

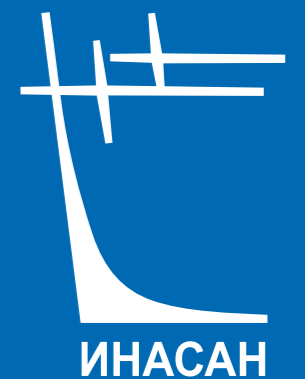
ISSN 2658-5669

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ ИНСТИТУТА АСТРОНОМИИ РАН

INASAN
SCIENCE
REPORTS

ТОМ
8

ВЫПУСК 3



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(3).** –
М.: Изд-во Янус-К, 2023, 60 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(3). M.: Janus-K, 2023, 60 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 (3)**

Сдано в набор 21.11.2023. Подписано в печать 30.11.2023
Формат 60х90/8. Бумага офсетная.
Уч.-изд. п.л. 7,5. Физ. п.л. 7,5. Тираж 100. Заказ №5248

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

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



О материалах номера

Институт астрономии РАН, Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ) и Международная общественная организация «Астрономическое общество» (АстрО) выступили инициаторами проведения Всероссийской конференции с международным участием «Физика звёзд: теория и наблюдения», которая с успехом прошла 26–30 июня 2023 года в ГАИШ МГУ. Конференция продолжила традиции, заложенные конференциями по физике звёздных атмосфер, регулярно проводившимися с 1976 года сначала в Советском Союзе, а затем в России, Украине, Азербайджане.

Тематика нашей конференции касалась проблем в таких областях, как наблюдения звёзд, определение фундаментальных параметров звёзд, моделирование атмосфер звёзд и формирования спектров, исследования магнитных полей, вспышечной активности звёзд, околозвёздных дисков и экзопланет, переменных и пульсирующих звёзд, тесных двойных систем, поздних стадий эволюции звёзд и компактных объектов. По каждому из направлений были заслушаны обзорные, тематические и устные доклады, всего 63 доклада, и представлены 30 стендовых докладов. Научная программа была дополнена вечерней научно-популярной лекцией «Тёмное и спокойное небо», прочитанной чл.-корр. РАН Б.М. Шустовым. Программу заседаний можно найти на сайте конференции <https://agora.guru.ru/stars-2023>.

В конференции приняли участие 108 человек, из них 75 — в очном формате. Это представители 16 российских астрономических институтов и обсерваторий, а также учёные из Азербайджана, Армении и Узбекистана. С удовлетворением отмечаем, что почти 40% участников (42 человека) — молодые люди в возрасте до 35 лет, и большинство из них участвовали в очном формате.

Все статьи, представленные в этом и предыдущем выпусках «Научных трудов Института астрономии РАН», подготовлены по материалам докладов конференции «Физика звёзд: теория и наблюдения».

Со-председатели организационного комитета конференции
чл.-корр. РАН Постнов К.А.
д.ф.м.н. Самусь Н.Н.
д.ф.м.н. Сачков М.Е.

Определение параметров протяженных атмосфер с использованием сеток моделей

Костенков А.Е., Винокуров А.С., Соловьева Ю.Н.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

В данной работе мы представляем большой набор сеток моделей и их применение в рамках определения параметров ветров сверхкритических аккреционных дисков. Модели были рассчитаны с различными радиусами ($R_* = 5, 20, 40R_\odot$), скоростями (300, 600 км с⁻¹), содержаниями водорода (20%, 40%, 50%, солнечное содержание водорода) и металличностями ($Z = 0.1 - 1.0Z_\odot$) для широкого набора температур 16 – 56 кК при темпах потери массы $10^{-5} - 10^{-4}M_\odot$ год⁻¹. Обсуждается алгоритм выбора оптимальной модели ветра для наилучшего описания наблюдаемого спектра, а также применимость подобных моделей для ультраярких рентгеновских источников.

Поступила в редакцию 01.08.2023 г. Принята в печать 18.08.2023 г.

Ключевые слова: ветры аккреционных дисков, звездные ветры, протяженные атмосферы

Determination of extended atmospheres parameters using model grids

Kostenkov A.E., Vinokurov A.S., Solovyeva Yu.N.

Special Astrophysical Observatory of the RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia

In this paper we present a large set of model grids and their application for determination of wind parameters of supercritical accretion disks. The models were calculated with different radii ($R_* = 5, 20, 40R_\odot$), velocities (300, 600 km s⁻¹), hydrogen abundances (20%, 40%, 50%, solar hydrogen abundance) and metallicities ($Z = 0.1 - 1.0Z_\odot$) for a wide range of temperatures 16 – 56 kK and mass-loss rates $10^{-5} - 10^{-4}M_\odot$ year⁻¹. We discuss algorithm for optimal model selection and validity of such models for ultraluminous X-ray sources winds.

Received 01.08.2023. Accepted 18.08.2023.

Keywords: accretion disk winds, stellar winds, extended atmospheres

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.001

1. Введение

Считается, что большинство ультраярких рентгеновских источников (ultraluminous X-ray sources, ULXs) представляют собой двойные системы с аккрецирующими в сверхэдингтоновском (сверхкритическом) режиме нейтронными звездами или черными дырами звездных масс [1]. Такой режим аккреции позволяет объяснять многие наблюдаемые эффекты, включая огромные рентгеновские светимости ULX, превышающие 10^{39} эрг с⁻¹ в диапазоне 0.3–10 кэВ (для случая изотропно излучающего источника). Главной отличительной особенностью сверхкритических дисков является наличие мощных истечений материи (ветра) из его центра, что было предсказано еще в 1970-х годах [2]: свидетельства таких истечений были найдены как в рентгеновском [3], так и в оптическом диапазонах [4]. Детальное исследование эмиссионных линий в оптических спектрах объектов позволило выдвинуть предположение о схожести ветров ULX со звездными ветрами [4], что дало повод для проверки применимости к ним методов моделирования протяженных звездных атмосфер.

Расчет модельных спектров позволяет определить фундаментальные параметры исследуемого объекта (болометрическая светимость, эффективная температура) и физические характеристики ветра (темп потери массы, химический состав газа, терминальную скорость и другие). Однако состояние истекающего вещества далеко от локального термодинамического равновесия (ЛТР), поэтому при расчете протяженных атмосфер необходимо учитывать множество не-ЛТР эффектов, связанных с влиянием поля излучения на состояние вещества в ветре. Вычисление моделей подразумевает получение согласованного решения уравнений переноса и статистического равновесия итеративным путем [5], время расчета одной сферически-симметричной модели расширяющейся атмосферы в не-ЛТР режиме с учетом покровного эффекта может достигать нескольких часов. Для сокращения времени подбора модели мы предлагаем использование предвычисленных сеток моделей протяженных атмосфер, а также некоторый набор методов для работы с ними.

2. Методы

Для расчета сеток моделей протяженных атмосфер нами был использован не-ЛТР код CMFGEN [9]. Скоростной закон ветра описывался в рамках простого β -закона [10]. При расчетах использовались два варианта скоростного распределения: стандартное для звездных ветров ($\beta = 1.0$) и распределение с протяженной зоной ускорения ветра ($\beta = 4.0$). Температуры моделей T_*^1 рассчитывались в пределах 16 – 56 кК при темпах

¹Здесь и далее под температурой подразумевается температура на гидростатическом радиусе $\tau_{\text{Ross}} \gtrsim 20$.

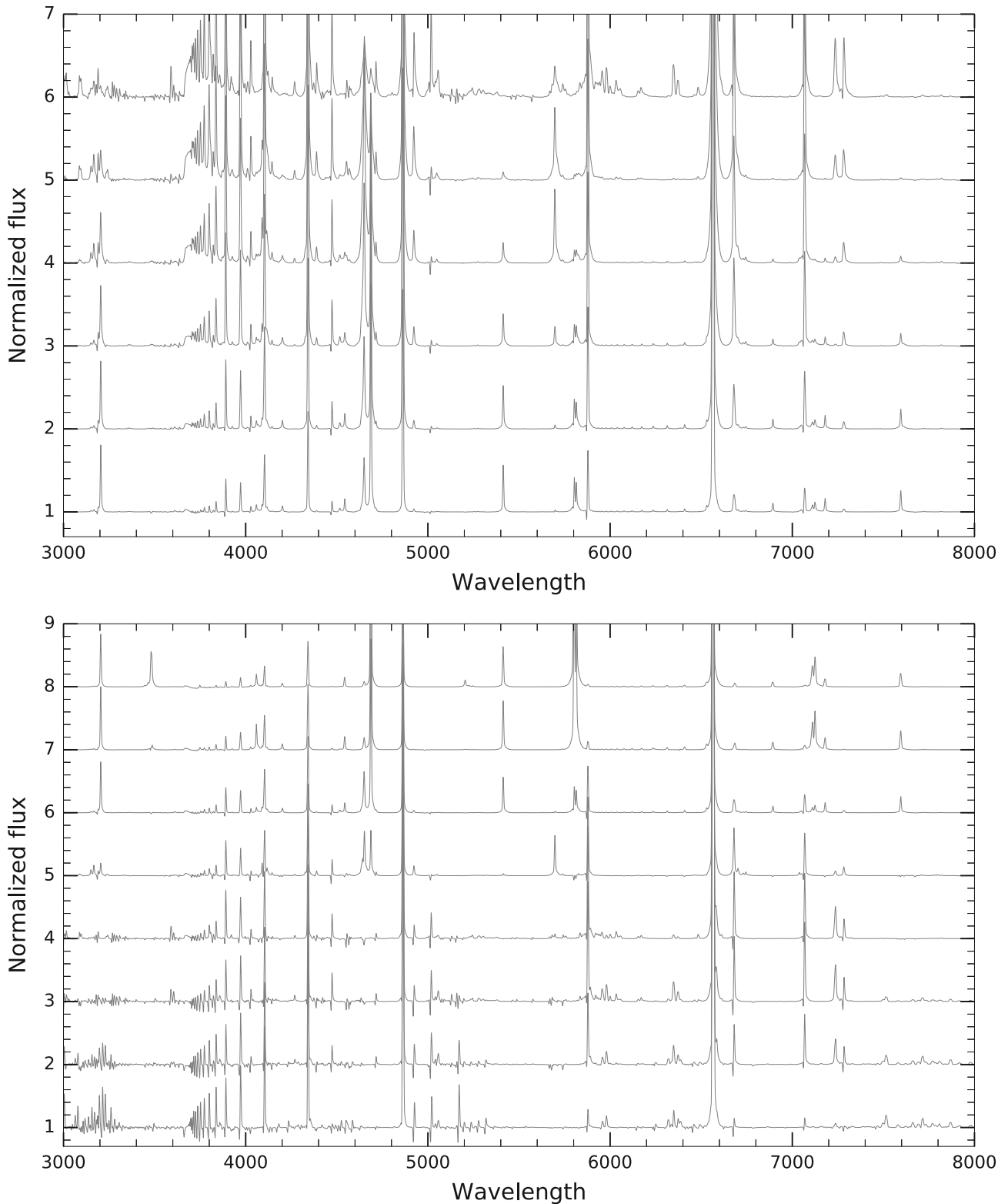


Рис. 1: Верхняя панель: нормированные модельные спектры в диапазоне $\dot{M} = 10^{-5} - 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ (снизу вверх, шаг $\Delta \log \dot{M} = 0.2$) при фиксированной температуре $\approx 38 \text{ кК}$. Нижняя панель: нормированные модельные спектры в диапазоне $T_* = 16 - 53 \text{ кК}$ (снизу вверх, шаг $\Delta \log T = 0.075$) при фиксированном темпе потери массы $10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Модельные спектры сглажены со спектральным разрешением 5 \AA .

потери массы $10^{-5} - 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ Для большей части моделей терминальная скорость ветра составляла $v_{\infty} = 300 \text{ км с}^{-1}$, некоторые сетки моделей также представлены при $v_{\infty} = 600 \text{ км с}^{-1}$. Модели были рассчитаны с радиусами $R_{\odot} = 5, 20, 40 R_{\odot}$ и металличностями $Z = 0.1 - 1.0 Z_{\odot}$ при пониженном (20%, 40%, 50%)

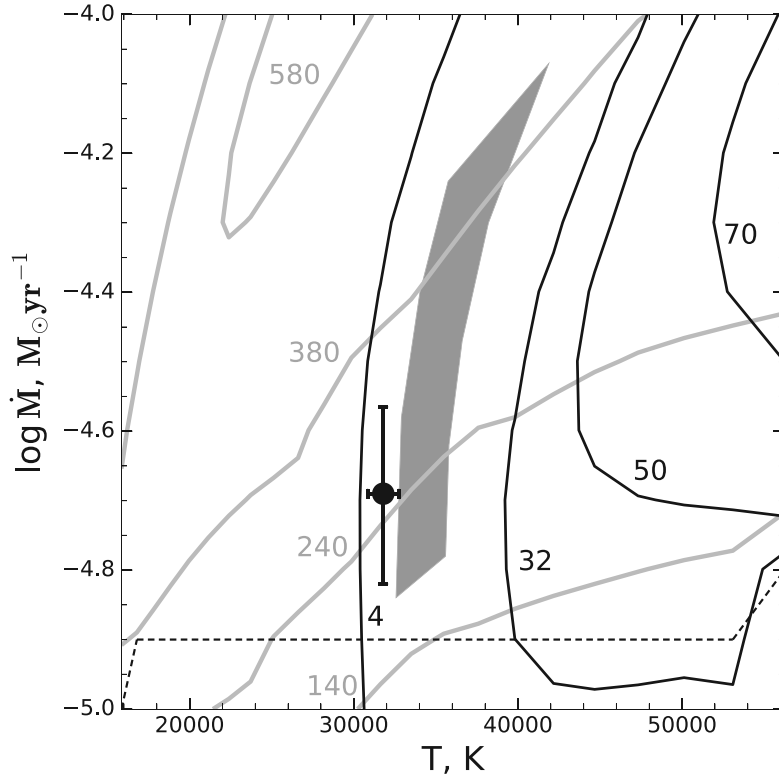


Рис. 2: Диаграмма эквивалентных ширин линий $H\alpha$ (серые линии) и $He\ II\ \lambda 4686$ (черные линии). Серой области соответствует возможный 1σ диапазон оценок параметров для SS433 по ряду разновременных измерений эквивалентных ширин эмиссионных линий из работ [6, 7]; черная точка с баром ошибок соответствует одному из одновременных измерений, полученных для NGC 300 ULX-1 [8]. Модели, расположенные выше черной пунктирной линии, соответствуют критерию $v_{\text{phot}} > 0.3 v_{\infty}$.

и солнечном содержании водорода. Отношение содержания азота к углероду относительно солнечного было увеличено до ~ 10 в моделях с пониженным содержанием водорода. Объемный фактор заполнения вещества в ветре составлял $f_{\text{cl}} = 0.3$, для некоторого набора сеток также были рассчитаны модели с однородной структурой ветра.

Всего было рассчитано 35 сеток моделей, каждая из которых включает в себя 253 модели с шагом $\Delta \log \dot{M} = 0.1$ и $\Delta \log T = 0.025$. При расчете сетки моделей с фиксированным радиусом вариация температур осуществлялась при помощи изменения светимости для сохранения одинаковой плотности ветра между моделями с разными температурами. Масштабирование параметров для светимости, соответствующей наблюдательным данным, осуществляется при помощи соотношения, приведенного в работе [11]. Примеры синтетических спектров для $\beta = 1.0$, солнечного содержания водорода, $Z = 1.0 Z_{\odot}$ и $f_{\text{cl}} = 0.3$ при различных температурах и темпах потери массы изображены на рис. 1.

Ввиду сложного влияния параметров протяженной атмосферы на наблюдаемые спектры определение основных параметров ветра является сложной задачей, предполагающей комплексный подход в рамках спектроскопического анализа. Как видно из рис. 1, как температура, так и темп потери массы оказывают существенное влияние на ионизационный баланс в ветре. Например, отношение эквивалентных ширин линий $He\ II/He\ I$, часто используемое как критерий для определения температуры фотосферы горячих звезд, может изменяться в несколько раз при варьировании плотности протяженной атмосферы. Одним из способов получения оценок темпа потери массы является измерения эквивалентных ширин водородных линий Бальмеровской серии. В работе [11] авторами был предложен метод определения параметров ветра при помощи диаграмм эквивалентных ширин, позволяющий наглядно оценить совокупное влияние параметров моделей на соотношение выбранных линий. В дальнейших исследованиях для автоматизированного подбора оптимальной модели атмосферы по набору эквивалентных ширин могут быть использованы различные методики регрессионного анализа. Для учета формы спектра и профилей линий необходимо использование множества точек синтетического спектра. Уменьшение размерности модели без существенной потери информации возможно при помощи метода главных компонент [12].

3. Результаты

В случае протяженной атмосферы ветра сверхкритического диска мы ожидаем, что выше радиуса фотосферы 10^{11} см [1] изменения скорости ветра невелики ввиду того, что истечение происходит с радиуса сферизации $R_{sp} \sim 10^8 - 10^9$ см [2], а значит большая часть зоны ускорения скрыта от наблюдателя оптически плотным веществом. В качестве минимального допустимого значения скорости ветра на фотосфере нами было принято значение $v_{phot} = 0.3 v_{\infty}$. Это является принципиальным отличием от моделей, представленных в работе [11].

При принятых ограничениях на соотношение скоростей, которые эквивалентны большой протяженности атмосферы, эмиссионные линии в модельных спектрах всегда имеют исключительно высокие значения эквивалентных ширин, которые примерно на порядок величины превышают характерные для ULX значения [4]. На рис. 2 представлены диапазоны эквивалентных ширин линий $\text{H}\alpha$ и $\text{He II } \lambda 4686$ для сетки моделей с параметрами $v_{\infty} = 300 \text{ км с}^{-1}$, $\beta = 1.0$, $Z = 1.0 Z_{\odot}$, $f = 0.3$ при солнечном содержании водорода. Из объектов со сверхкритическим диском в область диаграммы попадают лишь отдельные объекты, такие как NGC 300 ULX-1 и SS 433. Оценки темпа потери массы SS433, пересчитанные для светимости $10^6 L_{\odot}$, составляют $3 \times 10^{-5} - 10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, а температуры фотосферы $18 - 28$ кК. Несмотря на относительно неплохое согласие наших оценок с результатами измерений темпа потери массы и температуры фотосферы, полученными другими методами [13, 14, 6, 15], стоит упомянуть о хорошо известном отклонении ветра SS 433 от сферически симметричного (см. обзор [15]), что является серьезным препятствием для более детального моделирования объекта в рамках наших моделей.

Относительно низкие значения эквивалентных ширин линий большинства ULX могут свидетельствовать в пользу наличия дополнительного источника континуального излучения, роль которого может играть достаточно широкий канал ветра сверхкритического диска [1] или массивная звезда-донор. Если эмиссионный спектр ULX целиком формируется в ветре донора (хотя в работе [4] приводятся аргументы против этого), то темпы истечения в таких ветрах и их температуры должны соответствовать звездам типа WNLh.

Финансирование

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект No. 21-72-10167 «Ультраяркие рентгеновские источники: ветер и доноры»).

