

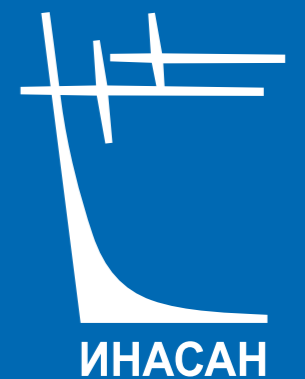
ISSN 2658-5669

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ
ИНСТИТУТА
АСТРОНОМИИ РАН

INASAN
SCIENCE
REPORTS

ТОМ
8

ВЫПУСК 5



ИНАСАН

МОСКВА
2023

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



УДК 52
ББК 22.6
НЗ4

НЗ4 **Научные труды Института астрономии РАН. Том 8(5).** –
М.: Изд-во Янус-К, 2023, 50 с., илл.

ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

Редколлегия

Сачков М.Е. (главный редактор), Вибе Д.З. (зам. главного редактора),
Бисикало Д.В., Барабанов С.И., Кузнецов Э.Д., Малков О.Ю., Машонкина Л.И.,
Фатеева А.М., Шематович В.И., Шустов Б.М.

Ответственный редактор Исакова П.Б.
Секретарь редколлегии Вибе Е.Д.

«Научные труды Института астрономии РАН» – рецензируемый журнал, публикующий статьи по различным аспектам астрономии, в том числе по теоретической и наблюдательной астрофизике, планетной астрономии, звёздной астрономии, физике Солнца, небесной механике, астрономическим методам и приборам, космическим исследованиям и исследованиям в области космической геодезии.

© ИНАСАН, 2023
© Коллектив авторов, 2023

INASAN Science Reports. Vol 8(5). M.: Janus-K, 2023, 50 pp.

ISSN 2658-5669

e-ISSN 2712-8318

Editorial Board

M.E. Sachkov (Editor-in-Chief), D.S. Wiebe (Deputy Editor-in-Chief),
D.V. Bisikalo, S.I. Barabanov, E.D. Kuznetsov, O.Yu. Malkov, L.I. Mashonkina,
A.M. Fateeva, V.I. Shematovich, B.M. Shustov.

Managing Editor P.B. Isakova
Staff Editor E.D. Wiebe

INASAN Science Reports is a peer-reviewed journal that publishes papers in various fields of astronomy, including theoretical and observational astrophysics, planetary astronomy, galactic astronomy, solar physics, celestial mechanics, astronomical methods and tools, space research and studies related to space geodesy.

© INASAN, 2023
© Author team, 2023

Научное издание

**Научные труды
Института астрономии РАН.
Том 8 (5)**

Сдано в набор 18.12.2023. Подписано в печать 21.12.2023
Формат 60х90/8. Бумага офсетная.
Уч.-изд. п.л. 6,25. Физ. п.л. 6,25. Тираж 100. Заказ №8417

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

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



Режимы наблюдений блока камер поля космической обсерватории «Спектр-УФ»

Шмагин В.Е., Сичевский С.Г., Шугаров А.С.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Блок камер поля — один из основных научных приборов обсерватории «Спектр-УФ», который предназначен для получения изображений астрономических объектов в нескольких спектральных диапазонах. В его конструкции предусмотрено три канала: канал вакуумного ультрафиолета (115–176 нм) с высокими пространственным разрешением, оснащенный МКП-приемником с CsI фотокатодом; канал ближнего ультрафиолета (150–320 нм) с высокими пространственным разрешением, оснащенный МКП-приемником с GaN фотокатодом; и канал ближнего ультрафиолетового и оптического диапазона (180–1000 нм) с полем зрения $4.5' \times 4.5'$ и КМОП-приемником. МКП-приемники являются солнечно-слепыми (чувствительность в оптическом диапазоне на 3–8 порядков меньше, чем в ультрафиолетовом). Помимо режима получения изображений с использованием светофильтров, предусмотрен режим полевой спектроскопии низкого разрешения. В статье кратко изложены общие характеристики и возможные режимы работы блока камер поля, доработанного после 2022 г. группой сотрудников Института астрономии РАН. Статья основана на материалах, представленных на Всероссийской научной конференции «Ультрафиолетовая Вселенная — 2023».

Поступила в редакцию 16.11.2023 г. Принята в печать 12.12.2023 г.

Ключевые слова: ультрафиолет, Спектр-УФ, МКП, КМОП, солнечно-слепой УФ

WSO-UV Field Camera Unit observation modes

Shmagin V.E., Sichevsky S.G., Shugarov A.S.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Field Camera Unit (FCU) is one of the primary scientific instruments of the WSO-UV project. Its main purpose is taking images of astronomical objects in several spectral ranges using three channels: Far Ultraviolet channel (FUV, 115–176 nm) with high spatial resolution and MCP detector with CsI photocathode; Near Ultraviolet channel (NUV, 150–320 nm) with high spatial resolution and MCP detector with GaN photocathode; Ultraviolet and Optical channel (UVO, 180–1000 nm) with $4.5' \times 4.5'$ field of view and CMOS detector. In addition to the imaging mode with filters, a low-resolution field spectroscopy mode is implemented. Field camera unit general parameters and modes of operation are described, taking into account the latest updates after 2022 made by the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences working group. This paper is based on a talk presented at “Ultraviolet Universe — 2023” conference.

Received 16.11.2023. Accepted 12.12.2023.

Keywords: Ultraviolet, WSO-UV, MCP, CMOS, solar-blind UV

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.5.001

1. Введение

Блок камер поля (БКП) входит в состав научной аппаратуры космического комплекса (КК) «Спектр-УФ». Основное назначение КК «Спектр-УФ» — проведение наблюдений в вакуумном и ближнем УФ диапазонах электромагнитного спектра (115–310 нм). Развитие обсерватории «Спектр-УФ» и ее основные характеристики описаны в работах [1, 2, 3, 4, 5]. Обсуждение научной программы проекта можно найти в работе [6].

БКП вместе с блоком спектрографов (БС) — главные научные приборы, и вместе с телескопом Т-170М они составляют основу комплекса научной аппаратуры (КНА). БКП предназначен для получения высококачественных прямых снимков космических объектов в УФ-диапазоне. В первую очередь БКП предназначен для исследования слабых точечных УФ-источников и протяженных источников с использованием светофильтров. Также в БКП возможна работа в режиме полевой спектроскопии низкого разрешения. Данный режим позволяет проводить спектральный анализ слабых точечных и протяженных объектов. Среди основных научных задач, для решения которых предназначен БКП, можно отметить следующие:

- образование галактик;
- образование и эволюция Млечного Пути;
- физика аккреции и истечений;
- атмосферы планет Солнечной системы и экзопланет;
- астрохимия в присутствии сильных УФ-полей излучения.

В предыдущий вариант КНА входил БКП под названием ISIS (Imaging and Slitless Spectroscopy Instrument), предназначенный для построения изображений в диапазоне 115–320 нм и проведения бесщелевой спектроскопии. В ISIS использовались два МКП-приемника, оптимизированных для разных спектральных диапазонов. Один — с фотокатодом на основе CsI для наблюдений в вакуумном ультрафиолете, второй —

на основе CsTe, оптимизированный для ближнего ультрафиолета. Стороной, ответственной в проекте за разработку и создание ISSIS, была Испания [7], но из-за финансовых затруднений Испания отказалась от дальнейшего развития своего проекта. ГК «Роскосмос» поставил задачу создания российского варианта БКП. В процессе решения этой задачи была развита концепция нового БКП и разработаны его конструктивные основы (см. например, [8, 9]). Основываясь на опыте испанской стороны по созданию ISSIS обсерватории «Спектр-УФ», специалисты ИНАСАН совместно со специалистами ИКИ РАН и ФИАН провели в 2019–2020 гг. проектирование нового БКП, который позже был уточнен и дополнен из-за введенных в 2022 г. ограничений на возможность поставки иностранных комплектующих изделий.

Функционально БКП имеет следующие каналы:

- канал вакуумного ультрафиолета (ВУФ) (115–176 нм) с высоким пространственным разрешением, оснащенный МКП приемником с CsI фотокатодом;
- канал ближнего ультрафиолета (БУФ) (150–320 нм) с высоким пространственным разрешением, оснащенный МКП приемником с GaN фотокатодом;
- канал ближнего ультрафиолетового и оптического диапазона (УФО) (180–1000 нм) с полем зрения $4.5' \times 4.5'$ и КМОП приемником.

Разработанный новый вариант БКП имеет высокую чувствительность и большое поле зрения, предоставляя возможность работать не только в УФ, но и в оптическом и ближнем ИК диапазонах до 1000 нм. МКП-приемники ВУФ и БУФ каналов являются солнечно-слепыми (чувствительность в оптическом диапазоне на 3–8 порядков меньше, чем в ультрафиолетовом). Будет предусмотрен режим счета фотонов, что позволит получать фотометрические данные с миллисекундным временным разрешением. Помимо режима получения изображений с использованием светофильтров, предусмотрен режим полевой спектроскопии низкого разрешения. Кроме того, оптическая схема позволяет реализовать режим коронографа по схеме Лио и режим поляриметра. БКП будет уникальной астрономической камерой УФ-диапазона, обладающей субсекундным угловым разрешением и высокой эффективностью в поисково-обзорном режиме работы.

В статье кратко изложены общие характеристики и возможные режимы работы блок камер поля, доработанного после 2022 г. группой сотрудников Института астрономии РАН. Общие характеристики оптической схемы и компоновки БКП описаны в разделе 2, в разделе 3 кратко описаны режимы работы, выводы приведены в разделе 4.

2. Оптическая схема и компоновка БКП

Оптическая схема БКП с расположением основных узлов представлена на рис. 1.

БКП включает в себя 3 канала, по одному приемнику излучения в каждом. Первый элемент оптической схемы, плоское диагональное зеркало (M0), установлен на приводе, позволяющем производить выбор канала путем вращения зеркала вокруг оптической оси и фокусировать изображение путем смещения вдоль оптической оси. Канал УФО состоит из КМОП детектора в фокусе Несмита и четырех колес фильтров между зеркалом M0 и детектором. Внеосевое эллиптическое зеркало (M1) и тороидальное зеркало (M2) предназначены для увеличения фокусного расстояния системы в каналах ВУФ и БУФ с высоким пространственным разрешением. Между зеркалом M2 и детекторами расположен механизм выбора режима (МВР), предназначенный для переключения между каналами БУФ и ВУФ, а так же включение режима «Спектроскопия» в каналах ВУФ и БУФ. Между зеркалами M1 и M2 расположен выходной зрачок телескопа, в котором размещено общее для каналов ВУФ и БУФ колесо нейтральных фильтров (КНФ), предназначенных для наблюдения слишком ярких для МКП детекторов объектов. В фокусе Несмита между зеркалами M0 и M1 располагается колесо полевых диафрагм (КПД), которое позволяет дополнительно ограничить поле зрения каналов ВУФ и БУФ для снижения рассеянного света и избежания наложения спектров в режиме полевой спектроскопии. По одному колесу фильтров располагаются перед детекторами каналов ВУФ и БУФ.

3. Режимы БКП

Основной задачей БКП является получение изображений астрономических объектов. В качестве дополнительных режимов в текущем проекте БКП предусмотрена спектроскопия низкого разрешения, есть возможность реализации коронографического режима наблюдений и поляриметрии.

3.1. Режим «Камера»

Режим «Камера» является основным для проведения фотометрии точечных и протяженных источников. Канал УФО размещен в фокусе Несмита и имеет лучшее разрешение, чем наземные телескопы, не оснащенные адаптивной оптикой. Масштаб изображения в каналах ВУФ и БУФ в несколько раз меньше, чем в канале УФО, что позволяет получать пространственное разрешение, ограниченное качеством оптики телескопа Т-170М. Основные характеристики БКП и сравнение с аналогичными камерами телескопа им. Хаббла представлены в табл. 1.

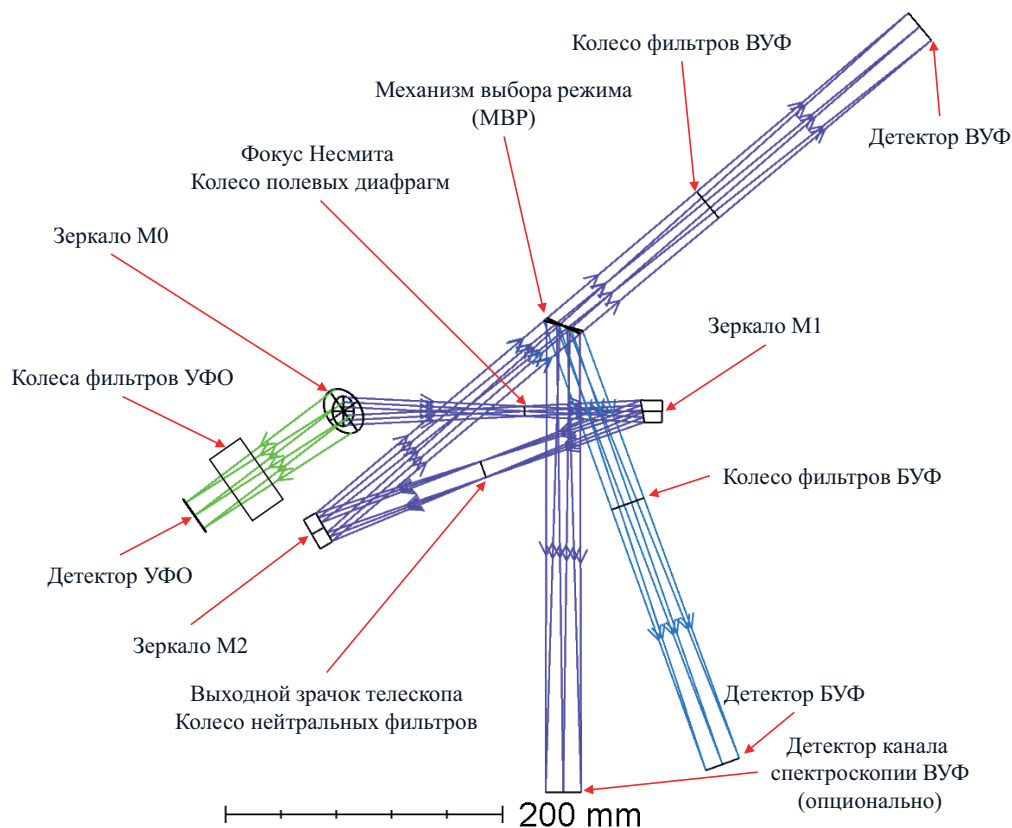


Рис. 1: Оптическая схема БКП.

Рабочий спектральный диапазон канала ВУФ с длинноволновой стороны ограничен крайне слабой чувствительностью фотокатода CsI к излучению с длиной волны более 180 нм, а с коротковолновой — поглощением фильтров и входного окна детектора из MgF_2 .

Рабочий спектральный диапазон канала ВУФ с длинноволновой стороны ограничен слабой чувствительностью фотокатода GaN к излучению с длиной волны более 320 нм, а с коротковолновой — входным окном детектора из сапфира (Al_2O_3).

Рабочий спектральный диапазон канала УФО с длинноволновой стороны ограничен красной границей внутреннего фотоэффекта в кремнии, а с коротковолновой — входным окном детектора из кварца (SiO_2) и УФО-покрытием на КМОП-чипе.

В канале УФО последовательно размещено 4 колеса фильтров, что позволяет вводить в пучок несколько фильтров одновременно. Такая возможность может быть полезна, например, для калибровки внеполосного пропускания некоторых фильтров.

Во всех колесах фильтров всех каналов предусмотрена возможность установки пустого слота для максимизации эффективности. В каждом канале есть затвор для получения калибровочных кадров, выполненный в виде непрозрачного слота в соответствующих колесах фильтров. Список и основные параметры фильтров

Таблица 1: Основные характеристики БКП и камер телескопа им. Хаббла — ACS SBC и WFC3 UVIS.

Характеристика	Канал ВУФ	Канал ВУФ	Канал УФО	ACS SBC	WFC3 UVIS
Тип ФПУ	МКП, CsI	МКП, GaN	КМОП	МКП, CsI	ПЗС
Диапазон, нм	115–176	150–320	180–1000	115–170	200–1000
Поле зрения, "		Ø 84	270 × 270	34.59 × 30.8	162 × 162
Масштаб изображения, "/пиксель		0.028	0.13	0.033 × 0.030	0.0395
Размер ФПУ, мм		Ø 25	22.5 × 22.5	25	61 × 61
Кол-во пикселей		Ø 3k	2k × 2k	1k × 1k	4k × 4k
Кол-во фильтров		до 10	до 19	6	62

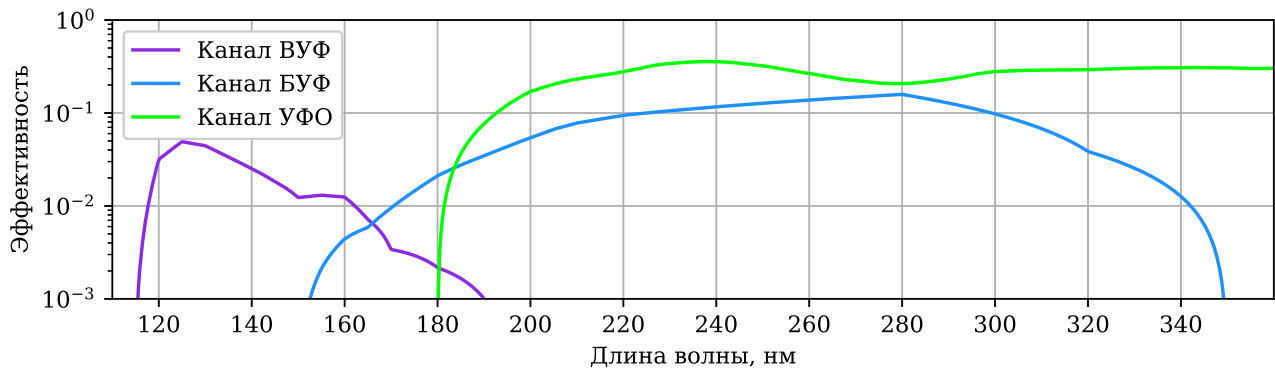


Рис. 2: Эффективность БКП.

БКП представлен в табл. 2. Зависимость эффективности телескопа и БКП без учета фильтров от длины волны представлена на рис. 2.

Таблица 2: Список фильтров БКП.

Фильтры канала ВУФ			
Фильтр ВУФ	λ_{\min} , нм	Материал	Назначение
F115LP	115	MgF ₂	Ly α
F125LP	125	CaF ₂	UV2 [10]
F140LP	140	BaF ₂	UV3 [10]
F150LP	150	SiO ₂ кр.	CIV
F165LP	165	SiO ₂ ам.	HeII

Фильтры канала БУФ			
Фильтр БУФ	λ_{cwl} , нм	FWHM, нм	Назначение
F255W	255	50	Hartley, UV6
F336W	336	50	Huggins, UV7
F232N	232	5	CII
F280N	280	5	MgII
F308N	308	5	TiII

Фильтры канала УФО			
Фильтр УФО	λ_{cwl} , нм	FWHM, нм	Назначение
F255W	255	50	Hartley, UV6
F336W	336	50	Huggins, UV7
F438W	438	70	B
F555W	555	150	V
F606W	606	230	Широкий V
F814W	814	260	Широкий I
F232N	232	5	CII
F280N	280	5	MgII
F308N	308	5	TiII
F656N	656	5	H α
F673N	673	10	SII

3.2. Режим «Спектроскопия»

Спектроскопия в канале ВУФ реализована за счет введения в оптический тракт одной из двух призм, расположенных в МВР. Призма для коротковолновой части диапазона (115–145 нм) будет изготовлена из фторида магния (MgF_2). Спектральная разрешающая способность на длине волны 121.5 нм ($\text{Ly}\alpha$) будет иметь значение около 1000. Вторая призма, рассчитанная на диапазон 145–176 нм будет изготовлена из фторида бария (BaF_2) или флюорита (CaF_2) и будет иметь спектральную разрешающую способность около 600 на длине волны 164 нм (HeII).

Так как для максимизации эффективности оптическая схема канала ВУФ не содержит плоского ломающего зеркала перед детектором, применение отражательной дифракционной решетки с основным детектором канала невозможно. Дифракционная решетка обеспечивает лучшую равномерность спектральной разрешающей способности по сравнению с призмой. Для канала ВУФ, в случае использования решетки, спектральное разрешение на краях диапазона будет варьироваться менее чем в 2 раза, в то время как для призмы из MgF_2 разница будет примерно в 10 раз. Существует возможность установки отдельного детектора для спектроскопии низкого разрешения в ВУФ диапазоне с применением отражательной решетки.

В канале ВУФ возможно использование как отражательной дифракционной решетки в МВР, так и призм в колесе фильтров канала.

Для повышения контраста спектра или лучшего разделения спектров разных источников в фокус Несмита могут быть установлены полевые диафрагмы разной формы и размера, а также щель. Такой режим работы БКП частично дублирует спектрограф с длинной щелью (СДЩ), расположенный в блоке спектрографов (БС) из состава комплекса научной аппаратуры «Спектр-УФ». Отличительная особенность режима щелевой спектроскопии низкого разрешения в БКП — использование детектора в режиме счета фотонов, что позволит получить высокое временное разрешение, что может быть полезно при наблюдении транзиентов, и условно нулевой шум считывания для наблюдения сверхслабых источников.

3.3. Режим «Коронография»

Для случаев, когда рядом с наблюдаемым объектом находится яркий источник, вызывающий насыщение МКП детектора или снижение контраста изображения за счет рассеянного света, может быть предусмотрен режим «коронография». Оптическая схема БКП позволяет реализовать коронограф Лио путем добавления маски, экранирующей яркий источник, в колесо полевых диафрагм и диафрагмы Лио для подавления дифракции в колесо нейтральных фильтров.

3.4. Поляриметрия

По причине массовых и габаритных ограничений на оборудование в инструментальном отсеке телескопа, полноценный поляриметр, измеряющий все параметры Стокса, в состав БКП включить невозможно. В случае наличия научной актуальности, в колесо нейтральных фильтров может быть добавлен набор из трех линейных поляризационных фильтров со смещенным направлением поляризации.

4. Заключение

Обсерватория «Спектр-УФ» является крайне актуальным проектом. В частности, большие надежды на проект возлагаются для задач исследования атмосфер экзопланет. Решены технические вопросы, решен вопрос с замещением импортных критических компонентов. Ритмичное финансирование обеспечит запуск до 2029 г. Большинство составных частей КНА прошли конструкторско-доводочные испытания или находятся на стадии подготовки к ним. Определенный запас времени позволил рассмотреть возможности некоторых улучшений в структуре проекта, в том числе и в БКП.

Разработанный вариант БКП имеет высокую чувствительность, большое поле зрения. Есть возможность работать не только в УФ, но и в оптическом и ближнем ИК диапазонах до 1000 нм. МКП-приемники ВУФ и ВУФ каналов будут работать в режиме счета фотонов, что позволит получать фотометрические данные с миллисекундным временным разрешением. БКП будет уникальной астрономической камерой УФ-диапазона, обладающей субсекундным угловым разрешением (в ВУФ даже лучше $0.1''$). Характеристики БКП будут аналогичны характеристикам камер ACS (Advanced Camera for Survey) Космического Телескопа Хаббла (КТХ).

Список литературы

1. B. Shustov, M. Sachkov, A. I. Gómez de Castro, K. Werner, N. Kappelmann, and A. Moisehev, *Astrophys. and Space Sci.*, **335**, 273, 2011.
2. B. Shustov, A. I. Gómez de Castro, M. Sachkov, A. Moisehev, et al., *Astrophys. and Space Sci.*, **354**, 155, 2014.
3. M. Sachkov, B. Shustov, I. Savanov, and A. I. Gómez de Castro, *Astronomische Nachrichten*, **335**, 46, 2014.

4. M. Sachkov, B. Shustov, and A. I. Gómez de Castro, in *Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, **9905**, 990504 (2016).
5. B. Shustov, A. I. Gómez de Castro, M. Sachkov, J. C. Vallejo, et al., *Astrophys. and Space Sci.*, **363**, 62, 2018.
6. A. A. Boyarchuk, B. M. Shustov, I. S. Savanov, M. E. Sachkov, et al., *Astronomy Reports*, **60**, 1, 2016.
7. A. I. Gómez de Castro, P. Sestito, N. Sánchez, F. López-Martínez, et al., *Advances in Space Research*, **53**, 996, 2014.
8. S. G. Sichevsky, B. M. Shustov, M. E. Sachkov, A. S. Shugarov, I. S. Savanov, and E. N. Kanev, in D. V. Bisikalo and D. S. Wiebe, eds., *A.A. Boyarchuk Memorial Conference*, 377–382 (2018).
9. M. Sachkov, B. Shustov, A. I. Gómez de Castro, A. Shugarov, I. Savanov, E. Kanev, S. Sichevskij, and M. Zvereva, in Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin, eds., *Stars: From Collapse to Collapse*, **510**, 573 (2017).
10. A. I. Gómez de Castro, N. Brosch, D. Bettoni, L. Beitia-Antero, P. Scowen, D. Valls-Gabaud, and M. Sachkov, *Experimental Astronomy*, **56**, 171, 2023.

