press (2020).
- 10. Кроузе и др. (P.A. Crowther, D.J. Lennon, and N.R. Walborn), Astron. Astrophys. **446**, 279 (2006).
- Кудряшова Н.А., Холтыгин А.Ф., Астрон. журн. 78 333, (2001) [N.A. Kudryashova and A.F. Kholtygin, Astron. Rep. 45, 287 (2001)].
- 12. Монин и др. (D.N. Monin, S.N. Fabrika, and G.G. Valyavin), Astron. Astrophys. **396**, 131 (2002).
- 13. Морел и др. (Т. Morel, S.V. Marchenko, A.K. Pati, K. Kuppuswamy, M.T. Carini, E. Wood, R. Zimmerman, et. al.), MNRAS **351**, 552 (2004).
- 14. Памятных (А.А. Pamyatnykh) Acta. Astron. **49**, 189 (1999).
- 15. Робертс и др. (D.H. Roberts, J. Lehar, and J.W. Dreher), Astron. J. **93**, 968 (1987).
- Симон-Диаз, Херреро (S. Simón-Diaz and A. Herrero), Astron. Astrophys. 562, A135 (2014).
- 17. Хильер, Миллер (D.J. Hillier and D.L. Miller), Astrophys. J. **496**, 407 (1998).
- 18. Ховарт и др. (I.D. Howarth, K.W. Siebert, G.A.J. Hussain, and R.K. Prinja), MNRAS 284, 265 (1997).
- 19. Холтыгин и др. (A.F. Kholtygin, J.C. Brown, J.P. Cassinelli, S. Fabrika, D.N. Monin, and A.E. Surkov), Astron. Astrophys. Trans. **22**, 499 (2003).

- Холтыгин А.Ф., Бурлакова Т.Е., Фабрика С.Н. и др., Астрон. журн. 83, 990 (2006) [А.F. Kholtygin, T.E. Burlakova, S.N. Fabrika, G.G. Valyavin, and M.V. Yushkin, Astron. Rep. 50, 887 (2006)].
- Холтыгин и др. (A.F. Kholtygin, S.N. Fabrika, T.E. Burlakova, G.G. Valyavin, G.A. Chuntonov, D.O. Kudryavtsev, D. Kang, M.V. Yushkin, and G.A. Galazutdinov), Astron. Rep. 51, 920 (2007a).
- 22. Холтыгин и др. (A.F. Kholtygin, G.A. Chountonov, S.N. Fabrika, T.E. Burlakova, G.G. Valyavin, Kang Dong-il, G.A. Galazutdinov, and M.V. Yushkin), *Physics of Magnetic Stars*, Proc. Conf., held in the Special Astrophys. Observ. of the Russian AS, August 28–31, 2006 (Ed. I.I. Romanyuk and D.O. Kudryavtsev, p. 262, 2007b).
- Холтыгин А.Ф., Шнейвайс А.Б., Бурлакова Т.Е., Миланова Ю.В., Астрофизика **50**, 281 (2007) [A.F. Kholtygin, A.B. Shneiwais, T.E. Burlakova, and Yu.V. Milanova, Astrophysics **50**, 225 (2007c)].
- Холтыгин А.Ф., Фабрика С.Н., Драке Н.А., Бычков В.Д., Бычкова Л.В., Чунтонов Г.А., Бурлакова Т.Е., Валявин Г.Г., Письма в Астрон. журн. **36**, 389 (2010) [А.F. Kholtygin, S.N. Fabrika, N.A. Drake, et al., Astron. Lett. **36**, 370 (2010)].
- 25. Холтыгин и др. (А.F. Kholtygin, S. Hubrig, V.V. Dushin, S. Fabrika, A. Valeev, M. Schöller, and A.E. Kostenkov), *Stars: From Collapse to Collaps*, Proc. Conf. held at Special Astroph. Observ., Nizhny Arkhyz, Russia 3–7 Oct. 2016 (Ed. Yu.Yu. Balega, D.O. Kudryavtsev, I.I. Romanyuk, I.A. Yakunin. San Francisco: Astron. Soc. Pacific, 299, 2017).
- 26. Холтыгин А.Ф., Батраков А.А., Фабрика С.Н. и др., Астроф. Бюлл. **73**, 498 (2018) [А.F. Kholtygin, А.А. Batrakov, S.N. Fabrika, А.F. Valeev, I.M. Tumanova, and O.A. Tsiopa, Astrophys. Bull. **73**, 471 (2018)].
- 27. Холтыгин А.Ф., Батраков А.А., Фабрика С.Н., Валеев А.Ф., Костенков А.Е., Циопа О.А., Астроф. Бюлл., в печати (2020).
- 28. Хубриг и др. (S. Hubrig, M. Schöller, and A.F. Kholtygin), MNRAS **440**, 1779 (2014).
- 29. Хубриг и др. (S. Hubrig, I. Ilyin, A.F. Kholtygin, M. Schöller, and M. Skarka), Astron. Nachr. **338**, 936 (2017).
- Циопа и др. (A. Tsiopa, A. Batrakov, A. Kholtygin, S. Hubrig, S. Fabrika, A. Kostenkov, and A. Valeev), Astron. J. Azerbaijan 15, in press (2020).

АКТИВНОСТЬ МОЛОДОГО СОЛНЕЧНОГО АНАЛОГА — ЗВЕЗДЫ С ЭКЗОПЛАНЕТОЙ DS Tuc

© 2020 г. И. С. Саванов^{1*}, Е. С. Дмитриенко²

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 12.02.2020 г.

После доработки 13.02.2020 г.; принята к публикации 25.02.2020 г.

Представлены результаты анализа фотосферной и хромосферной активности звезды DS Tuc (DS Tuc A, HD 222259A), которая является членом группы Tucana-Horologium (Tuc-Hor) с возрастом 45 млн лет. Звезда DS Tuc может рассматриваться как прототип молодого Солнца, а планетная система — как прототип молодой Солнечной системы. Используя данные из архива наблюдений миссии TESS, мы выполнили анализ активности этой звезды. По нашей оценке, период вращения звезды равен $P = 2.85 \pm 0.18$ сут, что совпадает с известными оценками. Методом решения обратной задачи восстановления карт поверхностных температурных неоднородностей проведен анализ кривой блеска. Показано, что на этих картах имеются концентрации пятен на двух долготах. Положения пятен претерпевают изменения. Доля S запятненной поверхности звезды составляет величину около 3.3 %. Изучено положение объекта на диаграммах S—возраст, S—период вращения и S—числа Россби, и сделан вывод о его соответствии общему характеру зависимостей, установленных ранее для молодых звезд с планетными системами и звезд солнечного типа. По наблюдениям обзора All Sky Automated Survey впервые получена оценка возможного цикла активности DS Tuc, равного 1610 сут (4.4 года).

Ключевые слова: переменные звезды.

DOI: 10.31857/S0320010820030043

ВВЕДЕНИЕ

Космическая миссия TESS (https.heasarc.gsfc.nasa.gov, httpstess.mit.edu) предоставляет уникальную возможность для исследования фотометрической переменности блеска звезд (в том числе с планетными системами) в молодых движущихся группах (YMG). YMG являются динамически несвязанными ассоциациями звезд, которые идентифицированы на основе их общего движения. Возраст ҮМС достигает 300 млн лет, их исследования позволяют изучать объекты в непрерывном диапазоне возрастов, в отличие от анализа молодых звездных скоплений. По плотности звезд ҮМС также отличаются от высокоплотных звездных скоплений, таких как Ясли или Плеяды. Кластеры YMG менее компактны, и поэтому звездные динамические взаимодействия в них встречаются реже. Как следствие этого, их свойства могут быть более характерными для предшественников экзопланетных систем, которые вращаются вокруг типичных звезд поля. Динамические исследования

*Электронный адрес: isavanov@inasan.ru

показывают, что звездные взаимодействия в открытых скоплениях вряд ли разрушают планетные системы, но более мягкие воздействия, такие как изменения эксцентриситета планетных орбит, вполне возможны (см. об этом более подробно вместе с соответствующими ссылками в Ньютон и др., 2019). Наконец, большинство известных YMG значительно ближе, чем звездные скопления, что обеспечивает дополнительные преимущества для нахождения детальных характеристик экзопланетных систем в YMG с помощью таких методов, как транзитная спектроскопия и измерения лучевой скорости.

Ньютон и др. (2019) сообщили об обнаружении близкой экзопланеты с радиусом между радиусами Нептуна и Сатурна около звезды DS Tuc (DS Tuc A, HD 222259A), члена Tucana-Horologium (Tuc-Hor) YMG. DS Tuc — визуально двойная система с первичной G6V и вторичной K3V звездами, отстоящими на 5 угл. сек (см. Ньютон и др., 2019). Кутиспото и др. (2002) приводят отличающуюся оценку спектральных классов для компонентов K3/4V и K5V соответственно.



Рис. 1. Кривая блеска DS Тис по наблюдениям с космической миссией TESS. По оси ординат — нормированный на среднее значение поток излучения, по оси абсцисс — время. Внизу: Спектр мощности, основной пик соответствует периоду вращения звезды P = 2.85 ± 0.18 сут.

DS Тис наблюдалась космической миссией TESS, начиная с первого сектора научных исследований с конца июля по август 2018 г., и была предварительно выбрана для дальнейшего анализа из-за своего членства в молодой движущейся группе Tucana-Horologium. Как и в работе Ньютон и др. (2019), в нашем исследовании мы использовали данные наблюдений звезды, представленные в каталоге MAST (https.mast.stsci.edu).

Цель нашей работы состоит в изучении активности звезды с планетной системой DS Tuc, которая может рассматриваться как прототип молодого Солнца. Методика выполненного исследования была аналогичной проводимой нами ранее при анализе данных из архива космического телескопа Кеплер и из архива наблюдений миссии TESS, включая восстановление карт поверхностных температур и оценку цикла активности звезды. Располагая оценками параметров активности звезды, мы проверили их на соответствие общему характеру зависимостей, установленных нами ранее для молодых звезд с планетными системами.

ОПИСАНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ И ИХ ОБРАБОТКА

Для DS Тис мы использовали данные наблюдений, полученные с временным разрешением в 2 мин. Их обработка была аналогичной проводимой нами ранее для данных из архива космического телескопа Кеплер (см., например, Саванов, Дмитриенко, 2011; Саванов, 2011, 2015) и из архива наблюдений миссии TESS (см., например, Саванов, 2019б). На рис. 1 (вверху) представлена кривая блеска DS Тис. Видна периодическая модуляция, показывающая заметную переменность амплитуды. Согласно результатам Ньютон и др. (2019), период вращения DS Тис Р составляет 2.85 сут. На построенном нами спектре мощности (рис. 1, внизу) имеется пик $P = 2.85 \pm 0.18$ сут. Кроме того, для величины P/2 имеется небольшой пик, который, как правило, интерпретируется как проявление наличия активных областей на противоположных полушариях звезды. Пики, соответствующие основному периоду Р и полупериоду Р/2, отмечены вертикальными линиями на рис. 1. Кроме того, на рис. 1 еще одной линией отмечен пик, соответству-



Рис. 2. Пример результатов восстановления температурных неоднородностей на поверхности DS Тис для 8 сетов наблюдений. Более темные области на рисунках соответствуют более высоким значениям факторов заполнения f. Также приводятся наблюдаемые кривые блеска и теоретические, построенные по восстановленной модели.

ющий периоду в 3.4 сут. По методике, примененной для определения параметров дифференциального вращения 12 300 звезд из данных наблюдений телескопа Кеплер, опубликованных Рейнхолд и Гизон (2015), с найденными нами значениями периодов (2.85 и 3.4 сут соответственно) мы оценили для DS Тис параметр дифференциального вращения звезды $\Delta\Omega$ (различие угловых скоростей вращения на экваторе и на полюсе). Общепринято, что закон дифференциального вращения описывается уравнением вида $\Omega(\theta) = \Omega(eq) (1 - \alpha \sin^2(\theta))$, где θ широта. По нашей оценке, DS Тис имеет параметр $\Delta\Omega = 0.357 \pm 0.010$ рад/сут. Полученная величина выше, чем характерные величины $\Delta\Omega$ для звезд солнечного типа (Саванов и др., 2018а), но сопоставима с макимальными из найденных в Фолсом и др. (2018) методом доплеровского картирования.

Дальнейший анализ фотометрической переменности звезды был сделан нами со средним фотометрическим периодом, составляющим 2.85 сут. Как и в наших предыдущих исследованиях карликов поздних спектральных классов (Саванов, Дмитриенко, 2011; Саванов, 2011), мы выполнили анализ каждой индивидуальной кривой блеска с помощью программы iPH (Саванов, Штрассмейер, 2008). Программа решает обратную задачу восстановления температурных неоднородностей на поверхности звезды по кривой блеска в двухтемпературном приближении (интенсивность излучения от каждой элементарной площадки на поверхности звезды складывается из двух компонент: фотосферы и

холодного пятна). Полное описание программы и ее тесты представлены нами в Саванова и Штрассмейер (2008). Подробности анализа можно найти в наших предыдущих публикациях (см., например, Саванов, 2011; Дмитриенко, Саванов, 2017а). Согласно данным Ньютон и др. (2019), температура фотосферы DS Тис была принята равной 5428 ± ± 80 К. Как и в большинстве предыдущих исследований, мы воспользовались стандартным соотношением между температурами пятен и невозмущенной фотосферы (см. обсуждение в работе Саванова, 2019в) и установили, что для исследуемой нами звезды можно ожидать, что температура запятненной поверхности ниже температуры фотосферы на 1000 К. Согласно нашей методике, для каждой элементарной площадки размером $6^{\circ} imes$ $imes 6^\circ$ на поверхности звезды был определен фактор заполнения f (доля поверхности элементарной площадки, занимаемая пятнами). В расчетах были использованы данные сетки моделей Куруца. Вычисления были проведены при значении параметра угла наклона оси вращения звезды к лучу зрения *i* = 82° (Ньютон и др., 2019).

На рис. 2 в качестве примера представлены результаты восстановления температурных неоднородностей на поверхности DS Тис для ряда сетов наблюдений. Там же приведены наблюдаемые и теоретические (построенные по восстановленной модели) кривые блеска. Как правило, на поверхностных картах имеются концентрации пятен на двух долготах — их значения регистрировались на-



Рис. 3. Зависимость индексов R'_{HK} от возраста (в млн лет) для изученных звезд — близнецов Солнца по данным БороСаикиа и др. (2018). Горизонтальная линия и квадрат соответствуют данным о хромосферной активности Солнца. Ромбы — результаты определения средних величин индекса R'_{HK} для звездных скоплений с возрастом 0.6–4.5 млрд лет. Оконтуренный кружок — данные для DS Tuc.

ми как две независимые активные области (долготы, АД), примерно на фазах 0.15 и 0.75. Установлено, что площадь первой области, как правило, меньше, чем площадь второй. Мы будем называть их соответственно АД А и АД В. В течение наблюдений наиболее активной была АД В, причем ее положения претерпевали изменения менее значительные, чем у долготы А. Изменения в положениях и размерах активных областей (пятен) происходили во временных интервалах, сопоставимых по длительности с периодом вращения звезды. Значение величины параметра запятненности S для DS Tuc составляет в среднем $3.3 \pm 0.2\%$. Наибольшая погрешность определения S связана с установлением уровня блеска для звезды без пятен на поверхности. Общепринято, что он соответствует ее максимальному наблюдательному блеску.