Список литературы

1. S. N. Fabrika, K. E. Atapin, A. S. Vinokurov, and O. N. Sholukhova, *Astrophysical Bulletin*, **76**, 6, 2021.
2. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev, *Astron. and Astrophys.*, **24**, 337, 1973.
3. C. Pinto, M. J. Middleton, and A. C. Fabian, *Nature*, **533**, 64, 2016.
4. S. Fabrika, Y. Ueda, A. Vinokurov, O. Sholukhova, and M. Shidatsu, *Nature Physics*, **11**, 551, 2015.
5. D. Mihalas, *Stellar atmospheres. Second edition*, W. H. Freeman & Company, San Francisco (1978).
6. D. R. Gies, M. V. McSwain, R. L. Riddle, Z. Wang, P. J. Wiita, and D. W. Wingert, *Astrophys. J.*, **566**, 1069, 2002.
7. T. C. Hillwig, D. R. Gies, W. Huang, M. V. McSwain, M. A. Stark, A. van der Meer, and L. Kaper, *Astrophys. J.*, **615**, 422, 2004.
8. V. A. Villar, E. Berger, R. Chornock, R. Margutti, et al., *Astrophys. J.*, **830**, 11, 2016.
9. D. J. Hillier and D. L. Miller, *Astrophys. J.*, **496**, 407, 1998.
10. H. J. G. L. M. Lamers, F. Najarro, R. P. Kudritzki, P. W. Morris, et al., *Astron. and Astrophys.*, **315**, L229, 1996.
11. A. Kostenkov, A. Vinokurov, Y. Solovyeva, K. Atapin, and S. Fabrika, *Astrophysical Bulletin*, **75**, 182, 2020.
12. C. Vogl, W. E. Kerzendorf, S. A. Sim, U. M. Noebauer, S. Lietzau, and W. Hillebrandt, *Astron. and Astrophys.*, **633**, A88, 2020.
13. K. M. Blundell, A. J. Mioduszewski, T. W. B. Muxlow, P. Podsiadlowski, and M. P. Rupen, *Astrophys. J. Lett.*, **562**, L79, 2001.
14. Y. Fuchs, L. Koch-Miramond, and P. Abraham, in P. O. Slane and B. M. Gaensler, eds., *Neutron Stars in Supernova Remnants*, **271**, 369 (2002).
15. S. Fabrika, *Astrophysics and Space Physics Reviews*, **12**, 1, 2004.

Переменные звезды в области рассеянного звездного скопления NGC 6819

Гайсин Р.А., Каримов Р.Г.

Астрономический институт им. Улугбека АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Представлены предварительные результаты поиска и изучения переменных звезд по данным наблюдений космической миссии TESS в области рассеянного звездного скопления NGC 6819. Изучены кривые блеска переменных звезд различных типов, расположенных в области рассеянного скопления. По данным миссии GAIA DR3 были определены вероятные члены скопления и его фундаментальные параметры, определено вероятное членство выявленных кандидатов в переменные звезды к скоплению NGC 6819.

Поступила в редакцию 02.08.2023 г. Принята в печать 31.08.2023 г.

Ключевые слова: рассеянные звездные скопления, переменные звезды

Variable stars in the field of open cluster NGC 6819

Gaysin R.A., Karimov R.G.

Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

Here we present preliminary results of searching and study of variable stars based on space observation data of the TESS mission in the field of the open star cluster NGC 6819. The light curves of variable stars of various types located in the field of an open cluster are studied. Based on the data from the GAIA DR3 mission, the probable members of the cluster and its fundamental parameters were determined, and the probable membership of the identified variable star candidates in the NGC 6819 cluster was determined.

Received 02.08.2023. Accepted 31.08.2023.

Keywords: open stars cluster, variable stars

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.002

1. Введение

В данной работе представлены результаты исследования рассеянного звездного скопления (РЗС) NGC 6819 «Лисья голова» [RA(J2000)=295.325°; DEC(J2000)=40.186°], расположенного в созвездии Лебедь. Скопление NGC 6819 является весьма богатым скоплением (более 2200 звезд), имеет угловой радиус $\sim 5'$ и расположено на расстоянии ~ 2471.2 пк от Солнца. Оценка возраста скопления колеблется в пределах $\sim 2.5 \pm 0.5$ млрд. лет. При изучении рассеянного скопления и поиска вероятных переменных звезд в области скопления использовали данные космической миссии GAIA DR3 [1] и TESS [2].

2. Данные и метод отбора звезд скопления

Необходимый набор данных размером поля $40' \times 40'$ был подготовлен с использованием стандартных запросов Astroquery без ограничений и фильтров по звездным величинам и другим параметрам. Подобный отбор проводился для того, чтобы получить более полную выборку всех измеренных объектов в этой области с целью дальнейшего поиска вероятных переменных звезд, расположенных в области скопления и определения их вероятного членства.

Для отсева звезд поля использовали программу ruUPMASK [3] — реализованную на языке Python версию программы UPMASK [4], написанной на языке R и разработанной для отделения звезд скопления от звезд поля. UPMASK используется группой GAIA для автоматической обработки результатов измерений. В данной работе при использовании ruUPMASK был использован метод, предложенный авторами ruUPMASK и реализованный в работе [5]. Метод подразумевает два этапа отсева звезд поля. На первом этапе используется две пары параметров — координаты относительно центра скопления и значения собственных движений. Второй этап подразумевает использование большего количества параметров звезд в качестве фильтров отсева — координаты, собственные движения, параллакс и фотометрию в полосах пропускания GAIA, вероятность принадлежности звезд к скоплению, определенную после первого этапа. Результат работы ruUPMASK показан на рис. 1. Для определения основных параметров скопления мы использовали пакет автоматизированного анализа звездных скоплений ASteCA [6]. ASteCA предоставляет оценки фундаментальных параметров РЗС, таких как: металличность, возраст, покраснение и расстояние до скопления, с использованием байесовского анализа (см. рис. 2а).

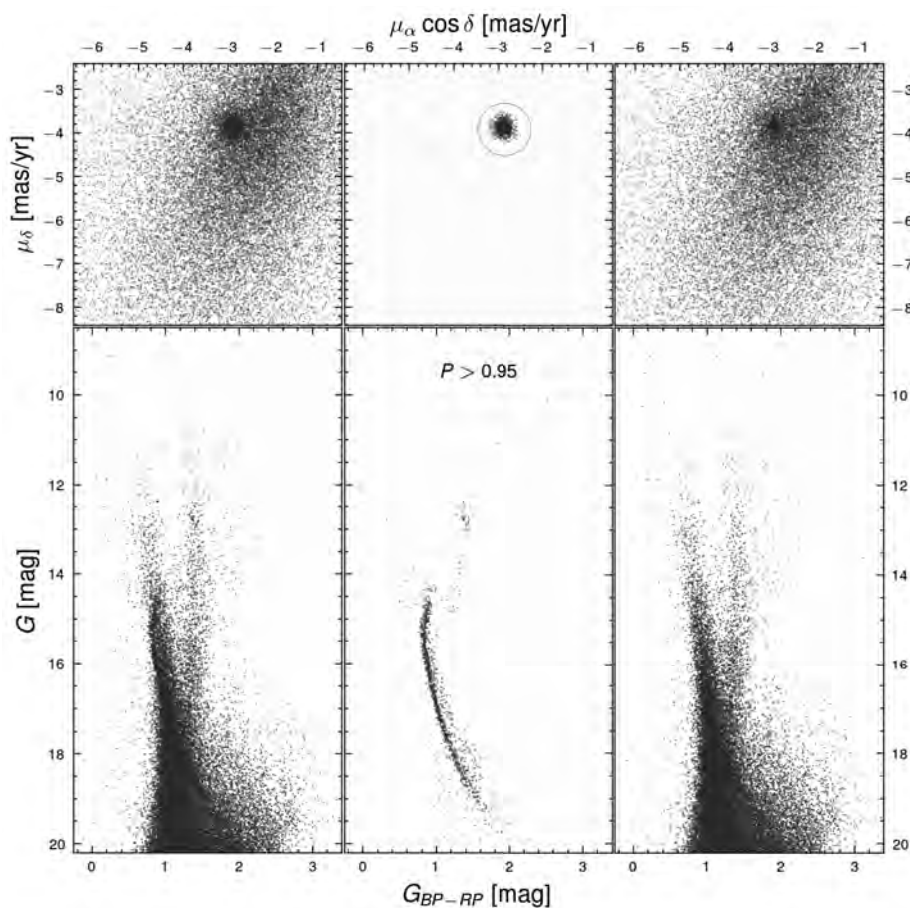


Рис. 1: Демонстрация работы алгоритма отсева звезд поля. На верхних панелях показаны диаграммы собственных движений всех звезд в области скопления NGC 6819 (левая), выделенных нами как принадлежащих к скоплению (в центре), и звезд поля (правая), соответственно. Нижняя панель — диаграмма цвет-светимость для звезд в области NGC 6819. Левая панель включает все звезды в области РЗС. Средняя панель включает только звезды в области внутри выделенного круга, которые мы классифицируем как вероятные члены скопления. Правая панель включает звезды поля заднего и переднего плана.

3. Результаты

Для поиска переменных звезд в области скопления NGC 6819 использовались данные наблюдений 14 и 15 секторов космической миссии Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), обработанные конвейером Quick-Look Pipeline (QLP) Массачусетского технологического института [7] и A PSF-Based Approach to TESS High Quality Data Of Stellar Clusters (PATHOS) [8]. Для отбора данных использовали портал The Mikulski Archive for Space Telescopes (MAST). Последующая работа с кривыми блеска (устранение трендов, нормирование кривых блеска, удаление очевидных систематических вариаций) проводилась с использованием программного обеспечения Lightkurve [9]. Поиск и анализ изменений проявляющихся на кривых блеска был ограничен 13 днями и заметными по амплитуде кратными вариациями. Для поиска периодических вариаций мы использовали периодограммы Ломба-Скаргла [9, 10, 11].

4. Заключение

Проведенный отбор вероятных членов скопления достаточно хорошо согласуется с набором вероятных звезд скопления, представленных в работах [12, 13, 14] для этого РЗС (см. рис. 1). Отбор показал, что в области $40' \times 40'$ нами выделено 2229 звезд, предположительно являющимися членами скопления с вероятностью более 70%, из них 1537 звезд — с вероятностью 95% и более. Методика отсева звезд поля, представленная выше, показывает уверенный, сопоставимый результат. Проведенная выборка была сопоставлена с набором отобранных вероятных переменных звезд в этой области, в том числе и опубликованных другими авторами.

Из 42 звезд, отобранных как вероятные кандидаты в переменные звезды, расположенные в области скопления NGC 6819, кривые блеска 12 звезд являются кривыми «смешанного блеска» из-за влияния близлежащей переменной звезды, что связано с большим угловым размером пикселей ПЗС приемников миссии

Таблица 1: Общая информация о вероятных кандидатах в переменные.

TIC	RA [°]	Dec [°]	ID	Период [доли суток]	Tmag [зв. вел.]	Амплитуда [зв. вел.]	Тип переменности	AAVSO
138970708	295.1896769	40.15781706	1	1.46948	15.1786	0.120	EA	✓
139109045	295.2367828	40.06721828	4	0.66626	14.4349	0.049	EB	✓
139109118	295.2388256	40.08218886	5	0.66621	13.9965	0.488	EB	✓
139109323	295.2695411	40.12494506	8	0.78721	16.462	1.168	EA	
139109523	295.2409378	40.15758924	10	3.65702	14.5317	0.090	EA	✓
139153767	295.2620432	40.17890202	23	0.93229	14.7588	0.087	EA	✓
139153830	295.27964	40.18472631	35	0.46583	15.7313	0.027	VAR	
139153846	295.2534191	40.18659235	39	0.93217	14.5569	0.0215	EA	
139153891	295.267927	40.19182629	45	0.46659	14.6332	0.025	VAR	
139153920	295.3475933	40.19505554	46	*	14.7278	0.120	VAR	✓
139153978	295.3416112	40.20056177	50	*	11.657	0.016	VAR	✓
139154609	295.3087098	40.29294652	59	5.38491	16.3679	0.201	ROT	
139154643	295.2336218	40.29983772	63	0.75897	14.9843	0.199	EW	
139154721	295.3447704	40.3202558	66	1.97572	16.8544	0.091	VAR	
139154739	295.2842686	40.32550125	67	*	9.0617	0.009	SR	✓
139154790	295.3540595	40.33908678	68	3.73164	13.8024	0.014	ROT	✓
184010379	295.3932962	40.29670321	69	2.65784	10.2507	0.005	ROT	
184010678	295.3947497	40.22474898	74	3.18473	15.0958	0.214	EA	
184010705	295.3805296	40.21942162	78	3.19585	14.2151	0.107	EA	✓
184010713	295.3913434	40.21671815	80	3.18569	14.965	0.528	EA	✓
184010939	295.451227	40.17079186	84	2.17014	14.6282	0.106	EW	
184011035	295.3750851	40.14793594	86	2.63649	14.9178	0.006	VAR	
1880383009	295.2769553	40.12986085	88	0.78700	15.7574	0.142	EA	✓
1880383439	295.294391	40.17865763	91	4.30034	16.1836	0.181	EA	
1880428984	295.3329154	40.20569387	96	*	16.657	0.028	VAR	
1880469549	295.2398874	40.30367008	100	0.75900	16.3694	0.175	EW	✓
138970970	295.2184339	40.0889989	102	0.66608	15.1449	0.068	EW	
138971032	295.127015	40.07140131	103	0.36286	14.0489	0.034	EW	
138971033	295.113684	40.07114413	104	0.36285	14.7689	0.193	EW	✓
139108796	295.3541613	40.0029154	106	0.42933	14.9228	0.329	EW	✓

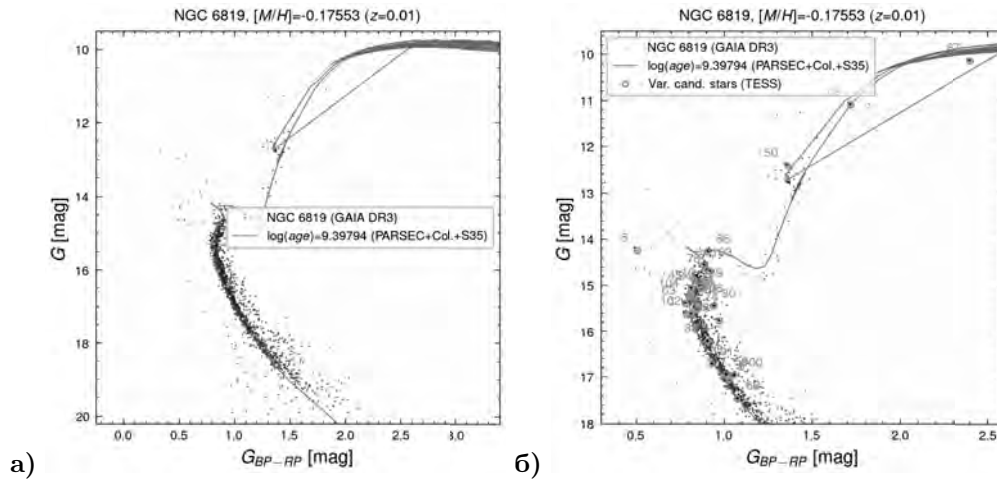


Рис. 2: а) Диаграмма Герцшпрунга-Рессела звезд скопления NGC 6819 с наложенной теоретической изохроной. б) То же, что и на панели слева, но зелеными точками выделены кандидаты в переменные звезды и указаны, присвоенные им порядковые номера.

TESS, и не являются источниками переменного излучения. Из остальных 30 звезд мы отнесли 19 звезд к затменно-переменным различных типов, 1 — вероятно полуправильная переменная звезда, 3 — вращающиеся и 7 звезд с переменностью неопределенного типа. Из отобранных вероятных переменных звезд 15 являются известными переменными звездами различных типов. Список вероятных кандидатов в переменные звезды приведен в табл. 1. В последнем столбце таблицы галочкой отмечены известные переменные звезды. Для

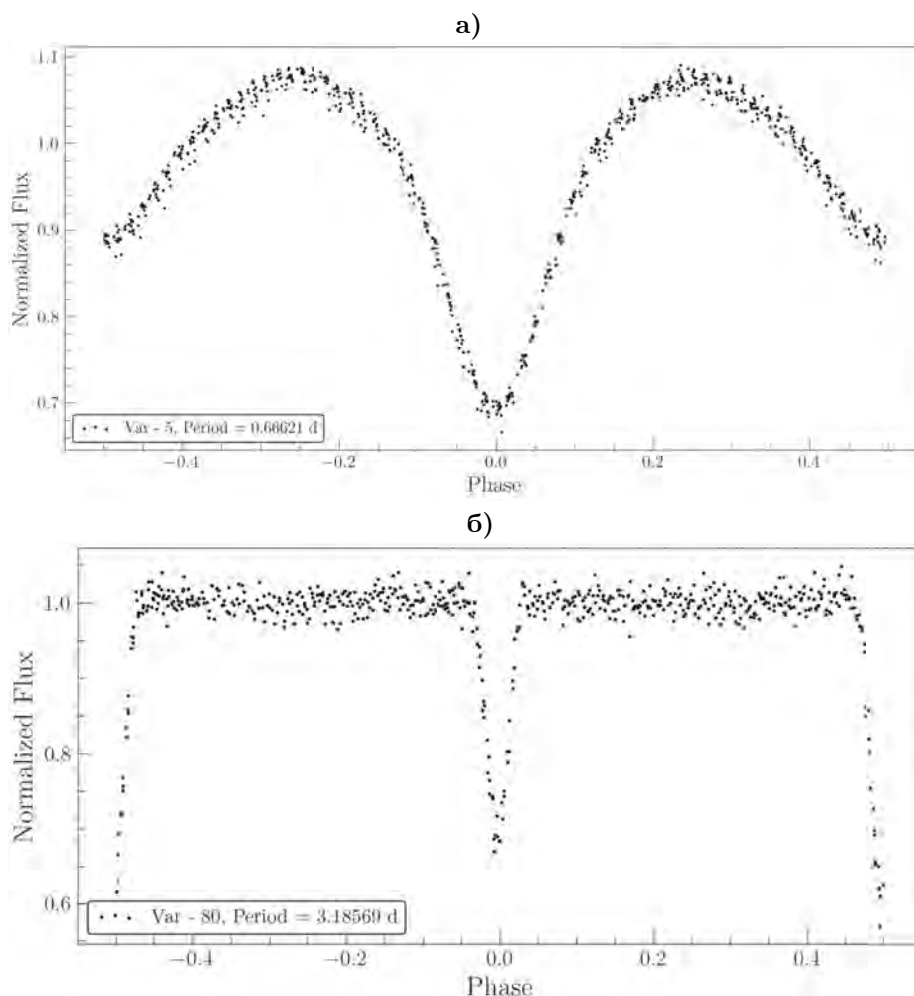


Рис. 3: Примеры кривых блеска 2-х звезд с обнаруженной заметной переменностью.

звезды №10, которая является известной переменной звездой, по данным TESS был определен период. Наши оценки типа переменности и периодов изменения блеска для известных переменных звезд №4, 78 и 104 не соответствуют значениям, приведенным в базе данных AAVSO. Кривые блеска звезд №46, 50, 67 и 96 показывают значимые изменения, но их период превышает временной интервал в 13 дней, и используемые временные ряды не позволяют получить их оценки. В табл. 2 приведен список звезд, которые вероятнее всего не являются источниками переменного излучения, характер кривых блеска которых и период их изменений

Таблица 2: Список звезд, которые вероятнее всего не являются переменными звездами.