Логика формирования состава российского сегмента Центра данных в области УФ-астрономии

Архангельский Р.Н., Иосипенко С.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

На основании требуемых функций и особенностей функционирования производится формирование состава компонентов российского сегмента объединенного Российско-Китайского Центра данных по исследованию Луны и дальнего космоса в области УФ-астрономии.

Поступила в редакцию 03.11.2023 г. Принята в печать 12.12.2023 г.

Ключевые слова: УФ-астрономия, центр данных

The logic of forming the composition of the Russian segment of the Data Center in the field of UV astronomy

Arkhangelsky R.N., Iosipenko S.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

Based on the required functions and features of functioning, the composition of the components of the Russian segment of the joint Russian-Chinese Data Center for the study of the Moon and deep space in the field of UV astronomy is being formed.

Received 03.11.2023. Accepted 12.12.2023.

Keywords: UV astronomy, data center

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.5.002

1. Введение

ИНАСАН участвует в работах по созданию российского сегмента объединенного Центра данных по исследованию Луны и дальнего космоса в области УФ-астрономии (ЦД-УФ). В соответствии с техническим заданием ЦД-УФ предназначен для сбора, хранения, обмена, обработки и визуализации данных в области УФ-астрономии, предоставление в установленном порядке данных по запросам. Также указано, что ЦД-УФ должен быть построен на основе иерархической архитектурной модели, содержащей следующие уровни:

- технический уровень, объединяющий базовые технические средства;
- функциональный уровень, обеспечивающий реализацию всего функционала задач, необходимых для информационной поддержки научных космических операций в области исследования Луны и дальнего космоса;
- экспертный уровень, на котором на основе анализа и интерпретации результатов формируются новые представления о физической природе тех или иных изучаемых явлений, а также подготавливаются предложения по формированию планов дальнейших совместных исследований.

Значительный рост объема наблюдательных данных и развитие IT технологий привели к возникновению проектов виртуальных обсерваторий. Идея виртуальной обсерватории позволяет для новых открытий в астрономии использовать существующие данные из архивов и каталогов [1].

В программном обеспечении для обработки изображений астрономических объектов, наряду с давно разработанными и хорошо зарекомендовавшими себя библиотеками на языках Фортран и Си, широко используются библиотеки на языке Python [2]. Построение конвейера (pipeline) для автоматической обработки изображений и извлечения научной информации подробно рассмотрено в [3].

Основным форматом, используемым в астрономии для хранения изображений и спектральных данных, является FITS (Flexible Image Transport System) [4]. С момента появления в 1981 г. формат FITS быстро стал основным средством для передачи астрономических данных NASA и в 1993 г. была принята первая версия стандарта. Современная версия формата FITS 4.0 официально принята Международным Астрономическим Союзом (МАС, International Astronomical Union, IAU) в июле 2016 г. [5].

На основании данных требований производится формирование состава российского сегмента Центра данных в области УФ-астрономии.

2. Формирование состава ЦД-УФ

Необходимая функциональность должна обеспечиваться техническими и программными средствами — компонентами комплекса. Для формирования списка необходимых компонентов будем отталкиваться от тре-

буемых функций ЦД-УФ, в соответствии с чем далее в табл. 1 приведем необходимые компоненты для выполнения соответствующих требуемых функций.

Таблица 1: Требуемые компоненты для обеспечения необходимых функций

Функция	Компонент комплекса
Интерфейс с китайским сегментом центра данных (сбор данных, обмен, предоставление данных по запросам)	– вычислительный сервер – сетевое оборудование – специальное программное обеспечение
Интерфейс с зарубежными хранилищами данных (сбор данных)	– вычислительный сервер – сетевое оборудование – специальное программное обеспечение
Интерфейс с отечественными наземными научными комплексами (сбор данных, обмен, предоставление данных по запросам)	– вычислительный сервер – сетевое оборудование – специальное программное обеспечение
Хранение полученных данных в исходном виде	– система хранения данных – основное программное обеспечение (база данных, файловый архив)
Обработка исходных данных	– вычислительный сервер – специальное программное обеспечение
Визуализация данных	– вычислительный сервер – специальное программное обеспечение
Управление дисциплиной доступа и обеспечение кибербезопасности	– система безопасности – основное программное обеспечение – специальное программное обеспечение

В соответствии с табл. 1, для выполнения всех требуемых функций ЦД-УФ должен представлять собой аппаратно-программный комплекс, в состав которого должны входить, как минимум:

- вычислительный сервер (2 шт.);
- система хранения данных (СХД);
- сетевой коммутатор (2 шт.);
- специальное программное обеспечение для сбора, хранения, обмена, обработки и визуализации данных в области УФ-астрономии (СПО-УФ).

При этом основными техническими (не программными) средствами являются вычислительный сервер и система хранения данных.

Сформируем требования к характеристикам вычислительного сервера на основании требуемых функций и особенностей функционирования (см. табл. 2).

Сформируем требования к характеристикам системы хранения данных на основании требуемых функций и особенностей функционирования (см. табл. 3).

3. Варианты реализации основных технических средств

Варианты реализации ЦД-УФ

1. Виртуальный сервер

Достоинства:

- – сокращение затрат;
- – простая процедура создания резервной копии.

Недостатки:

- – незначительное снижение производительности;
- – общие каналы связи и дисковая система;
- – вынужденная координация разработки с организациями — участниками создания центра данных.

2. Один выделенный сервер

Достоинства:

- – сокращение затрат.

Недостатки:

- – необходимость периодического создания резервной копии сервера;
- – частичная потеря данных БД при сбое;
- – лимит времени на восстановление системы ведет к необходимости круглосуточного мониторинга.

3. Безрейдовая СХД или с уровнем не RAID 1, без полного зеркалирования дисков

Достоинства:

Таблица 2: Требования к вычислительному серверу.

Функция	Особенности	Характеристики
Сбор данных	<ul style="list-style-type: none"> – выполнение программного кода на C++, Python – исполнение запросов к СУБД 	<ul style="list-style-type: none"> – слабая нагрузка, фоновые процессы – БД до 1 млн. записей, размером до 1 Гбайт
Предоставление данных по запросам	<ul style="list-style-type: none"> – функционирование Web-сервера – выполнение программного кода на C++, Python – исполнение запросов к СУБД 	<ul style="list-style-type: none"> – умеренная нагрузка – БД до 1 млн. записей, размером до 1 Гбайт
Обработка исходных данных	<ul style="list-style-type: none"> – выполнение программного кода на C++, Python [2] 	<ul style="list-style-type: none"> – периодическая высокая нагрузка – процессор с тактовой частотой не менее 2.4 ГГц, ОЗУ объемом не менее 32 Гбайт
Визуализация данных	<ul style="list-style-type: none"> – выполнение программного кода на C++, Python – частичное выполнение кода на стороне клиента 	<ul style="list-style-type: none"> – умеренная нагрузка
Параллельное выполнение запросов	<ul style="list-style-type: none"> – при выполнении запросов к Web-серверу и СУБД – при обработке данных 	<ul style="list-style-type: none"> – количество процессоров — не менее 2, ядер 8–12 – объединение серверов в кластер, использование нескольких ядер СУБД, распределение запросов
Резервирование функциональности	<ul style="list-style-type: none"> – «горячий» резерв для обеспечения надежности [6] 	<ul style="list-style-type: none"> – объединение серверов в кластер
Резервирование данных	<ul style="list-style-type: none"> – полное для обеспечения надежности, достаточно периодического после загрузки пакета данных 	<ul style="list-style-type: none"> – репликация СУБД – возможность копирования резервной копии на другой физический носитель

- – возможное сокращение затрат.

Недостатки:

- – возможная частичная потеря данных при сбое;
- – необходимость периодичного создания резервной копии данных на носитель такой же емкости;
- – лимит времени на восстановление системы ведет к необходимости круглосуточного мониторинга.

4. СХД с дублированным контроллером RAID

Достоинства:

- – увеличение надежности по критическому элементу.

Недостатки:

- – увеличение класса СХД и соответственно увеличение стоимости.

5. СХД распределенная совместно с китайским сегментом

Достоинства:

- – возможность использования СХД очень большой емкости
- – существенное сокращение затрат.

Недостатки:

- – российский сегмент теряет свою автономность в работе.

4. Варианты системы хранения данных (СХД)

Емкость одного современного диска, физического носителя информации, достигает 20 Тбайт. К 2025 г. должны появиться диски с объемом памяти 40 Тбайт и выше. Современные СХД позволяют объединять от 12 до 100 носителей информации в модули. СХД может включать несколько таких модулей, что позволяет работать с большими объемами данных. Задача размещения данных ЦД-УФ принципиально решается с использованием иностранных СХД.

Доля СХД российского производства на внутреннем рынке небольшая, но законодательные требования для размещения серверов только на территории РФ и необходимость внедрения системы импортозамещения приводят к ее постоянному росту.

Российские СХД содержат электронные компоненты и диски, изготавливаемые на производственных мощностях, базирующихся в Азии. Задача размещения данных ЦД-УФ также принципиально решается с ис-

Таблица 3: Требования к системе хранения данных

Функция	Особенности	Характеристики
Хранение полученных данных в исходном виде	– файлы FITS размером до 500 Мбайт [5]	– объем данных не менее 210 Тбайт – общий объем хранилища не менее 1 Пбайт (без учета резерва)
Хранение обработанных данных	– файлы FITS размером до 500 Мбайт	– объем данных не менее 625 Тбайт – общий объем хранилища не менее 1 Пбайт (без учета резерва)
Параллельное выполнение запросов	– при выполнении запросов к Web-серверу и СУБД – при обработке данных	желательно
Резервирование данных	– постоянное, полное для обеспечения надежности	– скорость записи низкая – скорость чтения высокая – зеркалирование дисков, массив с высокой надежностью RAID 1, RAID 10, RAID 51, RAID 6, RAID 61 – общий объем хранилища не менее 2 Пбайт (с учетом резерва)

пользованием отечественных СХД с учетом того, что вместо технологии RAID используется собственная система хранения с избыточностью от 20 до 25%.

Ряд предприятий Госкорпорации «Ростех» в настоящее время выпускает СХД. Одна из ключевых разработок — СХД «Купол», отечественная система защищенного хранения данных больших и сверхбольших объемов с возможностью сертификации на работу с данными любой категории. СХД «Купол» производится дочерней компанией Концерна «Автоматика» — ООО «Национальные технологии». Система удовлетворяет требованиям госзаказчиков. Надежность хранения информации гарантируют политики защиты целостности данных с минимальной избыточностью на основе кодов Рида-Соломона. ПО хранения позволяет добиться результатов в 20% избыточности при возможной одновременной потере 2 дисков, а все процессы восстановления данных после сбоя или потери дисков происходят значительно быстрее чем в классических системах хранения, использующих технологии RAID.¹

Система хранения данных АЭРОДИСК Восток — другой вариант СХД, полностью разработанной и произведенной в России. Работает на отечественных процессорах «Эльбрус». Оборудование АЭРОДИСК находится в реестре Минпромторга, а программное обеспечение АЭРОДИСК — в реестре Министерства цифрового развития².

Российская СХД серии BITBLAZE, производимая компанией «Промобит», также работает на отечественных процессорах «Эльбрус»³. СХД BITBLAZE полностью соответствует программе импортозамещения, компоненты и ПО производятся в России. Программное обеспечение внесено в Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных. Решение может использовать в своем составе ОС, сертифицированные Минобороны, ФСБ, ФСТЭК.

Несмотря на высокий уровень локализации производства, использование отечественных процессоров не исключает проблем с поставками. Так «Байкал Электроникс», производитель отечественных процессоров «Байкал» и «Эльбрус», вынужден был заморозить в 2022 г. выпуск новых серверных процессоров Baikal-S из-за проблем с размещением заказов на производство в Тайване. Отмена Baikal-S означает, что в ближайшее время на российский серверный рынок преимущественно будут поставляться решения на базе иностранных чипов.

5. Варианты программного обеспечения

Выбор компонентов программного обеспечения должен производиться на основе функциональных критериев, а также с учетом работ по импортозамещению, актуальность которых только возрастает. Импортозамещение подразумевает замену зарубежного ПО отечественными аналогами, однако требования к реализации программы импортозамещения постоянно корректируются и дополняются. Так, к 2025 г. планируется перевести на отечественное программное обеспечение те организации, которые относятся к субъектам критической информационной инфраструктуры (КИИ), в том числе наука и ракетно-космическая промышленность.

¹ Система хранения данных «Купол» компании «Национальные технологии», <https://www.ao-avtomatika.ru/media/blog/otchestvennaya-sistema-khraneniya-dannykh/>

² Система хранения данных АЭРОДИСК Восток, <https://aerodisk.ru/products/aerodisk-vostok/>

³ Система хранения данных компании «Промобит», <https://bitblaze.ru/storage-system/>

Перечень отечественного программного обеспечения⁴ ограничен в основном программами самого общего назначения — операционные системы, офисные и почтовые программы, браузеры и т. п.

В техническом задании требования по импортозамещению программного обеспечения не конкретизируются, тем не менее для ЦД-УФ целесообразно использовать основной принцип — либо российское программное обеспечение, либо свободно распространяемое ПО с открытым кодом.

6. Заключение

На основании требований по функциональности сформирован принципиальный состав компонентов ЦД-УФ и возможные пути его реализации. При этом при выборе конкретных путей реализации необходимо также учитывать то, что ЦД-УФ должен представлять собой отказоустойчивую информационную систему, способную работать длительное время без перерыва. Эту задачу целесообразно решать созданием высоконадежных систем в специально подготовленном помещении. Задачи доставки крупных массивов информации на большие расстояния и работы в режиме «онлайн» необходимо решать использованием высокоскоростных каналов связи с резервированием и соответствующего сетевого оборудования.

Список литературы

1. Ray Norris, Heinz Andernach, Guenther Eichhorn, and et al., in *Highlights of Astronomy, XXVIth IAU General Assembly* (2006).
2. M. Diganta, M. Sparsha, O. A. Bhargav, and et al., *Astron. and Astrophys.*, **641**, 2020.
3. P. M. Weillbacher, R. Palsa, and O. Streicher, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018.
4. D. C. Wells, E. W. Greisen, and R. H. Harten, *Astron. and Astrophys.*, **44**, 363, 1981.
5. FITS Working Group, Documentation and Astronomical Data International Astronomical Union, *Definition of the Flexible Image Transport System (FITS), FITS Standard Version 4.0*, 2016.
6. A. A. Zatsarinny, A. I. Garanin, V. A. Kondrashev, and et al., *Sistemy i sredstva informatiki*, **29**, 135, 2019.

⁴Российский реестр программного обеспечения, <https://reestr.digital.gov.ru/reestr/>.

Прототип российского сегмента объединенного Центра данных по исследованию Луны и дальнего космоса в УФ области

Архангельский Р.Н., Иосипенко С.В.

Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Представлен обзор существующих и перспективных источников УФ данных, на основании которых целесообразно формировать требования к проектированию российского сегмента объединенного Российско-Китайского Центра данных по исследованию Луны и дальнего космоса в области УФ-астрономии.

Поступила в редакцию 03.11.2023 г. Принята в печать 12.12.2023 г.

Ключевые слова: УФ-астрономия, центр данных

Prototype of the Russian segment of the joint Data Center for the Exploration of the Moon and Deep Space in the UV spectrum

Arkhangelsky R.N., Iosipenko S.V.

Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia

An overview of existing and prospective sources of UV data for the formation of requirements for the design of the Russian segment of the joint Russian-Chinese Data Center is presented.

Received 03.11.2023. Accepted 12.12.2023.

Keywords: UV astronomy, data center

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.5.003

1. Введение

В настоящее время ИНАСАН ведет работы по созданию российского сегмента объединенного Центра данных по исследованию Луны и дальнего космоса в области УФ-астрономии (ЦД-УФ). Основанием для начала проведения таких работ стало соглашение между Государственной корпорацией по космической деятельности «Роскосмос» (Российская Федерация) и Китайской национальной космической администрацией (Китайская Народная Республика) о сотрудничестве в области создания объединенного Центра данных по исследованию Луны и дальнего космоса, при этом головным разработчиком с российской стороны является ИКИ РАН. В соответствии с текущими планами работ эксплуатация центра должна начаться с 2030 г., при этом срок плановой эксплуатации установлен в 5 лет.

ЦД-УФ будет предназначен для сбора, хранения, обмена, обработки и визуализации данных по исследованию Луны и дальнего космоса в области УФ-астрономии, полученных с российских и китайских космических средств. Для формирования и уточнения требований к ЦД-УФ проведен анализ существующих и перспективных источников научных данных в области УФ-астрономии до 2035 г. включительно. При этом среди достаточно большого количества архивов УФ миссий выбраны наиболее схожие с планируемой миссией «Спектр-УФ» по формату данных и диапазону измерений [1].

2. Существующие источники данных

В первую очередь были рассмотрены уже существующие УФ телескопы. В табл. 1 приведены их основные параметры и краткая информация о полученных с них данных.

Далее приведем краткую информацию по указанным в табл. 1 существующим инструментам и некоторые особенности в части возможностей использования, полученных с них данных.

CHANG'E 3 MUVT

До сих пор Луна практически не использовалась для проведения долгосрочных астрофизических наблюдений с помощью телескопов. Среди реализованных проектов самая интересная в части данных — китайская миссия на Луну CHANG'E 3, для которой в НАОС (Национальная астрономическая обсерватория, Китайская академия наук) был разработан лунный телескоп LUT (Lunar-based Ultraviolet telescope), позднее переименованный в Moon located Ultraviolet Telescope (MUVT).

В качестве детектора используется ПЗС AIMO CCD E2V47-20 формата 1024×1024 пикселей с увеличенной УФ-чувствительностью и термоэлектрическим охлаждением до 40°C ниже температуры окружающей среды.

Таблица 1: Космические УФ-телескопы.

Инструмент/ Наименование КА	Страна	Диапазон/ детектор	Апертура	Статус	Данные
Chang'e-3/ УФ-камера EUVC (Extreme Ultraviolet Camera)	Китай	25–35 нм, МКП	12 см	Время работы на Луне с декабря 2013 г. по июнь 2014 г. [2]	388 снимков, 19 Мбайт (уровня 2A/2B), имеющих научное значение, для доступа к архиву требуется регистрация
Chang'e-3/телескоп MUVT (Moon located Ultraviolet Telescope), ранее LUT (Lunar-based Ultraviolet telescope)	Китай	245–345 нм, ПЗС	15 см	В 2014–2015 г. проведены наблюдения двойных звезд [3]. Отработал на Луне дольше всех научных инструментов посадочной платформы	В открытом доступе архив 1 Тбайт данных за 2014 г. (уровня 2A), для доступа к архиву требуется регистрация
Astrosat/телескоп UVIT	Индия	130–320 нм, МКП	Два телескопа 40 см	Запуск в 2015 г., работает по настоящее время [4]	Закрытый архив
GALEX (Galaxy Evolution Explorer)	США	135–280 нм, ПЗС	50 см	С 2003 г. проработал 10 лет	Открытый архив, обработанные и исходные данные 70 Тбайт
Астрон/телескоп «Спика», УФ-спектрометр	СССР	110–350 нм, 170–650 нм	80 см	Работал более 8 лет с 1983 г. [5]	Исследовано более 200 объектов, получены спектры нескольких сотен звезд, нескольких десятков галактик и галактических эмиссионных туманностей, фоновых областей. Данные требуют оцифровки
CASTOR (The Cosmological Survey Telescope for Optical and UV Research)	Канада	150–300 нм, ПЗС	1 м	Проект 2012 г. с запуском в 2022 г. В 2021 г. находится в «Фазе 0» ¹	–
Спектрограф GESE (Galaxy Evolution Spectroscopic Explorer)	США	Ближний-УФ	С 2016 г. находится в стадии проекта	–	–
HORUS (The High-ORbit Ultraviolet-visible Satellite)	США	100-170 нм, МКП; 200-1075 нм, ПЗС	2.4 м	с 2013 г. находится в стадии проекта	Планируемый объем данных 80 Гбайт/сут

¹ Сайт: <https://www.castormission.org/news>

Телескоп расположен на посадочном модуле миссии. Основные научные задачи проекта заключались в продолжительном (десять дней) фотометрическом мониторинге переменных звезд в ближнем УФ и проведении обзора галактической плоскости в ближнем УФ. Телескоп MUVT стал первой автоматизированной астрономической обсерваторией на Луне. В архиве доступен 1 Тбайт научных данных за 2014 г. Внешний вид приведен на рис. 1.

UVIT

На индийской космической обсерватории Astrosat установлены два телескопа UVIT с диаметром зеркала 40 см для наблюдений в ближнем и дальнем УФ, а также в оптическом диапазоне, с полями зрения 0.5° и разрешением около 1". Обсерватория Astrosat запущена в 2015 г. За 5 лет работы телескопом UVIT проведены

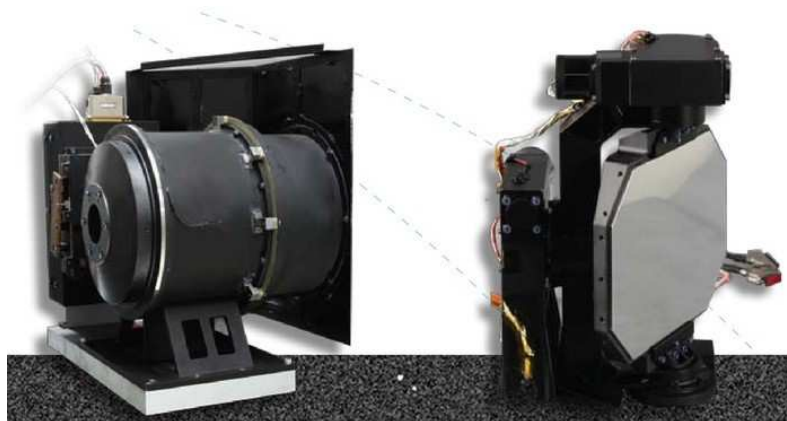


Рис. 1: УФ-телескоп LUT. Установлен на посадочном модуле миссии CHANG'E 3.

наблюдения более 800 уникальных объектов. Результаты работы и качественное сравнение характеристик полученных изображений в сравнении с данными GALEX приведены в [6].

GALEX

Каталог космической обсерватории GALEX является наиболее полным каталогом ультрафиолетовых источников на сегодняшний день, но он имеет большие пропуски, особенно в областях с яркими источниками. Это обусловлено использованием детектора на основе МКП, работающего в режиме счета фотонов и используемого для наблюдений за слабыми источниками УФ-излучения. Миссия GALEX провела наблюдения на 26000 квадратных градусов в основном режиме съемки с экспозицией 100 с.

Космическая УФ-обсерватория GALEX была запущена на орбиту в 2003 г., и ее работа поддерживалась NASA до 2011 г. После выхода из строя детектора канала дальнего УФ в 2009 г., наблюдения проводились только в канале ближнего УФ.

Астрон

ИСЗ «Астрон» стал первой отечественной внеатмосферной непилотируемой обсерваторией. В рамках этого проекта специалистами НПО им. С.А. Лавочкина, Крымской астрофизической обсерватории и Марсельской лаборатории разработана уникальная конструкция крупнейшего, на момент запуска, ультрафиолетового космического телескопа, получившего наименование «СПИКА». В течение шести лет успешно проводился комплекс научных исследований в ультрафиолетовой и рентгеновской областях электромагнитного излучения.

Данные обсерватории «Астрон» рассматривались в качестве отечественного источника научных данных. Архив данных нуждается в оцифровке, что требует дополнительных материальных и трудовых ресурсов и не укладывается во временные рамки эскизного проекта.

В ответ на инициативу МинОбрНауки по повторному использованию научных данных ИНАСАН предложено создание онлайн базы научных данных проекта «Астрон». Если архив будет оцифрован, он может быть задействован в технологическом образце ЦД-УФ.

3. Перспективные источники данных

В табл. 2 приведены данные по перспективным космическим средствам, их основные параметры и краткая информация о данных.

Далее приведем краткую информацию по наиболее перспективным из указанных в табл. 2 проектам.

«Спектр-УФ»

Международная космическая обсерватория проекта «Спектр-УФ» (WSO-UV) включает два важных компонента — наземный научный комплекс (ННК) и космический аппарат. Последний в своем составе имеет комплекс научной аппаратуры (КНА), основа которого двухзеркальный телескоп Т-170М системы Ричи-Кретьена с диаметром главного зеркала 1.7 м (см. рис. 2). Телескоп будет обеспечивать сбор и concentra-

Таблица 2: Перспективные космические УФ-телескопы.