ХРОМОСФЕРНАЯ АКТИВНОСТЬ

Как указали Генри и др. (1996), DS Тис следует отнести к числу объектов с высокой фотосферной и хромосферной активностью (log $R'_{HK} =$ = -4.09). Хромосферная активность является еще одним из хорошо известных индикаторов активности звезд. Измерение хромосферной активности многочисленной выборки звезд послужило предметом многолетних программ мониторинга обсерватории Маунт Вилсон, а в дальнейшем — и других обсерваторий (см. подробности в работе БороСаикаи и др., 2018). Как и скорость осевого вращения звезд, хромосферная активность (характеризуемая индексом R'_{HK}) убывает с увеличением их возраста. Указанный параметр также можно рассматривать как индикатор возраста звезды. Ранее Саванов и Дмитриенко (2017) использовали результаты исследования Рамирез и др. (2014), в котором для звезд — близнецов Солнца были сопоставлены измеренные авторами индексы R'_{HK} с возрастами изученных объектов (установленных по изохронам с погрешностью определений вплоть до 1.3 млрд лет) (рис. 3). Мы дополнили данные исследования Рамирез и др. (2014) результатами определений средних величин индекса R'_{НК} для звездных скоплений с возрастом 0.6-4.5 млрд лет (Мамаджек, Хилленбранд, 2008). Как следует из рис. 3, с увеличением возраста происходит уменьшение хромосферной активности, при этом для звезд старше 4 млрд лет она спадает до солнечного уровня (горизонтальная линия и квадрат соответствуют данным о хромосферной активности Солнца). Как отметил Саванов (2018), разброс параметра R'_{HK} частично может быть обусловлен его переменностью, например, в ходе цикла активности. При сопоставлении для изученных объектов диаграмм "R'_{HK}-возраст" и "параметр S-возраст" (см. также результаты Дмитриенко, Саванов, 2017а, и Саванов, Дмитриенко, 2017) можно заключить, что рассматриваемые на них зависимости обладают общими характерными особенностями, указывающими на повышенный уровень активности молодых объектов, относительно малые изменения активности объектов с возрастом 4-8 млрд лет и возможное дальнейшее уменьшение активности более старых звезд (Рамирез и др., 2014, отмечают, что спад активности наступает при возрасте звезд более 9 млрд лет). Данные о хромосферной активности молодой звезды DS Tuc,



Рис. 4. Сверху: Кривая блеска DS Тис по данным, доступным из архива наблюдений All Sky Automated Survey. Внизу: спектр мощности для диапазонов периодов 1–6000 сут. Вертикальными линиями отмечены циклы продолжительностью 1610 и 360–400 сут.

обладающей возрастом в 45 млн лет, хорошо соответствуют зависимости параметра R_{HK}^\prime от возраста, предложенной Мамаджек и Хилленбранд (2008) для звезд молодых скоплений. Таким образом, можно заключить, что зависимость, характеризующая связь параметра S и возраст, повторяет вид зависимости $\log R'_{HK}$ — возраст. Также как и исследование связи между параметрами S и Ro для карликов спектрального класса М (Дмитриенко, Саванов, 2017а), наш анализ соотношения logR'_{HK} — возраст дает основание предполагать, что полученная нами зависимость в дальнейшем дополнит и расширит возможности совместного анализа зависимости хромосферной и фотосферной активности звезд от возраста и найдет применение для уточнения параметров, характеризующих действие динамо-механизмов, в том числе для звезд, обладающих планетными системами. В то же время подчеркнем, что получение оценок параметра запятненности S менее трудоемко, чем определение рентгеновской светимости и даже чем спектральные исследования, являющиеся основой для получения величин $\log R'_{HK}$, так как оценки S

могут быть выполнены для многочисленных выборок объектов и по космическим, и по наземным наблюдениям.

ЦИКЛЫ АКТИВНОСТИ

Для оценки возможного цикла активности DS Тис мы использовали данные из архива наблюдениий обзора All Sky Automated Survey http://www.astrouw.edu.pl/asas/. Была рассмотрена 801 оценка блеска звезды в фильтре V. На основе построенного спектра мощности можно сделать заключение о наличии возможного цикла активности порядка 1610 сут (4.4 года) (рис. 4, нижняя диаграмма). На рис. 4 (нижняя диаграмма) отмечен еще один пик (порядка 360-400 сут), который рассматривается нами как артефакт, соответствующий сезонной цикличности наблюдений. По своей продолжительности 4.4-летний цикл активности звезды DS Тис сопоставим с установленным Санч-Форкада и др. (2019) 1.6летним циклом для еще одного молодого солнечного аналога *и* Hor (возраст 600 млн лет).
В работе Саванова и Дмитриенко (2019а) мы привели результаты анализа активности одиночной звезды спектрального класса G2V V889 Her (HD 171488, НІР 91043), которая является молодым солнечным аналогом и характеризуется как переменная типа BY Draconis. Ее возраст соответствует 30-50 млн лет. Молодые звезды солнечного типа представляют особый интерес при изучении звездной активности и эволюции, так как они дают нам представление о том, каким могло быть в прошлом Солнце. На этой ранней стадии эволюции солнечные близнецы намного более магнитоактивны, чем Солнце в настоящее время. В статье Саванова и Дмитриенко (2019а) приведены основные свойства V889 Her. Как и следовало ожидать, молодая звезда V889 Her обладает быстрым вращением, период ее вращения P = 1.33 сут. На построенном спектре мошности переменности блеска объекта хорошо выделяются пики, соответствующие циклам в 7.15 лет, 12.5 лет и около 35 лет. К сожалению, используемые нами данные для DS Тис из архива наблюдениий обзора All Sky Automated Survey вследствие своей недостаточной продолжительности не позволяют установить наличие циклов с длительностью более 6-8 лет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее в работе Саванова и Дмитриенко (2019б) мы привели результаты нашего исследования активности пяти молодых звезд, обладающих планетными системами: К2-231, ЕРІС 219388192, К2-136, Kepler-66 и Kepler-67. Возраст этих объектов был установлен по их принадлежности к скоплениям. Мы представили заключения о характере изменений блеска изучаемых звезд. Кроме того, нами были найдены или уточнены периоды их вращения, которые, как было показано, лежат в интервале 9-15 сут. Для Kepler-66 и Kepler-67 были получены оценки параметра дифференциального вращения $\Delta\Omega$, которые составили 0.04-0.05 рад/сут и 0.04 рад/сут соответственно. По фотометрическим данным мы построили карты температурных неоднородностей на поверхности пяти изученных звезд и сделали заключение о характере эволюции изменений положений активных областей. При этом были определены величины параметра Sплощади запятненной поверхности звезд, которая для наших объектов находится в пределах $0.7\pm$ $\pm 4.5\%$ от площади их полной видимой поверхности. Наконец, было изучено положение объектов на диаграммах S-возраст, S-период вращения и S-числа Россби, сделан вывод о его соответствии общему характеру зависимостей, установленных нами ранее для 1570 М карликов.

Исследование Саванова и Дмитриенко (2019б) явилось продолжением наших работ по анализу активности молодых звезд с экзопланетами. Ранее нами (Дмитриенко, Саванов, 2017б) были представлены результаты изучения планеты типа Нептун в системе М карлика ЕРІС 210490365 (К2-25) в скоплении Гиады (650-800 млн лет). В статье Саванова и др. (2018б) мы изучили два объекта — ЕРІС 211901114 из скопления Ясли и ЕРІС 205117205 (К2-33), входящий в подгруппу Upper Scorpius ассоциации Sco-Cen. Результаты нашего анализа активности молодого объекта EPIC 247267267 из ассоциации Cas-Tau с возрастом порядка 46 ± 8 млн лет приводятся в работе Саванова (2018). Эта система (вместе с К2-33) является одной из наиболее молодых планетных систем, обнаруженных методом транзитов.

В настоящей работе мы сопоставили параметр запятненности S для DS Тис и других молодых звезд с планетными системами (см. Саванов, Дмитриенко, 2019б, и ссылки) с параметром S, определенным для 18 140 звезд главной последовательности из статьи Рейнхолд и Гизон (2015) с эффективной температурой менее 6500 К и периодами вращения Р от 1.5 до 60 сут. Величины параметра S, установленные по величинам $R_{\rm var}$ (амплитуды переменности блеска объектов — табл. 4 из Рейнхолд, Гизон, 2015), были рассмотрены нами в качестве индикаторов активности. Возраст объектов был оценен по уравнениям гирохронологической зависимости (см. в Рейнхолд, Гизон, 2015). Диаграмма, связывающая запятненность объектов S и их возраст, представлена на рис. 5 (верхняя панель). На рис. 5 также приведены данные об исследованных нами ранее звездах, обладающих планетными системами. На диаграмме положения DS Тис представлено символом оконтуренного кружка. Можно заключить, что общее согласие между данными для параметра запятненности объектов, достоверно входящих в скопления с известным возрастом, и объектов из Рейнхолд и Гизон (2015), возраст которых найден по гирохронологической зависимости, указывает на достаточную надежность калибровки из Рейнхолд и Гизон (2015). На диаграмме зависимости параметра запятненности от периода вращения звезды (рис. 5, средняя панель) положения для DS Тис хорошо согласуются со сделанными ранее в работе Дмитриенко и Саванова (2017а) заключениями об уменьшении активности (параметра запятненности) объектов с периодами вращения, превышающими 8-10 сут. Группа более быстро вращающихся объектов, исследованных нами ранее (периоды вращения Р которых меньше 10–12 сут), характеризуется большими значениями параметра S. Несомненно, DS Тис входит в группу быстро вращающихся



Рис. 5. Сверху: Зависимость параметра запятненности S для звезд главной последовательности (Рейнхолд и Гизон, 2015) от их возраста (возраст приводится в млн лет). Средняя диаграмма: Зависимость S от периода P вращения звезды. Внизу: Зависимость S от чисел Россби. Вертикальная линия соответствует величине параметра Ro (насыщения) = 0.13. На всех диаграммах положение объектов из работы Рейнхолд и Гизон (2015) отмечено светлыми кружками. Положению К2-25 соответствует символ ромб. Большой темный кружок представляет данные для К2-33, а средний темный кружок — для EPIC 211901114, квадрат — для EPIC 247267267. Положения пяти объектов из статьи Дмитриенко и Саванова (2019б) представлены символами крестик. Положение DS Тис — оконтуренный кружок.

объектов, при этом величина параметра запятненности S для этой звезды составляет $3.3\pm0.2\%$.

Дмитриенко и Саванов (2017а) высказали предположение о том, что диаграмма S-Ro повторяет классическую зависимость рентгеновской светимости активных звезд от числа Россби, и что режим насыщения достигается при той же величине параметра Ro (насыщения) = 0.13. Это заключение было получено нами из анализа данных МакКуиллан и др. (2013). В статье Саванова и Дмитриенко (20196) сделан вывод, что оно подтверждается также по другому набору данных из Рейнхолд и Гизон (2015). При установленных числах Россби пяти исследуемых нами звезд их положение на диаграмме S-Ro свидетельствует о возможной применимости для них оценок Райт и др. (2011). Единственным из рассматриваемых объектов, лежащим на диаграмме S-Ro в области насыщения, является K2-25 (число Россби для него составляет 0.03). По полученным оценкам рентгеновская светимость DS Tuc равна lg(Rx) = -3.99 (Rx = Lx/Lbol), что существенно выше солнечной величины lg(Rx) = -6.24 (см. Армстронг и др., 2016). До получения результатов точных рентгеновских наблюдений эта оценка может быть использована при моделировании влияния активности звезды на входящие в ее систему планеты.

Благодаря своему сравнительно яркому блеску,

система DS Тис А предоставляет широкие возможности для детальных исследований экзопланет на их ранних стадиях эволюции. Как отмечается в статье Ньютон и др. (2019), измерение массы планеты в молодой системе DS Тис позволило бы сравнить ее плотность с плотностью более старых планет. Стандартные соотношения, основанные на изучении экзопланет у более старых звезд, могут приводить к переоценкам массы планеты в рассматриваемом случае, так как в них не учитывается, что планета со временем может подвергаться воздействию от звезды (фотоиспарение атмосферы вследствие облучения ультрафиолетовым потоком звезды, вспышечная активность звезды, корональные выборы массы и проч.). Вопрос о том, будут ли при этом одновременно изменяться и радиус, и масса планеты (Ньютон и др., 2019), остается открытым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космическая миссия TESS предоставляет уникальную возможность для исследования фотометрической переменности блеска звезд с планетными системами в молодых движущихся группах и в скоплениях различного возраста. Ньютон и др. (2019) сообщили об обнаружении близкой экзопланеты с величиной радиуса между радиусами Нептуна и Сатурна около звезды DS Tuc (DS Tuc A, HD 222259A), которая является членом группы Tucana-Horologium (Tuc-Hor) с возрастом порядка 45 млн лет. DS Тис — визуально двойная система, состоящая из первичной G6V и вторичный K3V звезд. Компонент спектрального класса G6V может рассматриваться как прототип молодого Солнца, а сама планетная система — как прототип молодой солнечной системы. Мы выполнили анализ активности горячего компонента G6V. Обработка данных аналогична проводимой нами ранее при анализе данных из архива космического телескопа Кеплер и из архива наблюдений миссии TESS. По нашей оценке, период вращения звезды равен $P = 2.85 \pm 0.18$ сут, что совпадает с литературными оценками. Если интерпретировать появление на спектре мощности второго пика, соответствующего периоду в 3.4 сут, как указание на наличие дифференциального вращения звезды, то параметр дифференциального вращения DS Tuc $\Delta\Omega = 0.357 \pm 0.010$ рад/сут. Дальнейший анализ фотометрической переменности звезды был выполнен нами со средним фотометрическим периодом, составляющим 2.85 сут. Методом решения обратной задачи восстановления карт поверхностных температурных неоднородностей проведен детальный анализ кривой блеска. Показано, что, как правило, на поверхностных картах имеются концентрации пятен на двух долготах. Положения и

размеры пятен претерпевают изменения и временами нестабильны. Доля запятненной поверхности звезды S составляет величину около 3.3%.

Изучено положение объекта на диаграммах Sвозраст, S-период вращения и S-числа Россби, и сделан вывод о его соответствии общему характеру зависимостей, установленных нами ранее для молодых звезд с планетными системами. Впервые получена оценка возможного цикла активности DS Tuc в 1610 сут (4.4 года) по наблюдениям All Sky Automated Survey http://www.astrouw.edu.pl/asas/.

Исследование выполнено в рамках проекта "Исследование звезд с экзопланетами" по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение № 075-15-2019-1875).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Армстронг и др. (D.J. Armstrong, C.E. Pugh, A.-M. Broomhall, D. J.A. Brown, M.N. Lund, H.P. Osborn, and D.L. Pollacco), MNRAS **455**, 3110 (2016).
- 2. БороСаикиа и др. (S. Boro Saikia, C.J. Marvin, S.V. Jeffers, A. Reiners, R. Cameron, S.C. Marsden, P. Petit, J. Warnecke, and A. P. Yadav), Astron. Astrophys. **616**, A108 (2018).
- 3. Генри и др. (T.J. Henry, D.R. Soderblom, R.A. Donahue, and S.L. Baliunas), Astronom. J. **111**, 439 (1996).
- 4. Дмитриенко, Саванов (E.S. Dmitrienko and I.S. Savanov), Astron. Rep. **61**, 122 (2017а).
- 5. Дмитриенко, Саванов (E.S. Dmitrienko and I.S. Savanov), Astron. Rep. **61**, 871 (20176).
- 6. Кутиспото и др. (G. Cutispoto, L. Pastori, L. Pasquini, J.R. de Medeiros, G. Tagliaferri, and J. Andersen), Astron. Astrophys. **384**, 491 (2002).
- 7. МакКуиллан и др. (A. McQuillan, S. Aigrain, and T. Mazeh), MNRAS **432**, 1203 (2013).
- 8. Мамаджек, Хилленбранд (Е.Е. Mamajek and L.A. Hillenbrand), Astrophys. J. **687**, 1264 (2008).
- Ньютон и др. (E.R. Newton, A.W. Mann, B.M. Tofflemire, L. Pearce, A.C. Rizzuto, A. Vanderburg, R.A. Martinez, J.J. Wang, et al.), Astrophys. J. Lett. 880, 15 (2019).
- 10. Райт и др. (N.J. Wright, J.D. Drake, E.E. Mamajek, and G.W. Henry), Astrophys. J. **743**, 48 (2011).
- Рамирез и др. (I. Ramirez, J. Melendez, J. Bean, M. Asplund, M. Bedell, T. Monroe, L. Casagrande, L. Schirbel, et al.), Astron. Astrophys. 572, A48 (2014).
- 12. Рейнхолд, Гизон (T. Reinhold and L. Gizon), Astron. Astrophys. **583**, A65 (2015).
- 13. Саванов (I.S. Savanov), Astron. Rep. 55, 341 (2011).
- 14. Саванов (I.S. Savanov), Astrophys. Bull. **70**, 292 (2015).