TIC	RA [°]	Dec [°]	IDs	Период [доли суток]	Tmag [зв. вел.]	Амплитуда [зв. вел.]	Тип переменности
139109571	295.2347695	40.16391574	13	3.63920	15.4623	0.133	EA
139109135	295.2501365	40.08633076	6	0.66618	14.1706	0.124	EB
139153775	295.2698345	40.17959722	24	0.93204	15.7899	0.319	EA
139153793	295.2579997	40.18106785	26	0.93219	15.2295	0.184	EA
139153799	295.2507445	40.18161208	29	0.93248	15.0659	0.052	EA
139153812	295.2702664	40.18305186	32	0.93228	16.0331	0.171	EA
139153867	295.2632197	40.18890297	41	0.93222	16.4479	0.101	VAR
139153880	295.2602015	40.19045336	44	0.93217	16.5551	0.105	VAR
139154580	295.324053	40.28617396	58	5.12766	15.4625	0.124	VAR
139154641	295.2566204	40.29956008	62	0.75948	16.686	0.199	EW
184010748	295.3887636	40.20966727	82	3.17965	11.991	0.017	EA
139108743	295.3495203	39.98971971	105	0.42926	16.591	0.121	EW

из данных TESS является следствием вклада излучения близких соседних звезд. Отобранные вероятные переменные звезды являются вероятными членами скопления. В поле скопления, согласно данным, представленным в базе AAVSO [15], имеется еще несколько десятков известных переменных звезд, для которых по используемой в работе выборке мы не смогли выделить какую-либо значимую переменность, вероятно, из-за ограниченной используемой выборки и наличия систематических артефактов на кривых блеска TESS. Положение вероятных переменных звезд на диаграмме Герцшпрунга-Рессела показано на рис. 2б. На рис. 3 показаны примеры кривых блеска двух переменных звезд.

Список литературы

1. Gaia Collaboration, A. Vallenari, A. G. A. Brown, T. Prusti, et al., *Astron. and Astrophys.*, **674**, A1, 2023.
2. G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, D. W. Latham, et al., *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **1**, 014003, 2015.
3. M. S. Pera, G. I. Perren, A. Moitinho, H. D. Navone, and R. A. Vazquez, *Astron. and Astrophys.*, **650**, A109, 2021.
4. A. Krone-Martins and A. Moitinho, *Astron. and Astrophys.*, **561**, A57, 2014.
5. H. Chi, S. Wei, F. Wang, and Z. Li, *Astron. and Astrophys. Supp.*, **265**, 20, 2023.
6. G. I. Perren, R. A. Vázquez, and A. E. Piatti, *Astron. and Astrophys.*, **576**, A6, 2015.
7. C. X. Huang, A. Vanderburg, A. Pál, L. Sha, et al., *Research Notes of the American Astronomical Society*, **4**, 204, 2020.
8. D. Nardiello, G. Piotto, M. Deleuil, L. Malavolta, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **495**, 4924, 2020.
9. Lightkurve Collaboration, J. V. d. M. Cardoso, C. Hedges, M. Gully-Santiago, et al., Lightkurve: Kepler and TESS time series analysis in Python, Astrophysics Source Code Library, record ascl:1812.013, 2018.
10. N. R. Lomb, *Astrophys. and Space Sci.*, **39**, 447, 1976.
11. J. D. Scargle, *Astron. and Astrophys.*, **263**, 835, 1982.
12. T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bragaglia, et al., *Astron. and Astrophys.*, **618**, A93, 2018.
13. T. Cantat-Gaudin, F. Anders, A. Castro-Ginard, C. Jordi, et al., *Astron. and Astrophys.*, **640**, A1, 2020.
14. 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.
15. C. Watson, A. A. Henden, and A. Price, *VizieR Online Data Catalog*, B/vsx, 2017.

Образование и динамика магнитных силовых трубок в аккреционных дисках молодых звезд

Бартая Н.В.¹, Хайбрахманов С.А.^{1,2,3}

¹ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

² Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

³ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Работа посвящена численному моделированию динамики тороидальных магнитных силовых трубок (МСТ) в аккреционном диске молодой звезды типа Т Тельца. Уравнения динамики МСТ записываются с учетом сил плавучести и сопротивления, магнитного поля диска и натяжений внутреннего магнитного поля МСТ. Рассматривается случай эффективного теплообмена с окружающим газом. Структура аккреционного диска рассчитывается с помощью магнитогазодинамической (МГД) модели аккреционных дисков Дудорова и Хайбрахманова. Для расчета вертикальной структуры диска используется уравнение состояния политропного газа. Расчеты показывают, что МСТ с радиусом поперечного сечения $0.1H$, где H — шкала высоты диска, практически вертикально всплывают к поверхности диска со скоростью до 7 км с^{-1} . Тонкие МСТ радиусом $0.001H$ всплывают со скоростями до 20 км с^{-1} и стягиваются по направлению к оси вращения диска. В ходе эволюции МСТ могут расширяться до размеров, сравнимых со шкалой высоты аккреционного диска и формировать неоднородную истекающую замагниченную корону диска. Всплытие МСТ является эффективным механизмом отвода избыточного магнитного потока из внутренних областей диска, где степень ионизации достаточно высока и магнитное поле заморожено в вещество. Концентрация МСТ вблизи оси вращения диска может влиять на генерацию струйных истечений и обуславливать наблюдаемые неоднородности струй.

Поступила в редакцию 02.08.2023 г. Принята в печать 29.08.2023 г.

Ключевые слова: аккреционные диски, магнитные поля, МГД

Formation and dynamics of magnetic flux tubes in the accretion disks of young stars

Bartaya N.V.¹, Khaibrakhmanov S.A.^{1,2,3}

¹ Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

² Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

³ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

This work is dedicated to the numerical simulations of the dynamics of toroidal magnetic flux tubes (MFTs) in the accretion disk of a young T Tauri star. The equations of MFT dynamics take into account the buoyancy and drag forces, the magnetic field of the disk, and the tensions of the internal magnetic field of the MFT. The case of efficient heat exchange with the surrounding gas is considered. The structure of the accretion disk is simulated using the magnetohydrodynamic (MHD) model of the accretion disks developed by Dudorov and Khaibrakhmanov. The equation of state for a polytropic gas is used to model the vertical structure of the disk. Simulations show that MFTs with cross-section radius of $0.1H$, where H is the disk scale height, rise almost vertically to the disk surface at a speed of up to 7 km s^{-1} . Thin MFTs with cross-section radius of $0.001H$ float up with velocities up to 20 km s^{-1} and contract towards the axis of rotation. During evolution, MFTs can expand to sizes comparable to the accretion disk scale height and form an inhomogeneous outflowing magnetized disk corona. Floating of MFTs is an effective mechanism for removing excess magnetic flux from the inner regions of the disk, where the ionization fraction is large, and the magnetic field is frozen into gas. The MFT concentration near the disk rotation axis can affect the generation of jet outflows and cause the observed jet inhomogeneities.

Received 02.08.2023. Accepted 29.08.2023.

Keywords: accretion disks, magnetic fields, MHD

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.003

1. Введение

Аккреционные диски молодых звезд типа Т Тельца и Ae/Be Хербига представляют собой геометрически тонкие газопылевые диски, вещество из которых в течение $1 - 10$ млн. лет аккрецирует на звезду. В процессе эволюции дисков темп аккреции уменьшается от 10^{-6} до $10^{-9} M_{\odot}/\text{год}$. Большинство аккреционных дисков характеризуется истечениями, которые могут уносить часть вещества и отводить часть углового момента из системы. Предполагается, что аккреционные диски эволюционируют в протопланетные, то есть в них начинается процесс образования планет. Эта гипотеза в настоящее время получает прямые наблюдательные подтверждения [1, 2].

Современные наблюдательные данные указывают на то, что в аккреционных и протопланетных дисках молодых звезд присутствует крупномасштабное магнитное поле [3], которое имеет остаточную природу. Согласно современным моделям, магнитное поле обуславливает перенос углового момента внутри аккреционных дисков, а также участвует в образовании истечений из дисков. Дудоров и Хайбрахманов разработали МГД-модель аккреционных дисков с остаточным крупномасштабным магнитным полем, в которой учтены

основные ионизационные, рекомбинационные, индукционные и диффузионные эффекты [4, 5]. С помощью модели было показано, что на периферии дисков амбиоплярная диффузия ограничивает рост радиального компонента магнитного поля и магнитное поле имеет квазитороидальную геометрию. Внутри областей низкой степени ионизации и эффективной омической диффузии («мертвых» зон) магнитное поле сохраняет первоначальную полоидальную геометрию. Вблизи звезды, в области тепловой ионизации, магнитное поле заморожено в газ и основным механизмом, который может ограничивать безудержный рост тороидального магнитного поля является магнитная плавучесть [6]. Развитие магнитной неустойчивости Рэлея-Тейлора [7, 8] (известной как неустойчивость Паркера в моделях галактик с магнитным полем [9]) приводит к образованию магнитных силовых трубок (МСТ), которые периодически всплывают из дисков и уносят часть магнитного потока.

Ранние исследования показали, что динамика МСТ в аккреционных дисках зависит от тепловых эффектов: в случае эффективного теплообмена с окружающим газом МСТ с ускорением всплывают из дисков, в то время как адиабатические МСТ могут испытывать тепловые колебания вблизи поверхности диска [10, 11]. В ряде работ исследована динамика тороидальных МСТ в дисках вокруг черных дыр и показано, что МСТ могут стягиваться к оси вращения диска [12, 13]. Дудоров и Хайбрахманов разработали модель динамики цилиндрических МСТ с учетом лучистого теплообмена и магнитного поля диска [14, 15, 16]. С помощью модели показано, что всплывающие МСТ формируют истекающую замагниченную корону диска. Магнитные и тепловые колебания могут обуславливать инфракрасную (ИК) переменность молодых звездных объектов.

В настоящей работе выполняется дальнейшее развитие модели, разработанной Дудоровым и Хайбрахмановым, для исследования эволюции кольцевых (тороидальных) МСТ. Модель дополняется уравнениями, описывающими изменение большого радиуса кольцевой МСТ с учетом внутренних магнитных натяжений.

Статья организована следующим образом. В разделе 2.1 описывается модель, с помощью которой рассчитывается структура аккреционного диска. Уравнения модели динамики МСТ формулируются в разделе 2.2. В разделе 3.1 приводятся параметры модели и обсуждаются методы решения уравнений динамики МСТ. В разделе 3.2 анализируются результаты расчетов динамики МСТ. В разделе 4 резюмируются основные результаты работы, делаются выводы и отмечаются перспективы дальнейшей работы.

2. Модель

2.1. Структура аккреционного диска

Структура аккреционного диска рассчитывается с помощью МГД-модели Дудорова и Хайбрахманова [4, 15]. Модель основана на приближениях Шакуры и Сюняева [17, 18]. Рассматривается геометрически тонкий стационарный аккреционный диск, находящийся в центробежном и гидростатическом равновесии. Полагается, что перенос углового момента осуществляется посредством турбулентности, эффективность которой параметризуется с помощью безразмерного турбулентного параметра α . Температура диска определяется из решения уравнения переноса излучения в диффузионном приближении с учетом нагрева за счет диссипации турбулентности и охлаждения посредством излучения. Во внешних оптически тонких областях учитывается нагрев космическими лучами и излучением звезды.

В дополнении к уравнениям базовой модели решаются уравнения ионизационно-рекомбинационного баланса и уравнение индукции с учетом омической диффузии, магнитной амбиоплярной диффузии и магнитной плавучести.

В случае, когда коэффициент непрозрачности задан как степенная функция плотности и температуры газа, уравнения радиальной структуры диска имеют аналитическое решение в виде степенных функций радиального расстояния r и параметров модели. Рассмотрим область диска, где температура газа близка к температуре испарения силикатных пылинок $T \sim 1500$ К. При такой температуре происходит тепловая ионизация металлов с низким потенциалом ионизации, степень ионизации поднимается выше 10^{-6} , выполняется условие замороженности магнитного поля и, как следствие, происходит эффективное усиление тороидального магнитного поля и генерация МСТ. Коэффициент поглощения в области рассматриваемых температур можно записать как $\kappa = 3 \times 10^{-3} T \text{ см}^2 \text{ г}^{-1}$ [19]. В этой области решения для радиальных профилей температуры и плотности газа в экваториальной плоскости диска имеют вид [4]:

$$T_m = 240 \left(\frac{\alpha}{0.01} \right)^{-1/4} \left(\frac{M}{1 M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-8} M_\odot / \text{год}} \right)^{3/8} \left(\frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-9/4} \text{ К}, \quad (1)$$

$$\rho_m = 2.5 \times 10^{-10} \left(\frac{\alpha}{0.01} \right)^{-5/8} \left(\frac{M}{1 M_\odot} \right)^{1/4} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-8} M_\odot / \text{год}} \right)^{7/16} \left(\frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-21/16} \text{ г см}^{-3}. \quad (2)$$

Радиальный профиль вертикального компонента магнитного поля при выполнении условия вмороженности определяется как

$$B_z = 0.29 \left(\frac{\alpha}{0.01} \right)^{-3/4} \left(\frac{M}{1 M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-8} M_\odot/\text{год}} \right)^{1/8} \left(\frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-3/8} \text{ Гс.} \quad (3)$$

Следуя предыдущей работе [16], для моделирования вертикальной структуры диска с учетом зависимости температуры от высоты будем использовать решение уравнения гидростатического равновесия политропного газа. В этом случае, вертикальные профили плотности и температуры газа имеют вид:

$$\rho_e(r, z) = \rho_m(r) \left(1 - \frac{k-1}{k} \frac{z^2}{2H^2} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (4)$$

$$T_e(r, z) = T_m(r) \left(1 - \frac{k-1}{k} \frac{z^2}{2H^2} \right), \quad (5)$$

где $k = 1 + 1/n$, n — показатель политропы, $H = c_T/\Omega_k$ — шкала высоты изотермического диска, c_T — изотермическая скорость звука, Ω_k — кеплеровская угловая скорость.

Предположим, что над диском находится разреженная изотермическая корона, которая находится в гидростатическом равновесии. Для простоты можно считать, что корона нагревается за счет поглощения излучения звезды. В этом случае радиальный профиль температуры короны можно записать как:

$$T_c = 280 \left(\frac{L}{1 L_\odot} \right)^{1/4} \left(\frac{r}{1 \text{ а. е.}} \right)^{-1/2} \text{ К.} \quad (6)$$

Будем определять поверхность диска $z_s(r)$ из равенства температур диска и короны, $T_e(r, z_s) = T_c(r)$.

2.2. Уравнения динамики МСТ

Рассмотрим динамику кольцевой МСТ малого радиуса a (радиус поперечного сечения) и большого радиуса R . МСТ является однородной в азимутальном направлении и характеризуется плотностью ρ , температурой T , давлением p и интенсивностью магнитного поля B . В рассматриваемой постановке задачи большой радиус МСТ соответствует радиальному расстоянию от центра звезды, $R = r$. Будем описывать диск плотностью ρ_e , температурой T_e , давлением p_e , интенсивностью магнитного поля $B_e = B_z(r)$. Компоненты вектора скорости движения МСТ запишем как $\mathbf{v} = \{v_R, 0, v_z\}$.

Как и в предыдущих работах, будем считать, что динамика МСТ в вертикальном направлении определяется силами плавучести и сопротивления. В этом случае уравнение движения МСТ по z :

$$\frac{dv_z}{dt} = \left(\frac{\rho_e}{\rho} - 1 \right) g_z - f_d, \quad (7)$$

где g_z — вертикальный компонент ускорения силы притяжения звезды, f_d — сила сопротивления.

Положим, что изменение R определяется сжатием под действием магнитных натяжений тороидального магнитного поля внутри МСТ,

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{B^2}{4\pi\rho R}. \quad (8)$$

Для простоты рассмотрим случай эффективного теплообмена с окружающим газом. В этом случае $T = T_e$, а плотность МСТ в каждый момент времени определяется балансом внутреннего и внешнего давлений при заданной температуре,

$$p = p_e + \frac{B_e^2}{8\pi}. \quad (9)$$

Давление газа внутри МСТ рассчитывается из уравнения состояния идеального газа с показателем адиабаты $\gamma = 7/5$.

3. Результаты расчетов

3.1 Параметры расчетов и методы решения уравнений модели

Обыкновенные дифференциальные уравнения динамики МСТ (7) и (8) решаются методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности с автоматическим выбором шага. Алгоритм решения уравнений модели реализован в программном комплексе «Хариус» на языке программирования C++.

Выполнена серия расчетов для различных начальных малого радиуса, $a_0/H = [0.001, 0.01, 0.1]$, большого радиуса, $R_0 = [0.15, 0.2, 0.4, 0.6]$ а. е. и плазменного параметра МСТ, $\beta_0 = [0.1, 1, 10]$. Структура диска рассчитывается при следующих стандартных параметрах: масса звезды $M = 1 M_\odot$, темп аккреции $\dot{M} = 10^{-8} M_\odot/\text{год}$, турбулентный параметр $\alpha = 0.01$.

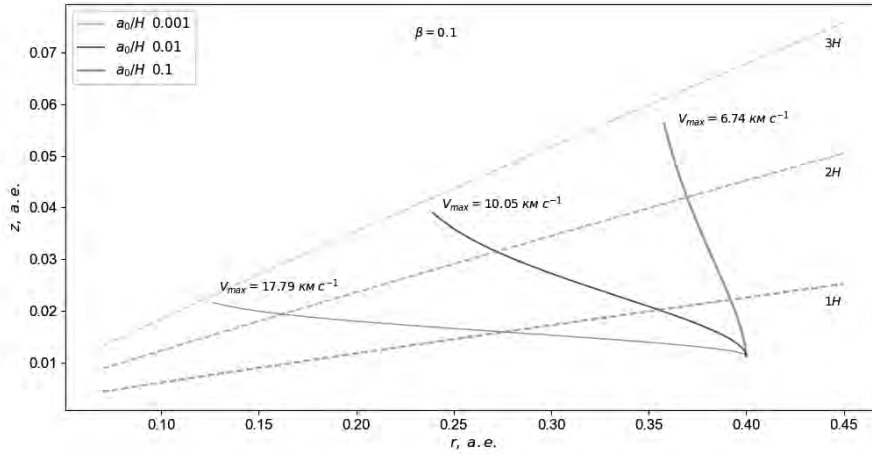


Рис. 1: Траектории движения МСТ с начальной координатой (большим радиусом кольца) $r_0 = 0.4$ а. е. для плазменного параметра $\beta_0 = 0.1$ и различных начальных малых радиусов a_0 (сплошные линии разных цветов). Числа рядом с линиями указывают максимальную скорость соответствующих МСТ в км/с. Штриховыми линиями показаны поверхности $z = 1H$, $2H$ и $3H$, где H — изотермическая шкала высот диска.

3.2. Динамика кольцевых МСТ

Рассмотрим динамику МСТ с начальным большим радиусом $R_0 = r = 0.4$ а. е. при $\beta_0 = 0.1$, $z_0 = 0.5H$ и различных радиусах поперечного сечения $a_0/H = 0.001, 0.01, 0.1$. На рис. 1 изображены траектории движения МСТ с указанными параметрами.

Рис. 1 показывает, что динамика МСТ характеризуется всплытием к поверхности диска, $z_s \approx 2.5H$, и одновременным «стягиванием» к оси вращения (уменьшением большого радиуса R). МСТ с большим начальным радиусом поперечного сечения, $a_0 = 0.1H$, всплывают к поверхности диска практически без изменения большого радиуса R . Тонкие МСТ, $a_0 = 0.001H$, наоборот, быстро стягиваются к оси вращения и всплывают из диска в области $r \approx 0.15$ а. е. Скорость всплытия МСТ начальных радиусов $a_0 = [0.001 - 0.1]$ лежит в диапазоне от 18 до 7 км с⁻¹, то есть более тонкие МСТ всплывают быстрее.