Инструмент/ Наименование КА	Страна	Диапазон	Апертура	Статус	Данные
ККС (CSS)/спектрограф SING	Индия, Россия, Китай	138–270 нм, МКП	30 см	Высокая степень готовности, идет согласование точного положения SING на модульной станции [7]	Планируется открытый доступ к данным
PROBA-V/телескоп MESSIER	Франция	150–1000 нм, изогнутая ПЗС	50 см	Проект не выбран ESA в классе малых миссий в 2017 г., повторно заявлен в 2018 с запуском в 2026–2028 г. [8]	Планировался полный обзор неба каждые 6 месяцев
МНЛС (International Lunar Research Station — ILRS), УФ-оптический-ИК телескоп	Россия, Китай	УФ, оптический, ИК	15–30 см / 60 см / мультиапертурный из объектов 10–25 см [9]	В рамках международной миссии ILRS-5 предполагается развертывание на Луне обсерватории в 2030–2035 г.	–
«Спектр-УФ»/телескоп T-170M	Россия	115–310 нм спектрокопия, 115–310 нм камера поля, ПЗС, МКП	1.7 м	Запуск в 2029 г.	Расчетный объем данных до 24 Гбайт/сут
Xuntian/телескоп CSST (China Space Station Telescope)	Китай	255–317 нм [10]	2 м	Запуск в 2024 г.	За 10 лет работы планируется обзор 40 % неба
THEIA (Telescope for Habitable Exoplanets and Interstellar/Intergalactic Astronomy) / камера Star Formation Camera (SFC), спектрограф UltraViolet Spectrograph (UVS)	США	100–300 нм	4 м	В стадии проектирования	Расчетный объем данных с SFC 6 Тбайт/сут
Habitable Exoplanet Observatory (HabEx)/ УФ-спектрограф	США	91–160 нм спектрокопия, 110–300 нм камера	4 м	В 2021 г. проект соединен с LUVOIR [11]	–
LUVOIR (Large UV Optical Infrared Surveyor)/ спектрограф LUMOS	США	100–1000 нм	6 м	Выбран NASA как приоритетное научное направление для инвестиций в астрономию и астрофизику в США в течение следующих 10 лет. В 2021 г. проект соединен с HabEx. Запуск после 2040 г. [11]	–
EUVO (European Ultraviolet Visible Observatory)/ спектрограф	ЕС	90–200 нм, 200–400 нм, ПЗС, МКП	8 м	Проект с 2013 г., в 2019 г. повторно заявлен как концепт	–

цию излучения, а его регистрацию обеспечат два научных прибора из состава КНА — Блок спектрографов и Блок камер поля.

Запуск обсерватории запланирован на 2028 г. После окончания работы космического телескопа им. Хаббла в 2026 г. обсерватория «Спектр-УФ» станет главным научным инструментом для астрономов в области УФ до 2035 г.

Расчетный объем исходных данных до 24 Гбайт/сут, после обработки составит до 240 Гбайт/сут. Суммарный объем данных за 5 лет работы по предварительным данным составит более 400 Тбайт.



Рис. 2: Космическая обсерватория «Спектр-УФ».

Xuntian

Автономный модуль Китайской Космической Станции (CCS, China Space Station) будет функционировать на общей орбите со станцией. Модуль периодически будет причаливать к стыковочному узлу станции для обслуживания и замены научных приборов (см. рис. 3).

Диаметр зеркала телескопа China Space Station Telescope (CSST) составляет около 2 м. Разрешение близко к разрешению космического телескопа им. Хаббла, а поле зрения в 300 раз больше. По прогнозу за 10 лет работы телескоп CSST проведет обзор до 40% неба. Запуск модуля Xuntian запланирован на 2024 г.

Четкой политики по доступности научных данных в открытых источниках не обнаружено. Ожидается публикация обзоров на регулярной основе и создание китайского аналога американского архива MAST.

SING

Совместный индо-российский прибор для спектральных исследований газа туманностей SING (Spectroscopic Investigation Of Nebular Gas) является спектрографом с высокой щелью. Прибор позволит отслеживать эмиссионные линии по всей пространственной протяженности туманностей в диапазоне длин волн от 138 до 270 нм, что будет способствовать более глубокому пониманию их динамики и эволюции. Спектрограф будет работать на борту Китайской космической станции [7]. Внешний вид спектрографа приведен на рис. 4.

Проект индо-российского спектрографа SING был выбран на конкурсной основе и одобрен для установки на Китайской модульной космической станции в рамках программы международного сотрудничества по использованию CSS для космических экспериментов Управления Организации Объединенных Наций



Рис. 3: Телескоп CCST на модуле Xuntian.

по вопросам космического пространства (UNOOSA). Космическая станция обеспечивает относительно стабильную платформу для наблюдений в течение длительного периода времени. SING будет установлен как сканирующий телескоп и будет наблюдать небо по мере движения станции по орбите вокруг Земли.

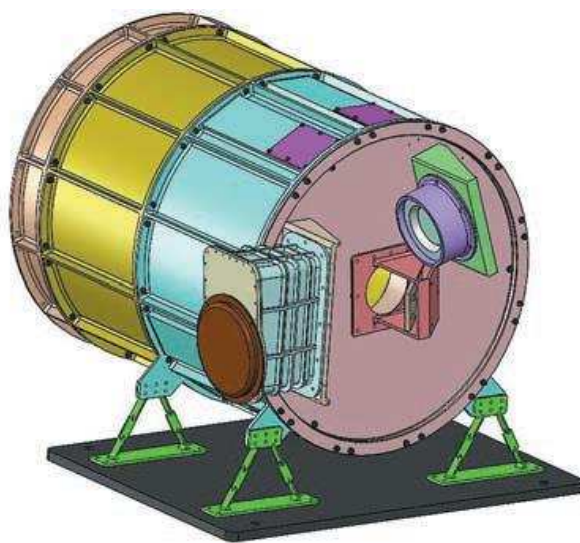


Рис. 4: Внешний вид прибора SING на панели CSS.

МНЛС

В 2021 г. Китай и Россия подписали соглашение о сотрудничестве по созданию будущей международной научной лунной станции (МНЛС), международное название — International Lunar Research Station (ILRS). Предполагается, что после завершения уже запланированных национальных миссий серий «Луна» и CHANG'E последующие миссии ILRS-1...-5 будут международными, каждая миссия будет посвящена конкретной задаче. В рамках ILRS-5 предполагается развертывание на Луне обсерватории для проведения астрономических наблюдений.

Для создания телескопов для астрофизических наблюдений с Луны предлагаются к рассмотрению три различные концепции:

1. Создание относительно небольшого телескопа (с апертурой от 15 до 30 см) с собственной системой наведения.
2. Установка на Луне достаточно крупного многоцелевого астрофизического телескопа с апертурой 60 см УФ-, оптического и ИК-диапазонов с не менее чем четырьмя научными приборами (рис. 5 слева).
3. Построение нового типа телескопа — мультиапертурного телескопа (рис. 5 справа) для одновременной съемки всего доступного с МНЛС неба в УФ в режиме реального времени. Телескоп будет включать до 200 одиночных линзовых объективов с апертурой от 10 до 25 см, каждый из которых является самостоятельным телескопом с детектором и блоком обработки информации.

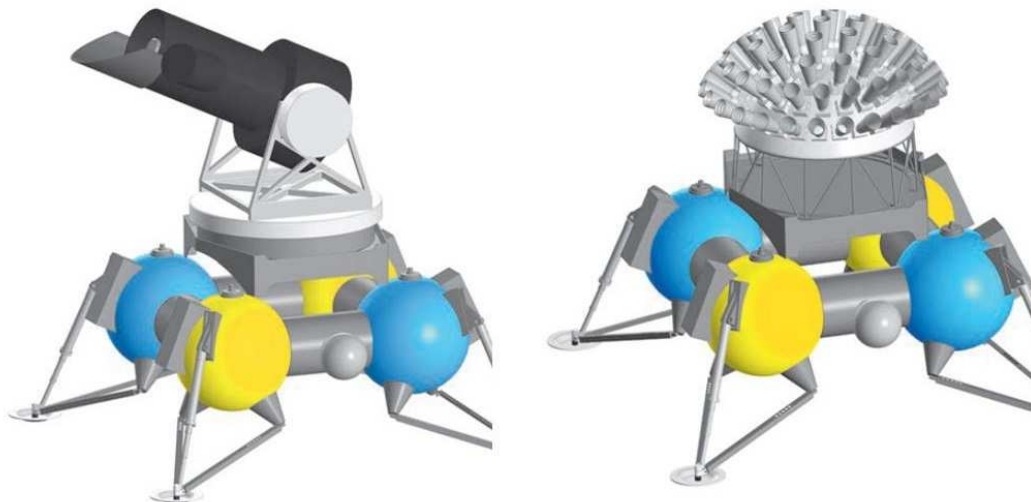


Рис. 5: Варианты посадочного аппарата.

4. Заключение

Все перечисленные перспективные проекты весьма интересны, но реальность такова, что сроки для планирования и осуществления крупных космических УФ-обсерваторий довольно большие, от 15 до 20 лет, и пока все предложенные проекты, кроме «Спектр-УФ» и Xuntian, находятся на ранних стадиях развития.

Подводя итог, в качестве тестовых данных для макетирования ЦД-УФ следует рассмотреть имеющиеся данные *Astrosat/UVIT*, *Chang'e-3/MUVT* и *GALEX*. Для размещения в опытных образцах ЦД-УФ в период с 2023 по 2030 г. требуется разработать интерфейсы к источникам данных *Chang'e-3/MUVT*, *GALEX*, «Спектр-УФ», а при организации доступа китайской стороной — Xuntian и SING.

Список литературы

1. В. М. Shustov, М. Е. Sachkov, S. G. Sichevsky, and et al., *Solar System Research*, **55**, 677, 2021.
2. H. He, H. Wang, C. Shen, and X. Zhang, in *32nd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS)* (2017).
3. L. Xu, Y. Zou, and L. Qin, *Chinese Journal of Space Science*, **38**, 598, 2018.
4. S. K. Ghosh, P. Joseph, and A. Kumar, *Journal of astrophysics and astronomy*, 2020.
5. A. Boyarchuk, ed., *Astrofizicheskie issledovaniya na kosmicheskoy stancii «ASTRON»* (1994).
6. Annapurni Subramaniam and J. Shyam Tandon, in *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation* (2016).
7. М. Е. Sachkov, В. Chandra, S. Prabha, and et al., *Solar System Research*, **55**, 688, 2021.
8. S. Lombardo, E. Muslimov, D. Valls-Gabaud, and et al., in *International Conference on Space Optics - ICSO* (2018).
9. A. S. Shugarov, H. Wang, S. Dong, and et al., *Vestnik NPO Lavochkin*, 2022.
10. Y. Gong, X. Liu, Y. Cao, and et al., *Astrophys. J.*, **883**, 2019.
11. N. Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s* (2021).

Баллистическое проектирование миссии «Спектр-УФ»

Филиппов М.Л.¹, Моисеев А.А.¹, Погодин А.В.¹, Захваткин М.В.², Степаньянц В.А.²

¹АО «НПО Лавочкина», Химки, Россия

²ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

В АО «НПО им. Лавочкина» в соответствии с актуальной ФКП РФ проводятся работы по созданию космической астрофизической обсерватории ультрафиолетового диапазона «Спектр-УФ». Выведение будет осуществляться ракетой-носителем (РН) «Ангара-А5М» с разгонным блоком (РБ) ДМ с космодрома «Восточный». В качестве рабочей орбиты определена геосинхронная орбита с наклоном 35 градусов. Параметры орбиты (высоты перигея и апогея, аргумент перигея) выбирались, в том числе, исходя из необходимости уменьшения потенциально опасных сближений с космическими объектами (КО) на геостационарной орбите (ГСО) и в защищаемой области вокруг нее. В докладе приводится справочная баллистическая информация по выбранной рабочей орбите (интервалы тени, зоны радиовидимости), а также схема выведения, оценка максимальной массы космического аппарата (КА) и необходимый запас характеристической скорости для осуществления приведения орбиты выведения на заданную среднюю географическую долготу, выполнения коррекций поддержания и проведения заключительных операций с КА. Статья основана на материалах, представленных на Всероссийской научной конференции «Ультрафиолетовая Вселенная — 2023».

Поступила в редакцию 03.11.2023 г. Принята в печать 12.12.2023 г.

Ключевые слова: «Спектр-УФ», РН «Ангара-А5М», космодром «Восточный», геосинхронная орбита, выведение на орбиту

“Spektr-UV” mission ballistic design

Philippov M.L.¹, Moisehev A.A.¹, Pogodin A.V.¹, Zahvatkin M.V.², Stepanyants V.A.²

¹NPO Lavochkin, Khimki, Russia

²Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, Russia

In accordance with the current Federal Space Program of the Russian Federation, a space astrophysical observatory of the ultraviolet range “Spektr-UV” is being developed by “NPO Lavochkin”. The orbit injection will be carried out by an “Angara-A5M” launch vehicle with a “Block DM” upper stage from the “Vostochny” cosmodrome. A geosynchronous orbit with an inclination of 35 degrees was selected as its operational orbit. The orbit parameters (heights of periapsis and apoapsis, argument of periapsis) were chosen, in particular, based on the need to reduce potentially dangerous proximity with space objects in geostationary orbit and its protected region. The article provides background information on the selected operational orbit (shadow intervals, radio visibility zones), as well as the injection scheme, the estimation of the maximum spacecraft mass and the delta-V reserve needed for the adjustment of the insertion orbit to the given average geographic longitude, conducting correction maneuvers to maintain the orbit and performing final operations with the spacecraft. This paper is based on a talk presented at “Ultraviolet Universe — 2023” conference.

Received 03.11.2023. Accepted 12.12.2023.

Keywords: “Spektr-UV”, Angara-A5M, the Vostochny Cosmodrome, geosynchronous orbit, orbit injection

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.5.004

1. Введение

Для создания наиболее благоприятных условий для работы комплекса научной аппаратуры КА «Спектр-УФ» его полет должен происходить, по возможности, вне радиационных поясов Земли на высотах не менее 35 тыс. км. Кроме того, для минимизации риска столкновения с другими КО и последующего загрязнения околоземного космического пространства, рабочая орбита не должна пересекать защищаемую область ГСО и область захоронения геостационарных спутников. Для обеспечения длительных зон радиовидимости КА [1] с командно-измерительными пунктами (КИП) из состава наземного комплекса управления (НКУ) рабочая орбита КА должна быть геосинхронной. Для управления КА предполагается использовать наземные станции с антенной системой ТНА-57 в Медвежьих озерах и Байконуре. Также, на начальном этапе полета к управлению может быть привлечена станция в Уссурийске. Для приема научной информации будут использоваться пункты наземного научного комплекса (ННК), расположенные в Звенигороде и Симеизе [2]. Начальная масса на орбите должна быть (вместе с адаптером) не менее 3000 кг. Запуск КА планируется осуществить с космодрома Восточный. Выведение будет проведено с помощью РН «Ангара А5М» и РБ «Блок ДМ».

2. Основные баллистические характеристики рабочей орбиты

На этапе дополнения к эскизному проекту было показано, что перечисленным условиям более всего соответствует геосинхронная круговая орбита (большая полуось соответствует радиусу ГСО, 42 164 км). Наклонение такой орбиты должно обеспечивать, с одной стороны, удовлетворительные интервалы радиовидимости КА

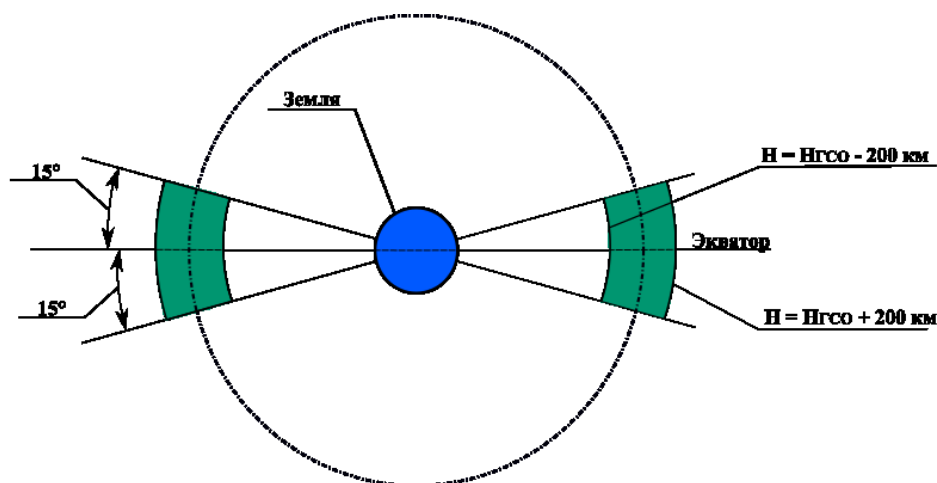


Рис. 1: Защищаемая область ГСО.

с наземных станций, а с другой стороны — удовлетворение ограничениям на допустимые дозы радиации на интервале активного существования КА.

Плоскость орбиты пересекает экваториальную область, в которой находятся геостационарные спутники. Чтобы избежать попадания в защищаемую область ГСО (см. рис. 1) и область захоронения отработавших КА над ГСО (см. ГОСТ Р 52925-2008 и рекомендации международного координационного комитета по космическому мусору IADC) и возможных столкновений с техногенными КО в течение срока активного существования, рабочая орбита КА «Спектр-УФ» будет иметь небольшой эксцентриситет (высоты перигея и апогея орбиты отличаются от высоты ГСО на -500 км и $+500$ км соответственно). Такая орбита является синхронной с суточным вращением Земли.

Таблица 1: Параметры рабочей орбиты КА «Спектр-УФ».

Параметр	Значение
Наклонение i	35°
Высота перигея H_π	35286 км
Высота апогея H_α	36286 км
Аргумент перицентра ω	0°

По заказу АО «НПО Лавочкина», в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, в рамках работ по ОКР «Разработка стратегии БНО полета КА, исключая сближение с космическими объектами во время и после САС» было проведено исследование вероятности столкновения КА с КО на рабочей орбите в зависимости от значения ее аргумента перицентра. Результатом расчетов стала рекомендация принять для рабочей орбиты значение аргумента перицентра $\omega = 0^\circ$ или 180° . В статье, для примера, используется значение $\omega = 0^\circ$. Предполагается, что при обоих значениях аргумента перицентра эволюция рабочей орбиты будет иметь одинаковый характер. Выбор конкретного значения будет происходить на этапе рабочего проектирования.

Без проведения коррекций поддержания аргумент перигея рабочей орбиты будет существенно меняться. Это может привести к тому, что КА будет пересекать защищаемую область ГСО и область орбит захоронения. Таким образом, повышается вероятность столкновения с крупным КО, последующего разрушения и формирования облака фрагментов.

Завершение срока активного существования КА, после которого маневрирование станет невозможным, должно сопровождаться мероприятиями по уходу КА на орбиту захоронения, удовлетворяющую критериям безопасности для активных аппаратов в защищаемой области ГСО.

Начальное значение долготы восходящего узла (ДВУ) во второй экваториальной системе координат (ЭСК2) эпохи J2000.0, определяющее время старта РН в выбранную дату, выбирается, исходя из соответствия параметров орбиты указанным выше требованиям с учетом их эволюции (см. рис. 7–11). Конкретное значение ДВУ, обусловленное какими-либо дополнительными требованиями (освещенность при выведении, время первых заходов в тень Земли и т. д.), может быть реализовано путем выбора соответствующей даты пуска и времени старта внутри суток пуска.

Начальные параметры выбранной рабочей орбиты КА «Спектр-УФ» приведены в табл. 1.

Для выбранной орбиты в течение года существуют два интервала дат (длительностью от 20 до 100 дней, в зависимости от даты старта), на которых КА ежесуточно попадает в тень Земли. Максимальная

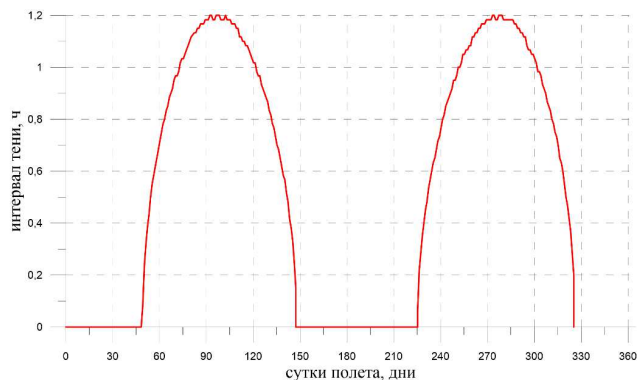


Рис. 2: Пример длительности теневого интервала (в часах в сутки) на рабочих орбитах КА «Спектр-УФ».

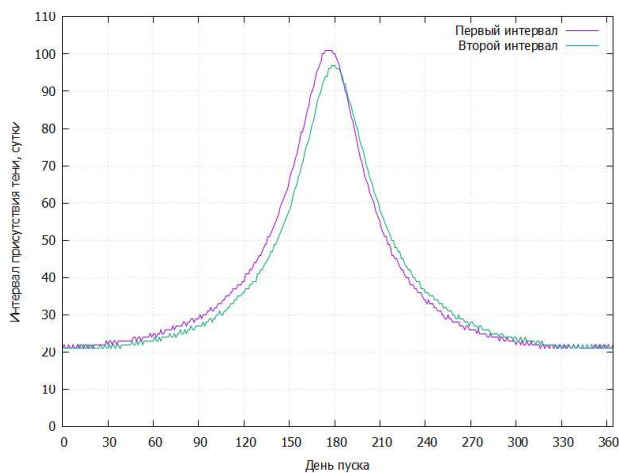


Рис. 3: Пример длительности интервалов присутствия тени на рабочих орбитах КА «Спектр-УФ» в зависимости от дня пуска внутри года.

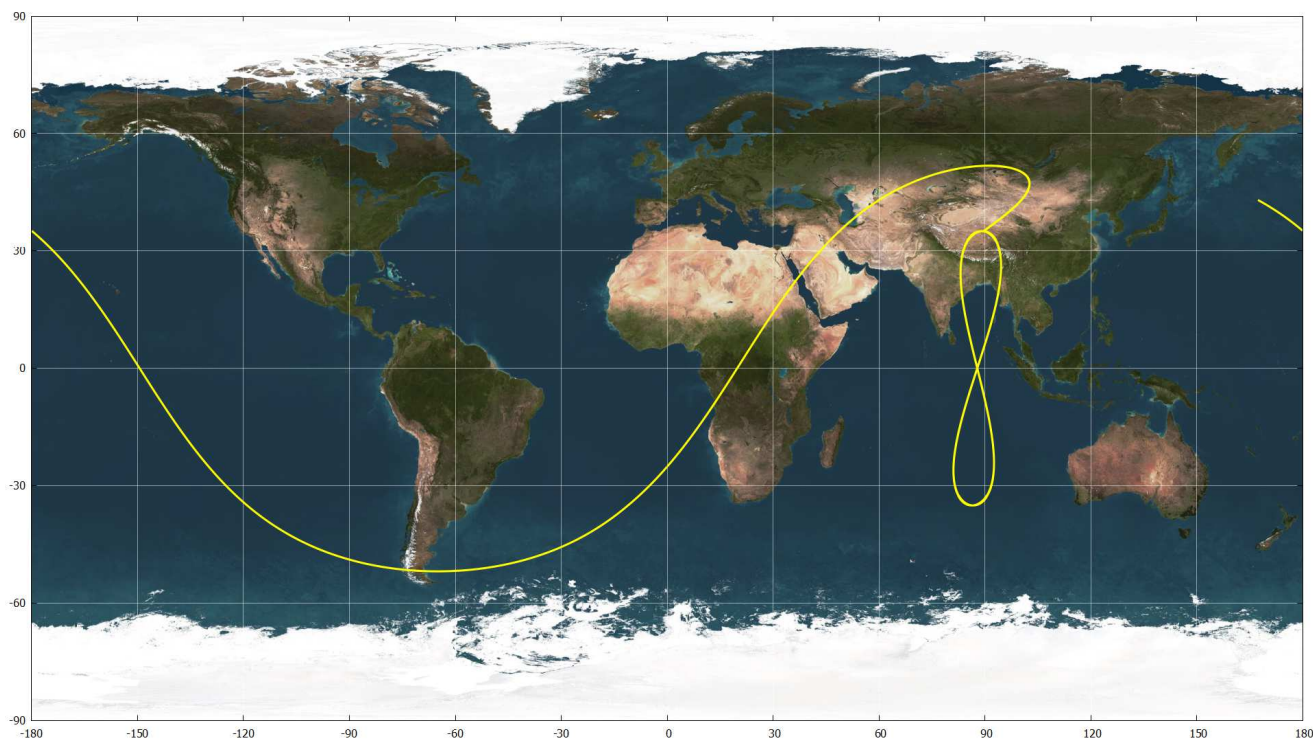


Рис. 4: Трасса выведения при запуске с космодрома «Восточный».

длительность участка тени на орбите достигает ~ 1.2 ч на витке. Кроме того, могут происходить заходы КА в тень Луны. Пример теневого обстановки на рабочей орбите КА «Спектр-УФ» приведен на рис. 2-3.

3. Предполагаемая схема выведения

По результатам расчетов предлагается следующая схема выведения КА «Спектр-УФ» (времена выдачи импульсов и интервалы пассивного полета даны в импульсной постановке задачи).