- 15. Саванов (I.S. Savanov), Proceed. of the 2018 acad. A.A. Boyarchuk Memorial Conference, INASAN Science Proceedings (Ed. D.V. Bisikalo and D.S. Wiebe, Moscow: Yanus-K, 2018), p. 73.
- 16. Саванов (I.S. Savanov), INASAN Sci. Rep. **3**, 179 (2019а).
- 17. Саванов (I.S. Savanov), Astrophys. J. **62**, 513 (20196).
- 18. Саванов (I.S. Savanov), INASAN Sci. Rep. **3**, 244 (2019в).
- 19. Саванов, Дмитриенко (I.S. Savanov and E.S. Dmitrienko), Astron. Rep. **55**, 890 (2011).
- 20. Саванов, Дмитриенко (I.S. Savanov and E.S. Dmitrienko), Astron. Rep. **61**, 461 (2017).
- 21. Саванов, Дмитриенко (I.S. Savanov and E.S. Dmitrienko), INASAN Sci. Rep. **3**, 173 (2019а).
- 22. Саванов, Дмитриенко (I.S. Savanov and E.S. Dmitrienko), Astron. Rep. **63**, 595 (20196).

- 23. Саванов, Штрассмейер (I.S. Savanov and K.G. Strassmeier), Astron. Nachrichten **329**, 364 (2008).
- 24. Саванов и др. (I.S. Savanov, E.S. Dmitrienko, D.S. Pandei, and S. Karmakar), Astrophys. Bull. 73, 454 (2018а).
- 25. Саванов и др. (I.S. Savanov, E.S. Dmitrienko, S. Karmakar, and J.C. Pandey), Astron. Rep. **62**, 532 (20186).
- 26. Санч-Форкада и др. (J. Sanz-Forcada, B. Stelzer, M. Coffaro, S. Raetz, and J.D. Alvarado-Gómez), Astron. Astrophys. **631**, A45 (2019).
- 27. Фолсом и др. (С.Р. Folsom, J. Bouvier, P. Petit, A. Lkre, L. Amard, A. Palacios, J. Morin, J.-F. Donati, and A.A. Vidotto), MNRAS **474**, 4956 (2018).

УПРАВЛЯЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ПАРУСА В ОКРЕСТНОСТИ КОЛЛИНЕАРНОЙ ТОЧКИ ЛИБРАЦИИ

© 2020 г. Д. В. Шиманчук^{1*}, А. С. Шмыров¹, В. А. Шмыров¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия Поступила в редакцию 23.10.2019 г. После доработки 25.02.2020 г.; принята к публикации 25.02.2020 г.

Рассматривается движение космического аппарата с солнечным парусом в рамках ограниченной задачи трех тел системы Солнце–Земля. Исследуются уравнения управляемого орбитального движения солнечного паруса в окрестности коллинеарной точки либрации L_1 системы Солнце–Земля. Для описания управляемого орбитального движения космического аппарата и разработки законов управления используются модифицированные уравнения круговой ограниченной задачи трех тел системы Солнце–Земля. Основным результатом работы является предложенный закон управления в виде обратной связи, обеспечивающий удержание космического аппарата окрестности точки либрации L_1 при использовании сил светового давления.

Ключевые слова: ограниченная задача трех тел, коллинеарная точка либрации, солнечный парус, орбитальное движение, управление.

DOI: 10.31857/S0320010820030055

ВВЕДЕНИЕ

Полеты в окрестности коллинеарной точки либрации (L_1 или L_2) системы Солнце—Земля (Маркеев, 1978) уже давно имеют практическое значение в связи с проектами, реализуемыми NASA и ESA (ISEE-3, SOHO, WIND, ACE, Genesis и т.д.).

Идея использования солнечного паруса для удержания космического аппарата (КА) в окрестности коллинеарной точки либрации была сформулирована в работе Буклесса, Макиннеса (2008). В этой работе были изучены возможности использования изменения площади паруса, а также изменение ориентации паруса для удержания космического аппарата на квази-периодической орбите. В нашей работе КА удерживается вблизи инвариантного многообразия в окрестности коллинеарной точки либрации.

Под солнечным парусом будем понимать КА с установленной и развернутой на нем зеркальной поверхностью, которая, отражая солнечный свет, сообщает КА управляющее ускорение.

Движение КА с солнечным парусом рассматривается в окрестности коллинеарной точки либрации во вращающейся геоцентрической системе координат в рамках хилловского приближения круговой ограниченной задачи трех тел Солнце– Земля–КА (Шмыров, 2005).

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

В качестве основной динамической модели движения будем рассматривать ограниченную круговую задачу трех тел. Уравнения неуправляемого движения во вращающейся барицентрической системе координат представлены в работе Себехея (1967), уравнения управляемого движения во вращающейся барицентрической системе координат $Ox_1x_2x_3$ могут быть представлены в виде

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + y_1, \\ \dot{x}_2 = -x_1 + y_2, \\ \dot{x}_3 = y_3, \\ \dot{y}_1 = -\mu \frac{x_1 + 1 - \mu}{r_1^2} - (1 - \mu) \frac{x_1 - \mu}{r_2^2} + y_2 + u_1, \\ \dot{y}_2 = -\mu \frac{x_2}{r_1^2} - (1 - \mu) \frac{x_2}{r_2^2} - y_1 + u_2, \\ \dot{y}_3 = -\mu \frac{x_3}{r_1^2} - (1 - \mu) \frac{x_3}{r_2^2} + u_3, \end{cases}$$
(1)

где $\mathbf{x} = (x_1; x_2; x_3)$ — вектор координат КА, $\mathbf{y} = (y_1; y_2; y_3)$ — вектор сопряженных импульсов, $\mu = \frac{M_1}{M_1 + M_2}, \quad M_1$ — масса Земли, M_2 — масса Солнца, $r_1 = \sqrt{(x_1 + 1 - \mu)^2 + x_2^2 + x_3^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x_1 - \mu)^2 + x_2^2 + x_3^2}, \quad r_2 = \sqrt{(x_1 - \mu)^2 + x_2^2 + x_3^2}, \quad O$ — центр инерции Земли и Солнца, ось Ox_1 направлена вдоль оси, соединяющей O и центр масс Солнца; $\mathbf{u} = (u_1; u_2; u_3)$ — вектор управляющего воздействия. В принятой

^{*}Электронный адрес: d.shimanchuk@spbu.ru

модели единицы времени и расстояния выбраны таким образом, что единица расстояния равна а. е., R — расстояние от Земли до Солнца, а единица времени — 58.0916 сут (год, деленный на 2π). Точка либрации L_1 во вращающейся системе неподвижна и имеет координаты $\mathbf{x}^* = (-0.9900265046; 0; 0),$ $\mathbf{y}^* = (0; -0.9900265046; 0).$

В случае, когда $\mathbf{u} = 0$, будет имеем неуправляемую систему (1), которой будет отвечать неуправляемое движение. Неуправляемая система (1) гамильтонова, с функцией Гамильтона

$$H = \frac{||\mathbf{y}||^2}{2} - \frac{\mu}{r_1} - \frac{1-\mu}{r_2} + x_2y_1 - x_1y_2,$$

где || * || — евклидова норма вектора.

При построении законов управления ориентацией солнечного паруса будем использовать упрощенные уравнения, так называемое хилловское приближение уравнений движения. Эти уравнения получаются из (1), если перейти от барицентрической вращающейся системы координат к относительной вращающейся системе координат с началом в центре Земли и оставить два первых члена в разложении солнечного потенциала по степеням $\frac{||\mathbf{x}||}{R}$. Такой прием применил Хилл в своей теории движения Луны.

Уравнения управляемого движения КА во вращающейся системе координат в рамках хилловского приближения для солнечного потенциала могут быть представлены в виде (Шмыров, 2005)

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + y_1, \\ \dot{x}_2 = -x_1 + y_2, \\ \dot{x}_3 = y_3, \\ \dot{y}_1 = -\frac{3x_1}{||\mathbf{x}||^3} + 2x_1 + y_2 + u_1, \\ \dot{y}_2 = -\frac{3x_2}{||\mathbf{x}||^3} - x_2 - y_1 + u_2, \\ \dot{y}_3 = -\frac{3x_3}{||\mathbf{x}||^3} - x_3 + u_3, \end{cases}$$

$$(2)$$

где $\mathbf{x} = (x_1; x_2; x_3)$ — вектор координат КА, $\mathbf{y} = (y_1; y_2; y_3)$ — вектор сопряженных импульсов, центр инерции Земли совпадает с началом системы координат, а ось Ox_1 направлена вдоль оси, соединяющей центры масс Земли и Солнца; $\mathbf{u} = (u_1; u_2; u_3)$ — вектор управляющего воздействия. В случае, когда $\mathbf{u} = \mathbf{0}$, будем иметь неуправляемую систему (2), которая описывает неуправляемое движение. В принятой модели единицы времени и расстояния выбраны таким образом, что единица расстояния приблизительно равна 10^{-2} а. е. $\approx 1.5 \times 10^6$ км, а единица времени — 58.0916 сут (год, деленный на 2π). Точка либрации L_1 во вращающейся системе неподвижна и имеет координаты $\mathbf{x}^* = (1; 0; 0), \mathbf{y}^* = (0; 1; 0).$ Неуправляемая система (2) — гамильтонова, где функция Гамильтона

$$H = \frac{||\mathbf{y}||^2}{2} - \frac{3}{||\mathbf{x}||} - \frac{3x_1^2}{2} + (3) + \frac{||\mathbf{x}||^2}{2} + x_2y_1 - x_1y_2.$$

Известно, что гамильтониан (3) на траекториях движения сохраняет свое значение, т.е. является интегралом для системы (2). Этот факт может быть использован для оценки точности приводимых примеров численного интегрирования.

Система линеаризованных уравнений неуправляемой системы (2) в окрестности коллинеарной точки либрации L_1 имеет вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + y_1, \\ \dot{x}_2 = -x_1 + y_2, \\ \dot{x}_3 = y_3, \\ \dot{y}_1 = 8(x_1 - 1) + (y_2 - 1), \\ \dot{y}_2 = -4x_2 - y_1, \\ \dot{y}_3 = -4x_3. \end{cases}$$
(4)

Матрица неуправляемой линеаризованной системы (4) имеет набор собственных значений (Шмыров, 2005)

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{1 + 2\sqrt{7}} = \pm l,$$

$$\lambda_{3,4} = \pm i \sqrt{2\sqrt{7} - 1} = \pm i\omega_{\mathbf{e}},$$

$$\lambda_{5,6} = \pm 2i = \pm 2i\omega_{\mathbf{n}}.$$

Замечание. Из положительности собственного значения $\lambda_1 = \sqrt{1 + 2\sqrt{7}}$ следует неустойчивость точки либрации L_1 .

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Коллинеарная точка либрации является неустойчивой (Маркеев, 1978), что, очевидно, приводит к задаче стабилизации небесных тел в окрестности коллинеарной точки либрации (Шмыров, 2005). С другой стороны, неустойчивость точки либрации может быть использована как положительный фактор при задаче маневрирования небесного тела в околоземном космическом пространстве (Шмыров и др., 2015; Шмыров, Шиманчук, 2015). Примером такого рода задач могут служить проекты, направленные на решение проблемы кометно-астероидной опасности, в частности, с целью мониторинга и перехватов космических объектов, опасно сближающихся с Землей.

В этом случае и возникает задача исследования движения КА с солнечным парусом в окрестности коллинеарной точки либрации *L*₁.

Пусть солнечный парус с заданными характеристиками (m — масса КА с солнечным парусом, S — площадь солнечного паруса) находится в окрестности коллинеарной точки либрации L_1 с начальными данными x_{10} , x_{20} , x_{30} , y_{10} , y_{20} , y_{30} . Требуется определить закон изменения ориентации паруса с целью удержания КА в окрестности L_1 .

Предлагается закон управления орбитальным движением солнечного паруса в окрестности точки либрации. Этот закон получен как решение задачи оптимального демпфирования специальной функции от фазовых переменных (координат и сопряженных импульсов) — "функции опасности" в виде обратной связи, т.е. угол ориентации зависит от фазовых переменных.

ФУНКЦИЯ ОПАСНОСТИ

Важной характеристикой поведения решения как системы (4), так и системы (2) в окрестности коллинеарной точки либрации *L*₁, является линейная форма фазовых переменных — функция опасности (Шмыров и др., 2015; Шмыров, Шиманчук, 2015; Поляхова и др., 2018; Шиманчук, Шмыров, 2013):

$$d_1 = \mathbf{a}_1 \mathbf{z},$$

где $\mathbf{a}_1 = (a_{11}; a_{12}; 0; a_{14}; a_{15}; 0)$ — собственный вектор-строка, соответствующий собственному значению l, $\mathbf{z} = (x_1 - 1; x_2; x_3; y_1; y_2 - 1; y_3)$ вектор-столбец. Вектор \mathbf{a}_1 определяется с точностью до множителя, для определенности положим

$$a_{14}^2 + a_{15}^2 = 1, (5)$$

и компонента $a_{11} > 0$.

На траекториях неуправляемой линеаризованной системы (4) функция опасности, как функция времени, имеет вид

$$d_1(t) = ce^{lt},$$

где *с* — действительное число, определяемое из начальных условий.

У неуправляемой системы уравнений (4) имеется инвариантное 5-мерное многообразие, заполненное ограниченными траекториями, асимптотически приближающимися к двухчастотным колебаниям с частотами ω_e и ω_e . Это многообразие определяется уравнением

$$d_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0.$$

В общем случае для неуправляемой нелинейной системы (2) знак функции опасности определяет направление ухода из окрестности коллинеарной



Рис. 1. Солнечный парус во вращающейся системе координат.

точки либрации L_1 к Земле или к Солнцу. Этот результат получен из численных экспериментов.

Для управляемой линеаризованной системы уравнений движения (4) поведение функции опасности d₁ на траекториях описывается уравнением

$$d_1 = ld_1 + a_{14}u_1 + a_{15}u_2. (6)$$

Уравнение (6) позволяет строить управления по методу оптимального демпфирования функции опасности. Эти управления могут использоваться как для стабилизации (Шмыров, 2005), так и для маневрирования (Шмыров и др., 2015; Шмыров, Шиманчук, 2015; Поляхова и др., 2018; Шиманчук, Шмыров, 2013).

УПРАВЛЯЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ КА С СОЛНЕЧНЫМ ПАРУСОМ

Пусть ҚА с солнечным парусом движется таким образом, что орт вектора нормали паруса е все время параллелен плоскости эклиптики. В этом случае управляющее ускорение, создаваемое направленным потоком фотонов от Солнца, также будет лежать в плоскости, параллельной плоскости эклиптики. Отраженный поток в случае идеально отражающей поверхности солнечного паруса сообщает небесному телу ускорение, которое определяется по формуле

$$-2\frac{pS}{m}\langle \mathbf{i},\mathbf{e}\rangle^2\mathbf{e},$$

где p — давление солнечного света; $\langle *, * \rangle$ — операция скалярного произведения векторов; **i** — орт направления от Земли к Солнцу (рис. 1).

В таком случае можно определить компоненты вектора управления, создаваемого солнечным парусом:

$$u_{1} = -2\frac{pS}{m}\cos^{3}\varphi, \qquad (7)$$
$$u_{2} = -2\frac{pS}{m}\cos^{2}\varphi\sin\varphi, \\u_{3} = 0,$$

где управляющий параметр φ — угол между векторами **i** и **e**. Угол φ при движении KA в достаточно малой окрестности точки либрации можно принять равным углу между направлением на Солнце и вектором нормали паруса.

Следует заметить, что реализация закона управления (7) отвечает плоскому развороту паруса вокруг нормали к плоскости эклиптики.

Если парус обладает односторонней отражающей поверхностью, то, согласно (7), управляющий параметр лежит в отрезке $-\frac{\pi}{2} \le \varphi \le \frac{\pi}{2}$.

Движению к Солнцу из окрестности L_1 соответствует траектория $d_1 > 0$, а движению к Земле траектория с $d_1 < 0$. Для производной функции опасности (6), учитывая (5) и (7), тогда можем записать

$$\dot{d}_1 = ld_1 - 2\frac{pS}{m}f(\varphi),\tag{8}$$

где $f(\varphi) = \cos^2 \varphi \sin(\varphi + \varphi_0), \quad \varphi_0 = \operatorname{arctg} \frac{l^2 + 3}{2l} \approx \approx 1.076$ рад.

Для удержания КА в области $d_1 < 0$ из равенства (8) и условия оптимального демпфирования функции опасности получаем

$$ld_1 - 2\frac{pS}{m}f(\beta) > 0, \qquad (9)$$

где $\beta = -1.244$ рад (Поляхова и др., 2018). Аналогично для удержания КА в области $d_1 > 0$ можно получить

$$ld_1 - 2\frac{pS}{m}f(\alpha) < 0, \tag{10}$$

где $\alpha = 0.168$ рад. Если условия (9), (10) не выполняются для α и β , то они не выполняются для любого другого угла φ , что во многом обусловлено начальными данными и характеристикой солнечного паруса — парусностью $\frac{S}{m}$. В этом случае КА будет просто уходить к Земле или к Солнцу. Из условий (9) и (10) также можно получить оценку снизу и сверху для значения функции опасности, а следовательно, и оценку области управляемости:

$$d_1^{\min} = \frac{2pS\cos^2\beta\sin(\beta+\varphi_0)}{ml},$$
$$d_1^{\max} = \frac{2pS\cos^2\alpha\sin(\alpha+\varphi_0)}{ml}.$$



Рис. 2. График функции $f(\varphi)$.