На рис. 2 изображены зависимости $\rho(z)$ и $\rho_e(z)$, а также $a(z)$ для тех же расчетов. Рис. 2 показывает, что в процессе всплытия плотность МСТ уменьшается на несколько порядков, а радиус МСТ сильно увеличивается и становится сравним с полутолщиной диска. Следовательно, МСТ рассеиваются над диском и формируют истекающую замагниченную корону, что согласуется с ранее полученными для цилиндрических МСТ результатами [15].

Расчеты динамики МСТ с различными начальными R_0 показывают, что характер движения МСТ на различных радиальных расстояниях от звезды качественно одинаков. Более толстые МСТ медленно всплывают к поверхности диска почти без изменения радиуса. Тонкие МСТ быстро всплывают к поверхности диска и стягиваются к оси вращения.

4. Заключение и выводы

В настоящей работе разработана численная модель динамики кольцевых МСТ в аккреционных дисках молодых звезд. Разработанная ранее модель дополнена уравнением, описывающим эволюцию большого радиуса кольцевой МСТ под действием внутренних магнитных натяжений.

Расчеты показывают, что динамика кольцевых МСТ характеризуется всплытием к поверхности диска и одновременным стягиванием к оси вращения диска. Скорость всплытия увеличивается с уменьшением начального радиуса поперечного сечения МСТ и может достигать 20 км с⁻¹. Толстые МСТ с начальным радиусом $a_0 = 0.1H$ всплывают практически вертикально, в то время как более тонкие МСТ существенно стягиваются к звезде и всплывают из диска в области $r < 0.3$ а. е. При всплытии МСТ радиус их поперечного сечения быстро увеличивается, МСТ рассеиваются и формируют истекающую замагниченную корону диска.

Полученные результаты подтверждают вывод, сделанный ранее для цилиндрических МСТ: образование и всплытие МСТ из областей эффективной генерации тороидального магнитного поля является эффективным механизмом отвода избытка магнитного потока из дисков. Стягивание кольцевых МСТ к оси вращения позволяет сделать вывод о том, что всплытие МСТ приводит к формированию сильно неоднородной по ра-

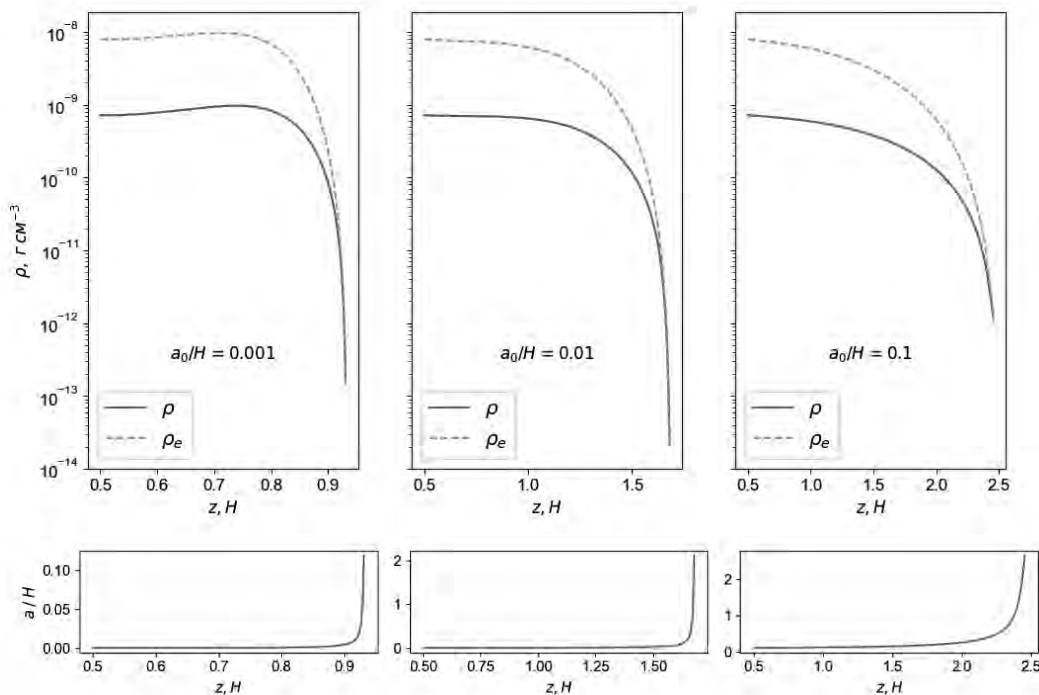


Рис. 2: Зависимость плотности (верхний ряд панелей) и радиуса МСТ (нижний ряд панелей) от z . Начальные координаты: $r_0 = 0.4$ а. е., $z_0 = 0.5H$. Слева направо: начальный малый радиус МСТ равен 0.001, 0.01 и $0.1H$.

диусу короны. Концентрация МСТ вблизи оси вращения диска может оказывать влияние на генерацию струйных истечений и приводить к наблюдаемым неоднородностям структуры струй.

Для более детального исследования динамики кольцевых МСТ в дальнейшем необходимо рассмотрение влияния внешнего давления и центробежной силы на эволюцию большого радиуса кольца.

Благодарности. Работа С.А. Хайбрахманова выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 23-12-00258).

Список литературы

1. A. Boccaletti, E. Di Folco, E. Pantin, A. Dutrey, et al., *Astron. and Astrophys.*, **637**, L5, 2020.
2. S. Nayakshin, T. Tsukagoshi, C. Hall, A. Vazan, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **495**, 285, 2020.
3. S. Khaibrakhmanov, in E. D. Kuznetsov, D. Z. Wiebe, A. B. Ostrovskii, S. V. Sali, A. M. Sobolev, and B. M. Shustov, eds., *Trudy 50-j Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii «Fizika kosmosa»*, 416–419 (2023).
4. A. E. Dudorov and S. A. Khaibrakhmanov, *Astrophys. and Space Sci.*, **352**, 103, 2014.
5. S. A. Khaibrakhmanov, A. E. Dudorov, S. Y. Parfenov, and A. M. Sobolev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **464**, 586, 2017.
6. S. A. Khaibrakhmanov and A. E. Dudorov, *Physics of Particles and Nuclei Letters*, **14**, 882, 2017.
7. Y. A. Tserkovnikov, *Soviet Physics Doklady*, **5**, 87, 1960.
8. D. W. Hughes, *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, **32**, 273, 1985.
9. E. N. Parker, *Cosmical magnetic fields. Their origin and their activity* (1979).
10. P. J. Sakimoto and F. V. Coroniti, *Astrophys. J.*, **342**, 49, 1989.
11. U. Torkelsson, *Astron. and Astrophys.*, **274**, 675, 1993.
12. S. K. Chakrabarti and S. D'Silva, *Astrophys. J.*, **424**, 138, 1994.
13. A. Deb, K. Giri, and S. K. Chakrabarti, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **472**, 1259, 2017.
14. S. Khaibrakhmanov, A. Dudorov, and A. Sobolev, *Research in Astronomy and Astrophysics*, **18**, 090, 2018.
15. A. E. Dudorov, S. A. Khaibrakhmanov, and A. M. Sobolev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **487**, 5388, 2019.
16. S. A. Khaibrakhmanov and A. E. Dudorov, *Open Astronomy*, **31**, 125, 2022.
17. N. I. Shakura, *Astronomicheskii Zhurnal*, **49**, 921, 1972.
18. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev, *Astron. and Astrophys.*, **24**, 337, 1973.
19. D. Semenov, T. Henning, C. Helling, M. Ilgner, and E. Sedlmayr, *Astron. and Astrophys.*, **410**, 611, 2003.

Фотометрические и спектральные наблюдения Ве звезды Хербига AS 310

Исмаилов Н.З.¹, Алышов С.А.¹, Исмаилова Ш.К.¹, Гусейнова Ф.С.²

¹Шамакинская астрофизическая обсерватория им. Туси, Шамаха, Азербайджан

²Батабатская астрофизическая обсерватория, Нахичевань, Азербайджан

В работе приводятся результаты спектральных и фотометрических исследований звезды Ве Хербига AS 310. Фотометрические наблюдения показали, что амплитуда сезонных изменений блеска звезды в разные годы меняется плавным образом и достигла максимума $\Delta V \sim 0.6$ mag в 2018 г. Спектральные наблюдения звезды выявили переменные эмиссионные компоненты в линиях $H\alpha$ и $H\beta$. Наши исследования показали, что AS 310 является молодой массивной звездой, которая потеряла околозвездный диск и уже вступила на Главную последовательность.

Поступила в редакцию 17.07.2023 г. Принята в печать 30.08.2023 г.

Ключевые слова: звезды до ГП, HBe звезды, фотометрия, спектроскопия, переменность

Photometric and spectral observations of the Herbig Be star AS 310

Ismailov N.Z.¹, Alishov S.A.¹, Ismayilova Sh.K.¹, Huseynova F.S.²

¹Tusi Shamakhy Astrophysical Observatory, Shamakhy, Azerbaijan

²Batabat Astrophysical Observatory, Nakhichevan, Azerbaijan

Spectral and photometric studies of the Be Herbig type star AS 310 are presented. Our photometric observations showed that the amplitude of seasonal variations in the brightness of the star varies smoothly over different years and reached a maximum of $\Delta V \sim 0.6$ mag in 2018. Spectral observations revealed variable emission components in the $H\alpha$ and $H\beta$ lines. Our studies have shown that AS 310 is an extremely young massive star, however, it is already on the Main Sequence.

Received 17.07.2023. Accepted 30.08.2023.

Keywords: pre-main sequence stars, HBe stars, photometry, spectroscopy, variability

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.004

1. Введение

Звезды типа Ве Хербига (HBe) — это подкласс молодых звезд промежуточных масс, звезд типа AeBe Хербига (HAeBe) [1]. Для классических HBe звезд верхняя граница массы у многих авторов принималось равной $8-12 M_{\odot}$ (см., например, [1, 2]). С использованием данных Gaia DR3 из [3] показано, что у HBe звезд максимальная масса может быть и более $20 M_{\odot}$. Существуют лишь одиночные исследования индивидуальных массивных HBe звезд (см., например, [4, 5]). Исследование характеристик массивных HBe звезд является важной задачей для понимания процесса эволюции таких звезд. В данной работе приводятся результаты исследований HBe звезды AS 310.

В каталоге [6] объект HBC 284 = AS 310 приводится как горячая звезда HAeBe высокой светимости, спектр которой примечателен наличием сильных межзвездных полос поглощения. На спектрограммах видна интенсивная эмиссионная линия $H\alpha$ и узкие абсорбционные линии гелия. Согласно [7], звезда находится в зоне III S61. В работе [2] отмечено, что у звезды не обнаруживается широкая эмиссия в линии $H\alpha$, поэтому объект не может считаться звездой Хербига. У звезды в позиции 135° , на расстоянии $3''$ выделяется компаньон с разностью блеска $\Delta m \approx 1$ mag. По наблюдениям в области 1.3 мм масса источника оценивается как $\sim 30 M_{\odot}$ [8].

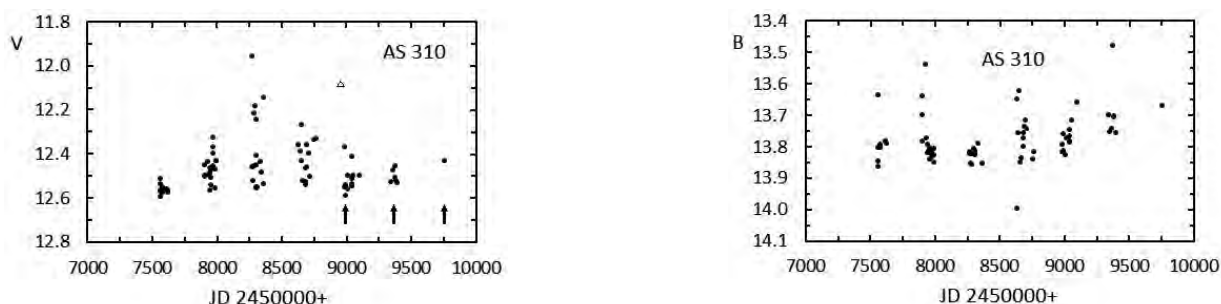


Рис. 1: Изменение блеска звезды в V (левая панель) и B-полосах (правая панель) по нашим данным за 2016–2022 гг. На левой панели вертикальными черточками указаны даты наших спектральных наблюдений.

Таблица 1: Параметры звезды, собранные из литературы.

Ссылка	T_{eff} (K)	$\log g$ (cgs)	D (pc)	A_V	$\lg L/L_{\odot}$	$R,$ R_{\odot}	M M_{\odot}	age (Myr)	Sp	$EW_{H\alpha}$ (Å)
[9]	26000	4.4	2110	3.86	4.13	5.7	11.6	0.07 ± 0.08	B1e	
[10]	25100		2500	3.7	4.23	6.8	12		B1e	
[11]	24500		2110	4.13	4.17		11.9	0.06		-8.89
[12]	30900		2500		4.55				B0	
[13]			2500	3.9					B2+B5	
[14]	25100		2500	6.06	5.21		> 6.00	< 0.01	B1	-7.7, -5.0
[15]	25100		2500	4.1, 6.6	4.43, 5.43		14.5, 43.5	0.02, 0.01	B1, B0, BA	-7.7
[3]	28000		2380	4.0	4.34	6.32	14.4	0.05	B0	
[8]	30900		2500		3.0		30		B0	

Мы проверили данные для окружения AS 310 из каталога 2MASS, которые доступны в архиве SIMBAD (VizieR). По этим данным вокруг звезды AS 310 в окружности радиусом $\sim 6.7''$ выделяются 7 объектов. Из них наиболее сильное излучение наблюдается у объекта с именем NAME SH 2-61 2, который в R полосе примерно на одну звездную величину слабее, чем AS 310. По данным этого архива названный объект находится на расстоянии $4.35''$ от AS 310 и его излучение соответствует спектру B1. Это подтверждает вывод авторов работы [2], где предсказано существование тесного компонента звезды на расстоянии 3–4". Остальные объекты показывают гораздо более слабое излучение в этом диапазоне спектра. Это говорит о том, что в излучении звезды AS 310 может быть ощутимый вклад по крайней мере еще от одной звезды.

Параметры звезды AS 310, данные разными авторами, собраны в табл. 1. Как видно из табл. 1, у разных авторов некоторые параметры звезды сильно различаются. Основной причиной различий, по-видимому, является сложное околосредное окружение и неточность в определении коэффициента межзвездного поглощения.

Таким образом, исследование звездной системы AS 310 представляет интерес для понимания механизма образования массивных звезд, в том числе звезд HAeBe.

2. Фотометрические наблюдения

Наши фотометрические наблюдения звезды были выполнены на телескопе Zeiss-600 с применением BVRcIc фотометра, который установлен в касегреновском фокусе телескопа ($F = 7500$ мм) с относительным отверстием $A = 1 : 12.5$. В качестве светоприемника применена CCD FLI 4K×4K камера с размером элементов 9 мкм. Эффективное поле фокальной плоскости составило $17' \times 17'$. Фотометрические данные обрабатывались с помощью стандартных процедур программного пакета MaxDL. Детальное описание фотометрической системы приведено в работе [16]. Привязка нашей фотометрической системы к международной описана в работе [17].

Наши наблюдения охватывают период 2016–2022 гг. Среднеквадратичная ошибка измерений в отдельных полосах составила ± 0.02 (B), ± 0.008 (V), ± 0.005 (R_c) и ± 0.009 (I_c). Всего получено 82 измерения в V-полосе, немного меньше в остальных полосах. Таблица с результатами наших фотометрических наблюдений была опубликована в работе [17].

На рис. 1 показана кривая блеска звезды, полученная в полосах B и V. Как видим, звезда, в основном, находится в слабом состоянии блеска, но временами показывает увеличение блеска с разными амплитудами в течение сезона наблюдений. В течение 6 лет наблюдений амплитуда изменений блеска в V-полосе постепенно растет и достигает максимума около 0.6 величины в 2018 г. Далее, до 2022 г. наблюдается постепенное уменьшение амплитуды изменений блеска. К сожалению, в ночь наблюдений максимальной амплитуды в V-полосе наблюдения в B-полосе не проводились.

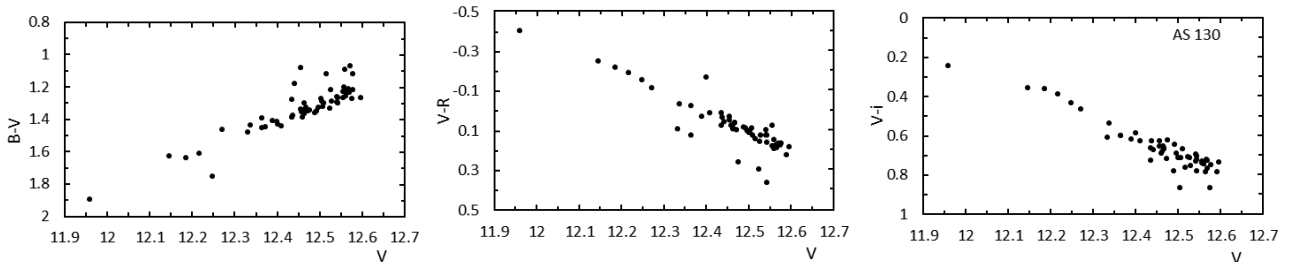


Рис. 2: Изменение показателей цвета $B - V$, $V - R_c$ и $V - I_c$ с изменением блеска в V-полосе.

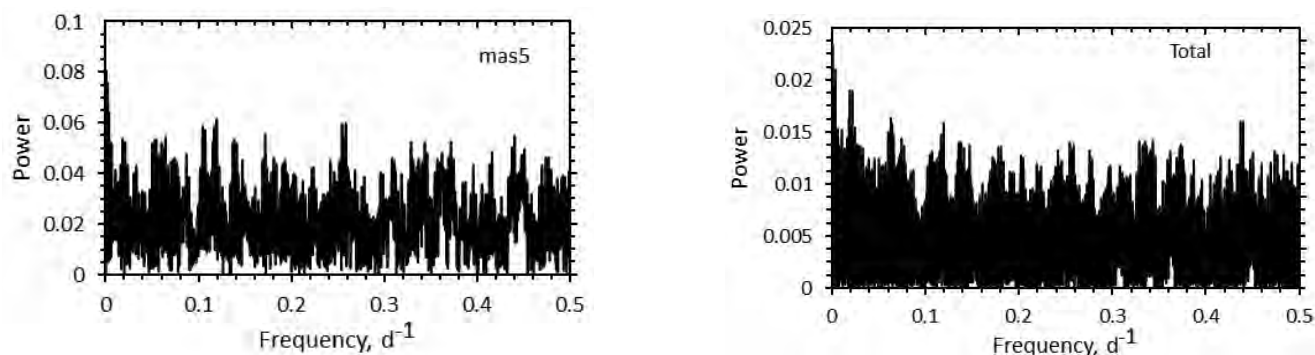


Рис. 3: Примеры спектра мощности для 77 точек массива, полученных в 1990 (слева), и для всех наблюдений одновременно (справа).

На рис. 2 показаны изменения показателей цвета $B - V$, $V - R_c$ и $V - I_c$ звезды AS 310 с изменением блеска в V -полосе. Как видно, с уменьшением блеска показатель цвета $B - V$ уменьшается, т. е. излучение звезды усиливается в синем диапазоне, а показатели цвета $V - R_c$ и $V - I_c$ демонстрируют убывание, т. е. усиление излучения в красной части спектра.