1. Через 753.622 с от контакта подъема (КП) РН выводит головной блок (ГБ) массой 23900 кг в составе КА и РБ с переходниками на падающую траекторию со следующими параметрами:
 $i = 51.8^\circ$; $H_\pi \approx -177$; $H_\alpha \approx 193$; $\omega = 328.2^\circ$.
2. Пассивный полет по орбите выведения до первого включения двигательной установки (ДУ) РБ.

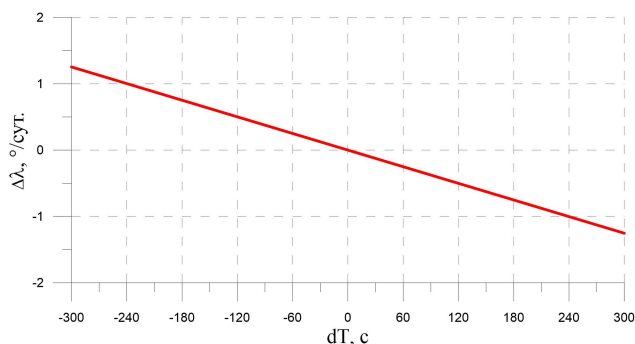


Рис. 5: Зависимость суточного изменения средней долготы трассы КА от изменения периода орбиты.

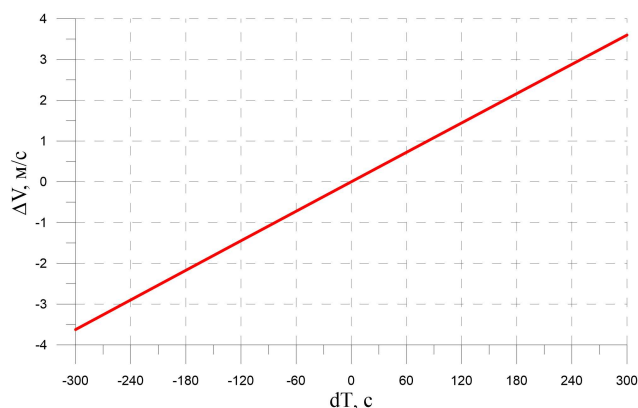


Рис. 6: Зависимость величины импульса коррекции трассы КА от изменения периода орбиты.

Таблица 2: Затраты хар. скорости на выведение «Спектр-УФ» ($M_{ГБ}$ — масса ГБ перед включением, $\Delta V_{хар}$ — затраты хар. скорости на включение ДУ, $\Delta M_{топл}$ — затраты рабочего тела).

Включение	$M_{ГБ}$, кг	$\Delta V_{хар}$, м/с	$\Delta M_{топл}$, кг
1-е (доразгон)	22796.8	110.3	714.96
2-е (перевод на переходную траекторию)	22081.84	2456.58	11221.99
3-е (перевод на траекторию выведения)	10859.85	2106.74	4950.978
Σ		4673.62	16887.93

- Первое включение РБ (~20 минут с момента отключения точного приведения): осуществляется доразгон ГБ на опорную круговую орбиту с высотой ~193 км.
- Пассивный полет ГБ по опорной орбите до заданного аргумента широты (-46.8°) ~40 минут.
- Второе включение ДУ РБ: осуществляется перевод ГБ на переходную орбиту со следующими параметрами:
 $i = 51.8^\circ$; $H_\pi \approx 186$; $H_\alpha \approx 35802$; $\omega \approx -46.8^\circ$.
- Пассивный полет ГБ до апоцентра перелетной орбиты (~5.25 ч).
- Третье включение ДУ РБ: осуществляется перевод ГБ на околокруговую геосинхронную орбиту выведения с параметрами:
 $i = 35^\circ$; $H_\pi \approx 35286$; $H_\alpha \approx 36286$; $\omega \approx 0^\circ$; $u \approx 90^\circ$.

Таким образом, общая длительность выведения КА на орбиту выведения с момента КП составляет ~6 часов 15 минут. На момент приведения на орбиту выведения КА находится над точкой земной поверхности с координатами в гринвичской системе координат (СК): ~35.03° с. ш.; ~89.59° в. д.

Затраты характеристической скорости при выбранной схеме приведены в табл. 2.

Таким образом, при выбранной конечной массе РБ ~2600 кг и адаптера ~200 кг, масса ГБ и КА на орбите выведения составит ~5909 кг и до ~3109 кг соответственно.

Длительности первых после отделения участков радиовидимости КА (по углу места 7°) из КИП «Медвежья озера», «Байконур» и «Уссурийск» составят ~7, 9.5 и 7.9 ч соответственно.

Далее, при условии, что географическая долгота орбиты не будет меняться, продолжительность ежедневных зон радиовидимости из КИП «Медвежья озера», «Байконур» и «Уссурийск» составит ~13.5 ч, 18 ч и 16.5 ч соответственно. Для пунктов приема научной информации, расположенных в Звенигороде и Симеизе, продолжительности видимости составит ~13.5 ч и 15 ч ежедневно соответственно.

На рис. 4 представлена трасса выведения на геосинхронную орбиту ($R_\pi = R_{ГСО} - 500$; $R_\alpha = R_{ГСО} - 500$).

При необходимости изменения средней долготы трассы КА на рабочей орбите осуществляется коррекция периода орбиты. На рис. 5 и 6 приведены суточное изменение средней долготы трассы КА в зависимости от изменения периода орбиты и величины корректирующего импульса, необходимого для изменения периода орбиты на заданное число секунд.

4. Эволюция параметров рабочей орбиты

Была проведена оценка эволюции параметров орбит выведения в зависимости от даты и времени запуска. С этой целью осуществлялся прогноз движения КА по орбите выведения на интервал 10 лет при условии, что

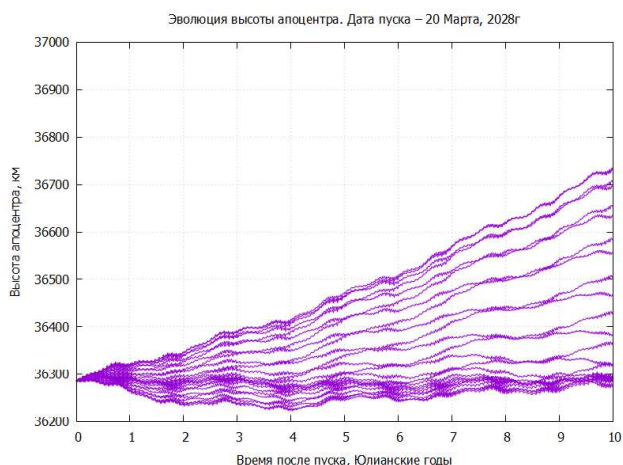


Рис. 7: Изменение высоты апогея (км) в зависимости от количества времени после старта.

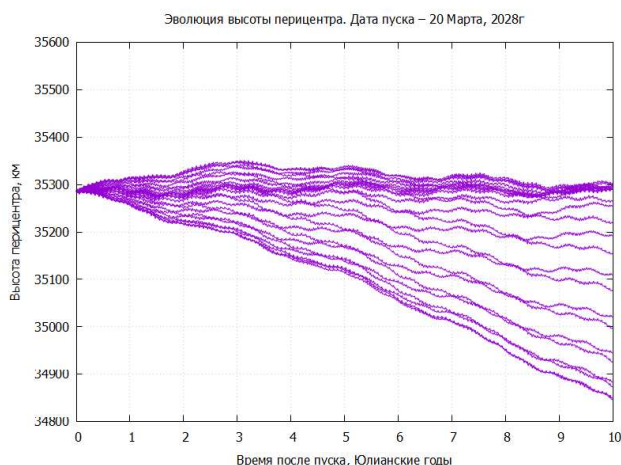


Рис. 8: Изменение высоты перигея (км) в зависимости от количества времени после старта.

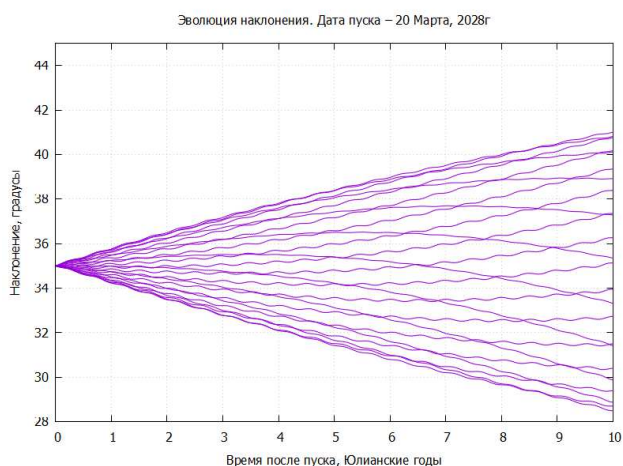


Рис. 9: Изменение наклоения орбиты в зависимости от количества времени после старта.

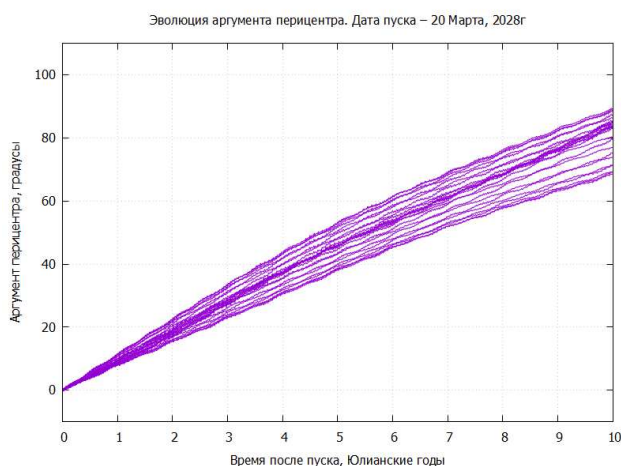


Рис. 10: Изменение аргумента перигея в зависимости от количества времени после старта.

запуск был произведен в одну из четырех характерных дат в году (двух равноденствий и двух солнцестояний) для условного года пуска 2028. При этом ДВУ орбиты выведения в ЭСК2 эпохи J2000 изменялась в диапазоне от 0° до 360° с шагом 15°, что соответствует изменению времени старта внутри даты старта на 1 ч. Характер эволюции параметров орбиты примерно одинаков для всех четырех выбранных дат. В связи с этим в статье приведены графики (см. рис. 7–11) только для запуска в день весеннего равноденствия (20 марта).

Из полученных результатов следует, что высоты перигея и апогея орбиты изменяются несущественно. В то же время, наклонение для некоторых дат и времен пуска существенно уменьшается, что может привести КА в область с недопустимо высокими концентрациями заряженных частиц. Т. о. необходимо подбирать дату и время старта с учетом эволюции наклоения.

5. Оценка необходимого запаса характеристической скорости

Бюджет характеристической скорости КА «Спектр-УФ» состоит из следующих частей:

1. затраты на приведение орбиты выведения на заданную географическую долготу;
2. затраты на проведение коррекций поддержания периода орбиты;
3. затраты на проведение коррекций поддержания аргумента перигея орбиты;
4. затраты на перевод КА на орбиту захоронения.

Рассмотрим каждую составляющую подробнее и дадим ей грубую оценку сверху.

1. После отделения КА от РБ он оказывается на орбите выведения. Далее, следует этап приведения КА на рабочую орбиту. Рабочая орбита имеет такие же параметры, что и орбита выведения, одна-

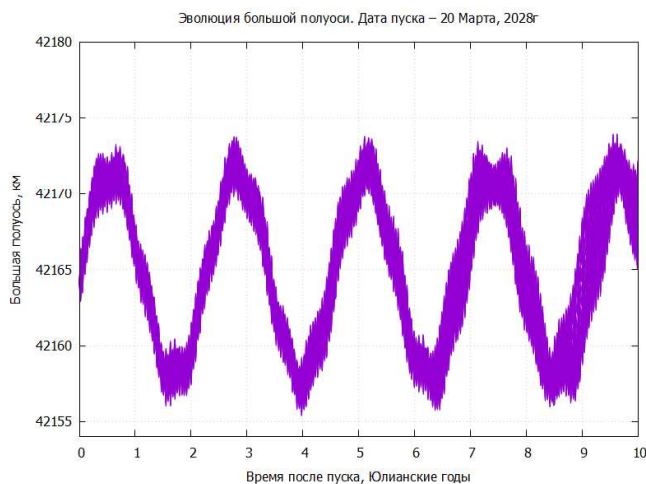


Рис. 11: Изменение большой полуоси в зависимости от времени суток после старта.

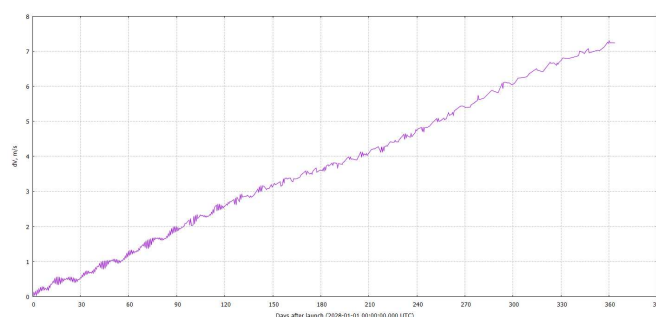


Рис. 12: Зависимость хар. скорости коррекции поддержания аргумента перигея рабочей орбиты от интервала между коррекциями.

ко обеспечивает максимальные зоны радиовидимости КА за счет удачного расположения трассы КА на поверхности Земли.

- Приведение осуществляется изменением периода орбиты за счет чего достигается ежесуточное смещение трассы КА по долготе (см. рис. 5 и 6 выше). По достижении заданной долготы, период геосинхронной орбиты восстанавливается. Т. о. приведение включает в себя два маневра. Предполагая требуемую скорость смещения трассы 1 градус в сутки, можем оценить затраты характеристической скорости на приведение как $3 \text{ м/с} \cdot 2 = 6 \text{ м/с}$.
- Возмущения естественного происхождения, действующие на движение центра масс КА, приводят к отклонению периода его орбиты от номинального геосинхронного. Это, в свою очередь, вызывает смещение трассы и ухудшение условий радиовидимости КА из пунктов НКУ и ННК. Для парирования этой ситуации необходимо проведение регулярных коррекций поддержания периода орбиты. По аналогии с геостационарными аппаратами («Электро-Л» №1–№3) затраты характеристической скорости для проведения этих коррекций можно оценить сверху как 2 м/с в год.
- Эволюция аргумента перигея рабочей орбиты может приводить КА в защищаемую область ГСО или в область орбит захоронения в окрестности ГСО. Для снижения опасности столкновения КА с техногенными КО, имеющими относительно высокую плотность в этих областях, необходимо проводить регулярные коррекции поддержания аргумента перигея рабочей орбиты. На рис. 12 приведены затраты характеристической скорости на проведение одной такой коррекции в зависимости от интервала между коррекциями.

Видно, что зависимость является практически линейной. Поэтому затраты характеристической скорости на поддержание заданной величины аргумента перигея рабочей орбиты можно оценить как 7 м/с в год.

- По окончании срока активного существования КА, во избежание его последующего попадания в результате орбитальной эволюции в защищаемую область ГСО, он должен быть переведен на орбиту

захоронения. В рамках работ по ОКР «Разработка стратегии БНО полета КА, исключаяющей сближение с космическими объектами во время и после САС» специалистами ИПМ им. М.В. Келдыша РАН было предложено формирование подобной орбиты путем повышения перицентра до высоты ГСО+N, где $N = 300 \sim 500$ км.

Затраты характеристической скорости на подобный перевод оцениваются как 20 м/с.

Таким образом, для срока активного существования КА 5 лет можно оценить потребный запас характеристической скорости КА как: $6 + 2 \cdot 5 + 7 \cdot 5 + 20 = 71$ м/с.

Дополнительно, присутствуют затраты топлива на часть СУОС, т. е. на «разгрузку» двигателей-маховиков, формирование и поддержание различных ориентаций аппарата. По предварительным данным, запас топлива на эти операции оценивается в 25 кг на весь срок активного существования.

На момент написания статьи (осень 2023 г.) проектная максимальная масса заправленного КА составляет ~ 3000 кг при заправке ~ 150 кг. Учитывая приведенные выше значения, требуемое количество топлива на срок активного существования КА составляет $97 + 25 = 122$ кг, что удовлетворяет проектной заправке.

Список литературы

1. A. A. Boyarchuk, B. M. Shustov, I. S. Savanov, M. E. Sachkov, et al., *Astronomy Reports*, **60**, 1, 2016.
2. B. Shustov, A. I. Gomez, de Castro, M. Sachkov, J. C. Vallejo, et al., *Astrophys. and Space Sci.*, **363**, 62, 2018.

Массивные звезды в УФ

Холтыгин А.Ф.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Обсуждаются результаты наблюдений массивных звезд ранних спектральных классов в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне, начиная от наблюдений на обсерваториях Орион-1 и 2. Обсуждаются такие проблемы как диагностика звездного ветра O звезд и звезд типа Вольфа-Райе и их пульсационной активности, определение химического состава массивных звезд и анализ структуры дисков Be звезд. Особое внимание уделено задачам, которые можно решать с помощью наблюдений на космической обсерватории «Спектр-УФ». Статья основана на материалах, представленных на Всероссийской научной конференции «Ультрафиолетовая Вселенная — 2023».

Поступила в редакцию 15.11.2023 г. Принята в печать 12.12.2023 г.

Ключевые слова: космические миссии, Спектр-УФ, ультрафиолетовое излучение звезд, OB звезды, структура звездного ветра

Massive stars in UV

Kholtygin A.F.

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

We discuss the results of observations of massive stars of early spectral classes in the ultraviolet (UV) range, starting with observations at the Orion 1 and 2 observatories. Problems such as diagnostics of the stellar wind of O stars and Wolf-Rayet type stars and their pulsational activity, determination of the chemical composition massive stars and analysis of the disk structure of Be stars are discussed. Particular attention is paid to problems that can be solved using observations at the WSO-UV space observatory. This paper is based on a talk presented at “Ultraviolet Universe — 2023” conference.

Received 15.11.2023. Accepted 12.12.2023.

Keywords: space missions, WSO-UV, stellar ultraviolet emission, OB stars, stellar wind structure

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.5.005

1. Введение

Международный проект «Спектр-УФ»¹ (Всемирная космическая обсерватория ВКО-УФ, World Space Observatory — Ultraviolet) направлен на исследование Вселенной в УФ участке электромагнитного спектра: $\lambda\lambda 1100\text{--}3200\text{\AA}$. Проект космического телескопа «Спектр-УФ» задуман еще в 1990-х как развитие и усовершенствование миссии «Астрон»². Описание проекта представлено в публикациях [1, 2, 3, 4].

Проект «Спектр-УФ» включен в Федеральную космическую программу на 2016–2025 гг. Головной организацией по ракетно-космическому комплексу является НПО им. С.А. Лавочкина. В России создаются все основные инструменты обсерватории — космический телескоп с главным зеркалом диаметром 170 см, спектрографы высокого и низкого разрешения, а также камеры для построения изображений небесных объектов. Инструменты обсерватории будут размещены на космической платформе *Навигатор*, которая использовалась при выводе на орбиту предыдущих спутников серии «Спектр»: «Спектр-Р» («Радиоастрон»)³ и «Спектр-Рентген-Гамма»⁴.

Запуск космической миссии «Спектр-УФ» предполагается в 2028/2029 г. Для успешности выполнения программы наблюдений на спутнике необходимо заранее построить стратегию наблюдений и выделить те объекты, наблюдения которых в УФ позволят наиболее эффективно приблизиться к пониманию их природы. В настоящей статье обсуждаются перспективы наблюдений массивных звезд на обсерватории «Спектр-УФ».

2. Массивные звезды

К массивным относятся звезды с начальной массой свыше 8–10 масс Солнца, эволюция которых заканчивается вспышкой сверхновой. Массивные звезды в зависимости от начальной массы при выходе на главную последовательность (ГП) становятся звездами спектрального класса O и ранних подклассов спектрального класса B (B0–B2). Согласно сценарию Conti [5] в ходе дальнейшей эволюции массивные звезды проходят стадии звезд типа Вольфа-Райе (W-R), LBV звезд [6], красных (RSG [7]) и голубых (BSG [8]) сверхгигантов. В настоящей статье обсуждается программа спектральных наблюдений OB и WR звезд на космическом телескопе «Спектр-УФ».

¹<https://www.laspacespace.ru/activities/projects/spectrum-uv/>

²<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/astron.html>

³<http://www.asc.rssi.ru/radioastron/rus/index.html>

⁴http://srg.iki.rssi.ru/?page_id=2&lang=ru

3. Предыдущие наблюдения массивных звезд в УФ

3.1. УФ наблюдения массивных звезд в СССР и Российской Федерации

УФ исследования в СССР начались с запуска астрофизической обсерватории «Орион-1», установленной на орбитальной станции «Салют-1». УФ телескоп с диаметром зеркала 28 см позволял получать спектры звезд до 5^m в спектральной области 2000 – 3800Å с разрешением 5 Å. Регистрация спектров производилась на фотоэмульсии УФС-4, чувствительной к излучению в области длин волн 1800 – 4000Å [9]. На рис. 1 (слева) представлено распределение энергии в спектре В1III звезды β Cep, полученное в ходе наблюдения на «Орионе-1» [10].

Орбитальный телескоп «Орион-2» с диаметром зеркала 39 см был установлен на борту космического корабля «Союз-13», запущенного в декабре 1973 г. Использование объективной призмы позволило получить спектры нескольких тысяч звезд до 13^m, в том числе и массивных звезд ранних спектральных классов [12], со спектральным разрешением 8–30Å в области 2000 – 3200Å [13]. При наблюдениях также использовался бесщелевой дифракционный спектрограф G-27, позволявший получать спектры звезд до 4^m с разрешением 0.5Å. Спектры регистрировались на фотоэмульсии KODAK 103UV. Спектр яркой B0.5IVpe звезды γ Cas, полученный на телескопе «Орион-2», показан на рис. 1 (справа) [11].

Опыт работы космических телескопов «Орион-1» и «Орион-2» был использован при создании специализированного УФ спутника «Астрон». Спутник был запущен 23 марта 1983 г. ракетой-носителем «Протон» на высокоапоейную орбиту (185 тысяч километров) и проработал на орбите до 1989 г. Для размещения аппаратуры спутника использовалась базовая платформа спутников серии «Венера». На борту «Астро-на» находились УФ телескоп СПИКА с диаметром зеркала 80 см для наблюдений в области длин волн 1140 – 3500 Å и рентгеновский телескоп-спектрометр СКР-02М, работающий в области энергий 2–25 кэВ. В качестве приемников излучения использовались три фотоумножителя с рабочими диапазонами 0.11–0.35-мкм и спектральным разрешением до 0.2Å. Детальное описание миссии «Астрон» и выполненных на оптическом и рентгеновском телескопе наблюдений представлено в монографии «Астрофизические исследования на космической станции Астрон», вышедшей в 1994 г. под редакцией А.А. Боярчука⁵ и в обзоре [14].

3.2. УФ наблюдения массивных звезд на спутниках IUE, GALEX и HST

Большое число спектров массивных звезд было получено на спутнике IUE. Спутник был оснащен телескопом диаметром 45 см и спектрографами низкого (6 Å) и высокого (0.1 Å) разрешения [15, 16]. Важной особенностью УФ наблюдений звезд на спутнике IUE было получение больших серий спектров, что позволило осуществить мониторинг состояния программных звезд на временных промежутках от нескольких дней до недель [17].

⁵<http://www.inasan.ru/~astron/astron.pdf>

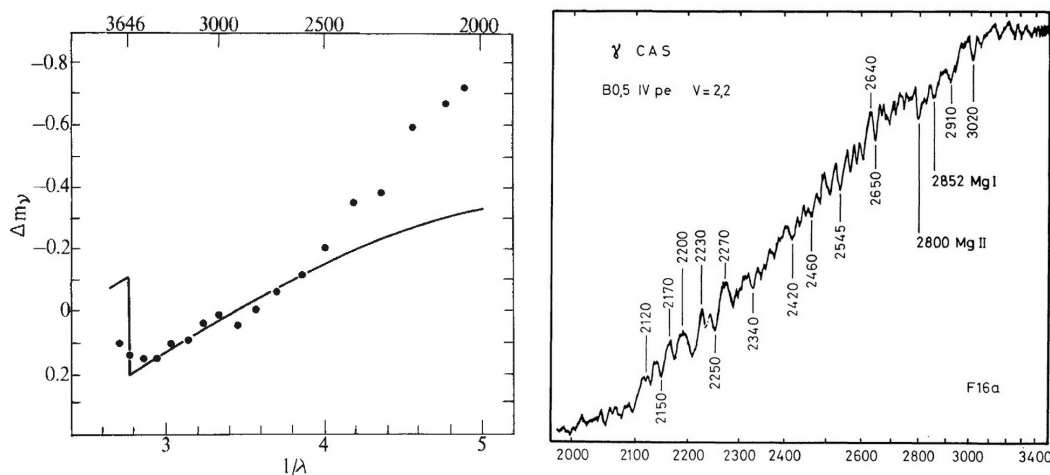


Рис. 1: Слева: Распределение энергии в спектре β Cep (точки) в сравнении с модельным распределением (сплошная кривая) по наблюдениям на телескопе «Орион-1» [10]. По оси абсцисс приведена величина 1/λ, где λ — длина волны в мкм. Справа: УФ спектр γ Cas, полученный на телескопе «Орион-2» [11].