Определим закон изменения угла φ как функцию от d_1 . Для этого зададимся некоторыми действительными числами δ и κ :

$$d_1^{\min} < \delta < d_1^{\max}, \quad \kappa > 0,$$

и определим вспомогательную функцию $\sigma(d_1)$ в виде логической функции сигмоида:

$$\sigma(d_1) = \frac{1}{1 + e^{-\kappa(d_1 - \delta)}}$$

Режим изменения угла ориентации паруса в зависимости от функции опасности запишем в виде

$$\varphi(d_1) = \beta - (\beta - \alpha)\sigma(d_1). \tag{11}$$

На управляющий параметр может быть наложено ограничение вида $0 \le \varphi \le \frac{\pi}{2}$. Такую постановку задачи будем называть задачей управляемого движения солнечного паруса с ограничением, которое может быть обусловлено, например, необходимой ориентацией КА. Из равенства (8) и рис. 2 следует, что в области $d_1 < 0$ удержание с помощью управления (7) при данном ограничении не представляется возможным, но сама задача удержания в данном случае также будет иметь решение.

Если задать действительные числа δ и κ :

$$0 < \delta < d_1^{\max}, \quad \kappa > 0,$$

то режим изменения управляющего параметра представим в виде

$$\varphi(d_1) = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)\sigma(d_1).$$

ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР

Проведем компьютерное моделирование движения солнечного паруса в окрестности коллинеарной точки либрации L_1 . Для моделирования движения используем параметры солнечного паруса m = 300 кг, S = 225 м². Выбор начальных данных для отработки управляющего воздействия



Рис. 3. Траектория управляемого движения КА с солнечным парусом на промежутке времени 3π единиц.



Рис. 4. График значения угла ориентации паруса (слева) и график значения функции опасности на траектории движения паруса (справа).

с точностью до линейного приближения будет обусловливаться областью управления $-0.00079 < < \delta < 0.04221$. Отметим, что вопрос размещения такого объекта в окрестности точки либрации в данной работе не исследуется, формулировка идеи и возможный алгоритм решения такой задачи представлены в работе Шиманчука, Шмырова (2013).

Результаты численного моделирования управляемого движения солнечного паруса с начальными данными $x_{10} = 0.9998$, $x_{20} = 0$, $x_{30} = 0.015$, $y_{10} = 0$, $y_{20} = 1$, $y_{30} = 0$ при $\delta = 0.02$ и $\kappa = 200$ на промежутке времени 1.5 года приведены на рис. 3

и 4. На рис. 3 представлена траектория управляемого движения солнечного паруса. На рис. 4 представлены графики значений угла ориентации паруса и функции опасности при управляемом движении паруса.

На рис. З видно, что траектория управляемого движения состоит из двух этапов. Первый этап — переходный, который характеризуется временем около 4 мес. На этом этапе ориентация паруса меняется от —1.2209 рад до —0.45 рад. Второй этап — установившееся движение. На этом этапе



Рис. 5. Траектория управляемого движения KA с солнечным парусом на промежутке времени 3π единиц (см. текст).



Рис. 6. График значения угла ориентации паруса (слева) и график значения функции опасности на траектории движения паруса (справа) (см. текст).

угол ориентации паруса колеблется около значения —0.45 рад. Амплитуда колебаний порядка 0.01 рад.

Результаты численного моделирования управляемого движения солнечного паруса с начальными данными $x_{10} = 1.015$, $x_{20} = 0$, $x_{30} = 0.015$, $y_{10} = 0$, $y_{20} = 1$, $y_{30} = 0$ при $\delta = 0.02$ и $\kappa = 200$ на промежутке времени 1.5 года приведены на рис. 5 и 6. На рис. 5 представлена траектория управляемого движения солнечного паруса. На рис. 6 представлены графики значений угла ориентации

паруса и функции опасности при управляемом движении паруса.

Аналогично рис. З движение на рис. 5 можно охарактеризовать двумя этапами. Переходному этапу на промежутке времени порядка 2 мес отвечает изменение ориентации паруса от 0.1438 рад до -0.44 рад. На установившемся этапе угол ориентации паруса колеблется около значения -0.44 рад. Амплитуда колебаний порядка 0.04 рад. Заметим, что наличие этих колебаний связано с нелинейностью модели движения.



Рис. 7. Траектория управляемого движения КА с солнечным парусом (см. текст).



Рис. 8. График значения угла ориентации паруса (слева) и график значения функции опасности на траектории движения паруса (справа) (см. текст).

Таким образом, из результатов компьютерного моделирования управляемого движения солнечного паруса в точке либрации L_1 видно, что с помощью солнечного паруса можно обеспечить удержание КА в окрестности коллинеарной точки либрации L_1 при условиях (9), (10). Из результатов численного моделирования также можно сказать, что управляемому движению солнечного паруса с предложенными законами управления будет отвечать время переходного процесса, которое зависит от параметра κ , а установившемуся процессу будут отвечать колебания угла ориентации паруса относительно некоторого значения, которое зависит от параметра δ .

УПРАВЛЯЕМОЕ ДВИЖЕНИЕ ПАРУСА В КРУГОВОЙ ОГРАНИЧЕННОЙ ЗАДАЧЕ ТРЕХ ТЕЛ

В данном пункте смоделируем орбитальное движение паруса с предложенными законами управления в круговой ограниченной задаче трех тел. На основании уравнений хилловского приближения круговой ограниченной задачи трех тел примем в качестве функции опасности выражение

 $d_1 = \mathbf{a}_1 \mathbf{z},$

где $\mathbf{z} = (x_1 + 0.9900265046; x_2; x_3; y_1; y_2 + +0.9900265046; y_3)$ — вектор-столбец.

Результаты численного моделирования управляемого движения солнечного паруса с начальными данными $x_{10} = -0.9900280046$, $x_{20} = 0$, $x_{30} = -0.015$, $y_{10} = 0$, $y_{20} = -0.9900265046$, $y_{30} = 0$ при $\delta = 0.0002$ и $\kappa = 20000$ на промежутке времени 1.5 года приведены на рис. 7 и 8. На рис. 7 представлена траектория управляемого движения солнечного паруса. На рис. 8 представлены графики значений угла ориентации паруса и функции опасности при управляемом движении паруса.

Графики на рис. 3, рис. 4, рис. 7, рис. 8 показывают идентичность результатов для модели круговой ограниченной задачи трех тел и модели хилловского приближения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный подход позволяет получить управление в форме обратных связей, решающее задачу удержания небесного тела с солнечным парусом вблизи коллинеарной точки либрации L₁, учитывая свойство неустойчивости точки либрации и характеристику солнечного паруса парусность. Предложенные законы управления движением ҚА с солнечным парусом, построенные в рамках хилловского приближения круговой ограниченной задачи трех тел, показали в ходе численных экспериментов свою эффективность в более общей модели движения. Эффективность управления солнечного паруса существенно выше в области $d_1 > 0$ по сравнению с управлением в области $d_1 < 0$. Это напоминает ситуацию с обычным парусником, когда движение против

ветра существенно труднее, хотя и возможно, чем движение по ветру.

Таким образом, предложенный закон управления ориентацией солнечного паруса с целью удержания КА в окрестности коллинеарной точки либрации заключается в том, чтобы обеспечить близость в фазовом пространстве КА к инвариантному многообразию. Ясно, что такое требование является менее жестким по сравнению с подходом, изложенным в работе Буклесса, Макиннеса (2008), и может быть реализовано при меньшей парусности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буклесс, Макиннес (J. Bookless and C. McInnes), Acta Astronautica 62, 159 (2008).
- 2. Маркеев А.П., Точки либрации в небесной механике и космодинамике (М.: Наука, 1978).
- Поляхова и др. (E. Polyakhova, A. Shmyrov, and V. Shmyrov), AIP Conf. Proceed. (Ed. Kustova E.V., Leonov G.A., Yushkov M.P., Morosov N.F., Mekhonoshina M.A., St. Petersburg, AIP, 2018).
- Ceóexeň (V. Szebehely), Theory of orbit The restricted problem of three bodies (Academic Press, New York, 1967).
- 5. Шиманчук Д.В., Шмыров А.С., Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 10: Прикладная математика, информатика, процессы управления **2**, 76 (2013).
- Шмыров В.А., Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 10. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления 2, 193 (2005).
- Шмыров и др. (A. Shmyrov, D. Shymanchuk, and L. Sokolov), 2015 International Conference on "Stability and Control Processes" in Memory of V.I. Zubov, SCP 2015—Proceedings (Ed. Petrosyan L.A., Zhabko A.P., St. Petersburg, IEEE, 2015), p. 129.
- 8. Шимыров, Шиманчук (A. Shmyrov and D. Shymanchuk), 2015 International Conference on Mechanics — Seventh Polyakhov's Reading (Ed. Tikhonov A. A., St. Petersburg, IEEE, 2015).

СПЕКТРАЛЬНЫЙ РЕЖИМ КАМЕРЫ ASTRONIRCAM

© 2020 г. С. Г. Желтоухов¹, А. М. Татарников^{1*}, Н. И. Шатский¹

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Россия Поступила в редакцию 02.12.2019 г. После доработки 02.12.2019 г.; принята к публикации 05.12.2019 г.

Изложен алгоритм редукции спектральных наблюдений с камерой-спектрографом ASTRONIRCAM, установленной на 2.5-м телескопе ГАИШ МГУ. Прибор позволяет получать спектры астрономических объектов с длинными (280") и короткими (10") щелями в диапазоне длин волн от 1 до 2.5 мкм. Измеренная разрешающая способность достигает R = 1270 для щели 0.9", световая эффективность системы меняется от 6 до 14% в рабочем диапазоне длин волн в режиме длинной щели и от 1 до 2% в режиме кросс-дисперсии. Пропускание ограничено качеством используемых гризм. Получены оценки доли рассеянного света, изучены механические гнутия и температурные дрейфы конструкции.

Ключевые слова: инфракрасный диапазон: общие вопросы, инструменты: спектрографы, методы: спектроскопия, методы: редукция наблюдений.

DOI: 10.31857/S0320010820020059

ВВЕДЕНИЕ

ASTRONIRCAM (The **ASTROnomical** NearInfraRed CAMera) — инфракрасный инструмент, установленный на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (Садовничий, Черепащук, 2015). Камера работает в диапазоне длин волн от 1 до 2.5 мкм в двух режимах — фотометрическом (получение прямых снимков неба в фильтрах ЈНК фотометрической системы МКО и нескольких узкополосных фильтрах) и спектральном (получение спектров низкого разрешения с длинной или короткой щелью). Конструкция камеры, оптическая схема, параметры детектора и схемы регистрации описаны в статье Наджипа и др. (2017).

Основным элементом камеры является HgCdTe матрица HAWAII-2RG формата 2048×2048 с размером пиксела 18 мкм. Квантовая эффективность приемника в рабочем диапазоне длин волн ~94%, шум считывания $12e^-$, емкость пикселов ~120 000 e^- . Изображение на приемнике формируется оптической схемой, состоящей из входного окна, фокальной турели с входной диафрагмой и набором из 10 спектральных щелей, коллиматора, двух турелей фильтров, камерного объектива. Для сокращения объема, занимаемого камерой, используются три диагональных зеркала, "складывающих" оптическую схему. Для уменьшения

количества рассеянного света между оптическими элементами установлены диафрагмы. Все элементы находятся в криостате на оптической скамье, охлаждаемой жидким азотом. Оцифровка и регистрация сигнала осуществляются контроллером ARC Gen III (Лич, Лоу, 2000). Для калибровки в спектральном режиме используется калибровочный блок, содержащий лампу накаливания и аргоновую лампу с линейчатым спектром.

Камера работает в режиме попиксельного неразрушающего считывания, что позволяет неоднократно считывать данные с детектора в ходе накопления сигнала, но ставит ограничение на минимально возможную экспозицию — примерно 3.6 с при работе в полнокадровом режиме. Результатом накопления сигнала является куб данных, каждая плоскость которого содержит результат однократного считывания данных с детектора. Обработка куба данных позволяет избавиться от влияния неравномерности и шума подложки (bias), исправить результат воздействия космических частиц и переполнение емкости ячейки в ходе накопления.

Целью настоящей работы были разработка и реализиация алгоритма первичной редукции получаемых спектральных данных, а также исследование характеристик спектрального режима инструмента ASTRONIRCAM.

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



Рис. 1. Кривые пропускания фильтров, выделяющих различные спектральные диапазоны длин волн.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ РЕЖИМ ASTRONIRCAM

Спектральный режим в ASTRONIRCAM реализован с помощью гризм, нарезанных на призмах из ZnSe. Они установлены в двух турелях фильтров вблизи зрачка оптической системы: в одной две вспомогательные гризмы для реализации режима кросс-дисперсии (65 и 81 штрихов/мм), работающие в порядке 1, во второй — основная гризма (162 штриха/мм), работающая в порядках 3-6 (в зависимости от требуемого спектрального диапазона).

При работе в спектральном режиме используется одна из 10 сменных щелей, установленных в фокальной турели. Пять щелей имеют длину около 1 мм (slit2—slit6), пять щелей — около 27 мм (slit7 slit11). С учетом масштаба в фокальной плоскости 10.3"/мм, это соответствует угловым длинам 10" и 280" соответственно. В режиме кросс-дисперсии используются только короткие щели. В каждом комплекте имеются щели шириной 0."9, 1."3, 1."8, 2."7 и 7."2 (в проекции на небо).

Для отсечения нерабочих порядков при наблюдениях без гризм кросс-дисперсии используются специальные светофильтры YOS (Y Order Sorter), JOS (J Order Sorter) и фотометрические фильтры H и K, установленные в том же колесе фильтров, что и гризмы кросс-дисперсии. Светофильтры для отсечения лишних порядков в режиме кросс-дисперсии (YJOS и HKOS) наклеены непосредственно на соответствующие кросс-дисперсионные гризмы. При работе в режиме кросс-дисперсии на одном кадре получаются спектры сразу двух диапазонов, соответствующих светофильтрам YOS + JOS или H + K. Кривые пропускания фильтров, отсекающих нерабочие порядки, приведены на рис. 1.

Перед входным окном камеры установлено подвижное плоское зеркало, с помощью которого можно направлять свет от калибровочного блока на входную щель. Калибровочный блок оснащен двумя источниками света (аргоновой лампой и лампой накаливания), интегрирующей сферой и конденсором. Примеры калибровочных кадров, полученных с длинной щелью и в режиме кроссдисперсии, показаны на рис. 2.

ПОДГОТОВКА КАЛИБРОВОЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Рассмотрим сначала работу спектрографа в режиме длинной щели. Наблюдения с ней могут проводиться в одном из четырех спектральных диапазонов в зависимости от используемого фильтра



Рис. 2. Примеры спектров аргоновой лампы в режиме длинной щели (слева) и кросс-дисперсии (справа).

сортировки порядков: YOS, JOS, H и K (рис. 1). Получаемый спектр отягощен геометрическими искажениями: кривизной монохроматического изображения щели, зависящей от длины волны, и разным наклоном спектра объекта по отношению к направлению колонок детектора, зависящим от положения объекта на щели.

Редукция рабочих спектров выполняется с помощью заранее подготовленных матриц и полиномов коррекции. Они строятся по спектрам аргоновой лампы, лампы накаливания и звездным спектрам примерно раз в сезон наблюдений.

Сначала рассчитываются матрицы смещений для выпрямления монохроматических изображений щели. Для этого используется следующий алгоритм:

- Получаются снимки спектров калибровочной аргоновой лампы.
- В спектре в направлении дисперсии определяется положение локальных максимумов, соответствующих спектральным линиям (при этом не используются близко расположенные линии).
- 3. Каждая из найденных спектральных линий делится на малые участки длиной 10 пикселов, для которых определяются координаты центра линии на оси, перпендикулярной щели. Принимая положение одного из краев спектра за неискаженное, получаем зависимость смещения центра профиля линии от координат на кадре для каждой из отобранных ранее линий.