2.1. Поиск периода в изменении блеска

С целью поиска периодов в изменении блеска звезды нами был применен Фурье-анализ по методу [18] и [19]. Поиск был выполнен программой Period04 [20]. Программа предназначена для статистического анализа больших астрономических временных рядов, содержащих пробелы по времени. Исходным материалом для выполнения Фурье анализа были наблюдательные данные, полученные с 1983 г. в Майданакской Обсерватории Института Астрономии Узбекистана. Данные этого архива приводятся в работах [21] и [22]. Из этого архива были взяты 344 измерения в полосе V , значительно меньше в UBR -полосах. К этому материалу были добавлены 82 измерения в V -полосе, полученные нами. Систематических отличий между нашими данными и данными каталога не обнаружено.

Собранный фотометрический материал был разбит по годам наблюдений на отдельные файлы, а также был очищен от трендов, указывающих долговременные изменения среднего значения блеска. Всего были рассмотрены 6 различных массивов, у каждого из которых количество точек превышает 60. Ни в одном из рассмотренных массивов период не обнаружен. На рис. 3 для примера показан спектр мощности для массива из 77 точек, охватывающего интервал наблюдений JD2448049–JD2448163 (1990 г.). На правой панели рис. 3 приводится спектр мощности для всех данных наблюдений. Как видно, в спектрах мощности не выделяется определенный период в изменении блеска звезды.

3. Спектральные наблюдения

Спектральные наблюдения звезды AS 310 выполнены в кассегреновском фокусе 2 м телескопа ШАО с применением спектрографа UAGS (Universal Astro Grid Spectrograph). В качестве светоприемника применялась CCD камера Andor (ikonL-936-BEX2-DD), работающая с матрицей 2048×2048 элементов, размер пикселя 13.5 мкм. Для адаптации CCD к спектрографу в камере спектрографа применялся светосильный объектив Canon EF ($f = 200$ mm, $f/2$). На данном комплексе получены спектры стандартных звезд, разного типа переменных звезд, а также спектры различных транзиентных объектов по программе Gaia [23, 24].

Применялась дифракционная решетка 651 шт/мм, которая при угле блеска 20.5° в первом порядке и при binning 1×1 дает спектр с линейной обратной дисперсией $144 \text{ \AA}/\text{мм}$ в диапазоне λ 3600–8000 \AA . В области линии $H\alpha$ (6562.816 \AA) в таком режиме получим умеренное спектральное разрешение, около $R = 3400$. Полученные спектры обрабатывались с помощью программы DECH 20 и ее модификаций¹. Вся обработка выполнялась стандартным методом.

Ошибки измерения лучевых скоростей стандартных звезд по разным линиям спектра с binning 1×1 составляют $\pm 3 - 10$ км/с в зависимости от отношения сигнала к шуму. Эквивалентные ширины наиболее сильных линий водорода у звезд спектрального класса A0–A6 можно определить с ошибкой $\pm 0.5 - 1.0 \text{ \AA}$.

¹Galazutdinov G., <http://www.gazinur.com/DECH-software.html>

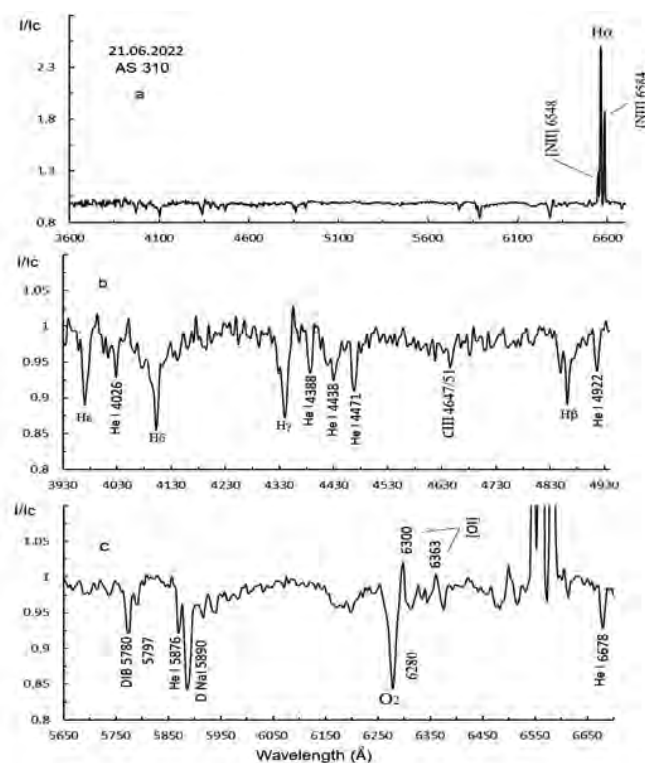


Рис. 4: Общий вид нормированного спектра AS 310 (a), а также участки спектра в интервале 3900–4900 Å (b) и 5600–6700 Å (c).

3.1. Общие характеристики спектра AS 310

Спектры звезды AS 310 были получены в 2020–2022 гг. Как видно из рис. 1, наши спектральные наблюдения получены в сезоны, когда изменения амплитуды блеска в V-полосе постепенно уменьшаются. На рис. 4 приводится общий вид спектра и две наиболее интересные области спектра звезды в разные даты. Линия $H\alpha$ наблюдается в виде сильной эмиссии, которая блендирует с эмиссионным дублетом [NII] 6548 и 6584 Å. Полуширины (FWHM) как у линии $H\alpha$, так и у запрещенных линий составляют примерно 8 ± 1.5 Å. Линия $H\beta$ имеет относительно слабый эмиссионный компонент, интенсивность которого значительно меняется в разные даты, до полного исчезновения. Полуширина эмиссионного компонента в линии $H\beta$ хорошо измеряется при JD 2458995, для которого мы получили значение 7.6 ± 1.2 Å. Наиболее сильные эмиссионные компоненты указанных линий имеют практически одну и ту же полуширину. Инструментальный контур для спектрографа UAGS при биннинге 1×1 составляет около 4.5 Å. Следовательно, для уширения рассматриваемых эмиссионных линий мы получим всего около 4 Å, что в области линии $H\alpha$ соответствует скорости около 180 км/с. Этот результат говорит о том, что все вышеуказанные эмиссионные компоненты, наблюдаемые в ядрах бальмеровских линий, и запрещенные линии, скорее всего, формируются в околозвездной туманности. В спектре звезды также наблюдаются эмиссионные линии дублета [OI] 6300 и 6363 Å (рис. 4c). Кроме того, в спектре звезды наблюдаются линии межзвездного поглощения (DIBs), а также некоторые абсорбционные линии Fe II (рис. 5).

На рис. 5 для сравнения показаны участки спектра 4000–5000 Å для четырех дат наблюдений. В ночь JD 2458995 наблюдается сильный эмиссионный пик в линии $H\beta$. В спектре, полученном через 4 дня, т. е., в ночь JD 2458999 интенсивность эмиссии в этой линии значительно уменьшилась.

На рис. 6 приводится изменение значений эквивалентных ширин линий $H\alpha$, $H\beta$ и [NII] для 6 разных ночей наблюдений. На 4-й панели рис. 6 также приводится изменение полуширин эмиссионных линий $H\alpha$ и дублета [Ne II]. Видно, что в первые две даты наблюдений значения EW у водородных линий значительно больше, чем в остальные дни. Полуширины эмиссионных линий остаются практически неизменными. Эквивалентные ширины эмиссионных линий $H\alpha$ больше в 2020 г., чем в остальные годы.

3.2. Линии нейтрального гелия

В спектре звезды наблюдаются линии нейтрального гелия He I 4026, 4387, 4417, 4922, 6678 Å и др. Эти линии достаточно сильные, что соответствует спектру раннего типа B, и не показывают каких-либо следов эмиссии. Эмиссионный компонент не выявляется даже у линии He I 5876, которая в спектрах у большинства

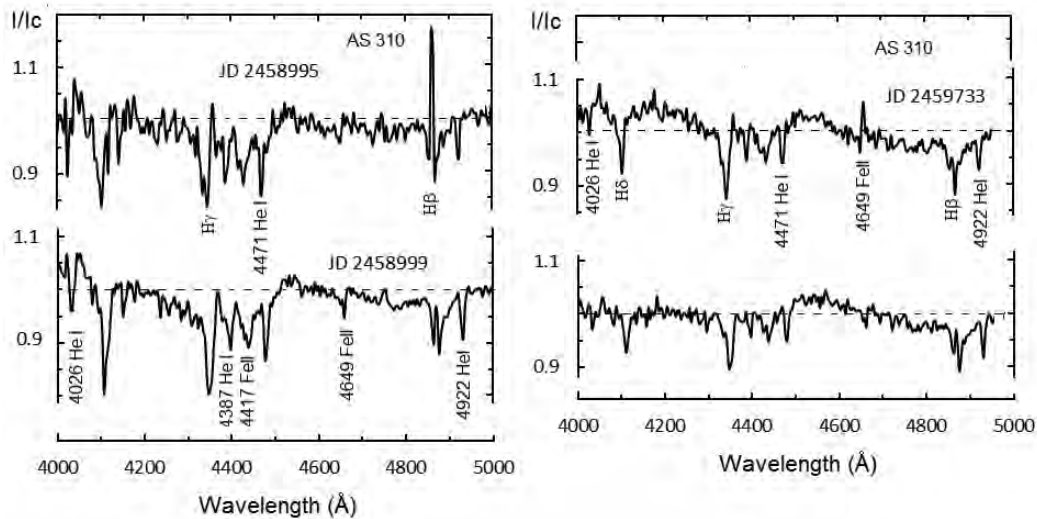


Рис. 5: Спектральные участки AS 310 в интервале 4000–5000 Å, полученные в разные ночи.

звезд типа HАеВе наблюдается в виде широкой эмиссии. В табл. 2 приведены измеренные эквивалентные ширины наиболее сильных линий He I. Поскольку ожидаемый спектральный класс звезды AS 310 — В1-В2 (см. табл. 1), то из табл. 2 видно, что в первые три даты EW большинства линий гелия имеют аномально большие значения. Это свидетельствует о возможном вкладе спектра близлежащей звезды. В последние 3 даты (табл. 2), когда звезда показывает ослабление эмиссии в линиях водорода, наблюдаются относительно нормальные значения EW у линий гелия. В табл. 2 также показаны средние значения эквивалентных ширин по всем наблюдениям, а также дисперсия среднего по всем данным.

5. Заключение и выводы

Результаты наших фотометрических наблюдений, выполненных в 2016–2022 гг., показали, что блеск и показатели цвета звезды AS 310 являются переменными. Поскольку звезда находится в сложном регионе НП и, вероятно, обладает близкими компонентами, это затрудняет правильную оценку вклада в изменение блеска отдельных компонентов системы и коэффициента межзвездного поглощения в направлении на систему. Данные каталога 2MASS, а также результаты работы [25] свидетельствуют о том, что звезда AS 310 находится в области, где наблюдается большое скопление звезд, расположенных на угловом расстоянии более 10". Обнаружить периодическую переменность блеска такой системы крайне затруднительно. Также по спектрам с низким разрешением невозможно разрешить спектральные линии отдельных компонентов системы. Наши измерения лучевых скоростей по линиям водорода и гелия сильно различаются и имеют большие ошибки, что не позволяет сделать уверенные выводы.

Результаты наших спектральных наблюдений показали, что а) с 2020 по 2022 гг. эквивалентные ширины линий гелия и эмиссионных компонентов линий водорода плавно уменьшаются, б) синхронно с изменением спектра плавно уменьшается амплитуда изменения блеска в V-полосе, в) значения эквивалентных ширин линий нейтрального гелия в отдельные даты примерно вдвое больше, чем у звезд классов В1-2, у которых эти линии максимально интенсивные.

Таблица 2: Эквивалентные ширины избранных абсорбционных линий гелия.

JD2450000+	EW(Å), He I lines						
	4026	4387	4438	4471	4921	5876	6678
8995.291	0.79	1.39	2.41	1.58	0.79	1.44	2.58
8999.421	1.02	2.36	2.84	1.91	1.62	2.79	2.83
9054.321	0.94	1.78	2.17	1.57	1.19	2.81	1.38
9471.301	0.88	0.69	1.96	1.53	0.89	2.62	1.70
9733.419	0.84	0.78	1.55	1.07	0.83	1.74	1.13
9752.353	0.96	0.79	1.02	1.01	0.65	1.03	0.88
mean	0.91	1.30	1.99	1.45	1.00	2.07	1.75
RMS	0.09	0.67	0.64	0.34	0.35	0.77	0.79

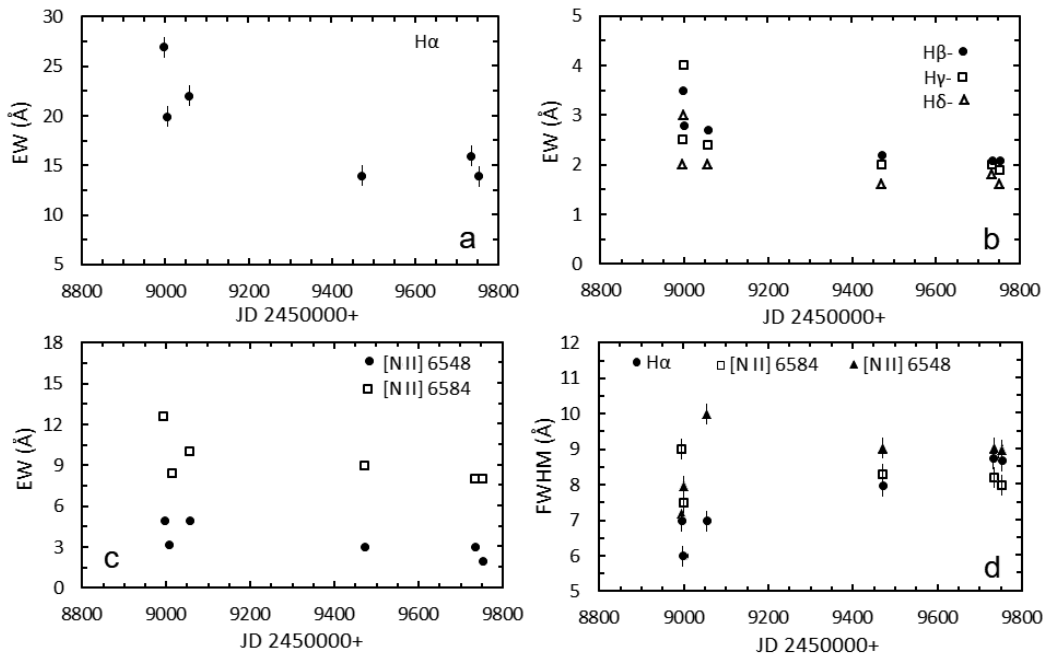


Рис. 6: Переменность эквивалентных ширин линий водорода $H\alpha$ (a), $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$ (b) и $[NII]$ 6548, 6584 Å (c). На панели (d) показано временное изменение полуширин эмиссии $H\alpha$ (жирные точки) и дублета $[NII]$ 6548 Å (треугольники), 6584 Å (квадраты). Вертикальным отрезком показана средняя ошибка.

Результаты наших наблюдений можно объяснить следующим образом. Возможен вклад второй звезды в EW линий гелия. Изменение эмиссии в водородных линиях, а также их нетипичная для HАеВе звезд малая ширина, что отмечено также в работе [2], указывают на то, что эти эмиссии возникают в околозвездном газе под действием УФ излучения горячих звезд. Отсутствие эмиссионного компонента в линиях HeI говорит о том, что, скорее всего, звезды не обладают околозвездными аккреционными дисками. Такие горячие ОВ звезды и раньше обнаруживались, например, θ^1 Ori в туманности Ориона M42 (см., например, [29, 30, 31]). Возможно, из-за большой массы, такие системы быстро теряют протопланетные диски. Наблюдаемая переменность блеска и спектра в таких массивных системах может быть связана с динамикой или с физической переменностью отдельных звезд, входящих в систему. Эти выводы являются предварительными и для их проверки нужны новые исследования с более высоким спектральным разрешением.

Предположим, что более яркая звезда системы имеет спектральный класс B2V. В этом случае показатели цвета для звезд ГП равны $(B - V)_0 = -0.21$, $(V - R_c)_0 = -0.094$, $(V - I_c)_0 = -0.23$ [32]. Судя по рис. 2, $B - V$ меняется в интервале от 1.0 до 1.9, $V - R_c$ от -0.4 до 0.4 , $V - I_c$ от 0.2 до 0.9 . Максимальная амплитуда изменений блеска в V-полосе составляет $\Delta V \sim 0.6$ mag, а показателей цвета — $\Delta(V - R_c) \sim 0.8$

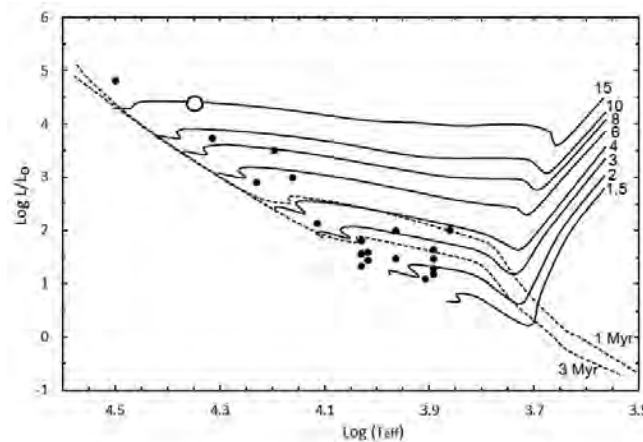


Рис. 7: Диаграмма ГР для хорошо известных звезд типа AeBe Хербига (черные кружки), параметры которых взяты из работы [26]. Эволюционные треки построены по данным [27] и [28]. Жирные линии указывают массы, пунктирные линии — возрасты. Светлым кружком обозначено положение звезды AS 310.

mag, $\Delta(B - V) \sim 0.9$ и $\Delta(V - I_c) \sim 0.6$ mag. Наблюдаемое увеличение блеска системы в разные даты может быть связано с увеличением вклада вторичной звезды системы. При более устойчивом, минимальном состоянии блеска в полосах В и V (13.85 и 12.6 mag, соответственно, см. рис. 1) для звезды В2V получим $E(B - V) = 1.46$ и $A_V = R E(B - V) = 4.526$ (взят стандартный коэффициент покраснения $R = 3.1$). Сравнение с табл. 1 показало, что полученное значение A_V хорошо согласуется с данными [11] ($A_V = 4.13$) и [15] ($A_V = 4.1$). Принимая $V_0 = 12.6$ mag и расстояние 2500 пс до AS310, можно вычислить абсолютную звездную величину

$$M_V = m + 5 - 5 \lg r - A_V = -3.92 \text{ mag.}$$

С учетом болометрической поправки получим $M_{V_b} = -5.98$, а для светимости и радиуса звезды $\lg L/L_\odot = 4.31$ и $R = 9.4R_\odot$, соответственно.

На рис. 7 приводится диаграмма ГР с эволюционными треками, взятыми из работ [27] и [28]. Для массы и верхней границы возраста получим $M \approx 14 \pm 1.0 M_\odot$ и $t < 0.5$ Myr.

Таким образом, наши наблюдения показали, что звезда AS 310 является массивной, экстремально молодой звездой. Необходимо детальное изучение других членов группы, в которую входит AS 310.