Важным результатом УФ наблюдений звезд спектрального класса О и ранних подклассов звезд спектрального класса В на спутнике IUE стало обнаружение спектральной переменности, связанной с наличием в атмосферах крупномасштабных неоднородностей — околосредных оболочек, дисков или струй [18, 19, 20].

Наиболее ярким ее проявлением является появление в фиолетовых частях профилей резонансных УФ линий CIV, NIV, SiIV и других ионов переменных дискретных абсорбционных компонентов (ДАК), перемещающихся к фиолетовому краю профиля. Процесс формирования ДАК происходит регулярно с рекуррентным периодом 1–2 дня, а их образование обычно связывается с существованием крупномасштабных структур в атмосферах звезд. Предполагается, что такие структуры ответственны также и за переменность профилей линий H β и HeI в видимой области спектра. В пользу этой гипотезы говорит близость периодов изменений в профилях оптических линий и периодов формирования ДАК [18, 21].

Наиболее убедительные свидетельства присутствия ДАК в УФ спектрах массивных звезд ранних спектральных классов были получены в рамках кампании «Мега» наблюдений на спутнике IUE (IUE Mega Campaign) [22]. В ходе этой кампании, продолжавшейся с 13 по 29 января 1995 г. было получено 444 спектра WN5 звезды HD 50896, B0.5Ib звезды HD 64760 и O4If(n) звезды ζ Pup. Спектры каждой из этих звезд наблюдались на протяжении не менее трех периодов вращения.

На рис. 2 представлены динамические спектры линий УФ дублета SiIV в спектре ζ Pup, полученных в ходе выполнения кампании «Мега» и сгруппированные по трем последовательным периодам вращения в зависимости от фазы вращения. Обращает на себя внимание подобие рисунка ДАК для различных периодов вращения, что свидетельствует о стабильности крупномасштабных структур, ответственных за появление ДАК в ветре звезды.

Появление крупномасштабных структур в атмосферах, связанных с ДАК, интерпретируется в предположении о существовании возмущений скорости истечения и темпа потери вещества в основании ветра этих звезд [23]. Наиболее разработанной гипотезой, объясняющей формирование подобных структур, является предположение о наличии у них умеренного магнитного поля ($B_l \approx 200 - 300$ Гс).

В 2003 г. был запущен УФ спутник GALEX (Galaxy Evolution Explorer), оснащенный 50 см УФ телескопом с большим полем зрения [24]. GALEX выполнил первый обзор неба в УФ диапазоне. Результатом работы миссии GALEX является база данных с более чем 200 миллионами источников измерений в дальнем (FUV) и ближнем (NUV) УФ [25]⁶.

Большое число спектров массивных звезд было получено в наблюдениях на телескопе HST. В библиотеке Hubble's Next Generation Spectral Library (NGSL) аккумулированы спектры умеренного разрешения ($R \sim 1000$) 378 звезд [26]. Сравнение спектров массивных звезд из библиотеки NGSL и полученных при

⁶Онлайн-версия каталога находится по адресу <https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR?-source=II/335>.

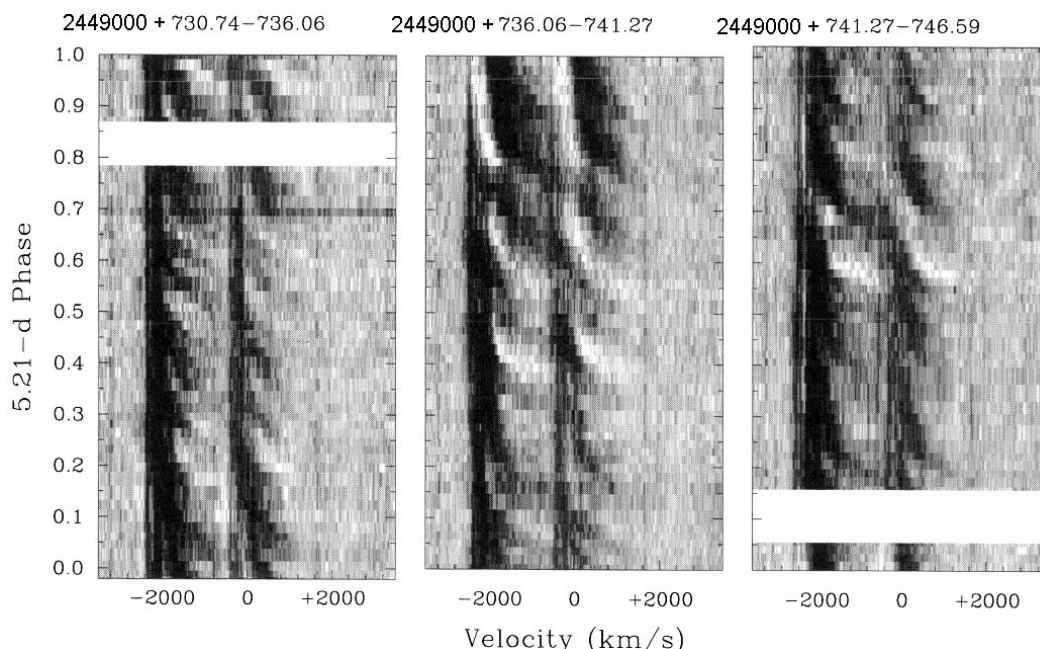


Рис. 2: Динамические спектры линий дублета SiIV 1393.8, 1402.8 в спектре ζ Pup [17]. Юлианские даты наблюдений показаны сверху панелей.

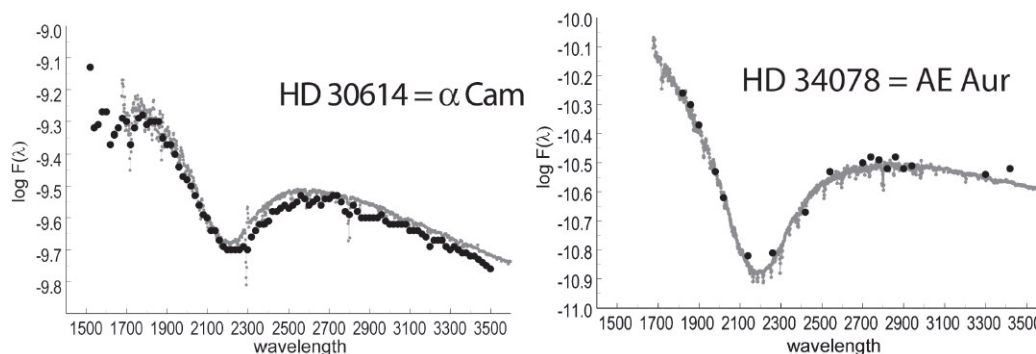


Рис. 3: Слева: сравнение спектров O9.5Ia звезды α Cam из библиотеки NGSL [26] (серые точки) и полученных на телескопе «Астрон» [14] (черные точки). Справа: то же, что на левом рисунке, но для O9.5V звезды AE Aur.

наблюдениях на УФ телескопе «Астрон» на рис. 3 показывает хорошее согласие спектров, полученных различными инструментами.

4. Задачи будущих УФ наблюдений

Планирование задач, стоящих перед будущими УФ наблюдениями, началось после запусков уже первых УФ обсерваторий. Детальный обзор таких задач представлен, например, в обзоре [27]. Подробное описание приборов миссии «Спектр-УФ» и научных задач, решаемых при выполнении спектральных наблюдений на телескопе дано в сборнике памяти академика РАН А.А. Боярчука⁷.

4.1. Спутник «Спектр-УФ»: программа наблюдений массивных звезд

При составлении программы наблюдений необходимо учитывать как опыт уже выполненных УФ миссий, так и существующие проекты будущих космических УФ телескопов. Телескоп спутника «Спектр-УФ» Т-170М предполагается оснастить двумя спектрографами высокого ($R = 50000$) разрешения: спектрографом вакуумного (116–176 нм) и спектрографом ближнего (174–310 нм) УФ, а также длиннощелевым спектрографом низкого разрешения ($R = 1000$), работающим в области длин волн 115–305 нм [28].

По нашему мнению задачи будущих спектральных УФ наблюдений в значительной степени определяются теми нерешенными проблемами физики массивных звезд, в решение которых могут внести существенный вклад УФ наблюдения, и которые описаны ниже, а также характеристиками спектрографов самой миссии «Спектр-УФ».

4.1.1. Содержания элементов в атмосферах массивных звезд и анализ поглощения в области вакуумного УФ

Так как именно в УФ области спектра находится максимум излучения массивных звезд, то анализ их УФ спектров высокого разрешения позволит получить точные содержания элементов в их атмосферах. Особенно важной частью этого направления исследований будет анализ спектров звезд с дефицитом металлов для изучения нуклеосинтеза на ранних стадиях эволюции Галактики [29]. Анализ УФ спектров в областях поглощения УФ линий ионов железа (см., например, рис. 4 в статье [30]) могут использоваться для тестирования расчетов непрозрачностей в подповерхностных областях массивных звезд с целью проверки существования области повышенного поглощения (Z -opacity bump) при температурах близких к 2000000 К [31]. Поглощение в этой области определяет существование субповерхностной конвективной области [32]. Прецизионные определения содержаний элементов в атмосферах массивных звезд требуют использования спектрографов высокого разрешения, а тестирование поглощения ионами железа в области Z -opacity bump — использования спектрографа вакуумного УФ.

4.1.2. Исследования крупномасштабных структур в атмосферах массивных звезд

Для исследования крупномасштабных структур в атмосферах, ответственных за появление дискретных абсорбционных компонентов в профилях резонансных линий SiIV, CIV, NV и других ионов, необходимо получение длинных серий спектров звезд в течение нескольких периодов вращения. Трехмерные газодинамические расчеты [33] формирования структуры ветров ОВ звезд в результате образования магнитных пятен

⁷<http://www.inasan.ru/wp-content/uploads/2018/12/Boyarchuk.pdf>

на поверхности звезды демонстрируют формирование сложных спиральных структур, связанных с ДАК. Наблюдения УФ резонансных линий, необходимые для анализа таких структур, могут быть важной частью программы наблюдений на телескопе миссии «Спектр-УФ». В силу того, что анализируемые линии весьма широки, использование для получения таких серий спектров спектрографов высокого разрешения избыточно, поэтому планируемые наблюдения целесообразно выполнять с использованием спектрографа низкого разрешения.

4.1.3. Анализ мелкомасштабных неоднородностей (клампов) в ветрах массивных звезд

В 1980-х гг. стали появляться свидетельства существенной неоднородности атмосфер звезд типа WR [34] и присутствия в их мощных звездных ветрах областей существенно повышенной плотности (облаков или клампов) [35]. Наблюдательные свидетельства неоднородной структуры звезд типа WR были получены, начиная с 1990-х гг., из анализа вариаций профилей линий CIII 5696, HeII 4686 и других ионов [36, 37, 38].

Газодинамическое моделирование структуры звездных ветров показало, что радиативные звездные ветры неустойчивы и вещество звездных ветров распадается на области низкой и высокой плотности, что и приводит к образованию мелкомасштабных неоднородностей в расширяющихся атмосферах (ветрах) массивных звезд [39]. Это значит, что и ветер OB звезд также должен быть неоднороден. В то же время свидетельств присутствия таких неоднородностей в ветрах OB звезд, за исключением звезд ζ Рцр и HD 93129 A [36], не было получено.

Наблюдательные возможности миссии «Спектр-УФ» значительно превосходят таковые для спутника IUE, тем самым с запуском миссии появятся возможности обнаружения мелкомасштабных неоднородностей ветрах OB звезд, наблюдения которых также оптимально выполнять с использованием спектрографа низкого разрешения.

4.1.4. Образование дисков Ве звезд и УФ и рентгеновские вспышки на Ве звездах

Звезды типа Ве (классические Ве звезды) являются подклассом звезд спектрального класса В главной последовательности (ГП) со скоростями вращения, близкими к критической, и эмиссионными линиями в спектре. Звезды этого подкласса обладают околосредними декреционными дисками, присутствие которых обнаруживается по наличию в спектре эмиссионных линий водорода, Fe II и других элементов. В зависимости от положения диска относительно наблюдателя профили линий могут иметь одно- и двухкомпонентную форму. Особенностью Ве звезд является отсутствие у них обнаружимого магнитного поля. Это может быть связано с тем, что согласно ud-Doula et al. [40] присутствие у быстро вращающейся В звезды даже слабого магнитного поля (10–100 Гс) приводит к быстрому разрушению диска [40].

Тем самым модели образования декреционных дисков, предполагающие удержание вещества звездного ветра Ве звезд магнитным полем звезды [41], оказались несостоятельными. В настоящее время нет общепризнанной модели формирования дисков Ве звезд (см. например, [42, 43]). Диски Ве звезд являются нестабильными, в отдельные эпохи они могут полностью или почти полностью исчезать [44]. Изменения эмиссионных профилей линий $H\alpha$ и $H\beta$ могут происходить на промежутках времени в нескольких часов [45], что делает важной задачу мониторинга спектров Ве звезд.

Большинство Ве звезд являются яркими рентгеновскими источниками, среди которых выделяется группа звезд типа γ Cas, в которую входит 25–26 объектов [46]. Оптические спектры звезд этого типа ничем не отличаются от спектров других Ве звезд, но выделяются по аномально жесткому рентгеновскому спектру и высокой рентгеновской светимости, достигающей $10^{31} - 10^{33}$ эрг/с, что на 2–3 порядка превышает рентгеновскую светимость одиночных Ве звезд и на 2–4 порядка меньше, чем у рентгеновских двойных с Ве компонентами.

Природа рентгеновского излучения таких объектов до настоящего времени загадочна. Среди популярных гипотез — аккреция на компактный объект (нейтронную звезду или белый карлик) [47, 48], а также взаимодействие между системами магнитных петель звезды и ее декреционного диска [49]. Оптическая и рентгеновская светимости звезд типа γ Cas переменны на различных, вплоть до минутных, шкалах времени.

На этих звездах происходят нерегулярные рентгеновские вспышки [50], возможно связанные с упомянутыми выше событиями пересоединения магнитных силовых линий. Высвечивание горячего газа, образующегося в результате таких событий, должно иметь следствием послесвечение в УФ и оптической областях спектра (УФ и оптические вспышки). Детектирование таких вспышек в наблюдениях на спутнике «Спектр-УФ» является важной наблюдательной задачей и поможет пролить свет на природу звезд типа γ Cas. Наблюдательная программа поиска УФ вспышек на этом спутнике требует достижения высокого временного разрешения, то есть планируемые наблюдения следует выполнять с использованием спектрографа низкого разрешения, что позволит получить серии спектров в течение 2–3 периодов вращения звезды.

4.2. Будущие УФ миссии

Продолжением миссии «Астрон» и следующей после миссии WSO-UV для работы на орбите в УФ-области спектра должна стать предлагаемая миссия «Астрон-2» [51]. Основным телескопом миссии будет телескоп 2-метрового класса с полем зрения 2 квадратных градуса. Этот телескоп планируется использовать для глубокого обзора всего неба в УФ-диапазоне (115–300 нм). В этом случае этот проект будет представлять миссию «super-GALEX» и позволит радикально увеличить число новых УФ источников, в том числе и массивных звезд.

В последние годы быстро развивается программа запуска малых спутников, в том числе предназначенных для наблюдений в УФ области, как, например, [52]. Подобные проекты разрабатываются и в России [53].

Рядовые наблюдения УФ спектров могут быть выполнены с использованием подобных малых УФ спутников, а такие продвинутые проекты как «Спектр-УФ» могут быть использованы для решения сложных научных задач, подобных рассмотренным выше.

5. Заключение

Опираясь на результаты работы как уже завершенных УФ миссий, так и на планы запуска будущих УФ телескопов можно предложить следующие важные направления исследований УФ спектров массивных звезд на телескопе «Спектр-УФ»:

- Наблюдения УФ спектров звезд с высоким спектральным разрешением для уточнения содержаний элементов в массивных звездах.
- Проведение спектрального мониторинга OB и WR звезд для анализа возникновения и эволюции крупномасштабных структур в их атмосферах, ответственных за появление дискретных абсорбционных компонентов в профилях резонансных линий SiIV, CIV, NV и других ионов.
- Получение длинных серий спектров OB звезд и звезд типа WR для поиска свидетельств присутствия мелкомасштабных неоднородностей из анализа разностных спектров эмиссионных линий HeII, CIII, CIV и других ионов.
- Выполнения серий спектральных наблюдений одиночных и двойных Be звезд с целью поиска вариаций профилей УФ линий, связанным с формированием и разрушением их декреционных дисков, а также поиска УФ послесвечения рентгеновских микровспышек, формирующихся при пересоединении силовых линий локальных магнитных полей Be звезды и силовых линий магнитного поля декреционного диска.

Финансирование

Работа поддержана грантом РФФИ 23-22-00090.

Список литературы

1. A. I. Gómez de Castro, I. Pagano, M. Sachkov, A. Lecavelier Des Étangs, G. Piotto, R. González, and B. Shustov, in *New Quests in Stellar Astrophysics. II. Ultraviolet Properties of Evolved Stellar Populations*, **7**, 319 (2009).
2. B. Shustov, M. Sachkov, A. I. Gómez de Castro, M. Huang, K. Werner, N. Kappelman, and I. Pagano, *Astrophys. and Space Sci.*, **320**, 187, 2009.
3. A. A. Boyarchuk, B. M. Shustov, A. A. Moisheev, and M. E. Sachkov, *Solar System Research*, **47**, 499, 2013.
4. B. M. Shustov, M. E. Sachkov, S. G. Sichevsky, R. N. Arkhangelsky, et al., *Solar System Research*, **55**, 677, 2021.
5. A. Maeder, in J. M. Vreux, A. Detal, D. Fraipont-Caro, E. Gosset, and G. Rauw, eds., *Liege International Astrophysical Colloquia*, **33**, 39 (1996).
6. N. Smith, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **489**, 4378, 2019.
7. E. M. Levesque, in C. Leitherer, P. D. Bennett, P. W. Morris, and J. T. Van Loon, eds., *Hot and Cool: Bridging Gaps in Massive Star Evolution*, **425**, 103 (2010).
8. E. J. Farrell, J. H. Groh, G. Meynet, R. Kudritzki, J. J. Eldridge, C. Georgy, S. Ekström, and S. C. Yoon, *Astron. and Astrophys.*, **621**, A22, 2019.
9. V. M. Uvarova, M. R. Shpol'ski, A. N. Oshurkova, J. B. Ohanian, and N. V. Uvarova, *Communications of the Byurakan Astrophysical Observatory*, **45**, 42, 1972.
10. G. A. Gurzadyan and J. B. Ohanian, *Nature*, **239**, 90, 1972.
11. G. A. Gurzadian, *Space Sci. Rev.*, **18**, 95, 1975.
12. G. A. Gurzadyan, R. A. Epremyan, D. B. Oganesyan, and S. S. Rustambekova, *Astrophysics*, **18**, 242, 1982.
13. G. A. Gurzadian, A. L. Iaragian, M. N. Krmoian, A. L. Kashin, G. M. Loretsian, and I. B. Okhanessian, *Astrophys. and Space Sci.*, **40**, 393, 1976.
14. E. Y. Kilpio, A. V. Mironov, and O. Y. Malkov, *Baltic Astronomy*, **25**, 23, 2016.
15. F. Macchetto, *Mem. Soc. Astron. Ital.*, **47**, 431, 1976.
16. B. Karplus Hartline, *Science*, **203**, 863, 1979.
17. I. D. Howarth, R. K. Prinja, and D. Massa, *Astrophys. J. Lett.*, **452**, L65, 1995.
18. J. A. de Jong, H. F. Henrichs, L. Kaper, J. S. Nichols, et al., *Astron. and Astrophys.*, **368**, 601, 2001.

19. C. Neiner, V. C. Geers, H. F. Henrichs, M. Floquet, Y. Frémat, A. M. Hubert, O. Preuss, and K. Wiersema, *Astron. and Astrophys.*, **406**, 1019, 2003.
20. R. K. Prinja, D. Massa, and A. W. Fullerton, *Astron. and Astrophys.*, **388**, 587, 2002.
21. L. Kaper, H. F. Henrichs, J. S. Nichols, and J. H. Teltng, *Astron. and Astrophys.*, **344**, 231, 1999.
22. D. Massa, A. W. Fullerton, J. S. Nichols, S. P. Owocki, et al., *Astrophys. J. Lett.*, **452**, L53, 1995.
23. S. R. Cranmer and S. P. Owocki, *Astrophys. J.*, **462**, 469, 1996.
24. L. Bianchi, A. Conti, and B. Shiao, *Advances in Space Research*, **53**, 900, 2014.
25. L. Bianchi, B. Shiao, and D. Thilker, *Astrophys. J. Supp.*, **230**, 24, 2017.
26. S. R. Heap and D. J. Lindler, in A. Vallenari, R. Tantalò, L. Portinari, and A. Moretti, eds., *From Stars to Galaxies: Building the Pieces to Build Up the Universe*, **374**, 409 (2007).
27. A. I. Gómez de Castro and W. Wamsteker, *Fundamental Questions in Astrophysics: Guidelines for Future UV Observatories*, volume 303 (2006).
28. A. Shugarov and M. Sachkov, *Photonics for Solar Energy Systems IX*, **10**, 1032, 2023.
29. A. A. Boyarchuk, B. M. Shustov, I. S. Savanov, M. E. Sachkov, et al., *Astronomy Reports*, **60**, 1, 2016.
30. D. J. Hillier, *Galaxies*, **8**, 60, 2020.
31. F. J. Rogers and C. A. Iglesias, *Astrophys. J.*, **401**, 361, 1992.
32. M. Cantiello, N. Langer, I. Brott, A. de Koter, et al., *Astron. and Astrophys.*, **499**, 279, 2009.
33. F. A. Driessen and N. D. Kee, in A. A. Vidotto, L. Fossati, and J. S. Vink, eds., *Winds of Stars and Exoplanets*, **370**, 161 (2023).
34. A. M. Cherepashchuk, J. A. Eaton, and K. F. Khaliullin, *Astrophys. J.*, **281**, 774, 1984.
35. I. I. Antokhin, A. F. Kholtygin, and A. M. Cherepashchuk, *Astronomicheskii Zhurnal*, **65**, 558, 1988.
36. S. Lepine, A. F. J. Moffat, and R. N. Henriksen, *Astrophys. J.*, **466**, 392, 1996.
37. L. Koesterke, W. R. Hamann, and T. Urrutia, *Astron. and Astrophys.*, **379**, 224, 2001.
38. A. F. J. Moffat, in W.-R. Hamann, A. Feldmeier, and L. M. Oskinova, eds., *Clumping in Hot-Star Winds*, 17 (2008).
39. M. C. Runacres and S. P. Owocki, *Astron. and Astrophys.*, **381**, 1015, 2002.
40. A. ud-Doula, S. P. Owocki, and N. D. Kee, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **478**, 3049, 2018.
41. J. C. Brown, D. Telfer, Q. Li, R. Hanuschik, J. P. Cassinelli, and A. Kholtygin, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **352**, 1061, 2004.
42. D. J. Hillier, in M. Kraus and A. S. Miroshnichenko, eds., *Stars with the B[e] Phenomenon*, **355**, 39 (2006).
43. J. M. Dodd, R. D. Oudmaijer, I. C. Radley, M. Vioque, and A. J. Frost, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 2023.
44. J. P. Wisniewski, Z. H. Draper, K. S. Bjorkman, M. R. Meade, J. E. Bjorkman, and A. F. Kowalski, *Astrophys. J.*, **709**, 1306, 2010.
45. A. K. Kholtygin, M. A. Burlak, and O. A. Tsiopa, *Astronomicheskij Tsirkulyar*, **1649**, 1, 2021.
46. A. F. Kholtygin, E. B. Ryspaeva, A. Moiseeva, M. Burlak, I. Yakunin, and O. Tsiopa, in *The Multifaceted Universe: Theory and Observations - 2022*, 44 (2022).
47. K. Postnov, L. Oskinova, and J. M. Torrejón, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **465**, L119, 2017.
48. D. R. Gies, L. Wang, and R. Klement, *Astrophys. J. Lett.*, **942**, L6, 2023.
49. M. A. Smith, R. Lopes de Oliveira, and C. Motch, *Advances in Space Research*, **58**, 782, 2016.
50. M. A. Smith, R. Lopes de Oliveira, and C. Motch, *Astrophys. J.*, **755**, 64, 2012.
51. M. Sachkov and I. Savanov, *ASTRON-2: mission for the all sky UV survey*, 2016.
52. P. Ribes-Pleguezuelo, F. Keller, and M. Taccola, *arXiv e-prints*, arXiv:2006.14967, 2020.
53. S. V. Iosipenko, *INASAN Science Reports*, **6**, 82, 2021.