- 4. Полученные смещения аппроксимируются двумерным полиномом степени от 2 до 4 в зависимости от спектрального диапазона.
- 5. Оставшиеся после исправления кривизны линий систематические отклонения положения центров линий от прямой с амплитудой до 0.2 пиксела не зависят от места линии в спектре, но зависят от диапазона (YOS, JOS, Н или К), в котором производится калибровка. Остаточное искривление достаточно быстро меняется вдоль щели, и поэтому для окончательного исправления кривизны используется полином 10-й степени (по числу нулей функции остаточных отклонений) по координате вдоль щели.

Результатом работы алгоритма для каждого спектрального диапазона является попиксельная матрица значений, сдвигом на которую в произвольном спектре исправляется кривизна спектральных линий. В среднем полуамплитуда остаточных отклонений не превышает 0.05 пиксела (порядка 1.3 мкм или 0.013" в фокальной плоскости). Наличие этих отклонений, возможно, связано с ошибками изготовления щелей.

Наклон спектра, разный для разных точек щели, исправляется по нескольким спектрам звезды в каждом из рабочих спектральных диапазонов, полученным при различном положении звезды вдоль щели. Как и в случае исправления кривизны спектральной линии, алгоритм ищет спектр звезды на изображении. Затем спектр разбивается вдоль направления дисперсии на малые участки длиной



Рис. 3. Пример аппроксимации участка реального калибровочного спектра (сплошная линия) модельным (пунктирная линия) для щелей 0.9" и 2.7".

20 пикселей, усредняется вдоль этого же направления, и аппроксимацией функцией Гаусса определяется центр каждого из участков. Найденные таким образом положения аппроксимируются двумерным полиномом 3—4-й степени. Максимальное измеренное изменение пространственного масштаба спектра составляет 8 пикселов при длине в 1200 пикселов, т.е. менее 1%.

После применения описанной процедуры У координате кадра (отсчитывается вдоль направления дисперсии) соответствует некоторая длина волны, а Х координате — положение вдоль щели. Дисперсионная кривая строится по спектру калибровочной аргоновой лампы (Рао и др., 1966). Для этого спектр, полученный в каждом из диапазонов, аппроксимируется модельным спектром. Искомыми параметрами выступают коэффициенты дисперсионной кривой и коэффициенты, описывающие форму линий (используется профиль Гаусса). В результате зависимость длины волны от координаты на изображении описывается полиномом степени 3. Используемый профиль линии хорошо описывает инструментальный контур для узких щелей. Для самых широких щелей требования к точности определения дисперсионной кривой снижаются и также достаточно использования профиля Гаусса. Примеры аппроксимации реального калибровочного спектра модельным приведены на рис. 3.

Таким образом, в результате работы алгоритма из калибровочных спектров аргоновой лампы получается попиксельная матрица смещений, необходимых для выпрямления спектра, и зависимость координаты на кадре от длины волны (дисперсионная кривая).

При наблюдениях в режиме кросс-дисперсии используется короткая щель, а рабочие порядки спектров получаются наклонными относительно направления дисперсии основной гризмы.

Получение матриц смещений для режима кросс-дисперсии начинается с определения накло-

на рабочих порядков спектра, вызванного действием дополнительной гризмы. Для этого используется непрерывный спектр калибровочной лампы накаливания. Изображение каждого порядка спектра в направлении дисперсии разбивается на несколько десятков участков, для каждого из которых путем аппроксимации прямоугольным профилем с экспоненциальными крыльями определяется центр изображения. Полученный набор положений центра полосы аппроксимируется полиномом третьего порядка. Скорректированный за наклон порядков спектр, так же как и спектр с длинной щелью, имеет искривленные линии и неравномерный угловой масштаб. Однако из-за в 30 раз более короткой щели эти эффекты оказываются пренебрежимо малы, и их исправление не производится. Существенным оказывается только наклон линий внутри одного порядка, составляющий чуть менее одного пиксела на всю длину щели. Для учета этого линия аппроксимируется линейной функцией, и наклон исправляется аналогично другим геометрическим искажениям.

Дисперсионная кривая для наблюдений в режиме кросс-дисперсии строится так же, как и в режиме длинной щели.

ПЕРВИЧНАЯ РЕДУКЦИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Редукция данных инфракрасных наблюдений значительно отличается от редукции данных оптических наблюдений. Процедура усложняется как особенностями детекторов, например, работой в режиме неразрушающего считывания и нелинейностью детектора во всем рабочем диапазоне сигнала, так и наличием сильных и переменных полос атмосферного поглощения в ближнем инфракрасном диапазоне (Вакка и др., 2003; Чилингарян и др., 2015).

Процедура обработки начинается с удаления плохих пикселов, которое выполняется по заранее

подготовленной карте расположения таких пикселов (Масленникова и др., 2020). После этого снимки исправляются за нелинейность чувствительности детектора. Одновременно с этим корректируются значения в тех пикселах, в которых в ходе накопления произошло переполнение емкости ячейки. Это возможно сделать из-за работы детектора в режиме неразрушающего считывания — значение сигнала восстанавливается по тому участку кривой накопления сигнала, на котором он был меньше полной емкости ячейки.

На вход процедуры коррекции геометрических искажений поступают либо отдельные кадры со спектрами, либо кадры с попарными разностями спектров объектов, полученными в режиме "dithering" (наблюдения с малыми смещениями объекта вдоль щели спектрографа между экспозициями). При этом исправляются кривизна линий и наклон спектра для наблюдений в режиме длинной щели, а также наклон порядков и наклон спектральных линий для режима кросс-дисперсии. В завершение первичной обработки в заголовок FITS-файла с изображением спектра добавляются коэффициенты дисперсионной кривой.

ΟЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СПЕКТРОГРАФА ASTRONIRCAM

Спектральная разрешающая сила

При построении дисперсионных кривых одновременно с их параметрами получаются данные о ширине линий и соответственно разрешающей

Таблица 1. Спектральная разрешающая сила спектрографа ASTRONIRCAM с различными щелями

Диапазон/ Щель	<i>YOS</i> 1.12 кмк	<i>JOS</i> 1.33 мкм	<i>Н</i> 1.65 мкм	<i>К</i> 2.2 мкм
0.9''	1270	1040	1030	1200
1.3''	980	850	840	940
1.8''	780	720	700	740
2.7''	510	490	490	490

Таблица 2. Световая эффективность спектрографа

λ , мкм	1.04	1.25	1.64	2.20
Режим однократной дисперсии	6%	9%	11%	14%
Режим кросс-дисперсии	1%	1.5%	2%	2%

способности спектрографа. FWHM линий в спектре, полученном с наиболее узкой 0".9 щелью, составляет около 4 пикселов. Она определяется шириной изображения щели, в проекции на приемник составляющей 3.3 пиксела, и аберрациями оптической системы. В табл. 1 представлены оценки спектральной разрешающей силы. Эти оценки хорошо совпадают с теоретическими оценками, приведенными в работе Наджипа и др. (2017).

Профиль щели

Как было отмечено выше, в состав спектрографа входит калибровочный блок. Однако штатный калибровочный осветитель щели не обеспечивает равномерной засветки входной щели спектрографа (рис. 4). Поэтому профиль щели определялся нами по наблюдениям эмиссионных линий неба, полученных с высоким отношением сигнал/шум. Оказалось, что в целом форма полученных профилей практически не зависит от спектрального диапазона и ширины щели, а обусловлена виньетированием в оптической системе камеры. На индивидуальных профилях узких щелей присутствуют отдельные понижения пропускания на 5-10%. связанные, по-видимому, с неравномерной шириной щели. Результирующий сглаженный профиль щели 0".9 изображен на рис. 4.

Эффективность при работе в спектральном режиме

Световая эффективность ASTRONIRCAM при работе в спектральном режиме оценивалась по наблюдениям спектров звезд спектрального класса A0V, используемых в качестве теллурических стандартов. При этом устанавливалась наиболее широкая щель (7.2"), позволяющая полностью захватить весь поток излучения от наблюдаемой звезды. Используемые нуль-пункты приведены в статье Токунаги и Вакки (2005). При вычислениях считалось, что пропускание атмосферы в зените равно 0.95 (см. Ломбарди и др., 2011, для *PVW* = = 4-7 мм), доля площади главного зеркала, экранированная вторичным — 0.16, коэффициенты отражения каждого их трех зеркал телескопа в ИКдиапазоне — 0.9. Результаты расчетов приведены в табл. 2. На рис. 5 приведены соответствующие кривые зависимости световой эффективности от длины волны (без коррекции атмосферных полос поглощения) для каждого из рабочих диапазонов спектрографа.

Эффективность камеры в фотометрическом режиме была оценена Наджипом и др. (2017). В полосах *JHK* она достигает 60%. Принимая во внимание, что при работе с длинной щелью в



Рис. 4. Сглаженные профили щели 0^{".9}, построенные с использованием штатного осветителя (пунктирная линия) и по линиям неба (сплошная линия).



Рис. 5. Световая эффективность спектрографа в диапазонах *Y*, *J*, *H* и *K* (без коррекции атмосферных полос поглощения).



Рис. 6. Спектры неба в диапазонах H и K при температуре воздуха 17°С и воздушной массе 1.5.



Рис. 7. Фрагмент спектра калибровочной лампы, полученного в режиме кросс-дисперсии в полосах У и Ј.

качестве сортирующих порядки фильтров используются в том числе и фотометрические фильтры *H* и *K*, низкие значения эффективности камеры в спектрофотометрическом режиме говорят о низкой эффективности гризм для рабочих порядков и высоком уровне светорассеяния на них.

Кроме световой эффективности, на производительность и качество выходных данных оказывает влияние также величина фона. Она складывается из теплового излучения атмосферы и телескопа и свечения верхних слоев атмосферы.

На рис. 6 приведены примеры спектров неба, полученных с длинной щелью в полосах H и K. Они получены в июле 2018 г. на высоте 43° над горизонтом при температуре воздуха в приземном

слое 17°С. Видно, что в полосе H преобладает излучение в линиях гидроксила, которое присутствует и в коротковолновой части полосы K. Тепловое излучение атмосферы и (прежде всего) телескопа преобладает в длинноволновой части полосы K. В полосах Y и J сигнал от фона в элементе изображения при этом не превышает $0.1-0.2 \ e^{-}/s$. Такой уровень фонового сигнала во всех рабочих спектральных диапазонах позволяет использовать экспозиции длительностью до 5 ч. Таким образом, величина фона не является ограничивающим фактором при спектральных наблюдениях с ASTRONIRCAM.

Используя полученные данные об эффективности прибора, можно рассчитать соотношение



Рис. 8. Зависимость интенсивности рассеянного света от расстояния до спектральной линии для основной гризмы (пунктирная линия) и аппроксимация рассеянного света экспонентой с характерным масштабом 50 Å (сплошная линия).

сигнал-шум при наблюдениях слабых объектов:

$$SNR = \frac{\eta F t}{\sqrt{\eta F t + \frac{RN^2}{N_{NDR}}N_{pix} + \eta F_{sky}tN_{pix}}}$$

 $\sim T^{4}$

где F — количество фотонов от звезды в диапазоне длин волн, соответствующему одному пикселу детектора, η — световая эффективность камеры, F_{sky} — количество фотонов от неба, приходящих на один пиксел, N_{pix} и N_{NDR} — протяженность изображения звезды вдоль щели в пикселах и количество неразрушающих считываний соответственно, RN — шум считывания в электронах, t — время экспозиции. Шум считывания убывает обратно пропорционально квадратному корню от количества считываний. Однако в нашем случае влияние шума считывания невелико и пуассоновские шумы неба и источника вносят гораздо больший вклад в величину SNR.

Расчеты показывают, что в полосе J прибор позволяет получить спектры звезд 16^m с SNR = 10 за время около 15 мин в режиме длинной щели, и примерно за 1 ч в режиме кросс-дисперсии.

РАССЕЯННЫЙ СВЕТ

Используемые диспергирующие элементы оптической системы камеры вносят искажения в получаемый спектр в виде "ду́хов" и рассеянного света. На рис. 7 приведен спектр аргоновой лампы в диапазонах Y и J. На нем хорошо виден как свет, рассеянный основной гризмой — вертикальные полосы, расходящиеся от каждой линии в спектре вдоль направления дисперсии, так и свет, рассеянный гризмой кросс-дисперсии — узкие горизонтальные полосы. На рис. 8 приведена зависимость интенсивности рассеянного света от расстояния до линии для основной гризмы, а также аппроксимация этой зависимости экспоненциальной функцией. Интегрирование полученной функции позволяет оценить суммарную интенсивность рассеянного света, которая составляет около 75% от наблюдаемой интенсивности в линии, а интенсивность света, рассеянного гризмой кроссдисперсии, составляет около 40%.

Учет рассеянного света позволяет количественно объяснить уровень фона, обнаруженный в спектрах аргоновой лампы. На рис. 9 показаны реальный спектр лампы и модельный спектр, построенный с учетом рассеянного света в диапазонах Y и J. Видно хорошее совпадение модельного и наблюдаемого спектров, кроме границ спектральных диапазонов, где присутствует пересечение спектральных порядков.

Еще один фактор, искажающий наблюдаемое распределение в спектре, — так называемые ду́хи дифракционной решетки (рис. 10а). Фурье-анализ



Рис. 9. Наблюдаемый (сплошная линия) и модельный (пунктирная линия) спектр аргоновой лампы.



Рис. 10. "Ду́хи" в рассеянном свете дисперсора: фрагмент изображения спектра с яркой линией (слева) и фурье-спектр рассеянного света (справа).

близкой к линии части рассеянного показал наличие повторяющихся "ду́хов" с периодом примерно 46, 22 и 14 пикселов. Зная период основной решетки (81 штрих на мм), можно оценить периоды решетки дефектов, которые составляют соответственно около 5, 2.5, 1.6 "штрихов" на мм, или 1/130, 1/60 и 1/40 дюйма. Заметим, что при визуальном исследовании изображения "ду́хов" наиболее выделяется период в 14 пикселов.

МЕХАНИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

Щелевые спектрографы низкого разрешения, позиционный угол которых изменяется при помощи механических деротаторов при установке в фокусах Кассегрена или Несмита, меняют пространственную ориентацию во время экспозиций и между ними. Поэтому важно знать, на сколько изменяются положения спектральных линий при повороте прибора, происходит ли это систематически и однозначно в зависимости от угла или температуры прибора и/или окружающей среды. Это напрямую связано с надежностью определения доплеровских сдвигов (лучевых скоростей) по линиям спектра и накладывает определенные ограничения на частоту калибровок по длине волны и предельную продолжительность экспозиции.

С целью исследования механической стабильности спектрографа ASTRONIRCAM была проведена серия измерений сдвига по кадру эмиссионных линий в спектре калибровочной лампы спектрографа в зависимости от времени, угла наклона деротатора, а также температуры криостата. При этом использовались наиболее узкая короткая щель $0.9'' \times 10''$ и кросс-дисперсионная гризма диапазона YJ. Сдвиг спектра в направлении дисперсии определялся путем проведения кросс-корреляции текущего спектра с первым спектром в серии. Шум измерений взаимного



Рис. 11. Зависимость смещения спектра на детекторе от угла поворота деротатора в семи последовательных тестах с вращением по часовой стрелке (сплошные линии) и против (штриховые линии).

сдвига спектров используемым методом составляет менее 0.001 пиксела.

Измерения смещений спектра, вызванных изменением ориентации прибора, были проведены несколько раз с разными углами поворота. Оказалось, что при резком изменении угла деротатора на $\pm 30^{\circ}$ (например, при наведении на объект) спектр смещается на величину 0.04-0.06 пиксела (рис. 11). При максимально используемых во время наблюдений изменениях угла поворота деротатора в 120° отмечается смещение спектра на 0.1 пиксела. В новом положении наблюдается постепенное изменение положения спектра — дрейф, очевидно связанный с постепенным "провисанием" ("усадкой") оптической схемы спектрографа. Величина дрейфа порядка 0.01 пиксела с характерным временем в несколько минут. Заметен также и относительно небольшой (порядка 0.01 пиксела) гистерезис в смещении спектра при смене направления врашения криостата. При медленном вращении деротатора, например, в процессе отслеживания суточного движения объекта, "усадки" оптической схемы спектрографа после остановки не наблюдается.