Список литературы

1. G. H. Herbig, *Astrophys. J. Supp.*, **4**, 337, 1960.
2. U. Finkenzeller and R. Mundt, *Astron. and Astrophys. Supp.*, **55**, 109, 1984.
3. J. Guzmán-Díaz, I. Mendigutía, B. Montesinos, R. D. Oudmaijer, et al., *Astron. and Astrophys.*, **650**, A182, 2021.
4. M. A. Pogodin, S. E. Pavlovskij, N. A. Drake, N. G. Beskrovnaya, et al., in Y. Y. Balega, D. O. Kudryavtsev, I. I. Romanyuk, and I. A. Yakunin, eds., *Stars: From Collapse to Collapse*, **510**, 157 (2017).
5. N. Z. Ismailov, M. A. Pogodin, U. Z. Bashirova, and G. R. Bahaddinova, *Astronomy Reports*, **64**, 23, 2020.
6. G. H. Herbig and K. R. Bell, *Third Catalog of Emission-Line Stars of the Orion Population : 3 : 1988* (1988).
7. Y. P. Georgelin and Y. M. Georgelin, *Astron. and Astrophys.*, **6**, 349, 1970.
8. T. Henning, R. Launhardt, J. Steinacker, and E. Thamm, *Astron. and Astrophys.*, **291**, 546, 1994.
9. C. Wichittanakom, R. D. Oudmaijer, J. R. Fairlamb, I. Mendigutía, M. Vioque, and K. M. Ababakr, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **493**, 234, 2020.
10. A. P. Verhoeff, L. B. F. M. Waters, M. E. van den Ancker, M. Min, et al., *Astron. and Astrophys.*, **538**, A101, 2012.
11. M. Vioque, R. D. Oudmaijer, M. Schreiner, I. Mendigutía, D. Baines, N. Mowlavi, and R. Pérez-Martínez, *Astron. and Astrophys.*, **638**, A21, 2020.
12. L. Testi, F. Palla, and A. Natta, *Astron. and Astrophys. Supp.*, **133**, 81, 1998.
13. T. Y. Brooke, A. T. Tokunaga, and S. E. Strom, *Astron. J.*, **106**, 656, 1993.
14. P. Manoj, H. C. Bhatt, G. Maheswar, and S. Muneer, *Astrophys. J.*, **653**, 657, 2006.
15. J. Hernández, N. Calvet, C. Briceño, L. Hartmann, and P. Berlind, *Astron. J.*, **127**, 1682, 2004.
16. B. I. Abdullayev, I. A. Alekberov, N. I. Gulmaliyev, S. O. Majidova, K. M. Mikailov, and B. N. Rustamov, *Azerbaijani Astronomical Journal*, **7**, 39, 2012.
17. U. Valiyev, S. Alishov, and N. Z. Ismailov, *Peremennye Zvezdy*, **42**, 51, 2022.
18. N. R. Lomb, *Astrophys. and Space Sci.*, **39**, 447, 1976.
19. J. D. Scargle, *Astrophys. J.*, **263**, 835, 1982.
20. P. Lenz and M. Breger, *Communications in Asteroseismology*, **146**, 53, 2005.
21. W. Herbst and V. S. Shevchenko, *Astron. J.*, **118**, 1043, 1999.
22. K. N. Grankin, S. Y. Melnikov, J. Bouvier, W. Herbst, and V. S. Shevchenko, *Astron. and Astrophys.*, **461**, 183, 2007.
23. N. Z. Ismailov, K. M. Mikhailov, O. V. Khalilov, I. A. Alekberov, et al., *The Astronomer's Telegram*, **13861**, 1, 2020.
24. I. Gezer, N. Z. Ismailov, K. M. Mikailov, O. V. Khalilov, et al., *The Astronomer's Telegram*, **13992**, 1, 2020.
25. S. Thomas, B. Rodgers, N. S. van der Blik, G. Doppmann, J. Bouvier, C. Salvo, J. Beuzit, and F. Rigaut, *Astron. J.*, **165**, 135, 2023.
26. N. Z. Ismailov, U. Z. Valiyev, and N. S. Dzhililov, *Azerbaijani Astronomical Journal*, **17**, 40, 2022.
27. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **427**, 127, 2012.
28. P. Marigo, L. Girardi, A. Bressan, P. Rosenfield, et al., *Astrophys. J.*, **835**, 77, 2017.
29. P. P. Parenago, *Trudy Gosudarstvennogo Astronomicheskogo Instituta*, **25**, 3, 1954.
30. E. A. Antokhina, N. Z. Ismailov, and A. M. Cherepashchuk, *Pisma v Astronomicheskii Zhurnal*, **15**, 837, 1989.
31. Y. Y. Balega, E. L. Chentsov, V. V. Leushin, A. K. Rzaev, and G. Weigelt, *Astrophysical Bulletin*, **69**, 46, 2014.
32. M. J. Pecaut and E. E. Mamajek, *Astrophys. J. Supp.*, **208**, 9, 2013.

Исследование звезды высокой светимости J073620.47+653701.9 в галактике NGC 2403

Калдыбекова А.Б.¹, Галимова Э.К.¹, Соловьева Ю.Н.², Винокуров А.С.²

¹Казанский федеральный университет, Казань, Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

В данной работе представлены результаты фотометрического и спектрального исследования звезды высокой светимости J073620.47+653701.9 ($M_V < -8.52^m$) в галактике NGC 2403 ($D = 3.2$ Мпк), основанного на данных наземных (БТА, Цейсс-1000) и космических (Hubble Space Telescope, Spitzer) телескопов. J073620.47+653701.9 не показал существенного изменения блеска: $\Delta B = 0.19^m \pm 0.13^m$ и $\Delta V = 0.20^m \pm 0.16^m$ с 2005 по 2020 гг. Оценки болометрической светимости и начальной массы составляют $\log(L_{\text{bol}}/L_{\odot}) = 5.40 \pm 0.09$ и $20 - 24M_{\odot}$ соответственно. ИК избыток в спектральном распределении энергии указывает на присутствие теплой околозвездной газо-пылевой оболочки. Оценка температуры фотосферы звезды составила $T_{\text{color}} = 9950 \pm 580$ К при величине межзвездного поглощения $A_V = 0.35^m$. В оптических спектрах содержатся линии [O I], [Fe II] и [Ca II], характерные для B[e]-сверхгигантов. Оценка возраста звездного окружения составила 5 млн. лет. По совокупности наблюдательных характеристик звезда J073620.47+653701.9 предварительно классифицирована как B[e]-сверхгигант.

Поступила в редакцию 31.07.2023 г. Принята в печать 16.08.2023 г.

Ключевые слова: звезды высокой светимости, B[e]-сверхгиганты

Study of the luminous star J073620.47+653701.9 in the galaxy NGC 2403

Kaldybekova A.B.¹, Galimova E.K.¹, Solovyeva Y.N.², Vinokurov A.S.²

¹Kazan Federal University, Kazan, Russia

²Special Astronomy Observatory of the RAS, Nizhniy Arkhyz, Russia

We present the results of ground- and space-based photometric and spectral study of luminous star J073620.47+653701.9 ($M_V < -8.52^m$) in the NGC 2403 galaxy ($D = 3.2$ Mpc). J073620.47+653701.9 did not show the significant photometric variability: $\Delta B = 0.19^m \pm 0.13^m$ and $\Delta V = 0.20^m \pm 0.16^m$ from 2005 to 2020. The bolometric luminosity and initial mass estimates are $\log(L_{\text{bol}}/L_{\odot}) = 5.40 \pm 0.09$ and $20 - 24M_{\odot}$, respectively. The IR excess in the spectral energy distribution indicates the presence of a circumstellar envelope. The estimates of the stellar photosphere temperature and interstellar reddening are $T_{\text{color}} = 9950 \pm 580$ K and $A_V = 0.35^m$, respectively. The optical spectrum contains the [O I], [Fe II] and [Ca II] lines characteristic of B[e]-supergiants. The estimate of the age of the stellar environment is about 5 million years. Based on the observational characteristics, the star J073620.47+653701.9 has been preliminary classified as a B[e]-supergiant.

Received 31.07.2023. Accepted 16.08.2023.

Keywords: luminous stars, B[e]-supergiants

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.005

1. Введение

Звезды высокой светимости являются малочисленным, но разнообразным классом звезд, вносящих значительный вклад в обогащение межзвездной среды тяжелыми элементами. Их принято разделять на следующие 6 подклассов [1]:

1. Яркие голубые переменные звезды (Luminous Blue Variables, LBV) — звезды высокой светимости ($> 10^5 L_{\odot}$ [1]), показывающие значительную спектральную и фотометрическую переменность [2]. В спектрах LBV обычно присутствуют эмиссионные линии H, He I, Fe II, [Fe II], Si II, N II и другие, в зависимости от температуры фотосферы звезды, а в спектральном распределении энергии наблюдается свободно-свободное излучение в ближней ИК области на длинах волн 1–2 μm , формирующееся в звездном ветре [3].
2. B[e]-сверхгиганты. Их светимости обычно лежат в диапазоне $4 < \log(L_{\text{bol}}/L_{\odot}) < 6$, а спектры содержат эмиссионные линии [O I] и [Fe II], и в некоторых случаях линии [Ca II] и Ca II. Большинство подтвержденных B[e]-сверхгигантов окружены теплой околозвездной пылевой оболочкой, которая наблюдается в спектральном распределении энергии как заметный ИК избыток на длинах волн 2–3 μm [4]. У B[e]-сверхгигантов наблюдается слабая фотометрическая переменность на уровне 0.1–0.2^m.
3. Fe II-эмиссионные звезды. Отличительной чертой этой группы звезд является наличие голубого континуума с сильными эмиссионными линиями водорода и Fe II, а также полное отсутствие линий поглощения. Многие из этих звезд имеют избыток излучения в инфракрасном диапазоне, связанный с свободно-свободным излучением ветра и тепловым излучением пыли [1].
4. Теплые гипергиганты — это массивные звезды, в спектрах которых наблюдаются абсорбционные линии, характерные для звезд спектральных классов A–F, и эмиссионные линии водорода серии Бальмера. Кроме того, некоторые теплые гипергиганты показывают сильные линии излучения Fe II и слабые

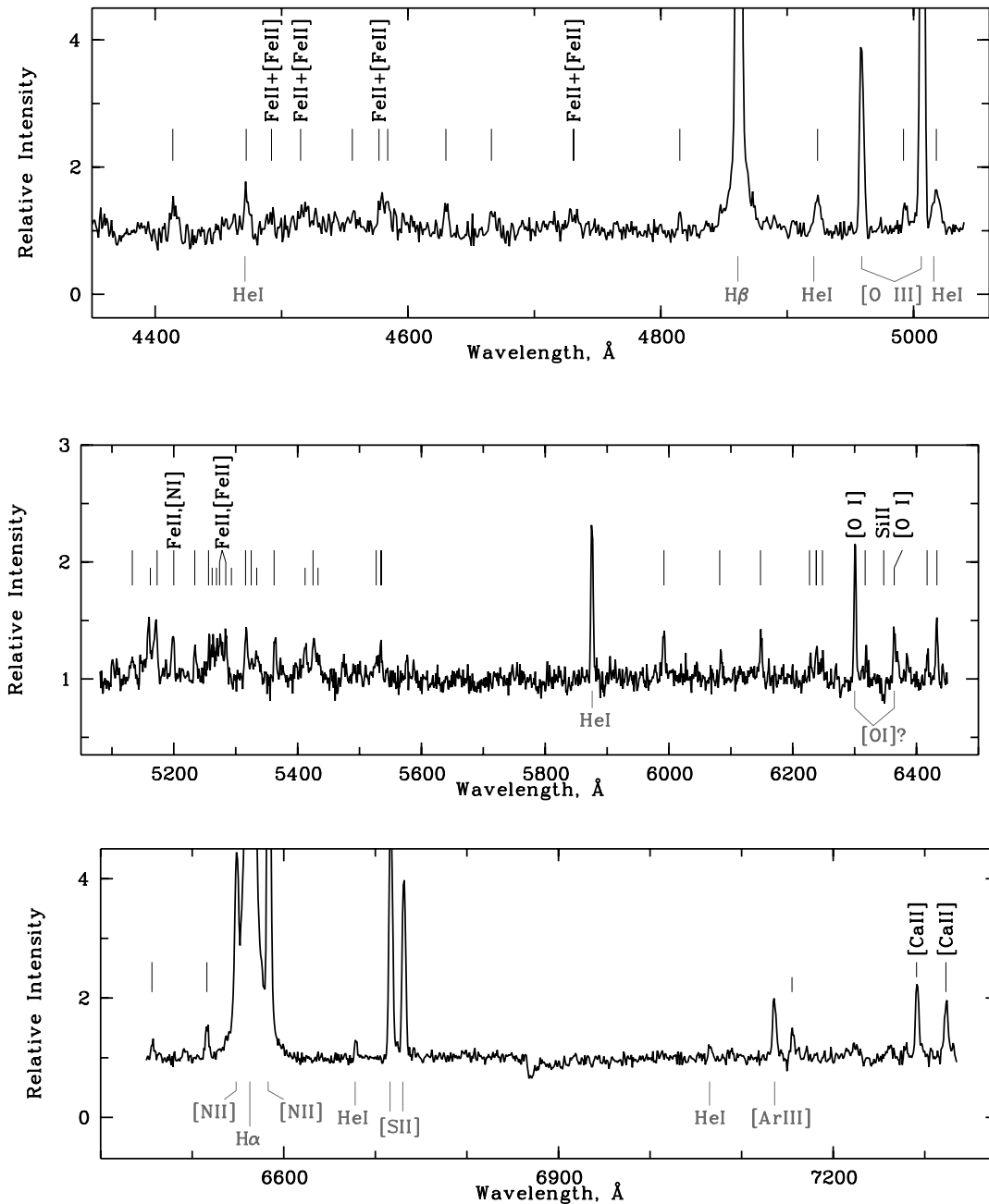


Рис. 1: Нормированный спектр J073620.47+653701.9, полученный 04 ноября 2021 г. с помощью БТА/SCORPIO-2. Красным цветом показаны линии, формирующиеся в газе H II-области, окружающей J073620.47+653701.9 и ближайшую группу молодых звезд, черным цветом — линии, принадлежащие исследуемой звезде. Неподписанными длинными и короткими штрихами отмечены линии Fe II и [Fe II], соответственно. Широкие компоненты линий водорода могут быть связаны с высокоскоростным полярным ветром звезды или с рассеянием на свободных электронах в ветре.

[Fe II]. Общими чертами звезд этого типа являются значительный избыток излучения в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, вызванный свободно-свободным излучением звездного ветра и тепловым излучением околозвездной пыли, а также отсутствие спектральной и значительной фотометрической переменности [1].

5. Горячие и промежуточные (желтые) сверхгиганты. В группу горячих сверхгигантов входят яркие звезды O- и B-типа с водородными и другими эмиссионными линиями (например, Fe II). Некоторые из них показывают спектральную и фотометрическую переменность [4]. Промежуточные (или желтые) сверхгиганты — это более холодные сверхгиганты со спектрами поглощения A–F типа, эмиссионными лини-

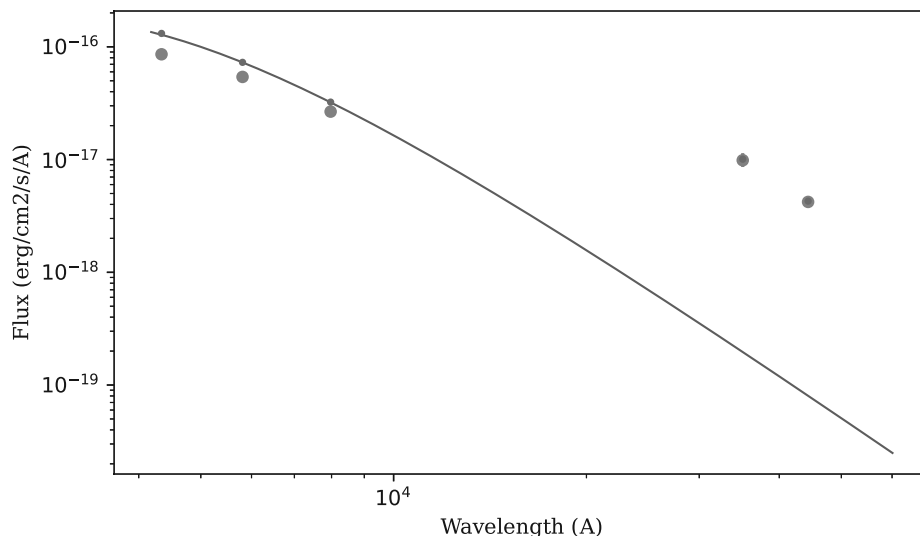


Рис. 2: Спектральное распределение энергии J073620.47+653701.9, построенное по данным HST/ACS/WFC и Spitzer. Серым цветом отмечены наблюдаемые данные, красным — данные, скорректированные за поглощение $A_V = 0.35^m$. Синим цветом показана аппроксимация оптических данных функцией Планка.

ями водорода и реке He I. Желтые сверхгиганты не демонстрируют спектральной или значительной фотометрической переменности [5].

- Звезды Of/late-WN, в спектрах которых наблюдаются эмиссионные линии N III и He II λ 4686 Å, а также сильные эмиссии линии водорода и He I, указывающие на высокую температуру фотосферы.

Несмотря на схожесть наблюдательных характеристик перечисленных типов звезд, эволюционная связь между ними не установлена, что обусловлено малочисленностью некоторых из представленных типов (например, B[e]-сверхгигантов и LBV звезд).

Исследуемая звезда J073620.47+653701.9 была выделена сотрудниками лаборатории физики звезд САО РАН как кандидат в LBV звезды на основании наблюдаемого H α -избытка, обнаруженного по данным фотометрии, представленной в архиве Hubble Legacy Archive: в фильтре F658N (H α + [N II]) звезда имеет звездную величину 18.0^m, а в полосах F606W и F814W, приблизительно соответствующих полосам V и I_c системы Джонсона-Козинса, звездные величины составляют 19.3^m и 19.2^m соответственно.

2. Спектроскопия

Спектры звезды J073620.47+653701.9 были получены на 6-м телескопе БТА в длиннощелевой моде с применением спектрографов SCORPIO-1 и SCORPIO-2 [6] в период с 2013 по 2021 гг. На рис. 1 приведен спектр, полученный 2021-11-04 с помощью SCORPIO-2 в диапазоне 3660–7300 Å. Ориентация щели шириной 1'' показана на рис. 3. Спектральное разрешение составляло около 4 Å, а размер звездного изображения — 1.2''.

Оптический спектр объекта изобилует эмиссионными линиями: эмиссионные линии водорода Бальмеровской серии с широкими крыльями, множество линий Fe II и [Fe II], а также запрещенные линии [Ca II] и [O I]¹. Данный набор линий характерен для B[e]-сверхгигантов, но может наблюдаться у Fe II-эмиссионных звезд и теплых гипергигантов. Однако наличие в спектре слабых абсорбционных линий (например, Si II 6347 Å) исключает принадлежность J073620.47+653701.9 к Fe II-звездам. В то же время эти абсорбции очень слабы и малочисленны, что не позволяет классифицировать объект и как гипергигант.