Критерии реализации магнитосферной аккреции во взрывных переменных

Бескровная Н.Г.¹, Ихсанов Н.Р.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

Обсуждается процесс аккреции во взрывных (катаклизмических) переменных на белый карлик с сильным магнитным полем. Вычислены пороговые значения магнитного поля белого карлика, препятствующего формированию аккреционного диска в системе. Вопрос о реализации в системе магнитосферной аккреции рассматривается в рамках различных предположений о геометрии аккреционного потока и механизмах проникновения газа в магнитное поле белого карлика на границе его магнитосферы. В рамках диффузионного приближения вычислено максимально возможное значение магнитного поля белого карлика, при котором в системе может быть реализована магнитосферная аккреция. Статья основана на материалах, представленных на Всероссийской научной конференции «Ультрафиолетовая Вселенная — 2023».

Поступила в редакцию 01.11.2023 г. Принята в печать 12.12.2023 г.

Ключевые слова: катаклизмические переменные, аккреция, магнитное поле

Realization criteria for magnetospheric accretion in Cataclysmic Variables

Beskrovnaya N.G.¹, Ikhsanov N.R.^{1,2}

¹Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo, St. Petersburg, Russia

²Institute of Applied Astronomy of the RAS, St. Petersburg, Russia

Accretion process in cataclysmic variables with strongly magnetized white dwarfs is discussed. The threshold values of the white dwarf magnetic field which prevents formation of the accretion disk in the system are calculated. Realization of the magnetospheric accretion in the system is considered under different assumptions about geometry of the accretion flow and mechanisms of matter penetration into the magnetic field of the white dwarf at its magnetosphere boundary. In the frame of diffusion approximation we have calculated the maximum value of the white dwarf magnetic field at which the magnetospheric accretion can be realized in the system. This paper is based on a talk presented at “Ultraviolet Universe — 2023” conference.

Received 01.11.2023. Accepted 12.12.2023.

Keywords: cataclysmic variables, accretion, magnetic field

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.5.006

1. Введение

Взрывные (катаклизмические) переменные являются маломассивными взаимодействующими двойными системами, состоящими из красного и белого карликов. Эти объекты составляют подкласс переменных звезд, хаотические изменения блеска которых в значительной степени связаны с процессом обмена массой между компонентами системы. Высокий темп обмена массой в большинстве рассматриваемых нами систем реализуется вследствие заполнения красным карликом своей полости Роша. Течение вещества с поверхности красного карлика в полость Роша белого карлика в этом случае происходит в тепловой шкале времени с темпом, достаточным для интерпретации наблюдаемых хаотических вариаций блеска этих источников в терминах аккреционной модели [1].

По структуре течения вещества взрывные переменные можно условно разделить на системы с дисковой аккрецией и системы, в которых образование диска в полости Роша белого карлика не происходит. К числу последних относятся взрывные переменные, именуемые полярами, в которых образованию диска препятствует сильное магнитное поле белого карлика, период осевого вращения которого совпадает или близок к орбитальному периоду системы, и пара объектов (AE Водолея и AR Скорпиона), составляющих так называемый подкласс пульсароподобных белых карликов, в которых образованию диска, наряду с сильным магнитным полем, препятствует также быстрое осевое вращение белого карлика (см. [2]). Системы с дисковой аккрецией, в свою очередь, подразделяются на системы с магнитосферной аккрецией, именуемые промежуточными полярами, и так называемые немагнитные взрывные переменные, в которых развитой магнитосферы у аккрецирующего белого карлика не образуется [3]. Обсуждению критериев, позволяющих классифицировать четыре вышеперечисленных подкласса взрывных переменных, посвящена наша работа. В следующем параграфе мы обращаем внимание, что сильное магнитное поле белого карлика при определенных условиях может препятствовать течению струи вещества через точку L1, создавая тем самым условия для каналированного течения вещества без промежуточной баллистической фазы. В параграфе 2

мы обсуждаем критерии формирования развитой магнитосферы у белых карликов, аккрецирующих из диска. Наши оценки показывают, что эти критерии существенно зависят от механизма, под действием которого аккреционный поток проникает в магнитное поле белого карлика на границе его магнитосферы. Используя оценку минимально возможного радиуса магнитосферы, полученную в предположении, что проникновение газа из диска в магнитное поле звезды происходит вследствие аномальной (Бомовской) диффузии, мы приходим к абсолютному верхнему пределу величины магнитного поля белого карлика, аккреция на поверхность которого происходит из диска без образования магнитосферы. Значение полученного нами верхнего предела указывает на возможную недооценку величины магнитного поля у белых карликов в промежуточных полярах.

2. Критерии реализации дисковой аккреции

Мы рассматриваем маломассивную двойную систему, состоящую из магнитного белого карлика и красного карлика, заполняющего свою полость Роша. Темп перетекания вещества с поверхности красного карлика в области точки L1 оценивается выражением

$$\dot{\mathfrak{M}}_{L1} \leq \rho_0 c_{s0} S_{L1}, \quad (1)$$

где ρ_0 и c_{s0} — плотность и скорость звука в газе на поверхности красного карлика, и S_{L1} — площадь сечения так называемой горловины точки L1, т. е. области, в которой скорость свободного падения, оцениваемая в рамках потенциала Роша, не превосходит скорости звука c_{s0} .

Давлению газового потока в области точки L1, $p_{g0} \simeq \rho_0 c_{s0}^2$, противостоит магнитное давление, обусловленное дипольным магнитным полем белого карлика, $p_{m0} = \mu^2 / 2\pi r_{L1}^6$. Здесь $\mu = (1/2)B_{wd}R_{wd}^3$ — дипольный магнитный момент белого карлика радиуса R_{wd} , напряженность магнитного поля на поверхности которого в области магнитных полюсов B_{wd} , и r_{L1} — расстояние, отсчитываемое от центра белого карлика до точки L1. Течение газа через точку L1, таким образом, оказывается возможным лишь при условии $p_{g0} \geq p_{m0}$, которое выполняется, если дипольный магнитный момент белого карлика удовлетворяет условию $\mu \leq \mu_{cr}$, где [4]

$$\mu_{cr} \simeq 10^{34} \text{ Гс см}^3 \times \dot{\mathfrak{M}}_{15}^{1/2} c_6^{1/2} \sigma_9^{-1} \left(\frac{P_{orb}}{2.2 \text{ ч}} \right)^2 \times [(0.5 - 0.227 \log q)[(1+q)M_{wd}]^{1/3}]^3. \quad (2)$$

Здесь $\dot{\mathfrak{M}}_{15} = \dot{\mathfrak{M}}_{L1} / 10^{15} \text{ г с}^{-1}$ и $c_6 = c_{s0} / 10^6 \text{ см с}^{-1}$. Параметр σ_9 обозначает радиус сечения горловины точки L1 в единицах 10^9 см , P_{orb} — орбитальный период системы, а q — отношение масс компонентов системы.

В ситуации, когда дипольный магнитный момент белого карлика меньше критического значения, $\mu < \mu_{cr}$, магнитный клапан в точке L1 открыт, и газ в форме струи втекает в полость Роша белого карлика, где он, двигаясь по баллистической траектории, взаимодействует с магнитным полем белого карлика. Образование диска в этом случае оказывается возможным, если динамическое давление струи газа, $p_{ram} = \rho_s v_{ff}^2$, на радиусе циркуляризации [5]

$$r_{circ} \simeq 4(1+q)^{4/3} (0.5 - 0.227 \log q)^4 P_d^{2/3} R_\odot \quad (3)$$

превосходит противодействие, оказываемое на нее со стороны дипольного магнитного поля белого карлика. Здесь P_d — орбитальный период двойной системы, выраженный в сутках. Для случая $q > 0.5$ выражение (3) хорошо аппроксимируется формулой $r_{circ} \simeq 0.6 P_d^{2/3} R_\odot$, которую мы и будем использовать в дальнейшем.

Решая неравенство $p_{ram}(r_{circ}) \geq p_m(r_{circ})$ относительно μ , мы приходим к условию $\mu \leq \mu_w$, где

$$\mu_w \simeq 3 \times 10^{32} \text{ Гс см}^3 \times \dot{\mathfrak{M}}_{15}^{1/2} m^{1/4} \sigma_9^{-1} \left(\frac{P_{orb}}{2.2 \text{ ч}} \right)^{11/6}. \quad (4)$$

Здесь m — масса белого карлика, M_{wd} , в единицах $0.8 M_\odot$.

Если в системе реализуется обратное неравенство, т. е. $\mu \geq \mu_w$, магнитное поле белого карлика будет препятствовать образованию аккреционного диска. В этом случае реализуется либо режим так называемой каналированной аккреции, если период его осевого вращения удовлетворяет неравенству $P_s \geq P_{cr}$, где

$$P_{cr} \simeq 560 \text{ с } \sigma_9^{6/11} m^{-7/11} \dot{\mathfrak{M}}_{15}^{-3/11} \mu_{33}^{6/11}, \quad (5)$$

либо режим пропеллера, сопровождаемый истечением вещества из двойной системы (см., например, [6]).

Критерии образования диска в системе, таким образом, можно выразить условиями $\mu < \mu_w$ и $P_s < P_{cr}$. Процесс аккреции при этих условиях мы рассматриваем в следующем параграфе.

3. Критерии магнитосферной аккреции

Необходимым условием формирования магнитосферы у аккрецирующего белого карлика (и, соответственно, реализации сценария магнитосферной аккреции) является выполнение неравенства

$$r_{\text{st}} \geq R_{\text{wd}}. \quad (6)$$

Здесь r_{st} — радиус остановки аккреционного потока магнитным полем белого карлика, который определяется уравнением баланса между давлением магнитного поля белого карлика и давлением аккреционного потока, p_{f} .

В случае сферической геометрии аккреционного потока давление дипольного магнитного поля белого карлика достигает величины динамического давления аккреционного потока, $p_{\text{рам}} = \rho_{(\text{sp})} v_{\text{ff}}^2$, на Альвеновском радиусе,

$$r_{\text{A}} = \left(\frac{\mu^2}{\dot{M}(2GM_{\text{wd}})^{1/2}} \right)^{2/7}. \quad (7)$$

Здесь $\rho_{(\text{sp})}(r) = \dot{M}/4\pi r^2 v_{\text{ff}}$ — радиальное распределение плотности газа в сферическом аккреционном потоке, двигающемся в направлении звезды со скоростью свободного падения $v_{\text{ff}}(r) = (2GM_{\text{wd}}/r)^{1/2}$, и \dot{M} — темп аккреции (т. е. количество массы, двигающейся к белому карлику в радиальном направлении в единицу времени). Полагая в выражении (6) $r_{\text{st}} = r_{\text{A}}$ и решая полученное неравенство относительно μ , находим $\mu \geq \mu_0$, где

$$\mu_0 \simeq 2 \times 10^{31} \text{ Гс см}^3 \times \dot{M}_{18}^{1/2} m^{1/4} R_9^{7/4}. \quad (8)$$

Здесь $R_9 = R_{\text{wd}}/10^9$ см. Полученное значение дипольного магнитного момента соответствует напряженности магнитного поля на поверхности белого карлика

$$B_0 \simeq 4 \times 10^4 \text{ Гс} \times \dot{M}_{18}^{1/2} m^{1/4} R_9^{-5/4}. \quad (9)$$

В случае дисковой аккреции давление, оказываемое аккреционным потоком на магнитное поле белого карлика, складывается из газового давления на внутреннем радиусе диска, давления, обусловленного собственным магнитным полем диска, и давлением, связанным с азимутальным вращением газа в диске. Максимальное значение радиуса остановки диска дипольным магнитным полем белого карлика можно оценить путем сравнения газового давления на внутреннем радиусе диска, $p_{\text{g}}(r_{\text{in}}) = \rho_{\text{d}}(r_{\text{in}}) c_{\text{s}}^2(r_{\text{in}})$, с магнитным давлением $p_{\text{м}}$. Оценивая радиальное распределение плотности газа, $\rho_{\text{d}}(r)$, и скорости звука, $c_{\text{s}}(r)$, в рамках классической модели α -диска [7], находим [8]

$$r_{\text{st}}^{(\text{d})} \simeq 34 \alpha^{8/27} \times \frac{\mu^{16/27}}{\dot{M}^{7/27} (GM_{\text{wd}})^{7/27}}, \quad (10)$$

где

$$\alpha = \frac{v_{\text{t}} \ell_{\text{t}}}{c_{\text{s}} z_0}, \quad (11)$$

определяет параметр, нормирующий скорость, v_{t} , и масштаб, ℓ_{t} , турбулентных движений в диске на скорость звука и полутолщину диска, определяемую выражением

$$z_0(r) = r \frac{c_{\text{s}}(r)}{v_{\text{k}}(r)}, \quad (12)$$

где $v_{\text{k}}(r) = \sqrt{GM_{\text{wd}}/r}$ — кеплеровская скорость.

Полагая в выражении (6) $r_{\text{st}} = r_{\text{st}}^{(\text{d})}$ и решая полученное неравенство относительно μ , находим $\mu \geq \mu_1$, где

$$\mu_1 \simeq 2 \times 10^{32} \text{ Гс см}^3 \times \alpha_{0.1}^{-1/2} \dot{M}_{18}^{7/16} m^{7/16} R_9^{27/16} \quad (13)$$

и $\alpha_{0.1} = \alpha/0.1$.

Величина критического значения напряженности магнитного поля на поверхности белого карлика, при которой в системе возможна реализация сценария магнитосферной аккреции в этом случае

$$B_1 \simeq 4 \times 10^5 \text{ Гс} \times \alpha_{0.1}^{-1/2} \dot{M}_{18}^{7/16} m^{7/16} R_9^{-21/16}. \quad (14)$$

Наконец, используя в выражении (6) значение минимально возможного радиуса магнитосферы [9],

$$r_{\text{N}} \simeq 0.16 \lambda_0 \frac{\mu^{6/11}}{\dot{M}^{4/11} (GM_{\text{wd}})^{1/11}}, \quad (15)$$

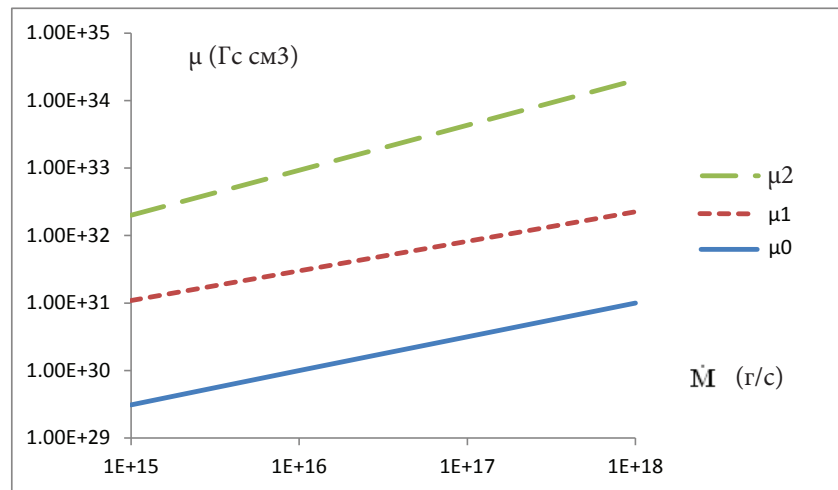


Рис. 1: Зависимость величины критического дипольного магнитного момента белого карлика, допускающего формирование его магнитосферы, для различных значений темпа аккреции, реализуемого в системе (см. текст).

при котором темп аномальной (Бомовской) диффузии плазмы из диска в магнитное поле нейтронной звезды достигает темпа аккреции вещества в самом диске¹ и решая неравенство $r_N \geq R_{wd}$ относительно μ , находим $\mu \geq \mu_2$, где

$$\mu_2 \simeq 2 \times 10^{34} \text{ Гс см}^3 \times \lambda_0^{-11/6} \dot{M}_{18}^{2/3} m^{1/6} R_9^{11/6}. \quad (16)$$

Здесь λ_0 — безразмерный параметр эффективности порядка единицы, учитывающий возможные отклонения рассматриваемой картины аккреции от сценария α -диска (см. [8]).

Величина критического значения напряженности магнитного поля на поверхности белого карлика, при которой в системе возможна реализация сценария магнитосферной аккреции, в этом случае

$$B_2 \simeq 4 \times 10^7 \text{ Гс} \times \lambda_0^{-11/6} \dot{M}_{18}^{2/3} m^{1/6} R_9^{-7/6}. \quad (17)$$

Полученные величины критического значения дипольного магнитного момента в зависимости от темпа аккреции, реализуемого в системе, приведены на рис. 1.

4. Заключение

Выполненные нами оценки показывают, что пороговое значение магнитного поля белого карлика, при котором в системе реализуется магнитосферная аккреция, кроме стандартных параметров (темпа аккреции, масса и радиус белого карлика) зависит также от геометрии аккреционного потока и механизма, вследствие которого аккрецирующий газ проникает в магнитное поле белого карлика на границе его магнитосферы. Полученная нами оценка максимально возможного значения порогового магнитного поля существенно превосходит среднее значение этого параметра, принимаемое в традиционных сценариях. В свете этого результата исследование характеристик излучения пограничного слоя, образующегося при дисковой аккреции газа на белый карлик с сильным магнитным полем, представляется актуальным инструментом наблюдательной проверки аккреционных сценариев. Наконец, следует отметить, что полученные нами результаты указывают на возможную недооценку величины магнитного поля у белых карликов в промежуточных полярах.

Список литературы

1. A. G. Masevich and A. V. Tutukov, *Evolutsiia zvezd : teoriia i nabliudeniia* (1988).
2. P. B. Isakova, N. R. Ikhsanov, A. G. Zhilkin, D. V. Bisikalo, and N. G. Beskrovnaya, *Astronomy Reports*, **60**, 498, 2016.
3. B. Warner, *Cataclysmic variable stars*, volume 28 (1995).
4. N. R. Ikhsanov, V. Y. Kim, and O. Korol'kova, *Publications of the Pulkovo Observatory*, **228**, 115, 2023.
5. J. Frank, A. King, and D. J. Raine, *Accretion Power in Astrophysics: Third Edition* (2002).
6. A. G. Zhilkin, D. V. Bisikalo, and A. A. Boyarchuk, *Physics Uspekhi*, **55**, 115, 2012.
7. N. I. Shakura, *Astronomicheskii Zhurnal*, **49**, 921, 1972.
8. N. R. Ikhsanov and N. G. Beskrovnaya, *Publications of the Pulkovo Observatory*, **228**, 118, 2023.
9. N. R. Ikhsanov and N. G. Beskrovnaya, *Publications of the Pulkovo Observatory*, **229**, 19, 2023.

¹Заметим, что при этом условии скорость диффузии плазмы поперек силовых линий магнитного поля звезды также сравнивается со скоростью радиального движения газа на внутреннем радиусе диска.

Белые карлики и голубые бродяги в рассеянных звездных скоплениях, анализ населения на основе поиска в ультрафиолетовом диапазоне

Селезнев А.Ф., Михневич В.О.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

Яркие белые карлики и голубые бродяги являются одними из самых ярких объектов в старых рассеянных и шаровых звездных скоплениях при наблюдениях в ультрафиолетовом диапазоне. Поэтому «Спектр-УФ» позволяет эффективно обнаруживать такие звезды и определять основные свойства их населений в скоплениях. В первую очередь представляет интерес их пространственное распределение и доля среди вероятных членов скоплений. Количество белых карликов может дать информацию о количестве звезд с массой примерно до 10 масс Солнца, которые родились в составе данного скопления, что важно для построения начальной функции масс. Количество голубых бродяг даст информацию о количестве двойных систем, в которых происходил значительный обмен веществом между компонентами. Приводится список рассеянных скоплений, в которых «Спектр-УФ» может быть использован для поиска белых карликов и голубых бродяг. Статья основана на материалах, представленных на Всероссийской научной конференции «Ультрафиолетовая Вселенная — 2023».

Поступила в редакцию 30.10.2023 г. Принята в печать 12.12.2023 г.

Ключевые слова: рассеянные звездные скопления, белые карлики, голубые бродяги

White dwarfs and blue stragglers in the open clusters, an analysis of the population at the base of a search in the ultraviolet wavelengths

Seleznev A.F., Mikhnevich V.O.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Bright white dwarfs and blue stragglers are among the brightest objects in the old open clusters and globular clusters when one observes in the ultraviolet range of a spectrum. Consequently, the Spectr-UV mission allows to detect these stars effectively and determine the general properties of their populations in the clusters. The space distribution and the fraction of white dwarfs and blue stragglers among the probable cluster members are of essential interest. The number of the white dwarf stars can inform us about the number of stars with masses up to approximately 10 solar masses which were born in the cluster. This, in turn, is influential for a construction of the initial mass function. The number of the blue straggler stars gives an information on the binary systems with an intensive mass exchange in the past. We propose the list of open clusters, where Spectr-UV can be used to search white dwarfs and blue stragglers. This paper is based on a talk presented at “Ultraviolet Universe — 2023” conference.

Received 30.10.2023. Accepted 12.12.2023.

Keywords: open star clusters, white dwarfs, blue stragglers

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.5.007

1. Введение

За последние пару десятилетий о голубых бродягах стало известно очень многое, но, в основном, это касается таких звезд в шаровых скоплениях. В рассеянных скоплениях это население хорошо изучено только в очень небольшом количестве скоплений — М 67, NGC 188, NGC 6791, NGC 6819. Есть каталог кандидатов в голубые бродяги [1], который содержит 1887 объектов в 427 рассеянных звездных скоплениях (РЗС). Есть новый каталог, основанный на данных Gaia DR2, содержащий 899 кандидатов в голубые бродяги и 77 кандидатов в «желтые» бродяги в 408 скоплениях [2]. Но хочется исследовать эти объекты подробнее.

Есть два возможных механизма формирования голубых бродяг. Первый — перенос вещества в двойной системе, второй — слияние звезд при прямых столкновениях. В ряде шаровых скоплений наблюдаются две последовательности голубых бродяг, например, в М 30 [3], NGC 362 [4]. Это интерпретируется как проявление двух разных механизмов формирования голубых бродяг [3, 5].

Рассеянные скопления намного разреженнее шаровых скоплений. Возможны ли прямые столкновения звезд в рассеянных скоплениях? Такой механизм существует, это механизм Лидова-Козаи [6]. В иерархической тройной системе внутренняя пара испытывает значительные изменения эксцентриситета и наклона орбиты. Верхнее значение изменения эксцентриситета — почти единица. При таких условиях вполне возможно столкновение и слияние звезд внутренней пары.

Одна из наиболее исследованных популяций голубых бродяг — в рассеянном скоплении NGC 188. Исследования проводились в рамках проекта WOCS (это проект исследования РЗС объединением университетов штата Висконсин, штата Иллинойс, Йельского университета и Национальной оптической обсерватории

США). Оказалось, что минимум 80% голубых бродяг в NGC 188 — это спектрально-двойные системы с периодами вблизи 1000 суток и эксцентриситетами орбит существенно больше 0 [7, 8]. Кроме того, в этих системах были обнаружены вторичные компоненты — белые карлики (по наблюдениям на телескопе Хаббла в ультрафиолетовом диапазоне), что поддерживает гипотезу об имевшем в прошлом место переносе вещества в двойной системе [9].

При наблюдениях в оптическом диапазоне белые карлики очень слабые и видны только в ближайших рассеянных скоплениях. Но в них скрыта информация о звездах, которые были массивными и уже проэволюционировали. Это важно знать, как минимум, при построении функции масс. В белые карлики превращаются звезды с начальной массой от ~ 0.7 до $\sim 8-10$ масс Солнца. Если в скоплении максимальная масса звезд менее верхнего предела в $8-10$ масс Солнца, то можно ожидать наличие в скоплении белых карликов. На рис. 1 показаны изохроны PARSEC [10] разных возрастов для солнечной металличности, черные точки — положение точки поворота. В табл. 1 приведены значения массы звезды у точки поворота в зависимости от логарифма возраста. Видно, что в скоплениях даже с возрастом 100 млн. лет можно ожидать присутствие белых карликов.

При исследовании звездных скоплений возникают следующие вопросы. Сколько голубых бродяг и белых карликов в скоплении? Как они распределены в пространстве? Есть ли в скоплении двойные системы с белыми карликами и сколько их?

Чем наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне могут помочь при исследовании населения белых карликов и голубых бродяг в скоплении? Имеется обширная литература по наблюдениям шаровых скоплений в ультрафиолетовом диапазоне на телескопе им. Хаббла. Рассмотрим результаты исследования шарового скопления 47 Тукана [11, 12]. Это одно из ближайших к Солнцу шаровых скоплений, его гелиоцентрическое расстояние 4.45 ± 0.12 кпк [13]. На рис. 2 основные последовательности скопления 47 Тус схематично показаны на диаграмме «звездная величина — показатель цвета» в полосах F225W и F336W по данным рис. 4 из [11] и рис. 1 из [12]. Видно, что яркие белые карлики и яркие голубые бродяги являются абсолютно самыми яркими звездами этого скопления.