Температурный дрейф положения спектральных линий оценивается величиной 0.07 пиксела/К. При

этом изменение температуры внутренней (охлаждаемой) части спектрографа, связанное с испарением жидкого азота в первые сутки после стабилизации температуры после дозаправки, составляет менее 0.01 К/ч. Таким образом, при ежедневной заправке криостата влиянием изменения температуры спектрографа на положение спектра можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектральный режим камеры ASTRONIRCAM позволяет получать спектры астрономических объектов с длинными (около 280") и короткими (около 10") щелями шириной от 0.9" до 7" в спектральном диапазоне от 1 до 2.5 мкм. Для решения задачи первичной редукции данных, получаемых в спектральном режиме ИК-камеры ASTRONIRCAM, был создан комплекс программ на языке python. Комплекс включает в себя модули учета плохих пикселей, коррекции за нелинейность детектора (с исправлением переполнения емкости ячейки во время накопления), коррекции геометрических искажений получаемого спектра, учета "плоского поля" и создания дисперсионной кривой.

По спектрам калибровочной аргоновой лампы сделана оценка разрешающей силы спектрографа

(табл. 1). Сравнение этой величины с полученными Наджипом и др. (2017) теоретическими оценками величины R для режима однократной дисперсии говорит о том, что для широких щелей (1.8" и более), для которых можно пренебречь дифракцией, оптическая схема спектрографа строит изображение, близкое к расчетному. Для узких щелей реальное разрешение оказалось на 10–30% хуже расчетного. Общий профиль щели определяется виньетированием оптическими элементами спектрографа. При этом на краю щели пропускание системы падает менее, чем на 10%.

Изменение ориентации прибора во время наблюдений вызывает гнутие в его конструкции и смещение спектра относительно приемника. Характерная величина смещения, однако, составляет не более 0.002 пиксела/°. Поворот деротатора за время экспозиции на 30 градусов приводит к фиктивным доплер-сдвигам менее 2 км/с, которые можно учесть повторной калибровкой.

Эффективность спектрографа при работе с длинной щелью составляет от 6% в полосе Y, до 14% в полосе K (табл. 2). Сравнение с высокой эффективностью фотометрического режима (~60%, см. Наджип и др., 2017) говорит о том, что главный вклад в падение эффективности в спектральном режиме вносит основная гризма. Доля света, направляемого в рабочие порядки, составляет менее 35%. В крылья линий с характерным размером около 50 Å при этом рассеивается около 40% наблюдаемого потока. Гризмы кросс-дисперсии еще в несколько раз снижают эффективность спектрографа — до 1–2% в полосах от Y до K.

Несмотря на ряд недостатков, наблюдения с ASTRONIRCAM в спектральном режиме ведутся с 2017 г. Основными объектами наблюдений выступали такие яркие объекты, как спутники Юпитера (Бусарев и др., 2018), симбиотические звезды, Post-AGB звезды и мириды. С.Г. Желтоухов и Н.И. Шатский благодарят Российский Научный Фонд (грант № 17-12-01241) за частичную финансовую поддержку настоящей работы (разработка и реализация алгоритма коррекции спектральных данных и анализ результатов). Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бусарев В.В., Татарников А.М., Бурлак М.А., Астрон. вестник **52**, 305 (2018) [V.V. Busarev, A.M. Tatarnikov, M.A. Burlak, Solar System Res. **52**, 301 (2018)].
- 2. Вакка и др. (W.D. Vacca, M.C. Cushing, and J.T. Rayner), Publ. Astron. Soc. Pasific 115, 389 (2003).
- 3. Лич и Лоу (R.W. Leach and F.J. Low) Proc. of SPIE **4008**, 337 (2000)
- 4. Ломбарди и др. (G. Lombardi, E. Mason, C. Lidman, A.O. Jaunsen, and A. Smette), Astron. Astrophys. **528**, A43 (2011).
- 5. Масленникова и др. (N.A. Maslennikova, A.M. Tatarnikov, and N.I. Shatsky), in press (2020).
- Наджип А.Э., Татарников А.М., Туми Д. и др., Астрофиз. бюлл. 72, 382 (2017) [А.Е. Nadjip, А.М. Tatarnikov, D.W. Toomey, et al., Astrophys. Bull. 72, 349 (2017)].
- 7. Рао и др. (K.N. Rao, C.J. Humphreys, and D.H. Rank), *Wavelength Standards in the Infrared* (Academ. Press, 1966).
- 8. Садовничий В.А., Черепащук А.М., Природа **3**, 3 (2015).
- 9. Токунага, Вакка (А.Т. Tokunaga and W.D. Vacca), Publ. Astron. Soc. Pasific **117**, 421 (2005).
- 10. Чилингарян и др. (I. Chilingarian, Y. Beletsky, S. Moran, W. Brown, B. McLeod, and D. Fabricant), Publ. Astron. Soc. Pasific **127**, 406 (2015).

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2019 г.

АККРЕЦИЯ, ТЕОРИЯ ДЖЕТОВ И ЗВЕЗДНЫЙ ВЕТЕР

	Nº	Стр.
Ветер предсверхновой IIn SN 1997eg		
Н. Н. Чугай	2	101
Моделирование гидродинамического звездного ветра от быстро вращающейся звезды		
С. В. Боговалов, С. М. Романихин, И. В. Тронин	2	113
Диагностика параметров рентгеновских струй SS 433 по данным спектроскопии высокого разрешения обсерватории CHANDRA		
П. С. Медведев, И. И. Хабибуллин, С. Ю. Сазонов	5	344
АКТИВНЫЕ ЯДРА ГАЛАКТИК, КВАЗАРЫ И РАДИОГАЛАКТИКИ		
Многолетние наблюдения блазара Mrk 501 на черенковском телескопе ГТ-48		
К. С. Стригунов, А. В. Жовтан, Ю. И. Нешпор и др.	1	3
Рентгеновская функция светимости квазаров на 3 < z < 5 по данным "случайного обзора" обсерватории ХММ-Ньютона (исправления к статье, опубликованной в т. 44, № 8–9, с. 546, 2018)		
Г. А. Хорунжев, С. Ю. Сазонов, Р. А. Буренин	3	220
Относительная независимость ИК-запаздываний от длины волны в NGC 4151 в течение 2010—2015 гг.		
В. Л. Окнянский, В. И. Шенаврин, Н. В. Метлова и др.	4	237
Оптическое отождествление новых кандидатов в квазары на $3 < z < 5.5$ из рентгеновского обзора обсерватории ХММ-Ньютон		
Г. А. Хорунжев, Р. А. Буренин, С. Ю. Сазонов и др.	7	464
Сейфертовская галактика NGC 1275 — сверхтонкая структура		
Л. И. Матвеенко, С. С. Сиваконь	8	531
Спектральные свойства сильно поглощенных сейфертовских галактик из обзора всего неба обсерватории ИНТЕГРАЛ		
А. Н. Семена, С. Ю. Сазонов, Р. А. Кривонос	8	547

ГАЛАКТИКА (МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ)

Популяции источников в обзоре галактической плоскости телескопом ART-XC в составе СРГ: моделирование		
И. А. Мереминский, Р. А. Буренин, Р. А. Кривонос и др.	2	91
Численное исследование статистических свойств оценки расстояния до центра Галактики по геометрии сегментов спиральных рукавов (исправление к статье, опубликованной в т. 44, № 11, с. 763)		
И. И. Никифоров, А. В. Веселова	2	142
Кинематика Галактики по выборке молодых рассеянных звездных скоплений с данными из каталога Gaia DR2		
В. В. Бобылев, А. Т. Байкова	3	151
Вращение Галактики по ОВ-звездам из каталога Gaia DR2		
В. В. Бобылев, А. Т. Байкова	6	379
О свойствах галактического слоя пыли в радиусе 700 пк от Солнца		
Г. А. Гончаров	9	650

ГАЛАКТИКИ, ГРУППЫ И СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК, МЕЖГАЛАКТИЧЕСКИЙ ГАЗ

Оптическое отождествление скоплений галактик среди объектов второго каталога источников Сюняева—Зельдовича обсерватории им. Планка		
И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, И.Ф. Бикмаев и др.	2	77
UGC 1198 — галактика с внутренним полярным диском/кольцом		
Г. М. Каратаева, О. А. Меркулова, Л. В. Шаляпина и др.	4	227
Вклад сверхновых типа Ia в химическое обогащение карликовой галактики ультранизкой светимости Bootes I		
Ю. В. Пахомов, Л. И. Машонкина, Т. М. Ситнова и др.	5	303
Соотношение между измерениями масс скоплений галактик в рентгеновском диапазоне и по эффекту Сюняева—Зельдовича		
А. Р. Ляпин, Р. А. Буренин	7	455
Видимые с ребра галактики в Сверхглубоком поле Космического телескопа "Хаббл"		
В. П. Решетников, П. А. Усачев, С. С. Савченко	9	607
Color-Density Relation of Galaxies in the Redshift Region of $0.60 < z < 0.75$		
XF. Deng	11	799
Расстояния до 18 карликовых галактик из обзора Аресибо		
Н. А. Тихонов, О. А. Галазутдинова	11	800

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 3 2020

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2019 г.

Понижение яркости космического рентгеновского и мягкого гамма-фона в направлении на скопления галактик *С. А. Гребенев, Р. А. Сюняев*

Перспективы наблюдений гравитационно-линзированных источников космическими обсерваториями субмиллиметрового диапазона		
Т. И. Ларченкова, А. А. Ермаш, А. Г. Дорошкевич	12	866

12 835

ГАММА-ВСПЛЕСКИ, ГРАВИТАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ СОБЫТИЯ

Новые гамма-всплески, найденные в архивных данных телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL		
И. В. Человеков, С. А. Гребенев, А. С. Позаненко и др.	10	683
Наблюдение в гамма-диапазоне второго связанного со слиянием нейтронных звезд события LIGO/Virgo S190425z		
А. С. Позаненко, П. Ю. Минаев, С. А. Гребенев и др.	11	768
Возможные электромагнитные явления при слиянии двойных систем из нейтронной звезды и черной дыры		
К. А. Постнов, А. Г. Куранов, И. В. Симкин	11	787
Маломассивные нейтронные звезды с вращением		
А. В. Юдин, Т. Л. Разинкова, С. И. Блинников	12	893

ЗВЕЗДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ И АССОЦИАЦИИ, ЗВЕЗДНАЯ ДИНАМИКА

Кинематика Галактики по выборке молодых рассеянных звездных скоплений с данными из каталога Gaia DR2		
В. В. Бобылев, А. Т. Байкова	3	151
Кинематические свойства рассеянных звездных скоплений с данными из каталога GAIA DR2		
В. В. Бобылев, А. Т. Байкова	4	249
О распределении переменных типа RR Lyr шарового скопления M3 по периоду		
Ю. А. Фадеев	6	405
Кинематические параметры поля скоростей звезд области вокруг Солнца радиусом до 3 кпк по данным каталога GAIA Data Release 2 with Radial Velocities		
А. С. Цветков, Ф. А. Амосов	7	517
Кинематика горячих субкарликов из каталога Gaia DR2		
В. В. Бобылев, А. Т. Байкова	9	622

214

ЗВЕЗДЫ — СВОЙСТВА, КЛАССИФИКАЦИЯ

Холодные пятна на поверхности активного гиганта РZ Mon		
Ю. В. Пахомов, В. И. Шенаврин, Н. И. Бондарь и др.	3	201
Соотношение четных и нечетных изотопов бария у избранных звезд гало Галактики		
Л. И. Машонкина, А. К. Беляев	6	392
Образование эмиссионных линий водорода в магнитосферах молодых звезд		
Д. В. Дмитриев, В. П. Гринин, Н. А. Катышева	6	424
Влияние дискового ветра на собственную поляризацию молодых звезд		
С. Г. Шульман, В. П. Гринин	6	437
Кинематические параметры поля скоростей звезд области вокруг Солнца радиусом до 3 кпк по данным каталога GAIA Data Release 2 with Radial Velocities		
А. С. Цветков, Ф. А. Амосов	7	517
High Resolution Optical Spectroscopy of a B-type Abundance Standard Candidate in Ori ${\rm OB1}-{\rm HD}$ 35039		
T. Sahin, A. Dervisoglu	8	585
Кинематика горячих субкарликов из каталога Gaia DR2		
В. В. Бобылев, А. Т. Байкова	9	622
Влияние крупномасштабных возмущений в околозвездных дисках на параметры линейной поляризации звезд типа UX Ori		
С. Г. Шульман, В. П. Гринин	10	716
ЗВЕЗДЫ — ПЕРЕМЕННЫЕ И ПЕКУЛЯРНЫЕ		
Орбиты 451 широкой визуально-двойной звезды		
И. С. Измайлов	1	35
Моделирование гидродинамического звездного ветра от быстро вращающейся звезды		
С. В. Боговалов, С. М. Романихин, И. В. Тронин	2	113
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: CF Cas		
Л. Н. Бердников, Е. Н. Пастухова	2	125
Спектр желтой симбиотической звезды LT Дельфина до, во время и после вспышки 2017 года		
Н. П. Иконникова, М. А. Бурлак, В. П. Архипова и др.	4	258
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: V1033 Cyg — классическая цефеида на первом пересечении полосы нестабильности		
Л. Н. Бердников, Е. Н. Пастухова, В. В. Ковтюх и др.	4	269

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 3 2020

215

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2019 г.

Вторая вспышка желтой симбиотической звезды LT Дельфина		
Н. П. Иконникова, Г. В. Комиссарова, В. П. Архипова	6	414
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: DX Gem		
Л. Н. Бердников	7	489
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: BG Cru		
Л. Н. Бердников, А. Ю. Князев, В. В. Ковтюх и др.	7	499
Околозвездная оболочка полуправильной переменной звезды V CVn		
Б. С. Сафонов, А. В. Додин, С. А. Ламзин и др.	7	507
Эволюция и пульсации post-AGB звезд населения I		
Ю. А. Фадеев	8	578
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: BY Cas		
Л. Н. Бердников	9	636
Активность красного карлика FR Cnc по данным наблюдений роботизированного телескопа IRT-20 Звенигородской обсерватории ИНАСАН		
И. С. Саванов, С. А. Нароенков, М. А. Наливкин и др.	9	646
Радиальные пульсации звезд на стадии финальной гелиевой вспышки		
Ю. А. Фадеев	10	706
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: V532 Cyg		
Л. Н. Бердников	10	731
ЗВЕЗДЫ — СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ		
Соотношение четных и нечетных изотопов бария у избранных звезд гало Галактики		
Л. И. Машонкина, А. К. Беляев	6	392
О распределении переменных типа RR Lyr шарового скопления M3 по периоду		
Ю. А. Фадеев	6	405
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: DX Gem		
Л. Н. Бердников	7	489
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: BG Cru		
Л. Н. Бердников, А. Ю. Князев, В. В. Ковтюх и др.	7	499
Эволюция и пульсации post-AGB звезд населения I		
Ю. А. Фадеев	8	578
Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: BY Cas		
Л. Н. Бердников		636
	9	000
Радиальные пульсации звезд на стадии финальной гелиевой вспышки	9	000
Радиальные пульсации звезд на стадии финальной гелиевой вспышки Ю. А. Фадеев	9 10	706
Радиальные пульсации звезд на стадии финальной гелиевой вспышки Ю. А. Фадеев Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: V532 Cyg	9 10	706
Радиальные пульсации звезд на стадии финальной гелиевой вспышки Ю. А. Фадеев Поиск эволюционных изменений периодов цефеид: V532 Cyg Л. Н. Бердников	9 10 10	706 731

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ, НЕТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Ограничения на режимы ускорения электронов в солнечных вспышках		
В. А. Ковалев, В. Ф. Мельников	8	586
Наблюдение пучка ультрарелятивистских частиц и черенковский резонанс		
Г. Ф. Крымский, М. И. Правдин [†] , И. Е. Слепцов и др.	9	618

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА, ГАЗОВЫЕ ТУМАННОСТИ

Рекомбинационные радиолинии в Орионе А на 8 и 13 мм: ионизационная структура и эффективная температура звезды $\theta^1 C$ Ori, электронная температура ионизованного газа и турбулентность		
А. П. Цивилев, В. В. Краснов, С. В. Логвиненко	1	24
Влияние магнитного поля на волновые движения в термически неустойчивых областях фотодиссоциации		
К. В. Краснобаев, Р. Р. Тагирова	3	192
О свойствах галактического слоя пыли в радиусе 700 пк от Солнца		
Г. А. Гончаров	9	650