В спектре звезды также присутствуют линии поглощения Na I D1 D2, формирующиеся в межзвездной среде. Суммарная эквивалентная ширина этих линий составляет 0.8 ± 0.1 Å. Используя соотношение между эквивалентной шириной этих линий и величиной межзвездного поглощения для нашей Галактики, приведенное в работе [7], мы получаем $E(B - V) = 0.12$ или $A_V = 0.37^m$, принимая $R_V = 3.07$.

Звезда J073620.47+653701.9 расположена на краю крупного комплекса звездообразования размером около 11'', что на расстоянии 3.2 Мпк [8] соответствует линейному размеру примерно 170 пк. В составе отдельных звездных групп обнаружены WR-звезды, у которых наблюдаются широкие эмиссионные линии He II λ 4685 Å и бленды линий C III+N III λ 4660 Å, C IV-N IV λ 5860 Å. Возраст этих групп был оценен с использованием зависимости эквивалентной ширины He II от возраста как $(4.8 \pm 1.0) \times 10^6$ лет².

¹В линии [O I] может присутствовать вклад излучения туманности.

²<https://www.stsci.edu/science/starburst99/docs/default.htm>

Таблица 1: Результаты оптической фотометрии J073620.47+653701.9.

Телескоп	Дата	B , mag	V , mag	I , mag
HST	2005/03/29	–	–	18.45 ± 0.03
HST	2005/10/17	19.37 ± 0.03	19.26 ± 0.03	–
БТА	2013/12/31	–	19.46 ± 0.16	–
БТА	2019/10/27	–	19.42 ± 0.15	–
БТА	2019/10/28	19.26 ± 0.19	–	–
ЦЕЙСС-1000	2020/01/20	–	19.36 ± 0.14	–
ЦЕЙСС-1000	2020/02/17	–	19.43 ± 0.23	–
БТА	2020/09/23	19.23 ± 0.11	–	–
БТА	2020/11/12	–	19.37 ± 0.05	–
БТА	2020/11/13	19.18 ± 0.13	–	–
БТА	2021/05/11	19.32 ± 0.16	–	–

С «локальной» звездной группой, которой, вероятно, принадлежит J073620.47+653701.9, связана туманность, основными линиями оптического спектра которой являются эмиссионные линии водорода бальмеровской серии, [O III], [N II], [S II]. Из отношения интенсивностей линий [S II] и [N II] получены оценки электронной температуры $T_e \approx 8400\text{K}$ и электронной концентрации $n_e \approx 10^2 \text{ cm}^{-3}$. С использованием ионизационной диаграммы [5] был определен возможный механизм ионизации газа туманности: фотоионизация УФ излучением горячих звезд. На основе отношения потоков водородных линий бальмеровской серии в спектре туманности для случая В фотоионизации [9] было оценено значение межзвездного поглощения $A_V = 0.39 \pm 0.12^m$ вблизи J073620.47+653701.9, что согласуется с оценкой, полученной выше.

3. Фотометрия

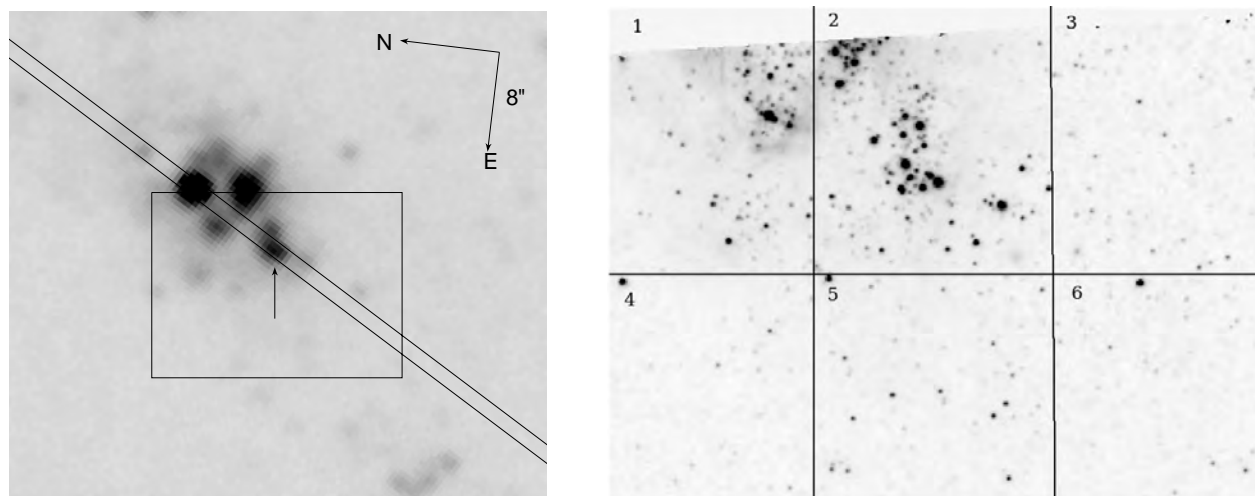


Рис. 3: Слева: Изображение в фильтре В области галактики NGC 2403 вблизи J073620.47+653701.9 (отмечен стрелкой), полученное 2021-11-04 с помощью БТА САО РАН. Показана ориентация щели шириной 1.2 угловых секунд во время спектральных наблюдений 2021-11-04. Прямоугольник размером $20'' \times 15''$ обозначает область, выбранную для построения диаграммы «цвет — звездная величина». Справа: Изображение в фильтре F435W (HST/ACS/WFC) области размером $20'' \times 15''$, поделенное на 6 равных частей (см. текст).

Результаты оптической фотометрии J073620.47+653701.9 приведены в табл. 1. По данным наземных телескопов и космического телескопа имени Хаббла (Hubble Space Telescope, HST) за период с 2005 по 2020 гг. изменение блеска J073620.47+653701.9 не превышает $\Delta B = 0.19^m \pm 0.13^m$ и $\Delta V = 0.20^m \pm 0.16^m$. Таким образом, с учетом указанных величин ошибок мы не детектируем значимой переменности объекта, что дает основание использовать разновременные данные при определении фундаментальных параметров по спектральному распределению энергии (SED). Для построения SED использовались архивные данные HST, полученные камерой ACS/WFC в фильтрах F435W и F606W (2005/10/17) и F814W (2005/03/29), а также архивные данные космического телескопа Spitzer в полосах 3.6 микрон (2010/05/23) и 4.5 мик-

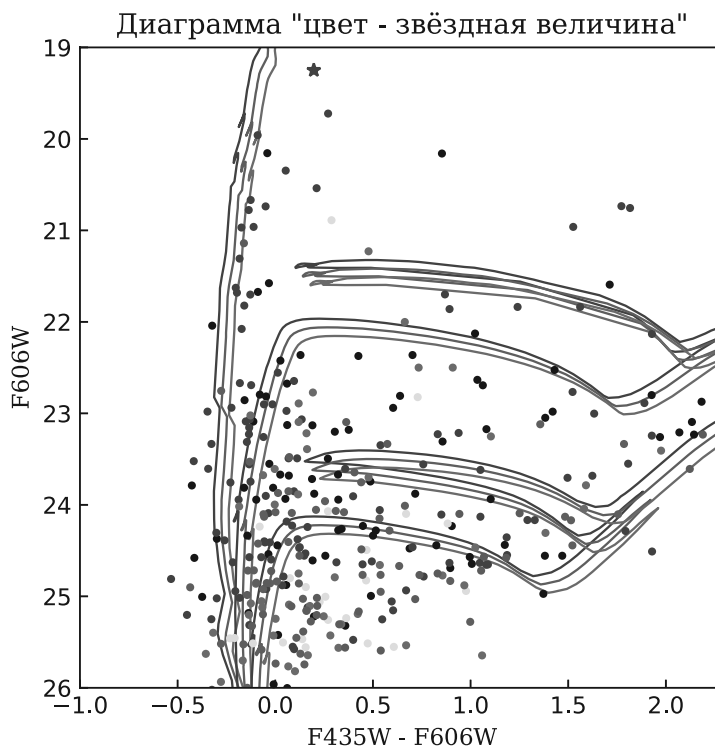


Рис. 4: Диаграмма «цвет — звездная величина» для окружения около J073620.47+653701.9, который обозначен символом звезды. Линиями показаны изохроны для возраста 5, 30 и 100 млн. лет (сверху вниз). Синий цвет соответствует значению поглощения $A_V = 0.1^m$, зеленый — 0.2^m , красный — 0.3^m .

рон (2014/01/14). Спектральное распределение энергии аппроксимировалось функцией Планка с учетом кривой поглощения [10] для значения $A_V = 0.35^m$ с $R_V = 3.07^3$. Наилучшая модель имеет параметры $T_{\text{color}} = 9950 \pm 580$ К и $\log(L_{\text{bol}}/L_{\odot}) = 5.40 \pm 0.09$ ($\chi^2 \approx 0.6$). В спектральном распределении энергии (рис. 2) наблюдается избыток излучения в ближнем ИК-диапазоне, который может быть связан с присутствием теплой околозвездной пыли, что характерно для В[e]-сверхгигантов [11]. На основе наблюдательных характеристик звезда J073620.47+653701.9 предварительно классифицирована как В[e]-сверхгигант.

Помимо описанного выше метода возраст окружающего J073620.47+653701.9 звездного населения оценивался на основе сравнения положения звезд на диаграмме «цвет — звездная величина» с теоретическими изохронами. Для этого была проведена апертурная фотометрия звезд в прямоугольной области размером $20'' \times 15''$ (рис. 3) по архивным изображениям в фильтрах F435W и F606W HST/ACS/WFC (2005-10-17). Рассматриваемая область была разбита на 6 подобластей для проверки отсутствия значительных вариаций возраста звездных групп или величины поглощения.

Наборы изохрон рассчитывались с помощью web-ресурса CMD 3.7⁴ для металличности $Z = 0.008$ в галактике NGC 2403 на удалении около 4 кпк от центра, где расположена J073620.47+653701.9 [14], и корректировались на межзвездное поглощение, значение которого варьировалось от 0.1 до 0.5^m . Пределы приблизительно соответствуют Галактическому поглощению на луче зрения и значению поглощения, полученного по бальмеровскому декременту туманности.

Результирующие диаграммы «цвет — звездная величина» показаны на рис. 4, где символы разных цветов соответствуют звездам из 6 подобластей. Видно, что значимого различия в положении звезд нет, соответственно, значение поглощения и возраста в этих областях примерно одинаково. При этом звездное окружение описывается не одной, а несколькими изохронами, что указывает на несколько вспышек звездообразования. Самые молодые звезды и исследуемый объект хорошо описываются изохроной возраста 5 млн. лет. Оптимальное значение покраснения определялось путем сравнения покрасненной изохроны с наблюдаемой главной последовательностью звезд из выбранной области (рис. 4, слева). В результате была

³Значение $A_V = 0.35$ получено усреднением оценок, полученных по результатам измерения наблюдаемого бальмеровского декремента в туманности и по диаграммам «цвет — звездная величина».

⁴<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

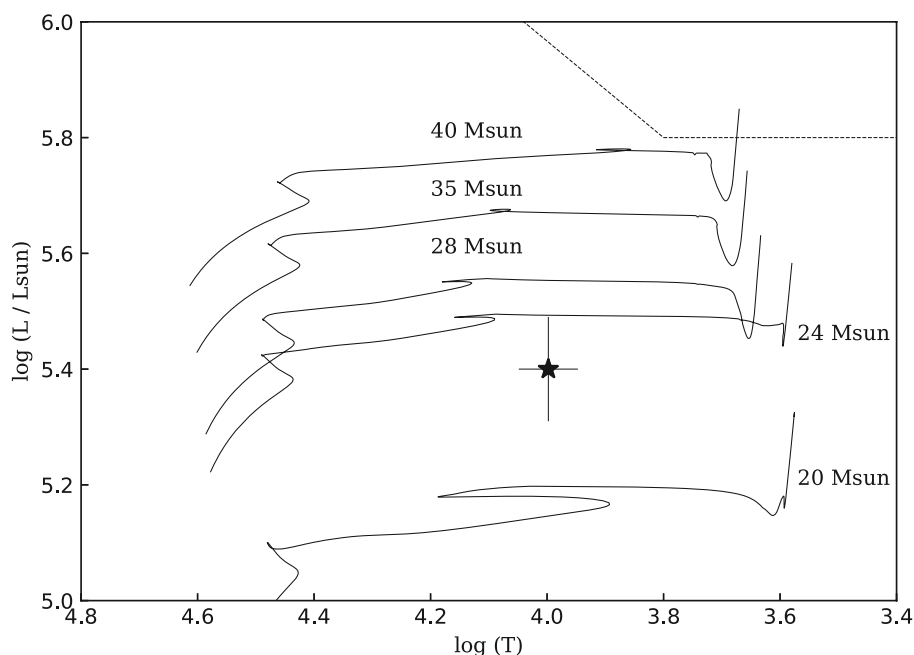


Рис. 5: Диаграмма «температура-светимость» для J073620.47+653701.9. На диаграмму нанесены эволюционные треки для массивных звезд из работы [12]. Положение объекта отмечено звездой. Пунктирной линией обозначен предел Хэмфрис-Дэвидсона [13]

получена оценка покраснения $A_V \approx 0.3^m$, что вполне согласуется с оценками, полученными выше двумя независимыми методами.

На рис. 5 показана диаграмма «температура-светимость» с эволюционными треками [12] для звезд разных масс. Положение J073620.47+653701.9 соответствует диапазону масс $20 - 24 M_{\odot}$. Продолжительность жизни звезды с такой массой составляет несколько млн. лет, что не противоречит оценке возраста для окружения около 5 млн. лет.

4. Заключение

Фотометрическое исследование LBV-кандидата J073620.47+653701.9 ($M_V < -8.52^m$) в галактике NGC 2403 ($D = 3.2$ Мпк) по наземным (БТА, Цейсс-1000) и космическим (Hubble Space Telescope, Spitzer) данным не выявило существенного изменения блеска ($\Delta B = 0.19^m \pm 0.13^m$ и $\Delta V = 0.20^m \pm 0.16^m$ с 2005 по 2020 гг.). Оценки болометрической светимости и начальной массы составляют $\log(L_{bol}/L_{\odot}) = 5.40 \pm 0.09$ и $20 - 24 M_{\odot}$ соответственно. ИК избыток в спектральном распределении энергии указывает на присутствии теплой околозвездной газо-пылевой оболочки. Оценка температура фотосферы составила $T_{color} = 9950 \pm 580$ К при величине межзвездного поглощения $A_V = 0.35^m$. В спектре содержатся линии [O I], [Fe II] и [Ca II], присущие B[e]-сверхгигантам. Оценка возраста звездного окружения составила 5 млн. лет. По совокупности наблюдательных характеристик звезда J073620.47+653701.9 предварительно классифицирована как B[e]-сверхгигант.

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН), утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. R. M. Humphreys, K. Weis, K. Davidson, D. J. Bomans, and B. Burggraf, *Astrophys. J.*, **790**, 48, 2014.
2. A. M. van Genderen, *Astron. and Astrophys.*, **366**, 508, 2001.
3. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Proc. Astron. Soc. Pacif.*, **106**, 1025, 1994.
4. R. M. Humphreys, M. S. Gordon, J. C. Martin, K. Weis, and D. Hahn, *Astrophys. J.*, **836**, 64, 2017.

5. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Proc. Astron. Soc. Pacif.*, **93**, 5, 1981.
6. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy*, **20**, 363, 2011.
7. D. Poznanski, J. X. Prochaska, and J. S. Bloom, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **426**, 1465, 2012.
8. J. L. Carlin, D. J. Sand, P. Price, B. Willman, et al., *Astrophys. J. Lett.*, **828**, L5, 2016.
9. D. E. Osterbrock and G. J. Ferland, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (2006).
10. E. L. Fitzpatrick, *Proc. Astron. Soc. Pacif.*, **111**, 63, 1999.
11. T. Liimets and et al., *Galaxies*, **10**, 41, 2022.
12. J. Tang, A. Bressan, P. Rosenfield, A. Slemmer, P. Marigo, L. Girardi, and L. Bianchi, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **445**, 4287, 2014.
13. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Astrophys. J.*, **232**, 409, 1979.
14. F. Bresolin, R.-P. Kudritzki, and M. A. Urbaneja, *Astrophys. J.*, **940**, 32, 2022.

Качество астрономического изображения на Майданакской обсерватории

Турсункулов С.Б.¹, Азимов А.М.¹, Тиллаев Ю.А.^{1,2}, Эгамбердиев Ш.А.^{1,2}

¹Астрономический институт им. Улугбека АН РУз, Ташкент, Узбекистан

²Национальный университет Узбекистана, Ташкент, Узбекистан

Атмосферное качество астрономического изображения было исследовано с помощью прибора DIMM — измерителя дифференциальных дрожаний звезд для оценки интегральной турбулентности над обсерваторией. Была также изучена приземная составляющая данного параметра путем сравнения оценок качества изображения, полученного на разных высотах. Оценено влияние скорости приземного ветра на приземную турбулентность. Кроме того, проведен статистический анализ скорости и направления ветра в тропопаузе (уровень слоя с атмосферным давлением 200 мБ) в период времени с 1957 по 2002 гг. по данным базы ERA5 и изучено влияние этого ветра на качество изображения, измеренного в 1996–2002 гг. Результаты показали, что медианное значение качества изображения по всей атмосфере составило 0.69 угловых секунд. Средняя скорость ветра на уровне тропопаузы равна 29 м/с, доминантное направление — западное. Качество изображения имеет сильную корреляцию со скоростью ветра в приземном слое — коэффициент корреляции составил чуть менее 0.50. Направление ветра заметно не влияет на турбулентность. Изменения скорости и направления ветра на высоте 200 мБ не проявляются в изменениях интегрального качества изображения во всей атмосфере.

Поступила в редакцию 28.07.2023 г. Принята в печать 22.08.2023 г.

Ключевые слова: атмосферная турбулентность, качество изображения, скорость ветра

Astronomical seeing at Maidanak Observatory

Tursunkulov S.B.¹, Azimov A.M.¹, Tillayev Y.A.^{1,2}, Ehgamberdiev Sh.A.^{1,2}

¹Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

²National University of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Astronomical seeing has been studied using the DIMM — differential image motion monitor for estimation of the integral turbulence above the observatory. The surface component of this parameter has also been studied by comparing the seeing obtained at different heights. The effect of surface wind speed on surface turbulence has been estimated. In addition, a statistical analysis of the wind speed and direction at the tropopause (the height with the air pressure of 200 mB) carried out for the period from 1957 to 2002 based on data from ERA5, and the effect of this wind on the seeing measured in 1996–2002 are estimated. The results showed that the median seeing across the entire atmosphere was 0.69 arcseconds. The average wind speed at the tropopause level is 29 m/s, the dominant direction is west. The seeing has a strong correlation with the wind speed in the surface layer — the correlation coefficient was slightly less than 0.50. Wind direction does not noticeably affect turbulence. Changes in wind speed and direction at a height of 200 mB does not correlate with the integral seeing in the entire atmosphere.

Received 28.07.2023. Accepted 22.08.2023.