В разделе 2 настоящей работы показано, как белые карлики и голубые бродяги будут располагаться на диаграмме «звездная величина — показатель цвета» типичного рассеянного скопления в полосах F225W и F336W. Также, показано, как неразрешенные двойные системы, одним из компонентов которых является белый карлик, будут располагаться на такой же диаграмме. В разделе 3 представлена выборка рассеянных звездных скоплений, для которых, с нашей точки зрения, население голубых бродяг и белых карликов

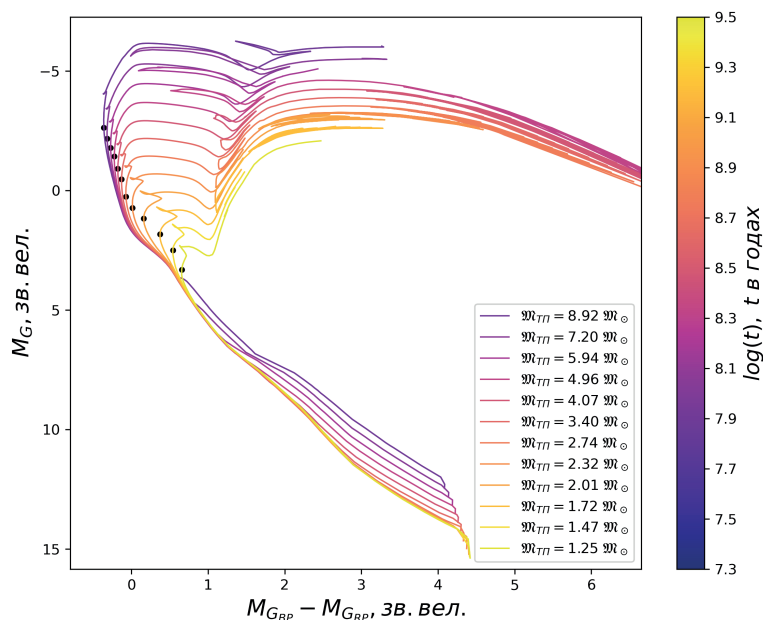


Рис. 1: Изохроны PARSEC [10] солнечной металличности для разных возрастов в фотометрической системе миссии Gaia. Черные точки — положение точки поворота главной последовательности. Показаны значения массы звезды, соответствующие точкам поворота.

Таблица 1: Значения массы звезды у точки поворота главной последовательности в зависимости от возраста скопления.

$\log t$ (t в годах)	\mathcal{M} , \mathcal{M}_{\odot}
7.3	8.92
7.5	7.20
7.7	5.94
7.9	4.96
8.1	4.07
8.3	3.40
8.5	2.74
8.7	2.32
8.9	2.01
9.1	1.72
9.3	1.47
9.5	1.25

может быть исследовано с помощью «Спектр-УФ». Краткое обсуждение результатов и основные выводы представлены в разделе 4.

2. Белые карлики и голубые бродяги рассеянных скоплений на диаграммах «звездная величина — показатель цвета» в ультрафиолетовом диапазоне

На основе данных о звездных величинах и показателях цвета белых карликов в ультрафиолетовом диапазоне из [11] нами были вычислены абсолютные звездные величины этих звезд. Для этого использовались параметры шарового скопления 47 Tuc: избыток цвета $E(B - V) = 0.04$ из [14] и расстояние 4.45 ± 0.12 кпк

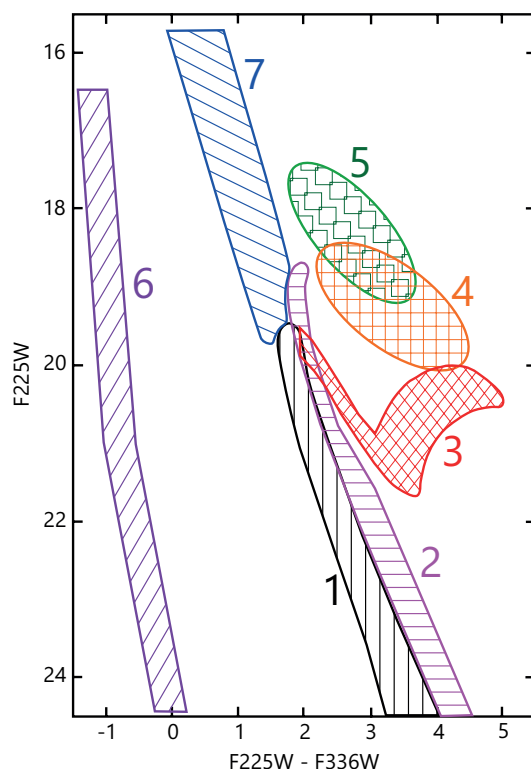


Рис. 2: Основные последовательности на диаграмме «звездная величина — показатель цвета» шарового скопления 47 Tuc по данным наблюдений на телескопе Хаббла [11, 12]. 1 — звезды главной последовательности, 2 — двойные звезды с компонентами на главной последовательности, 3 — красные гиганты, 4 — звезды асимптотической ветви гигантов, 5 — звезды горизонтальной ветви, 6 — белые карлики, 7 — звезды голубые бродяги.

из [13]. Для расчета полного поглощения в полосах F225W и F336W использовались формулы со страницы ввода параметров для запроса треков и изохрон PARSEC¹, это полосы камеры WFC3 телескопа Хаббла.

В качестве примера использовалось рассеянное скопление NGC 1039. Его параметры (возраст, химический состав, избыток цвета и расстояние) были взяты из каталога Диаса [15]. С помощью этих параметров абсолютные звездные величины белых карликов (смотри выше) были пересчитаны в видимые звездные величины в полосах F225W и F336W для скопления NGC 1039.

Результат показан на рис. 3. Черные точки показывают положение белых карликов на диаграмме, синий четырехугольник показывает область диаграммы, где можно ожидать наличие голубых бродяг. Очевидно, что белые карлики попадают в область звездных величин намного выше предела телескопа «Спектр-УФ». Голубые бродяги в случае рассеянного скопления оказываются самыми яркими звездами при наблюдениях в ультрафиолетовом диапазоне. Это позволит выделять их с большей уверенностью, чем в оптическом диапазоне.

Белые карлики в звездных скоплениях могут присутствовать не только как одиночные звезды, но и как компоненты неразрешенных двойных систем (в случае разрешенных двойных систем положение компонента — белого карлика на диаграмме «звездная величина — показатель цвета» не отличается от положения одиночной звезды). В Уральском федеральном университете проводится программа поиска неразрешенных двойных систем в рассеянных скоплениях [16, 17]. Но в этих работах рассматриваются только неразрешенные звездные системы с компонентами на главной последовательности. Используя ту же методику, можно рассчитать положение на диаграмме «звездная величина — показатель цвета» неразрешенных двойных систем с компонентом — белым карликом.

На рис. 4 показано положение неразрешенных двойных систем, одним из компонентов которых является белый карлик (фиолетовые точки). Для расчета были использованы несколько белых карликов из числа показанных на рис. 3 (черные точки) и несколько звезд главной последовательности (звездочки на изохроне), массы которых подписаны рядом. Фиолетовые точки показывают все возможные комбинации избранных белых карликов и избранных звезд главной последовательности. Необходимо отметить, что на диаграмме «звездная величина — показатель цвета» в ультрафиолетовых полосах неразрешенные двойные системы с белыми карликами расположены несколько дальше от главной последовательности, чем на диаграмме в полосах видимого диапазона. Это объясняется тем, что в ультрафиолетовом диапазоне белые карлики являются значительно более яркими, чем в видимом.

¹<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd> [10].

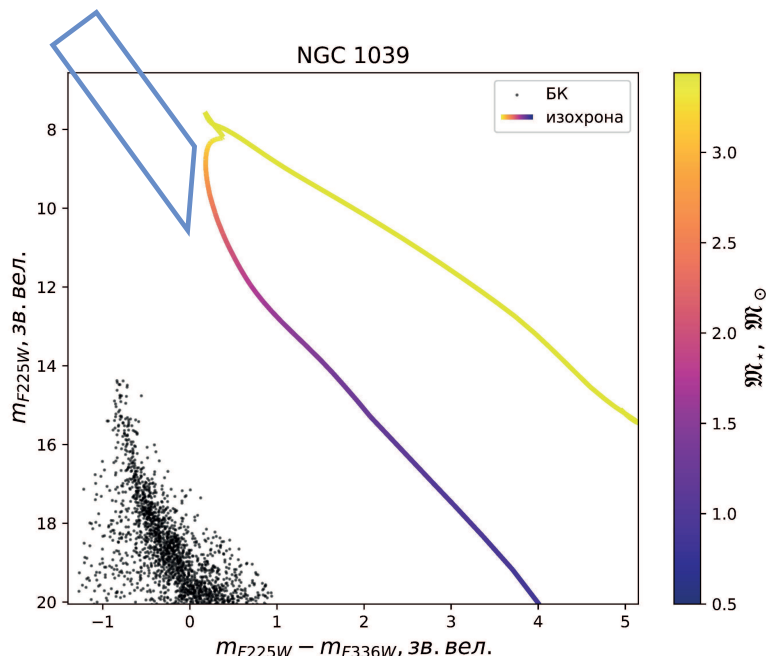


Рис. 3: Диаграмма «звездная величина — показатель цвета» рассеянного скопления NGC 1039 в ультрафиолетовом диапазоне. Черные точки — белые карлики из [11]. Синий прямоугольник — область, где можно ожидать наличие голубых бродяг. Сплошная линия — изохрона [10], соответствующая параметрам NGC 1039 из [15]. Цветовой градиент отражает разные значения массы звезд.

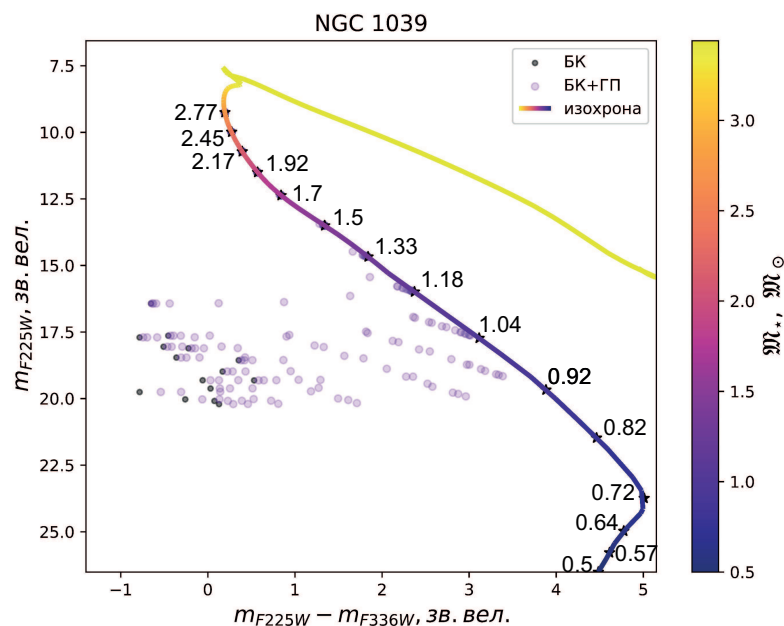


Рис. 4: Диаграмма «звездная величина — показатель цвета» рассеянного скопления NGC 1039 в ультрафиолетовом диапазоне. Черные точки — избранные белые карлики из [11]. Сплошная линия — изохрона для NGC 1039 с теми же обозначениями, что и на рис. 3. Звездочками на изохроне отмечено положение звезд главной последовательности, использованных для расчета неразрешенных двойных систем, числа обозначают массы этих звезд. Фиолетовые точки — неразрешенные двойные системы с одним компонентом — белым карликом и другим — звездой главной последовательности, показаны все комбинации.

3. Выборка рассеянных скоплений для исследования со «Спектр-УФ»

Поле зрения камеры ближнего ультрафиолетового и видимого диапазонов телескопа «Спектр-УФ» имеет размер 273×273 угловой секунды или 4.55×4.55 угловой минуты. Поэтому целесообразно выбирать для исследования рассеянные скопления с малым угловым диаметром.

Относительно большое количество белых карликов и голубых бродяг можно ожидать в старых рассеянных скоплениях с достаточно большим числом звезд. В соответствии с этими условиями, в качестве возможных объектов для исследования населения белых карликов и голубых бродяг из каталога [15] выбирались рассеянные скопления с возрастом от миллиарда лет с гелиоцентрическим расстоянием более 2 кпк. Дополнительный отбор проводился на основе анализа изображений отобранных скоплений в атласе DSS с помощью программы Aladin. На этой стадии отбирались скопления, хорошо видимые на изображениях и имеющие заметную концентрацию. Окончательно в выборку попали 46 рассеянных скоплений. Их список приведен в табл. 2. Табл. 2 содержит название скопления, экваториальные и галактические координаты, гелиоцентрическое расстояние и логарифм возраста.

4. Заключение

В работе рассмотрены те возможности, которые открывают наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне для исследования рассеянных звездных скоплений, а именно населения белых карликов и голубых бродяг в скоплениях. Голубые бродяги являются абсолютно самыми яркими звездами в скоплении, что существенно облегчает их выделение. Белые карлики в ультрафиолетовом диапазоне намного ярче, чем в видимом, и намного ярче предельной величины телескопа «Спектр-УФ». В настоящей работе мы опирались на данные наблюдений телескопа Хаббла в полосах F225W и F336W. Телескоп «Спектр-УФ» планируется оснастить фильтрами F255W и F336W. Полосы F225W и F255W имеют ширину около 500 ангстрем и сильно перекрываются, поэтому результаты наблюдения в полосе F255W не должны сильно отличаться от результатов телескопа Хаббла. Наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне также позволяют обнаруживать неразрешенные двойные системы, в которых одним из компонентов является белый карлик, увереннее, чем при наблюдениях в видимом диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2023-0019.

Таблица 2: Выборка скоплений для исследования населения белых карликов и голубых бродяг на телескопе «Спектр-УФ».

Скопление	RA	Dec	l	b	Расстояние	log t
	градусы	градусы	градусы	градусы	пк	t в годах
Tombaugh 2	105.7717	-20.8187	232.8343	-6.8804	9000	9.4
Berkeley 54	315.7443	40.4306	83.0737	-4.1350	7000	9.3
IC 1311	302.6926	41.1742	77.7008	4.1812	6700	9.1
Berkeley 31	104.3961	8.2813	206.2387	5.1230	6200	9.6
NGC 1193	46.4837	44.3826	146.8131	-12.1636	5500	9.7
IC 166	28.0963	61.8575	130.0525	-0.1687	5400	9.0
Berkeley 36	109.1044	-13.2013	227.5013	-0.5661	5000	9.5
NGC 1798	77.9176	47.6898	160.7066	4.8513	4800	9.1
NGC 2849	139.8524	-40.5211	265.2762	6.3625	4800	9.1
Berkeley 24	99.4553	-0.8711	212.1546	-3.4268	4700	9.1
Melotte 66	111.5672	-47.6817	259.5650	-14.2675	4700	9.7
NGC 6791	290.2238	37.7763	69.9638	10.9037	4400	9.9
Berkeley 39	116.6955	-4.6582	223.5232	10.0845	4400	9.8
NGC 2141	90.7312	10.4444	198.0473	-5.8099	4200	9.5
Berkeley 27	102.8400	5.7748	207.7800	2.6124	4200	9.5
NGC 2204	93.8823	-18.6789	226.0248	-16.1167	4100	9.3
NGC 2243	97.3918	-31.2826	239.4775	-18.0139	4000	9.5
Berkeley 12	71.0972	42.6872	161.6413	-2.018	3800	9.2
NGC 7423	343.7816	57.0918	107.6096	-2.2789	3700	9.1
Haffner 10	112.1592	-15.3688	230.8089	1.0215	3700	9.7
NGC 2192	93.8238	39.8435	173.4264	10.6512	3500	9.1
IC 361	64.7376	58.2578	147.5087	5.6660	3400	9.1
Berkeley 32	104.5283	6.4300	207.9564	4.4058	3300	9.7
NGC 2266	100.8304	26.9769	187.7838	10.2979	3300	9.0
Trumpler 5	99.1284	9.4601	202.8197	1.0210	3300	9.5
NGC 2506	120.0106	-10.7752	230.5717	9.9376	3200	9.3
NGC 7044	318.2871	42.4976	85.8921	-4.1481	3200	9.1
Berkeley 8	30.3075	75.4802	127.3606	13.2120	3200	9.5
King 11	356.9201	68.6348	117.1530	6.4814	2900	9.6
NGC 2262	99.9030	1.1507	210.5584	-2.1053	2900	9.0
Collinder 261	189.5122	-68.3777	301.6933	-5.5382	2800	9.9
Berkeley 44	289.3109	19.5487	53.2156	3.3446	2800	9.1
NGC 1245	48.6845	47.2359	146.6533	-8.9282	2800	9.1
NGC 2425	114.5717	-14.8835	231.5091	3.2953	2700	9.6
NGC 2660	130.6677	-47.1983	265.9313	-3.0067	2600	9.1
NGC 6819	295.3291	40.1903	73.9826	8.4798	2400	9.4
NGC 2420	114.6052	21.5716	198.1123	19.6414	2400	9.3
Melotte 72	114.6193	-10.7012	227.8660	5.3686	2400	9.1
NGC 4337	186.0177	-58.1274	299.3140	4.5520	2400	9.2
NGC 2509	120.1998	-19.0583	237.8456	5.8443	2400	9.2
Tombaugh 1	105.1310	-20.5756	232.3465	-7.3094	2300	9.1
NGC 6005	238.9586	-57.4422	325.7800	-2.9932	2200	9.0
LP 866	261.7523	-39.4065	349.1066	-2.3974	2200	9.1
King 5	48.6759	52.6932	143.7663	-4.2847	2200	9.0
Pismis 12	140.0058	-45.1302	268.6522	3.2096	2100	9.1
NGC 7142	326.2842	65.7814	105.3501	9.4907	2000	9.6

Список литературы

1. J. A. Ahumada and E. Lapasset, *Astron. and Astrophys.*, **463**, 789, 2007.
2. M. J. Rain, J. A. Ahumada, and G. Carraro, *Astron. and Astrophys.*, **650**, A67, 2021.
3. F. R. Ferraro, G. Beccari, E. Dalessandro, B. Lanzoni, et al., *Nature*, **462**, 1028, 2009.
4. E. Dalessandro, F. R. Ferraro, D. Massari, B. Lanzoni, et al., *Astrophys. J.*, **778**, 135, 2013.
5. Y. Xin, F. R. Ferraro, P. Lu, L. Deng, B. Lanzoni, E. Dalessandro, and G. Beccari, *Astrophys. J.*, **801**, 67, 2015.
6. L. Šubr, J. Schovancová, and P. Kroupa, *Astron. and Astrophys.*, **496**, 695, 2009.
7. A. M. Geller, R. D. Mathieu, H. C. Harris, and R. D. McClure, *Astron. J.*, **137**, 3743, 2009.
8. R. D. Mathieu and A. M. Geller, *Nature*, **462**, 1032, 2009.
9. A. M. Geller and R. D. Mathieu, *Nature*, **478**, 356, 2011.
10. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **427**, 127, 2012.
11. J. Parada, H. Richer, J. Heyl, J. Kalirai, and R. Goldsbury, *Astrophys. J.*, **826**, 88, 2016.
12. J. Parada, H. Richer, J. Heyl, J. Kalirai, and R. Goldsbury, *Astrophys. J.*, **830**, 139, 2016.
13. S. Chen, H. Richer, I. Caiazzo, and J. Heyl, *Astrophys. J.*, **867**, 132, 2018.
14. P. A. Bergbusch and P. B. Stetson, *Astron. J.*, **138**, 1455, 2009.
15. W. S. Dias, H. Monteiro, A. Moitinho, J. R. D. Lépine, G. Carraro, E. Paunzen, B. Alessi, and L. Villela, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **504**, 356, 2021.
16. A. A. Malofeeva, A. F. Seleznev, and G. Carraro, *Astron. J.*, **163**, 113, 2022.
17. A. A. Malofeeva, V. O. Mikhnevich, G. Carraro, and A. F. Seleznev, *Astron. J.*, **165**, 45, 2023.

УФ-излучение первых звезд и линия поглощения 21 см нейтрального водорода

Ерошенко Ю.Н.

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

УФ-излучение первых звезд, формирующихся в догалактическую эпоху, приводит к выравниваю спиновой и кинетической температуры нейтрального водорода за счет эффекта Ваутхейзена-Филда, что создает условия для дополнительного поглощения реликтовых фотонов в линии 21 см. В данной работе исследовано поглощение на звуковых волнах, генерируемых эволюционирующими объектами из темной материи в масштабах массы Джинса. Ранее этот канал поглощения не учитывался. Выполнен расчет структуры звуковых волн и поля скоростей в них. Источник гравитационного поля, создающий волну, может находиться как на линейной стадии, если возмущение в темной материи слабое, так и на нелинейной, когда сгущение темной материи уже обособилось и вириализовалось. Пекулярные скорости барионов в звуковой волне (во втором порядке по скорости) ответственны за дополнительное поглощение реликтового излучения в линии 21 см. Хотя эффект дополнительного поглощения мал, с повышением точности наблюдений он может быть замечен. Дополнительное поглощение может иметь большую величину в случае нестандартного спектра космологических возмущений на малых масштабах. Поглощение реликтового излучения в линии 21 см может давать косвенную информацию об УФ-фоне в ранней Вселенной и его источниках. Статья основана на материалах, представленных на Всероссийской научной конференции «Ультрафиолетовая Вселенная — 2023».

Поступила в редакцию 24.10.2023 г. Принята в печать 12.12.2023 г.

Ключевые слова: УФ-излучение, радиоастрономия, линия 21 см, темная материя

UV radiation of the first stars and the 21 cm absorption line of neutral hydrogen

Eroshenko Yu.N.

Institute for Nuclear Research of the RAS, Moscow, Russia

UV radiation of the first stars formed in the pre-galactic epoch leads to equalization of the spin and kinetic temperature of neutral hydrogen due to the Wouthuysen-Field effect, which creates conditions for additional absorption of relic photons in the 21 cm line. In this work, absorption on sound waves generated by evolving dark matter objects at mass scales smaller than the Jeans mass is investigated. Previously, this absorption channel was not taken into account. The structure of sound waves and velocity fields in them are calculated. The source of the gravitational field that creates the wave can be both at the linear stage, if the perturbation in the dark matter is weak, and at the nonlinear stage, when the dark matter condensation has already separated and virialized. The peculiar velocities of the baryons in the sound wave (in the second order of velocity) are responsible for the additional absorption of the relic radiation in the 21 cm line. Although the effect of additional absorption is small, with an increase in the accuracy of observations, it can be noticed. The additional absorption may have a large value in the case of a non-standard spectrum of cosmological disturbances on small scales. Absorption of the relic radiation in the 21 cm line can provide indirect information about the UV background in the early Universe and its sources. This paper is based on a talk presented at “Ultraviolet Universe — 2023” conference.

Received 24.10.2023. Accepted 12.12.2023.

Keywords: UV radiation, radio astronomy, 21 cm line, dark matter

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.5.008

1. Введение

В последние 10–20 лет точность наблюдений в космологии существенно возросла и продолжает увеличиваться. Некоторые космологические постоянные и характеристики ряда процессов известны уже с погрешностью на уровне процента. В связи с этим можно ожидать, что для количественного описания всего массива наблюдательных данных потребуется учет слабых эффектов, которыми ранее пренебрегали. Один из таких эффектов — поглощение в линии нейтрального водорода 21 см на звуковых волнах в эпоху Темных веков — рассматривается в данной работе.

Космологической эпохой Темных веков называют интервал времени между рекомбинацией водорода и реионизацией Вселенной. В течение большей части этого интервала не было источников света, чем и обусловлено название. Лишь в конце эпохи Темных веков начали появляться первые звезды и галактики, которые, вероятно, и вызвали повторную ионизацию. Несмотря на отсутствие источников излучения, эпоха Темных веков представляет значительный интерес. Вселенная в это время была заполнена нейтральным газом, практически отсутствовали сильные неоднородности, ударные волны и т. п. Физика процессов не была осложнена хаотическими факторами, и на этом спокойном фоне удобно исследовать различные слабые процессы в ранней Вселенной. Новый всплеск интереса к эпохе Темных веков возник в связи с запуском космического телескопа им. Дж. Уэбба, который наблюдает галактики на красных смещениях порядка 10,

т. е., в конце эпохи Темных веков. Галактик оказалось больше, чем ожидалось, и это может быть связано с нестандартным спектром космологических возмущений плотности [1]. Также загадкой остается наличие квазаров на больших красных смещениях $z > 7$. Весьма вероятно, что для объяснения наличия сверхмассивных черных дыр в столь ранние времена требуются затравки в виде массивных первичных черных дыр.

Помимо наблюдения первых галактик в ИК-диапазоне, инструментом для изучения состояния газа в эпоху Темных веков служит поглощение в линии 21 см [2]. Линия 21 см соответствует переходам между уровнями сверхтонкого расщепления в атомах нейтрального водорода. За счет космологического красного смещения эта линия в настоящее время смещена в метровый диапазон радиоволн. Появление первых звезд и их УФ-излучение влияет на спиновую температуру газа и, тем самым, косвенно влияет на поглощение в линии 21 см. Таким образом, наблюдения в радиодиапазоне могут давать информацию о первых звездах и их УФ-излучении.