МЕТОДЫ АСТРОНОМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ И АНАЛИЗА ДАННЫХ, ПРИБОРЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Популяции источников в обзоре галактической плоскости телескопом ART-XC в составе СРГ: моделирование		
И. А. Мереминский, Р. А. Буренин, Р. А. Кривонос и др.	2	91
Перспективы регистрации рентгеновских вспышек, сопутствующих быстрым радиовсплескам, на телескопе СРГ/еРОЗИТА А. Д. Хохрякова, Д. А. Ляпина, С. Б. Попов	3	163
Перспективы наблюдений гравитационно-линзированных источников космическими обсерваториями субмиллиметрового диапазона		
Т. И. Ларченкова, А. А. Ермаш, А. Г. Дорошкевич	12	866

НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА И АСТРОМЕТРИЯ

Параметры связи между оптической и радиосистемами по данным каталога Gaia DR2 и РСДБ-измерениям		
В. В. Бобылев	1	13
Обновленные численные эфемериды галилеевых спутников Юпитера		
Г. А. Космодаминский	11	821

ПЕРЕНОС ИЗЛУЧЕНИЯ

Образование эмиссионных линий водорода в магнитосферах молодых звезд		
Д. В. Дмитриев, В. П. Гринин, Н. А. Катышева	6	424
Влияние дискового ветра на собственную поляризацию молодых звезд		
С. Г. Шульман, В. П. Гринин	6	437
Влияние крупномасштабных возмущений в околозвездных дисках на параметры линейной поляризации звезд типа UX Ori		
С. Г. Шульман, В. П. Гринин	10	716
Понижение яркости космического рентгеновского и мягкого гамма-фона в направлении на скопления галактик		
С. А. Гребенев, Р. А. Сюняев	12	835

ПЛАЗМЕННАЯ АСТРОФИЗИКА, ГИДРОДИНАМИКА И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

Аналитическая модель токовой структуры границы магнитослоя в бесстолкновительной плазме		
В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов и др.	8	591

ПУЛЬСАРЫ, НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ И ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Исследование вспышечной активности кандидата в черные дыры GRS 1739-278		
С. Д. Быков, Е. В. Филиппова, И. А. Мереминский и др.	3	170
Ограничения на коллимированное рентгеновское излучение SS 433 по отражению на молекулярных облаках		
И. И. Хабибуллин, С. Ю. Сазонов	5	326
Диагностика параметров рентгеновских струй SS 433 по данным спектроскопии высокого разрешения обсерватории CHANDRA		
П. С. Медведев, И. И. Хабибуллин, С. Ю. Сазонов	5	344
Наблюдение в гамма-диапазоне второго связанного со слиянием нейтронных звезд события LIGO/Virgo S190425z		
А. С. Позаненко, П. Ю. Минаев, С. А. Гребенев и др.	11	768
Возможные электромагнитные явления при слиянии двойных систем из нейтронной звезды и черной дыры		
К. А. Постнов, А. Г. Куранов, И. В. Симкин	11	787
Маломассивные нейтронные звезды с вращением		
А. В. Юдин, Т. Л. Разинкова, С. И. Блинников	12	893

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 3 2020

РАДИО И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫЕ ИСТОЧНИКИ

Рекомбинационные радиолинии в Орионе А на 8 и 13 мм: ионизационная структура и эффективная температура звезды θ^1 C Ori, электронная температура		
ионизованного газа и турбулентность		
А. П. Цивилев, В. В. Краснов, С. В. Логвиненко	1	24
Перспективы регистрации рентгеновских вспышек, сопутствующих быстрым радиовсплескам, на телескопе СРГ/еРОЗИТА	0	100
А. Д. Хохрякова, Д. А. Ляпина, С. Б. Попов	3	163
Вспышка мазера водяного пара в высокоскоростной линии W49N		
Л. Н. Вольвач, А. Е. Вольвач, М. Г. Ларионов и др.	5	367
Сейфертовская галактика NGC 1275 — сверхтонкая структура		
Л. И. Матвеенко, С. С. Сиваконь	8	531
Обнаружение вспышек мазера метанола вблизи частот 19.9 и 20.9 ГГц в направлении на массивный источник активного звездообразования G358.931-0.030		
А. Е. Вольвач, Л. Н. Вольвач, М. Г. Ларионов и др.	11	814
Перспективы наблюдений гравитационно-линзированных источников космическими обсерваториями субмиллиметрового диапазона		
Т. И. Ларченкова, А. А. Ермаш, А. Г. Дорошкевич	12	866
РЕНТГЕНОВСКИЕ И ГАММА-ИСТОЧНИКИ		
Популяции источников в обзоре галактической плоскости телескопом ART-XC в составе СРГ: моделирование		
И. А. Мереминский, Р. А. Буренин, Р. А. Кривонос и др.	2	91
Перспективы регистрации рентгеновских вспышек,		

сопутствующих быстрым радиовсплескам, на телескопе СРГ/еРОЗИТА А. Д. Хохрякова, Д. А. Ляпина, С. Б. Попов

Исследование вспышечной активности кандидата в черные дыры GRS 1739-278

С. Д. Быков, Е. В. Филиппова, И. А. Мереминский и др.	3	170
Рентгеновская функция светимости квазаров на 3 < z < 5 по данным "случайного обзора" обсерватории ХММ-Ньютона (исправления к статье, опубликованной в т. 44, № 8–9, с. 546, 2018)		
Г. А. Хорунжев, С. Ю. Сазонов, Р. А. Буренин	3	220
Ограничения на коллимированное рентгеновское излучение SS 433 по отражению на молекулярных облаках		
И. И. Хабибуллин, С. Ю. Сазонов	5	326
Диагностика параметров рентгеновских струй SS 433 по данным спектроскопии высокого разрешения обсерватории CHANDRA		
П. С. Медведев, И. И. Хабибуллин, С. Ю. Сазонов	5	344

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 3 2020

3

163

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2019 г.

Соотношение между измерениями масс скоплений галактик в рентгеновском диапазоне и по эффекту Сюняева—Зельдовича А. Р. Ляпин. Р. А. Биренин	7	455
Оптическое отождествление новых кандидатов в квазары на $3 < z < 5.5$ из рентгеновского обзора обсерватории ХММ-Ньютон		
Г. А. Хорунжев, Р. А. Буренин, С. Ю. Сазонов и др.	7	479
Спектральные свойства сильно поглощенных сейфертовских галактик из обзора всего неба обсерватории ИНТЕГРАЛ		
А. Н. Семена, С. Ю. Сазонов, Р. А. Кривонос	8	547
Новые гамма-всплески, найденные в архивных данных телескопа IBIS/ISGRI обсерватории INTEGRAL И В. Человеков, С. А. Гребенев, А. С. Позаненко и др	10	683
Наблюдение в гамма-диапазоне второго связанного со слиянием нейтронных звезд события LIGO/Virgo S190425z	10	000
А. С. Позаненко, П. Ю. Минаев, С. А. Гребенев и др.	11	768
Понижение яркости космического рентгеновского и мягкого гамма-фона в направлении на скопления галактик		
С. А. Гребенев, Р. А. Сюняев	12	835
Оптическое отождествление четырех жестких рентгеновских источников из обзоров неба обсерватории ИНТЕГРАЛ		
Д. И. Карасев, С. Ю. Сазонов, А. Ю. Ткаченко и др.	12	882
СВЕРХНОВЫЕ И ОСТАТКИ СВЕРХНОВЫХ		
Ветер предсверхновой IIn SN 1997eg		
Н. Н. Чугай	2	101
Вклад сверхновых типа Ia в химическое обогащение карликовой галактики ультранизкой светимости Bootes I		
Ю. В. Пахомов, Л. И. Машонкина, Т. М. Ситнова и др.	5	303
Аналитическая модель нестационарной ионизации в оболочках сверхновых типа II на фотосферной фазе	_	
М. Ш. Поташов, С. И. Блинников	Ъ	320
Источник свечения сверхновой ASASSN-15пх с продолжительной линейной кривой блеска		
Н. Н. Чугай	7	480
СОЛНЦЕ		
Распад крупномасштабного магнитного поля на трубки у основания конвективной зоны Солнца		
Л. Л. Кичатинов	1	45
On the origin of solar halo coronal mass ejections		
V. K. Verma, N. Mittal	3	210

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 3 2020

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2019 г.		221
Мощные поярчения и локальные колебания в солнечных пятнах		
Ю. Д. Жугжда, Р. А. Сыч	3	211
Аналитическая модель распространения тепловых убегающих электронов в солнечных вспышках		
П. А. Грицык, Б. В. Сомов	4	279
Распределение энергии нановспышек в минимуме и на фазе роста 24 солнечного цикла		
А. С. Ульянов, С. А. Богачёв, А. А. Рева и др.	4	290
Уточнение правила Гневышева—Вальдмайера на основе 140-летнего ряда наблюдений		
Ю. А. Наговицын, В. Г. Иванов, Н. Н. Скорбеж	6	449
Ограничения на режимы ускорения электронов в солнечных вспышках		
В. А. Ковалев, В. Ф. Мельников	8	586
Аналитическая модель токовой структуры границы магнитослоя в бесстолкновительной плазме		
В. В. Кочаровский, Вл. В. Кочаровский, В. Ю. Мартьянов и др.	8	591
Необычное светлое образование в тени пятна NOAA 12109. Наблюдения и предварительные результаты		
О. А. Ожогина	9	673
Особенности правила Гневышева—Вальдмайера для различных времен жизни и площадей групп солнечных пятен		
Ю. А. Наговицын, В. Г. Иванов, А. А. Осипова	10	749
СОЛНЕЧНАЯ СИСТЕМА — ПЛАНЕТЫ, КОМЕТЫ,		
МАЛЫЕ ТЕЛА, ГЕЛИОСФЕРА		
Оценка физических параметров астероида 2017 VR12 по радиолокационным и фотометрическим наблюдениям		
Ю. С. Бондаренко, Д. А. Маршалов, Ю. Д. Медведев и др.	2	137
Обновленные численные эфемериды галилеевых спутников Юпитера		
Г. А. Космодаминский	11	821
Multiscale Analysis of the Instantaneous Eccentricity Oscillations of the Planets of the Solar System from 13.000 BC to 17.000 AD		
N. Scafetta, F. Milani, A. Bianchini	11	830
Массы троянских групп Юпитера		
Е. В. Питьева, Н. П. Питьев	12	902
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ КОСМОЛОГИЯ		

Оптическое отождествление скоплений галактик среди объектов второго каталога источников Сюняева–Зельдовича обсерватории им. Планка И. А. Зазнобин, Р. А. Буренин, И. Ф. Бикмаев и др.

2

77

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 3 2020

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2019 г.

Соотношение между измерениями масс скоплений галактик в рентгеновском диапазоне и по эффекту Сюняева—Зельдовича		
А. Р. Ляпин, Р. А. Буренин	7	455
Абсорбция в линии 21 см в первичных флуктуациях плотности вещества на стадии их нелинейного сжатия		
В. К. Дубрович, С. И. Грачев	11	759
Понижение яркости космического рентгеновского и мягкого гамма-фона в направлении на скопления галактик		
С. А. Гребенев, Р. А. Сюняев	12	835

ТЕПЛОВЫЕ МЕХАНИЗМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ, АТОМНЫЕ И МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ПРОЦЕССЫ, КОМПТОНИЗАЦИЯ

Аналитическая модель нестационарной ионизации в оболочках сверхновых типа II на фотосферной фазе		
М. Ш. Поташов, С. И. Блинников	5	320
Ограничения на коллимированное рентгеновское излучение SS 433 по отражению на молекулярных облаках		
И. И. Хабибуллин, С. Ю. Сазонов	5	326
Влияние дискового ветра на собственную поляризацию молодых звезд		
С. Г. Шульман, В. П. Гринин	6	437
Понижение яркости космического рентгеновского и мягкого гамма-фона в направлении на скопления галактик		
С. А. Гребенев, Р. А. Сюняев	12	835

ЭКЗОПЛАНЕТЫ

Циркумбинарные планетные системы в Солнечной окрестности: устойчивость и обитаемость		
И. И. Шевченко, А. В. Мельников, Е. А. Попова и др.	9	666
Распределение транзитных экзопланет по массам с учетом факторов наблюдательной селекции		
А. Е. Иванова, В. И. Ананьева, А. А. Венкстерн и др.	10	741

ПЕРСОНАЛИИ

Памяти Николая Семеновича Кардашева (25.04.1932–03.08.2019)	10	755
Памяти Леонида Ивановича Матвеенко (20.12.1929–13.10.2019)	11	831

222

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

DOI: 10.31857/S0320010820030080

Журнал "Письма в АЖ" печатает статьи по всем актуальным вопросам современной астрономии и астрофизики, содержащие еще неопубликованные результаты, нуждающиеся в срочной публикации. Исследования, относящиеся к новым быстро развивающимся областям астрономии и космической астрофизики, рассматриваются как приоритетные. Подробнее об ориентации журнала можно узнать из вводной статьи, опубликованной в его первом номере за 1994 г. (т. 20, с. 3).

Журнал переводится на английский язык компанией "Pleiades Publishing, Ltd.". Английская версия журнала выходит в свет одновременно с изданием на русском языке под названием "Astronomy Letters" и распространяется за рубежом издательством "Springer".

Общие требования. Полный объем рукописи (включая таблицы и рисунки) не должен превышать 25 машинописных страниц. Он может быть увеличен лишь в исключительных случаях по решению редколлегии. Текст статьи, независимо от ее объема, должен быть изложен с предельной краткостью, совместимой с ясностью изложения, и тщательно отредактирован. Аннотация должна содержать основные результаты, а не перечень вопросов, рассматриваемых в статье, и не должна повторять ее названия.

Статья должна давать ясное представление о задачах исследования, методике и полученных результатах. Следует избегать жаргонных выражений, терминов и сокращений, употребляемых лишь узкой группой специалистов. В частности, следует избегать фирменных буквенно-цифровых обозначений телескопов, приборов, проектов, а приводить, в случае необходимости, их полное название и основные характеристики. Не допускается перегрузка статей формулами, а также дублирование результатов в таблицах и рисунках. Таблицы большого объема (более трех машинописных страниц) могут быть опубликованы только в электронном виде (см. ниже). Также предоставляется возможность публикации других дополнительных материалов к статье только в электронной версии журнала (Supplementary Materials).

Представление рукописей. Автор может подать рукопись через портал редакционноиздательской системы https://publish.scincejournals.ru или прислать статью в виде PDF-файла на адрес электронной почты редакции pazh@pleiadesonline.com.

Направляя статью в редакцию, авторы передают учредителям, редколлегии и издателям журнала ("ИКЦ "АКАДЕМКНИГА" и "Pleiades Publishing, Ltd.") право на ее публикацию на русском языке и в переводе на английский язык, сохраняя при этом за собой все остальные права собственности на данную статью.

В этой связи просим авторов присылать одновременно со статьей:

1. Договор о передаче авторского права на использование материалов на английском языке (форму договора можно скачать www.pleiades.online).

2. Договор о передаче авторского права на публикацию русской версии (форму договора можно скачать на сайте журнала или на сайте www.sciencejournals.ru).

В договорах требуются подписи всех соавторов.

Необходимо сообщить адрес, фамилию, имя и отчество автора, ответственного за связь с редакцией, номер его телефона (служебного, мобильного, домашнего), адрес электронной почты. Статьи, основанные на работах, выполненных в учреждениях, желательно представлять с направлением от этих учреждений и, если это необходимо, с актом экспертизы.

Рецензирование. Статьи, представляемые в журнал "Письма в АЖ", направляются, как правило, на отзыв двум рецензентам, в ряде случаев оказывается необходимым дополнительное рецензирование. При получении авторами отзывов рецензентов, указывающих на необходимость доработки статьи, ответ должен быть получен редакцией в течение месяца. В противном случае статья считается взятой автором обратно. Ответ должен содержать не только переработанную версию статьи, но и сопроводительное письмо с пояснениями, какие исправления были сделаны, а с какими замечаниями рецензентов авторы не согласны и почему. В случае отклонения редакция сохраняет у себя один экземпляр статьи. **Оформление рукописей.** Статьи представляются набранными на компьютере стандартным шрифтом (12 pt). Страницы рукописи, а также таблицы и рисунки должны быть отдельно пронумерованы.