Населенность уровней атомов водорода зависит от так называемой спиновой температуры T_s , которая может быть не равна кинетической температуре газа. Если плотность газа достаточно мала, то взаимные столкновения атомов и столкновения атомов с электронами не успевают выравнивать спиновую температуру и кинетическую (это имеет место на $z \leq 30$). Спиновая температура зависит от температуры реликтового излучения, от кинетической температуры газа и от эффективной цветовой температуры УФ-излучения, испускаемого первыми редкими звездами. Если бы не было звезд, то при $z \leq 30$ спиновая температура газа выровнялась бы с температурой реликтового излучения, и поглощение в линии 21 см прекратилось бы. Но даже очень редкие первые звезды принципиально изменяют ситуацию за счет эффекта Ваутхейзена-Филда (см. подробности в обзоре [2]). Излучение звезд в области энергий лайман-альфа вызывает переходы между уровнями лайман-альфа и подуровнями сверхтонкого расщепления основного уровня водорода. За счет этого кинетическая температура газа и подуровни сверхтонкого расщепления оказываются связаны посредством внешних уровней, и спиновая температура приближается к кинетической температуре газа. Важно то, что нерелятивистский газ охлаждается быстрее, чем реликтовое излучение, поэтому спиновая температура становится меньше, чем температура реликтового излучения, и в этих условиях возможно поглощение в линии 21 см. Глубина поглощения зависит от темпа появления первых звезд, точнее, от потока их УФ-излучения в области лайман-альфа. Действительно, наблюдения радиотелескопов системы EDGES в Австралии показали наличие поглощения в линии 21 см [3], хотя на красном смещении порядка 17 поглощение оказалось в два раза сильнее, чем ожидается.

Если в газе есть неоднородности, то с ними будут связаны пекулярные скорости движения газа и некоторое дополнительное поглощение (по отношению к поглощению в однородном газе). Поглощения такого типа соответствует эффекту Соболева, а в космологии этот эффект обсуждался в работах [4] и [5] применительно к молекулам. Также в работе [6] изучалось поглощение в линии 21 см на периферии первых галактик.

Обычно в исследованиях наибольшее внимание уделяется достаточно большим объектам из темной материи (ТМ), способным захватывать газ, из которого затем могли образовываться звезды. Это происходило в достаточно массивных гало из ТМ (при массах $\geq (10^7 - 10^8)M_\odot$), в которых есть механизмы охлаждения газа. Захват газа возможен в гало ТМ, которые имеют массу, большую массы Джинса ($\sim 10^5 M_\odot$). Если масса гало меньше джинсовской, то такой объект барионы не захватывает. Газ разбегается от них в виде звуковых волн, которые затухают и, как обычно считается, не представляют интереса. Целью данной работы является выяснение вопроса о том, какова величина поглощения в линии 21 см на таких волнах. Можно заранее ожидать, что это поглощение слабое, но численное значение данного эффекта ранее получено не было. Если даже эффект поглощения в звуковых волнах слаб, то в будущем по мере возрастания точности космологических наблюдений подобные малые эффекты, возможно, станут доступны для изучения.

2. Структура звуковой волны

Рассматриваем сферически-симметричное возмущение плотности в ТМ. Избыток плотности ТМ создает гравитационное поле, которое действует на барионный газ. Газ растекается от центра медленнее, чем по закону Хаббла, и такой избыток плотности мы называем звуковой волной. В работе [7] было получено линеаризованное уравнение для эволюции возмущений. Мы следуем похожей методике, но рассматриваем двухкомпонентную среду, состоящую из ТМ и барионного газа. Двухкомпонентная среда из ТМ и барионов рассматривалась в работе [8], но только в линейном приближении для обоих компонентов и на красных смещениях $z > 150$. Мы рассматриваем эпоху $z < 150$, когда прекращается подогрев барионного газа за счет рассеяния фотонов реликтового излучения. Обобщая выполненный в работе [7] вывод уравнения для эволюции сферически-симметричных возмущений в барионном газе с учетом ТМ, получаем

$$\frac{\partial^2 \delta_B}{\partial t^2} + 2H \frac{\partial \delta_B}{\partial t} = 4\pi G (\Delta \rho_D + \Delta \rho_B) + \frac{v_s^2}{a^2} \left(\frac{\partial^2 \delta_B}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial \delta_B}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где $\delta_B = \Delta \rho_B / \bar{\rho}_B$ — возмущение плотности барионного газа, $\Delta \rho_D$ — отклонение плотности ТМ от средней космологической плотности $\bar{\rho}_D$ (и аналогичные величины $\Delta \rho_B$ и $\bar{\rho}_B$ для барионов), $a(t)$ — масштабный фактор

Вселенной, $H(t)$ — постоянная Хаббла, $x = r/a(t)$ — сопутствующая координата, $v_s \simeq [5k_B T(z)/(3m_p)]^{1/2}$ — скорость звука, $T(z)$ — температура газа, k_B — постоянная Больцмана, m_p — масса протона.

Еще одно важное отличие уравнения (1) от уравнения, полученного в [7], заключается в том, что мы линеаризовали уравнение во всех частях, за исключением источника гравитационного поля $4\pi G(\Delta\rho_D + \Delta\rho_B)$, который в нашем случае может быть и нелинейным. Нелинейным источником мы называем сгущение (минигало) ТМ, которое приближается к стадии вириализации или уже вириализовалось, т. е. $\Delta\rho_D/\bar{\rho}_D \geq 1$. Эволюцию ТМ, которая является источником гравитационного поля для барионов, мы рассматриваем в линейном и в нелинейном режиме с помощью известного точного решения для сферической «top-hat» модели. При этом предполагается, что звуковая волна в барионном газе линейная, $\delta_B \ll 1$. Насколько нам известно, в таком комбинированном подходе уравнение (1) раньше не решалось.

Рассматриваем красные смещения $z \leq z_1 = 150$, когда газ охлаждается адиабатически по мере расширения Вселенной (здесь и далее индексом «1» отмечаются величины на $z = z_1$). Уравнение (1) сводится к уравнению с постоянными коэффициентами путем замены переменных

$$\eta = 1 - \frac{t_1^{1/3}}{t^{1/3}}, \quad s = \delta_B/x. \quad (2)$$

В результате получаем

$$\frac{\partial^2 s}{\partial \eta^2} - w_s^2 \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} = f(\eta, x), \quad (3)$$

где

$$w_s = \frac{3v_1 t_1}{a_1^2}, \quad f(\eta, x) = \frac{6x}{(1-\eta)^2} \frac{\Delta\rho_D}{\bar{\rho}_D}, \quad (4)$$

и v_1 — скорость звука v_s в газе в момент z_1 . Введем обозначения

$$r_s = 3v_1 t_1 \simeq 60 \text{ пк}, \quad M_s = \frac{4\pi}{3} r_s^3 \rho_D(t_1) \simeq 10^5 M_\odot. \quad (5)$$

Величина M_s близка к массе Джинса.

Решение полученного уравнения дается формулой Даламбера

$$s(\eta, x) = \frac{1}{2w_s} \int_0^\eta d\tau \int_{x-w_s(\eta-\tau)}^{x+w_s(\eta-\tau)} \tilde{f}(\xi, \tau) d\xi. \quad (6)$$

с четным продолжением $\tilde{f}(\eta, x)$ на отрицательную полуось: $\tilde{f}(\eta, x) = f(\eta, x)$ при $x > 0$ и $\tilde{f}(\eta, -x) = \tilde{f}(\eta, x)$. Представим профиль плотности сгущения ТМ гауссианой в виде

$$\tilde{f}(x, \eta) = x\gamma(\eta)e^{-\beta(\eta)x^2}, \quad (7)$$

где общий нормировочный коэффициент учитывает эволюцию плотности темной материи сначала в линейной, а затем в нелинейной области посредством нелинейной эволюции $\Delta\rho_D/\bar{\rho}_D$. В сферической модели эволюция радиуса сгущения записывается в параметрическом виде

$$\begin{cases} R = R_{\text{eq}} \frac{3}{5\delta_{\text{eq}}} \cos^2 \theta, \\ \theta + \frac{1}{2} \sin(2\theta) = \frac{2}{3} \left(\frac{5\delta_{\text{eq}}}{3} \right)^{3/2} \frac{t-t_s}{t_{\text{eq}}}, \end{cases} \quad (8)$$

где $R_{\text{eq}} = [3M_D/(4\pi\rho_{\text{eq}})]^{1/3}$, параметр θ изменяется от θ_{eq} (в момент t_{eq} перехода Вселенной на пылевидную стадию) до $\pi/4$ (вириализация), $t_s/t_{\text{eq}} = (3\pi/4)(5\delta_{\text{eq}}/3)^{-3/2}$, $\theta_{\text{eq}} = -(\pi/2) + (5\delta_{\text{eq}}/3)^{1/2}$, δ_{eq} — возмущение плотности ТМ в момент t_{eq} . С помощью (8) рассчитывается величина

$$\frac{\Delta\rho_D}{\bar{\rho}_D} = \frac{X_{\text{eq}}^3}{X^3} - 1 = \begin{cases} \left(\frac{5\delta_{\text{eq}}}{3 \cos^2 \theta} \right)^3 \frac{(1+z_{\text{eq}})^3}{(1+z)^3} - 1; z > z_v \\ \left(\frac{10\delta_{\text{eq}}}{3} \right)^3 \frac{(1+z_{\text{eq}})^3}{(1+z)^3} - 1; z \leq z_v, \end{cases} \quad (9)$$

входящая в (4). Здесь z_v соответствует моменту вириализации при $\theta = \pi/4$ и находится численным методом.

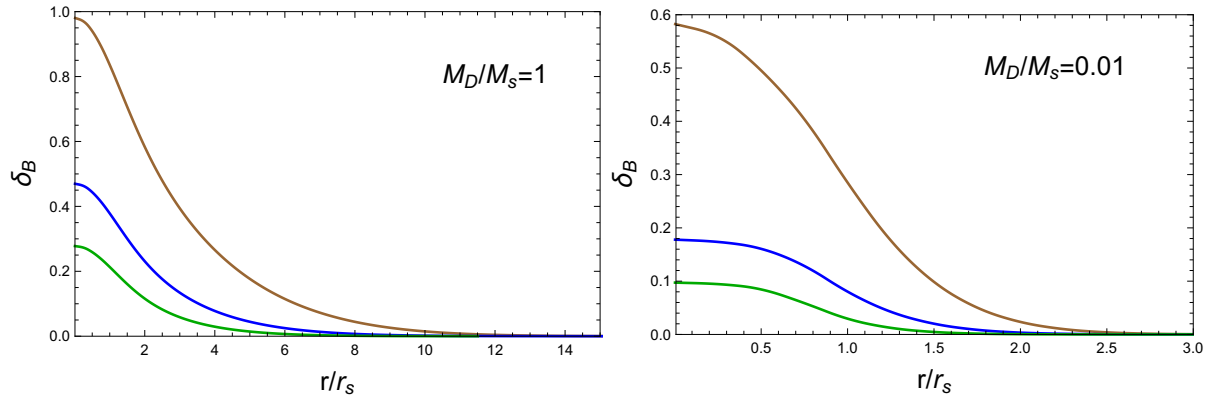


Рис. 1: Плотность в звуковой волне в зависимости от красного смещения $z = 10, 15$ и 20 (сверху вниз) для масс объекта из темной материи $M_D = M_s$ (слева) и $M_D = 0.01M_s$ (справа).

Решение (6) после интегрирования по ξ принимает вид суммы сходящейся и расходящихся волн

$$s(\eta, x) = \frac{3}{2w_s} \int_0^\eta d\tau \frac{1}{(1-\tau)^2 \beta(\tau)} \frac{\Delta\rho_D(\tau)}{\bar{\rho}_D(\tau)} \left[e^{-\beta(\tau)[x-w_s(\eta-\tau)]^2} - e^{-\beta(\tau)[x+w_s(\eta-\tau)]^2} \right]. \quad (10)$$

Сходящаяся волна важна для правильного представления плотности и скорости вблизи $x = 0$. Расстояние, на которое уйдет звуковая волна, в зависимости от красного смещения

$$r_{\max}(z) = r_s \frac{1+z_1}{1+z} \left[\left(\frac{M_D}{M_s} \right)^{1/3} + 1 - \frac{(1+z)^{1/2}}{(1+z_1)^{1/2}} \right]. \quad (11)$$

В это выражение входит размер гало темной материи и область волны за пределами гало.

Вычисляя декремент затухания, можно показать, что в эпоху Темных веков условия таковы, что звуковая волна успевает распространиться на расстояние, в десятки и сотни раз большее размеров гало ТМ до того, как затухнет в e раз. Это означает, что для рассматриваемой задачи затухание не важно, т. к. наибольшее поглощение в линии 21 см происходит в волнах, распространяющихся всего на несколько радиусов гало.

Результат расчета плотности в звуковой волне показан на рис. 1, где в качестве величин начальных возмущений δ_{eq} взяты среднеквадратичные возмущения для спектра возмущений, нормированного на данные спутника «Планк». Для менее массивных гало возмущение в газе меньше, но эволюционирует оно более резко. Это связано с тем, что менее массивные гало вириализуются рано, а возмущения с $M_D \sim M_s$ на красных смещения $z \sim 10 - 15$ в среднем еще только начинают выходить на нелинейную стадию.

3. Пекулярная скорость и поглощение в линии 21 см

Из уравнения непрерывности можно найти пекулярные скорости газа, т. е. отклонения скоростей от хаббловского закона

$$v_B = -\frac{1}{\bar{\rho}_B r^2} \int_0^r dr r^2 \left[\frac{\partial \delta \rho_B}{\partial t} + 3H \delta \rho_B + Hr \frac{\partial \delta \rho_B}{\partial r} \right]. \quad (12)$$

Результат расчета пекулярных скоростей показан на рис. 2.

Для объектов, масса которых составляет порядка 1% от джинсовской массы, пекулярная скорость оказывается больше, чем для объектов с джинсовской массой, что также связано с более ранним выходом маломассивных объектов на нелинейную стадию. Но если рассмотреть еще более легкие объекты с $M_D < 0.01M_s$, то пекулярные скорости уменьшаются из-за уменьшения гравитационного потенциала.

Рассчитаем поглощение в линии 21 см на звуковых волнах. Величина поглощения дается известным выражением, зависящим от градиента пекулярной скорости [2]

$$\delta T_b \simeq 27 x_{\text{HI}} (1 + \delta_B) \left(\frac{H}{\partial v_B / \partial s + H} \right) \left(1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_s(z)} \right) \left(\frac{1+z}{10} \frac{0.15}{\Omega_m h^2} \right) \left(\frac{\Omega_B h^2}{0.0023} \right) \text{ мК}, \quad (13)$$

где x_{HI} — доля нейтрального водорода, $T_\gamma(z)$ — температура реликтового излучения на красном смещении z , Ω_m и Ω_B — космологические параметры плотности ТМ и барионов, $h = H_0/100 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ — нормированная постоянная Хаббла в настоящий момент. Мы интегрируем выражение (13) по объему отдельной

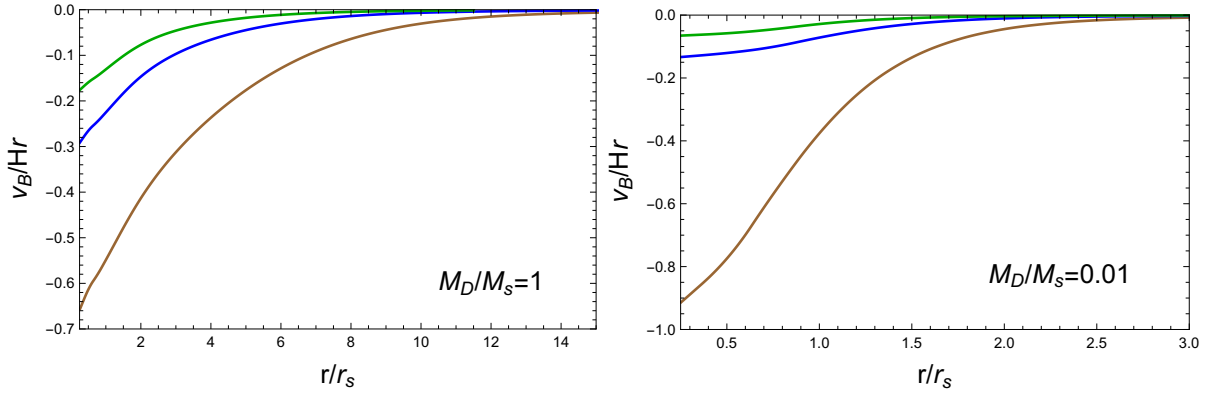


Рис. 2: Пекулярная скорость в звуковой волне в зависимости от красного смещения $z = 10, 15$ и 20 (снизу вверх) для масс объекта из темной материи $M_D = M_s$ (слева) и $M_D = 0.01M_s$ (справа).

звуковой волны вокруг одного объекта, и затем усредняем по многим объектам. Для оценки полагаем, что объекты из темной материи образуются из космологических возмущений плотности со среднеквадратичной величиной.

Градиент пекулярной скорости вдоль луча зрения на радиусе, составляющем угол ψ с прямой, которая проходит от наблюдателя через центр объекта,

$$\frac{\partial v_B}{\partial s} = \frac{\partial v_B}{\partial r} \cos \psi. \quad (14)$$

При интегрировании по сферически симметричному или по эллипсоидальному объекту первые степени скорости сокращаются, и вклад дают только квадратичные слагаемые. Усреднение по пространству зависит от расстояния между ближайшими объектами и от максимального радиуса разбегания звуковых волн. Половина среднего расстояния между соседними сгущениями ТМ с массами M составляет

$$l(z) = \frac{1}{2} \left(\frac{0.5 \rho_{\text{eq}} (1 + z_{\text{eq}})^3}{M (1 + z)^3} \right)^{-1/3}. \quad (15)$$

Обозначим

$$L(z) = \min\{l(z), r_{\text{max}}(z)\}, \quad (16)$$

тогда после интегрирования по ψ среднее по объему записывается в виде

$$\left\langle \frac{(1 + \delta_B)H}{\partial v_B / \partial s + H} \right\rangle = 1 + \frac{1}{l^3(z)} \int_0^{L(z)} dr r^2 \left(3\delta_B(r) + \frac{1}{2H^2} \left(\frac{\partial v_B}{\partial r} \right)^2 \right). \quad (17)$$

На рис. 3 представлен результат расчета для консервативного случая со спиновой температурой, приведенной в работе [2] и соответствующей умеренному УФ-излучению первых звезд, и для наиболее оптимистического случая, когда спиновая температура равна кинетической температуре газа $T_s = T_K$. Как и ожидалось, эффект поглощения на звуковых волнах очень мал. Для $z > 15$ он составляет десятые и сотые доли процента от величины поглощения в однородной Вселенной, а на $z < 15$ величина поглощения составляет несколько процентов в оптимистическом случае и десятые доли процента в указанном консервативном случае.

4. Заключение

В данной работе рассчитана структура и пекулярные скорости звуковых волн, создаваемых в эпоху Темных веков объектами темной материи с массами, меньшими массы Джинса. Выполнен расчет поглощения реликтовых фотонов в линии 21 см. Поглощение происходит, в основном, за счет наличия градиентов пекулярных скоростей во втором порядке по скорости.

Поглощение на звуковых волнах действительно имеет место, и оно зависит от УФ-излучения первых звезд посредством эффекта Ваутхейзена-Филда, но величина поглощения очень мала, на уровне нескольких процентов или долей процента. Не исключено, однако, что в будущем для интерпретации данных космологических наблюдений такие малые поправки на уровне процента необходимо будет учитывать.

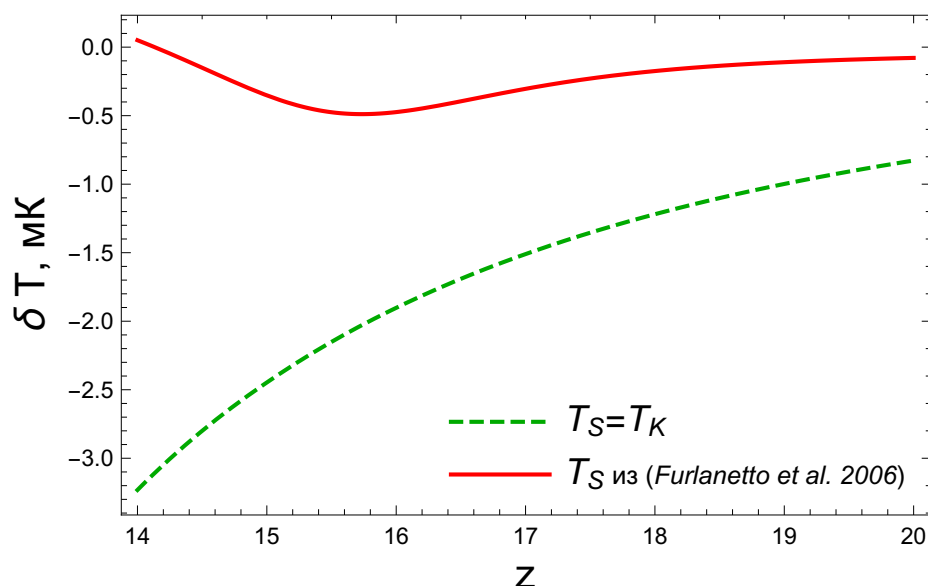


Рис. 3: Глубина поглощения в линии 21 см в зависимости от красного смещения. Верхняя сплошная кривая показывает поглощение для спиновой температуры, рассчитанной в работе [2]. Нижняя штрихованная кривая соответствует случаю, когда спиновая температура равна кинетической температуре газа.

Список литературы

1. M. V. Tkachev, S. V. Pilipenko, E. V. Mikheeva, and V. N. Lukash, *MNRAS*, **527**, 1381, 2024.
2. S. R. Furlanetto, S. P. Oh, and F. H. Briggs, *Physics Reports*, **433**, 181, 2006.
3. J. D. Bowman, A. E. E. Rogers, R. A. Monsalve, T. J. Mozdzen, and N. Mahesh, *Nature*, **555**, 67, 2018.
4. V. K. Dubrovich, *Soviet Astronomy Letters*, **3**, 128, 1977.
5. Y. B. Zel'dovich, *Soviet Astronomy Letters*, **4**, 88, 1978.
6. E. O. Vasiliev and Y. A. Shchekinov, *Astronomy Reports*, **56**, 77, 2012.
7. W. B. Bonnor, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **117**, 104, 1957.
8. P. J. E. Peebles, *Astrophys. J.*, **277**, 470, 1984.

Содержание

<i>Шмагин В.Е., Сичевский С.Г., Шугаров А.С.</i> Режимы наблюдений блока камер поля космической обсерватории «Спектр-УФ»	205
<i>Архангельский Р.Н., Иосипенко С.В.</i> Логика формирования состава российского сегмента Центра данных в области УФ-астрономии	211
<i>Архангельский Р.Н., Иосипенко С.В.</i> Прототип российского сегмента объединенного Центра данных по исследованию Луны и дальнего космоса в УФ области	216
<i>Филиппов М.Л., Мошеев А.А., Погодин А.В., Захваткин М.В., Степаньянц В.А.</i> Баллистическое проектирование миссии «Спектр-УФ»	223
<i>Холтыгин А.Ф.</i> Массивные звезды в УФ	230
<i>Бескровная Н.Г., Ихсанов Н.Р.</i> Критерии реализации магнитосферной аккреции во взрывных переменных	237
<i>Селезнев А.Ф., Михневич В.О.</i> Белые карлики и голубые бродяги в рассеянных звездных скоплениях, анализ населения на основе поиска в ультрафиолетовом диапазоне	241
<i>Ерошенко Ю.Н.</i> УФ-излучение первых звезд и линия поглощения 21 см нейтрального водорода	248

Contents

<i>Shmagin V.E., Sichevsky S.G., Shugarov A.S.</i> WSO-UV Field Camera Unit observation modes	205
<i>Arkhangelsky R. N., Iosipenko S.</i> The logic of forming the composition of the Russian segment of the Data Center in the field of UV astronomy	211
<i>Arkhangelsky R. N., Iosipenko S.</i> Prototype of the Russian segment of the joint Data Center for the Exploration of the Moon and Deep Space in the UV spectrum	216
<i>Philippov M.L., Moiseev A.A., Pogodin A.V., Zхваткин M.V., Stepanyants V.A.</i> “Spektr-UV” mission ballistic design	223
<i>Kholtygin A.F.</i> Massive stars in UV	230
<i>Beskrovnaya N.G., Ikhsanov N.R.</i> Realization criteria for magnetospheric accretion in Cataclysmic Variables	237
<i>Seleznev A.F., Mikhnevich V.O.</i> White dwarfs and blue stragglers in the open clusters, an analysis of the population at the base of a search in the ultraviolet wavelengths	241
<i>Eroshenko Yu.N.</i> UV radiation of the first stars and the 21 cm absorption line of neutral hydrogen	248