На титульном листе рукописи печатаются: название статьи, инициалы и фамилия всех соавторов (через запятую), полное название учреждения, в котором выполнялась работа, краткая аннотация $(\sim 150 - 200 \text{ слов})$ на русском языке и ключевые слова. Внизу страницы указывается электронный адрес одного из авторов (для связи), около его фамилии ставится звездочка. Если исследование выполнялось в разных учреждениях, после фамилии каждого соавтора дается ссылка в виде цифры, указывающая на учреждение, где он работает. Список учреждений приводится после фамилий всех соавторов. В качестве ключевых слов желательно использовать названия разделов ежегодного предметного указателя журнала (публикуется в № 1). Перевод на английский язык названия статьи, инициалов и фамилий всех соавторов, названий учреждений приводится на отдельном листе. Желательно привести также перевод специальных терминов и фамилий авторов обсуждаемых эффектов и методов. Основной текст должен начинаться со второй страницы рукописи. Рекомендуется разбивать статью на разделы, начинать ее с Введения, излагающего постановку задачи, и заканчивать Заключением с перечнем основных результатов работы (нумерации разделов желательно избегать).

Текст статьи должен быть тщательно отредактирован.

Размерность величин следует указывать, как правило, с применением косой черты (например, см/с, г/см³, но размерность концентрации следует писать см⁻³, а не 1/см³). Дробная часть числа отделяется от целой точкой (например, 3.1416). В экспоненциальном представлении такие числа записываются в виде 1.3×10^{-2} , а не 1.3E-2. Приближенное равенство обозначается знаком \approx или \simeq , равенство по порядку величины — знаком \sim (употребляется обычно в тексте), пропорциональность — знаком \propto . Используются только "кавычки", но не "кавычки". Буква "ё" везде заменяется на "е", кроме фамилий и особых случаев.

Электронная версия статьи.

Основной текст рукописи в формате LaTeX, TeX или TextOnly с приложением отдельных файлов с рисунками можно прислать уже после принятия статьи к публикации. Стилевой файл приведен на домашней странице журнала (hea.iki.rssi.ru/pazh) или на сайте издательства (http://pleiades.online/ru/authors/guidlines/prepareelectonic-version/tex-latex/). В некоторых случаях возможно представление текста в формате Microsoft Word for Windows по возможности с использованием последних версий или стилевого файла издательства (http://pleiades.online/ru/ authors/guidlines/prepare-electonic-version/style/). Требования к файлам дополнительных материалов. публикуемых в электронной версии журнала приведены http://pleiades.online/ru/authors/guidlines/ prepare-electonic-version/supplementary-materials/ файлы Подготовленные необходимо приредакции сылать ПО электронному адресу pazh\$pleiadesonline.com.

Рисунки. Статья не должна быть перегружена рисунками. При наличии нескольких связанных друг с другом рисунков они должны быть рационально и экономно скомпонованы. На координатных осях необходимо наносить шкалы, указывать, какая физическая величина на них отложена, и ее размерность. Не рекомендуется воспроизведение с иллюстрационными целями ранее публиковавшихся рисунков.

Приводя на графиках наблюдательные данные, желательно показать черточками величину ошибок наблюдений. К рисункам необходимы лаконичные подписи. На самом рисунке должно быть минимальное количество словесных обозначений, пояснения следует вносить в подрисуночные подписи или в текст статьи. Не добавляйте сетку или серый фон на задний план графиков и схем. Надписи на иллюстрации не должны соприкасаться ни с какими ее частями. Размер шрифта обозначений должен соответствовать предполагаемому окончательному размеру рисунка.

Файлы иллюстраций должны быть поименованы таким образом, чтобы было понятно, к какой статье они принадлежат и какой порядок их расположения в тексте. Каждый файл должен содержать один рисунок.

Требования к файлам иллюстраций.

1. Иллюстрации не должны иметь разрешение ниже 150 dpi. Рекомендуемое разрешение:

1.1. Halftones (color or grayscale) — 225-300 dpi.

1.2. Bitmap — 600–1200 dpi.

2. Иллюстрации не должны быть уже 8 см
(расположение на одну колонку), либо 17 см (на две колонки).

3. Толщины линий на иллюстрациях не должны быть меньше 0.5 pt.

4. Графики, диаграммы, схемы желательно готовить в векторных графических редакторах (CorelDRAW, Adobe Illustrator) и предоставлять в формате той программы, в которой они были выполнены (*.cdr, *.ai), или в формате *.eps. Текст по возможности преобразовывайте в кривые.

5. Для остальных иллюстраций желательны форматы *.tiff, *.jpeg.

6. Фотографии желательно предоставлять в 2 вариантах. Первый — соответствующий оригиналу со всеми надписями и обозначениями; второй — чистый (без текста, обозначений и пр.). Желательный формат файлов *.tiff, *.jpeg. Градация серого на фотографии допускается от 9 до 93%.

 Мы не рекомендуем передавать иллюстрации в формате DOC. Если это все-таки необходимо, все иллюстрации в данном формате должны быть собраны в один файл.

8. Запрещается использование точечных закрасок в программах работы с векторной графикой, таких как "Noise" "Black&white noise" "Top noise".

Литература. Ссылки в тексте на цитируемую литературу даются в виде фамилии автора (для иностранных авторов в русской транскрипции) и года опубликования работы с добавлением буквы при ссылках на несколько публикаций данного автора в том же году. При двух авторах указываются обе фамилии через запятую, при трех и более соавторах указывается лишь первая фамилия с добавлением "и др.". Желательно включать фамилии в текст фразы, в тех случаях, когда это невозможно, приводить их в скобках.

Цитируемая литература приводится под заголовком "Список литературы" в конце статьи в алфавитном порядке написания фамилии первого автора на русском языке. В ссылке через запятую указываются фамилии и инициалы восьми авторов с добавлением "и др.". Для авторов иностранных изданий после русской транскрипции одной или двух фамилий либо фамилии первого соавтора с добавлением "и др." в скобках указываются фамилии и инициалы восьми авторов в оригинальном написании с добавлением "et al.". После этого через запятую дается сокращенное название журнала в системе сокращений, употребляемых в "Письмах в АЖ", том, первая страница, год публикации. Для книг указывается фамилия и инициалы автора (авторов) или редактора, если это сборник, полное название книги, затем в скобках город и название издательства и год издания (для иностранных книг, переведенных на русский язык, следует приводить данные о русском издании). В ссылках на статьи, опубликованные в трудах конференций, необходимо указать название конференции, затем в скобках редакторов, город, издательство, год издания и первую страницу публикации.

Следующие примеры иллюстрируют приведенные выше правила цитирования литературы:

1. Вихлинин, Форман (A. Vikhlinin and W. Forman), Astrophys. J. **455**, 109 (1995).

2. Гнедин О.Ю., Яковлев Д.Г., Письма в Астрон. журн. **19**, 280 (1993) [О.Yu. Gnedin, D.G. Yakovlev, Astron. Lett. **19**, 104 (1993)].

3. Канизарес, BaftT (C.R. Canizares and J.L. White), *Active Galactic Nuclei, IAU Symp. 134* (Ed. D. Osterbrock, J. Miller, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1989), p. 161.

4. Лунд и др. (N. Lund, C. Budtz-J?rgensen, N.J. Westergaard, S. Brandt, I.L. Rasmussen, A. Hornstrup, C.A. Oxborrow, J. Chenevez, et al.), Astron. Astrophys. **411**, L231 (2003).

5. Шапиро С., Тьюколски С., *Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды* (М.: Мир, 1985), т. 1, с. 100.

Таблицы. С 1997 г. журнал публикует таблицы большого объема (более трех машинописных страниц) только в электронном виде, малого объема как в обычном, так и в электронном виде. Доступ к электронным версиям таблиц осуществляется через Страсбургский центр данных (Strasbourg Astronomical Data Center/CDS). В CDS таблицы хранятся в виде файлов. Они доступны через WWW интерфейс:

http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat

http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR

Если в статье значительное место занимают таблицы, содержащие наблюдательные или расчетные данные, авторы должны подготовить их электронные версии (в кодах ASCII) и передать их в CDS по адресу: cdsarc.ustrasbg. fr/doc/submit.htx. При представлении статьи в любом случае необходимо приложить одну копию таблиц в распечатанном виде для рецензирования.

Подробную инструкцию по подготовке таблиц в формате, принятом в CDS, можно найти на сайте журнала.

Общие инструкции по подготовке таблиц можно также получить непосредственно в CDS.

Работа с электронной корректурой. Авторам высылается по электронной почте PDF-файл верстки статьи. Файлы можно прочитать и отредактировать с помощью программы Adobe Reader (версии 9 и выше), которую можно бесплатно скачать через интернет: get.adobe.com/reader/

Замечания нужно вносить прямо в PDF-файл статьи, используя панель инструментов "Комментарии и пометки" программы Adobe Reader. Не используйте другие программы для правки PDFфайлов иначе авторские замечания могут быть потеряны при автоматической обработке ответов. Нельзя изменять название PDF-файла статьи и тему e-mail сообщения по той же причине.

Рекомендации по внесению исправлений в PDF-файл:

1. Откройте pdf-файл статьи программой Adobe Reader.

2. Если панель инструментов "Комментарии и пометки" не присутствует на экране, ее можно вызвать для быстрого доступа:

2.1. В меню "Инструменты" выбрать "Настроить панели инструментов...". В открывшемся окне нужно отметить галочками Панель инструментов "Комментарии и пометки", а также отметить те инструменты, которые Вы собираетесь использовать. Нажать "ОК".

3. Для использования инструментов правки текста необходимо выбрать нужный фрагмент текста в файле и нажать кнопку соответствующего инструмента:

3.1. Удалить текст: инструмент "Вычеркивание текста" (красный цвет).

3.2. Заменить текст: инструмент "Заменить выделенный текст" (синий цвет).

3.3. Вставить текст: инструмент "Вставить текст на место курсора".

4. Для использования инструментов рисования и вставки заметок необходимо сначала выбрать инструмент, а затем указать место в тексте.

5. Если Вам необходимо вставить или заменить текст со сложным форматированием или специфическим шрифтом, наберите его в MS Wird, скопируйте и вставьте в заметку или используя инструмент "Выносная строка". Символы, которые при такой вставке теряют форматирование, можно скопировать инструментом "Снимок" и вставить, используя инструмент "Штамп", нарисовать инструментом "Карандаш" или описать словами.

6. При правке сложных формул и рисунков ссылайтесь на оригинал, используйте инструмент "Карандаш" или копируйте инструментом "Снимок" и вставляйте, используя инструмент "Штамп". 7. Правка должна быть понятной и видимой при визуальном просмотре страницы. Не вставляйте объекты поверх существующего текста.

8. В исключительных случаях, когда правку невозможно внести в PDF-файл статьи (например, замена рисунка), то можно приложить к письму нужный файл в соответствующем месте с помощью инструмента "Присоединить файл" Рядом необходимо разместить комментарий, объясняющий что на что и по какой причине меняется.

9. Для повторяющихся исправлений используйте поиск (Ctrl + F).

Гонорар, оттиски, плата за публикацию. За публикацию в русской версии журнала плата с авторов не взимается и гонорар не выплачивается. За публикацию в английской версии выплачивается гонорар. Авторы получают оттиски русской и английской версий своей статьи в виде PDF-файлов.

Электронную версию настоящих правил, таблицы оглавлений русской версии журнала "Письма в АЖ" за многие годы и другую полезную информацию можно найти на сайте журнала: hea.iki.rssi.ru/pazh.

ЭТИКА И ПУБЛИКУЕМЫЕ СВЕДЕНИЯ

Astronomy Letters максимально стремится поддерживать принципы добропорядочности и этики в опубликованном контенте.

У Astronomy Letters есть политика конфликтов интересов, и публикуемые в журнале работы соответствуют международным, национальным и/или институциональным стандартам работы с людьми и животными, а также при необходимости используют практику информированного согласия.



Astronomy Letters является членом Committee on Publication Ethics (COPE) и соглашается с его принципами в отношении того, как бороться со случаями ненадлежащего поведения, тем самым обязуясь расследовать утверждения о ненадлежащем поведении в целях обеспечения этичности исследований.



Astronomy Letters может использовать программное обеспечение для обнаружения плагиата при проверке представленных рукописей. Если будет выявлен плагиат, журнал будет следовать принципам и рекомендациям СОРЕ в отношении плагиата. Публикуемые в Astronomy Letters работы рецензируются.

РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ СТАТЬИ

Astronomy Letters - журнал, в котором все статьи рецензируются. Мы используем одностороннюю "слепую" форму рецензирования. В число рецензентов входит свыше 100 внутренних и внешних экспертов (из них внешних - 80%). Среднее время — с момента получения рукописи в редакции до принятия первого решения — в 2017 году было 14 дней; время от принятия первого решения до принятия рукописи к публикации — 40 дней. Количество отклоненных рукописей составило в 2017 году 41%. Окончательное решение о публикации рукописи принимает редакционная коллегия.

Любой приглашенный рецензент, если он чувствует отсутствие необходимой квалификации или не может провести рецензирование рукописи изза конфликта интересов, должен своевременно сообщить об этом редактору и отклонить предложение о проведении рецензирования. Рецензенты должны формулировать свои утверждения в ясной форме, аргументированно и логично, так, чтобы авторы могли использовать их для улучшения рукописи. Необходимо полностью исключить критику, направленную на личность авторов. Рецензенты должны указать в своей рецензии (і) любые работы, которые имеют отношения к рукописи, но не были процитированы авторами; (іі) всё, что сообщалось в более ранних публикациях, но не было подобающим образом процитировано или указано в работе; (ііі) любое значимое сходство или пересечение с другими (опубликованными или неопубликованными) рукописями, о которых известно рецензенту.

ПОДПИСКА

Электронная версия журнала доступна по подписке http://springer.com/journal/11443

По вопросам подписки, пожалуйста, обращайтесь к дистрибьютору Springer Science + Business Media

The Americas (North, South, Central America, and the Caribbean): Journals Customer Service, Springer, 233 Spring St., New York, NY 10013, USA. Phone: 1-800-SPRINGER (777-4643); Email: customerservice@springer.com.

Outside the Americas: via a bookseller or Springer Customer Service Center GmbH, Tiergartenstrasse 15, 69121 Heidelberg, Germany. Phone: +49-6221-345-4303; Fax: +49-6221-345-4229; E-mail: subscriptions@springer.com.

Список принятых сокращений названий основных астрономических и физических журналов

Астрон. жирн. Астрон. вестник Астрон. циркуляр Астрофизика ЖЭТФ Изв. КрАО Космич. исслед. Переменные звезды Письма в Астрон. журн. Письма в ЖЭТФ Препринт ИКИ РАН Сообш. САО РАН Успехи физ. наук Acta Astron. Adv. Space Res. Ann. Rev. Astron. Astrophys. Astron. Astrophys. Rev. Astron. Astrophys. Suppl. Ser. Astron. Astrophys. Trans. Astron. J. Astron. Lett. Astron. Nachr. Astron. Rep. Astron. Telegram Astrophys. J. Astrophys. J. Suppl. Ser. Astrophys. Lett. Astrophys. Lett. Comm. Astrophys. Space Sci. Aust. J. Phys. Bull. Am. Astron. Soc. Canad. J. Phys. ESO Messenger Exp. Astron. IAU Circ. Icarus **MNRAS** Nature New Astron. Phys. Lett. Phys. Rev. Publ. Astron. Soc. Japan Publ. Astron. Soc. Pacific Science Solar Phys. Sov. Astron. Sov. Astron. Lett. Space Sci. Rev.

228

Астрономический жирнал Астрономический вестник Астрономический циркуляр Астрофизика Журнал экспериментальной и теоретической физики Известия Крымской астрофизической обсерватории Космические исследования Переменные звезды Письма в Астрономический журнал Письма в Журнал эксперим. и теор. физики Препринт Ин-та космических исследований РАН Сообшения Специальной астрофиз. обсерватории РАН Успехи физических наук Acta Astronomica Advances in Space Research Annual Review of Astronomy and Astrophysics Astronomy and Astrophysics Astronomy and Astrophysics Review (the) Astronomy and Astrophysics Supplement Series Astronomical and Astrophysicat Transactions Astronomical Journal (the) Astronomy Letters Astronomische Nachrichten Astronomy Reports Astronomer's Telegram Astrophysical Journal (the) Astrophysical Journal Supplement Series (the) Astrophysicat Letters Astrophysicat Letters & Communications Astrophysics and Space Science Australian Journal of Physics Bulletin of the American Astronomical Society Canadian Journal of Physics ESO Messenger (the) Experimental Astronomy International Astronomical Union, Circular Icarus Monthly Notices of the Royal Astronomical Society Nature New Astronomy Physical Letters Physical Review Publications of the Astronomical Society of Japan Publications of the Astronomical Society of the Pacific Science Solar Physics Soviet Astronomy Soviet Astronomy Letters Space Science Reviews