Keywords: atmospheric turbulence, astronomical seeing, wind speed

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.006

1. Введение

Данная работа посвящена изучению основного параметра астроклимата — качества астрономического изображения — на Майданакской обсерватории. Измерения качества изображения на этой обсерватории с использованием устройства DIMM (Differential Image Motion Monitor — измеритель дифференциальных дрожаний звезд) впервые проводились в период 1996–2003 гг. [1, 2], после чего наблюдения были приостановлены. В 2017 г. был составлен план по созданию современного 4-метрового телескопа на Майданаке, что послужило толчком для возобновления работ по измерению качества изображения и других параметров астроклимата. В 2018 г. в Майданакской обсерватории были возобновлены измерения качества изображения [3, 4]. Всего за период 2018–2022 гг. было проведено 266 ночных наблюдений. Также качество изображения измерялось на поверхности земли и на высоте 6 метров в течение определенного времени. Скорость приземного ветра регистрировалась на тех же уровнях установки телескопа, где проводились DIMM-измерения. Скорость и направление ветра в тропопаузе над горой Майданак на уровне с атмосферным давлением 200 мБ в период 1957–2002 гг. были получены из базы данных ERA5. Мы также изучили влияние скорости ветра на этой высоте на качество изображения в период 1996–2002 гг. Кроме того, было исследовано влияние скорости ветра в приземном слое на качество изображения по всей атмосфере.



Рис. 1: Модуль DIMM — измеритель дифференциальных дрожаний звезд, установленный на платформе на высоте 6 метров над уровнем земли.

2. Методы

Астрономическое качество изображения характеризует суммарную оптическую турбулентность атмосферы. Качество изображения определяется как полная ширина при половинном уровне интенсивности дифракционного изображения звезды, полученного на большом телескопе в течение длительного времени экспозиции. Качество изображения измеряется в секундах дуги, и чем меньше его значение, тем лучше атмосфера с точки зрения астрономических наблюдений.

Для оценки качества изображения с помощью устройства DIMM наблюдают стандартные и яркие звезды и создают два изображения одной и той же звезды. Измеряя смещение центров этих двух изображений звезд относительно друг друга и используя хорошо известную теорию распространения волн в турбулентной среде [5, 6], определяют качество изображения.

Есть несколько факторов, влияющих на качество изображения. Одним из них является скорость ветра. Скорость ветра в приземном слое измерялась с помощью автоматической метеостанции.

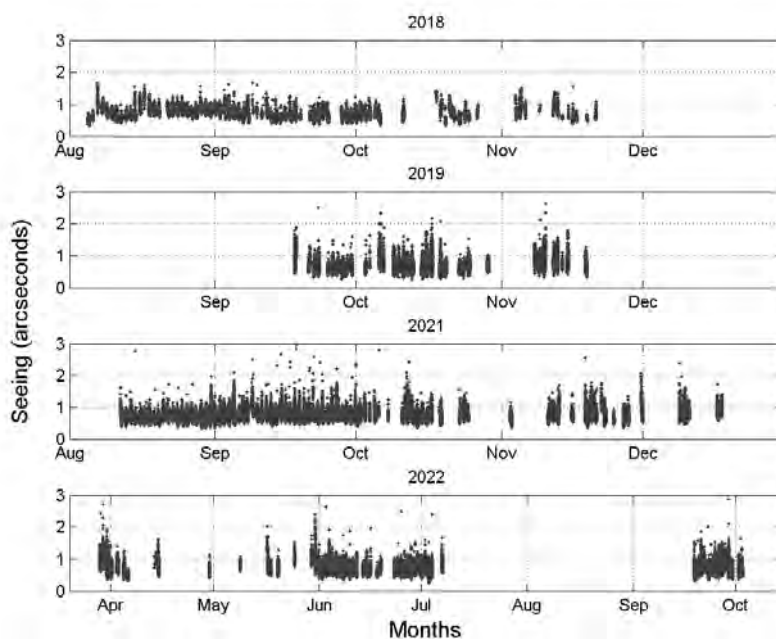


Рис. 2: Временные ряды качества изображения на Майданакской обсерватории в период 2018–2022 гг.

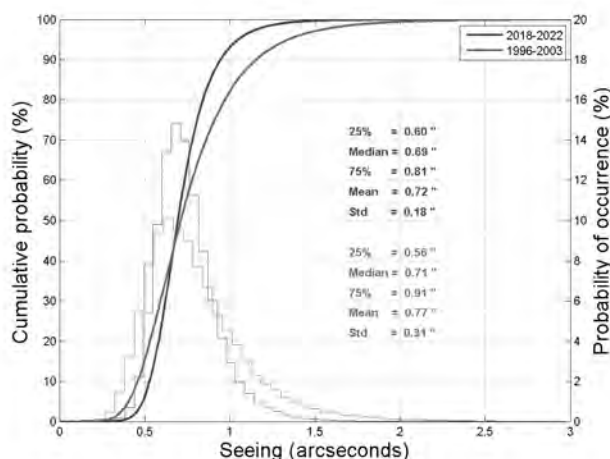


Рис. 3: Гистограмма качества изображения и кумулятивное распределение в период 2018–2022 гг.

Установка современного телескопа в обсерватории требует учета средней скорости воздушных потоков во всей атмосфере над обсерваторией. Если устанавливаемый телескоп имеет адаптивную оптическую систему, то значение информации о воздушных потоках возрастает еще больше. Основную часть этих воздушных потоков составляет скорость ветра в слое тропопаузы. Причина в том, что максимальная скорость ветра во всей атмосфере приходится на слой тропопаузы, то есть на высоту 200 мБ. При проектировании адаптивной оптической системы необходимо учитывать скорость ветра на этой высоте. Предполагается, что скоростные ветры на этой высоте могут усилить атмосферную турбулентность. Если этот эффект велик, то в результате волновой фронт, идущий от звезд, будет ухудшаться. Чтобы скорректировать ухудшенный волновой фронт, система адаптивной оптики должна работать с высокой скоростью и высокой точностью. Поэтому важно изучать скорость ветра в тропопаузе.

С этой целью были использованы базы данных ERA5 для анализа и изучения скорости ветра на высоте 200 мБ для Майданакской обсерватории. Мы получили данные за 46 лет с 1957 по 2002 гг. Полученные значения были обработаны и был проведен статистический анализ, результаты которого представлены в данной статье.

Атмосферное качество астрономического изображения измерялось с помощью DIMM прибора на разных высотах — на земле и на уровне 6 метров (рис. 1). Разница в результатах качества изображения, полученного на разных высотах, дает нам качество изображения в поверхностном слое. На качество изображения в этом приземном слое влияет скорость ветра, и это влияние было исследовано.

3. Результаты

Общее количество измерений качества изображения за 2018–2022 гг. составило 144300 (рис. 2). Медианное значение качества изображения за весь период наблюдения составило 0'69 (рис. 3). Годовые медианные значения составили: 0'70 в 2018 г., 0'65 в 2019 г., 0'71 в 2021 г. и 0'69 в 2022 г.

Установлено, что коэффициент корреляции между качеством изображения по всей атмосфере и скоростью ветра в приземном слое равен 0.13. С другой стороны, коэффициент корреляции между качеством изображения и скоростью ветра в приземном слое атмосферы оказался равным 0.47. Сравнение этих коэффициентов показывает, что скорость ветра в поверхностном слое земли, с одной стороны, сильно влияет на качество изображения (рис. 4), но с другой стороны, она слабо влияет на интегральное качество изображения, измеряемое по всей атмосфере (рис. 5).

На рис. 6 показано кумулятивное распределение скорости атмосферного ветра за период 1957–2002 гг. в обсерватории Майданак на уровне 200 мБ, разделенное на три периода. Первые два из этих периодов были равны 15 годам, а следующий период был равен 16 годам. Как видно из этого графика, медианные значения скоростей ветра на высоте 200 мБ за все три периода очень близки друг к другу, то есть скорость ветра практически не изменилась.

На рис. 7 приведены усредненные месячные значения скорости ветра на высоте 200 мБ. Мы разделили скорость ветра, измеренную в 1957–2002 гг., на 3 периода и сравнили сезонные тренды, используя месячные значения скорости ветров. На графике синим цветом показаны значения за 1957–1971 гг., красным — 1972–1986 гг., черным — 1987–2002 гг., а зеленым — весь период (1957–2002 гг.). Как видно из этого графика, скорость ветра во все три периода в апреле текущего года была менее 27 м/с. Самые высокие значения

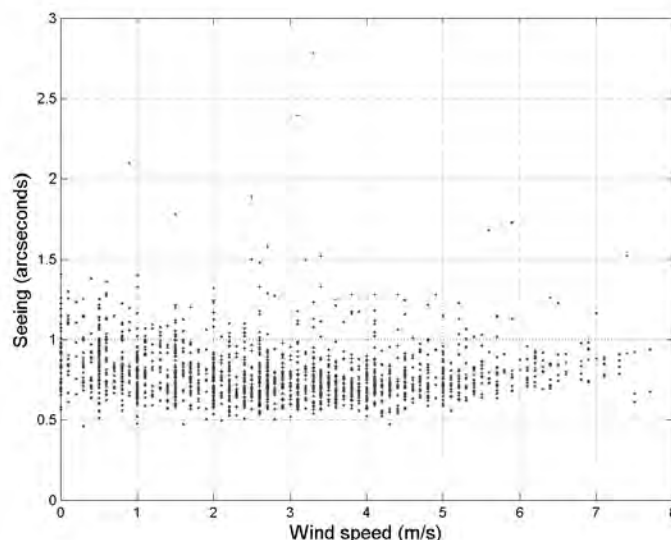


Рис. 4: Корреляция интегрального качества изображения и скорости ветра в приземном слое.

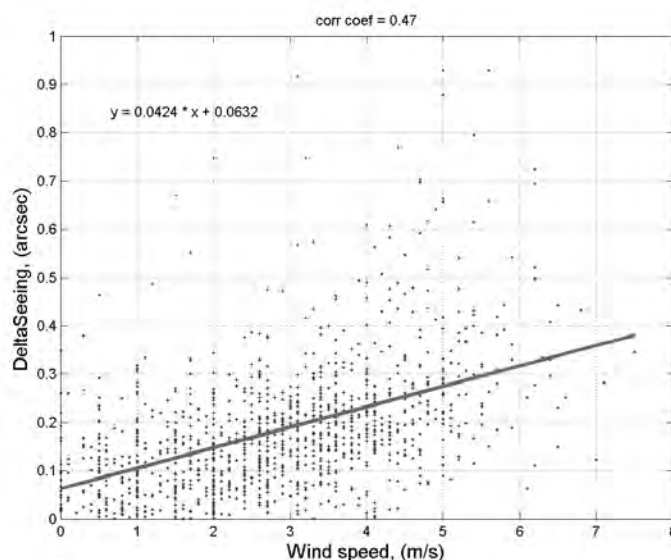


Рис. 5: Корреляция качества изображения в приземном слое и скорости ветра.

соответствовали июню (около 31–34 м/с). Среднее значение скорости ветра на высоте 200 мБ за 1957–2002 гг. составило 29.29 м/с. Также было определено, что медианное значение скорости ветра за этот период составило 28.64 м/с.

В ходе данного исследования изучалось влияние скорости ветра на высоте 200 мБ на качество изображения. Исследования показывают, что чем выше скорость ветра на этой высоте, тем больше величина качества изображения (рис. 8). Но коэффициент корреляции между этими значениями составил всего 0.04. Хотя изменения качества изображения и скорости ветра связаны линейно, эта связь имеет очень малую величину. Из этого следует, что скорость ветра на высоте 200 мБ и ее изменения практически не влияют на качество изображения.

4. Заключение

Новые исследования качества изображения показали, что этот параметр почти не изменился за 15 лет. Медианное значение качества изображения за весь период наблюдений составило 0''69.

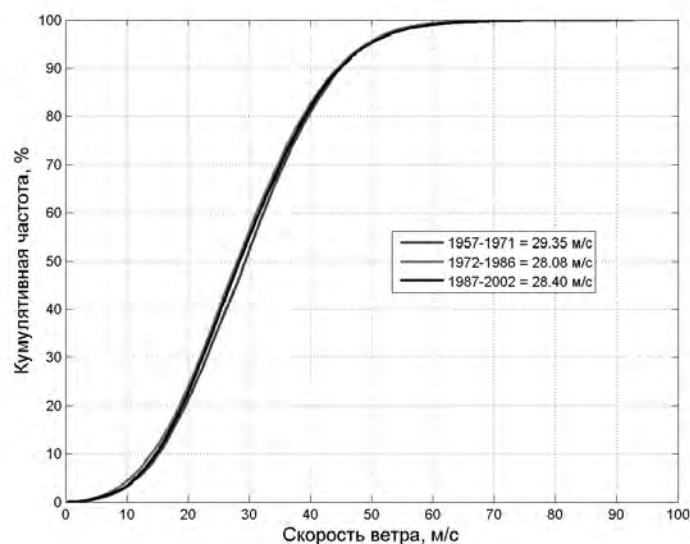


Рис. 6: Кумулятивное распределение скорости ветра на уровне 200 мБ за период 1957–2002 гг. для Майданакской обсерватории.

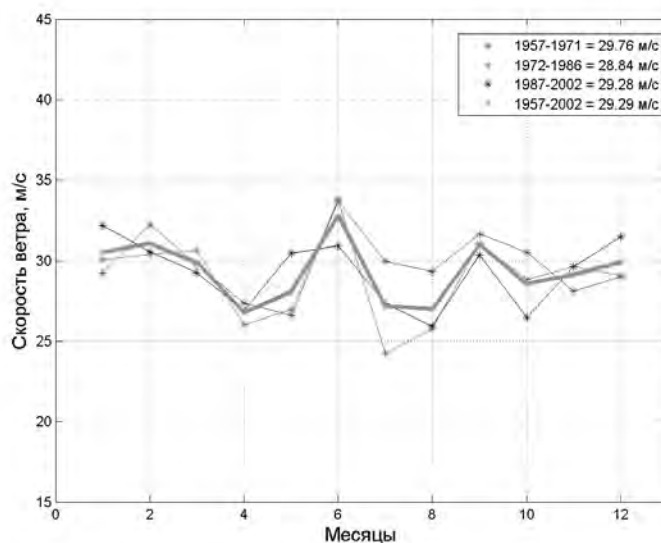


Рис. 7: Скорость ветра на высоте 200 мБ над Майданакской обсерваторией в период 1957–2002 гг.

Суммарная турбулентность не сильно зависит от приземных условий. Коэффициент корреляции между качеством изображения по всей атмосфере и скоростью ветра в приземном слое равен 0.13.

Исследовано влияние приземных условий на качество изображения, измеренного по всей атмосфере, и на качества изображения в поверхностном слое земли. Интенсивность турбулентности в приземном слое, полученная с помощью двух приборов DIMM, установленных на разных высотах над грунтом, имеет сильную зависимость от приземного ветра. Коэффициент корреляции между качеством изображения в приземном слое и скоростью ветра в этом слое равен 0.47.

Скорость ветра в атмосфере Майданакской обсерватории на высоте 200 мБ была получена и проанализирована из базы ERA5 за 1957–2002 гг. Средняя скорость ветра в районе тропопаузы 200 мБ составляет 29.29 м/с. Измеренная в течение 46 лет скорость ветра была разделена на 3 подпериода и исследована в каждом подпериоде. Установлено, что скорость ветра на высоте 200 мБ за этот длительный период практически не изменилась и не показала ни сезонных, ни месячных трендов.

Установлено, что скорость ветра на уровне 200 мБ существенно не влияет на качество изображения.

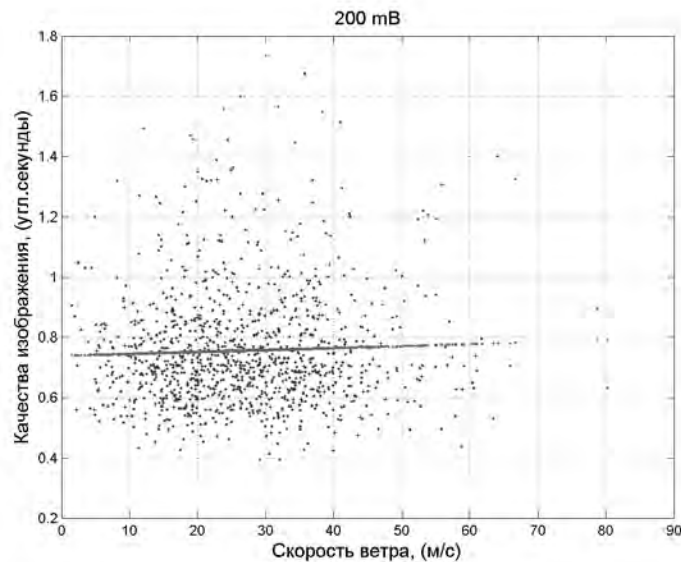


Рис. 8: Скорость ветра на высоте 200 мБ и ее влияние на качества изображения.

Авторы выражают благодарность Тиллаевой Нодире за помощь в создании временного ряда высотного ветра над обсерваторией Майданак на основе данных ERA5.

Список литературы

1. S. Ilyasov and Y. Tillayev, in X. Ma, B. Yang, and M. Li, eds., *International Conference on Space Information Technology 2009*, **7651**, 76511N (2009).
2. S. Ilyasov, S. Ehgamberdiev, M. S. Sarazin, and Y. Tillayev, in G. G. Matvienko and V. P. Lukin, eds., *Sixth International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics*, **3983**, 49 (1999).
3. Y. Tillayev, A. Azimov, S. Ehgamberdiev, and S. Ilyasov, *Atmosphere*, **14**, 2023, URL <https://www.mdpi.com/2073-4433/14/2/199>.
4. A. M. Azimov, Y. A. Tillayev, S. A. Ehgamberdiev, and S. P. Ilyasov, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, **8**, 047002, 2022, URL <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.4.047002>.
5. M. Sarazin and F. J. Roddier, *Astron. and Astrophys.*, **227**, 294, 1990, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:116944437>.
6. A. Tokovinin and V. G. Kornilov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **381**, 1179, 2007, URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:12874255>.

Эволюция углового момента в процессе коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков

Каргальцева Н.С.^{1,2}, Хайбрахманов С.А.^{1,2}

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

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

В работе представляются численные магнитогазодинамические (МГД) расчеты изотермической стадии коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков солнечной массы при различных начальных значениях вращательной и магнитной энергий и с различной степенью неоднородности. Моделирование осуществляется с помощью двумерного МГД-кода Enlil. Расчеты показывают, что при увеличении начальной степени неоднородности облака увеличиваются размеры элементов его иерархической структуры — сплюснутой оболочки и первичного диска — и усиливается влияние магнитного торможения в центре облака. Магнитное торможение отводит в межзвездную среду от 40 до 90% полного углового момента облака в зависимости от начального отношения магнитной энергии облака к модулю гравитационной энергии, $\varepsilon_m = 0.2 - 0.6$. Эффективность переноса углового момента слабо зависит от начального отношения вращательной и гравитационной энергий. В конце изотермической стадии коллапса неоднородного протозвездного облака формируется «мертвая» зона со степенью ионизации $x \leq 10^{-12}$. Радиус «мертвой» зоны составляет 90–220 а. е. для облаков с $\varepsilon_m = 0.2 - 0.6$. Сравнение характерных диффузионного и динамического времен показывает, что амбиполярная диффузия приведет к ослаблению магнитного торможения внутри «мертвой» зоны в течение 1–10 тыс. лет после образования первого ядра.

Поступила в редакцию 02.08.2023 г. Принята в печать 29.08.2023 г.

Ключевые слова: магнитное поле, магнитная газодинамика (МГД), численное моделирование, звездообразование, межзвездная среда

Evolution of angular momentum during the collapse of magnetic rotating protostellar clouds

Kargaltseva N.S.^{1,2}, Khaibrakhmanov S.A.^{1,2}

¹ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

We present the results of numerical magnetohydrodynamic (MHD) simulations of the isothermal stage of the collapse of magnetic rotating protostellar clouds of solar mass at various initial values of rotational and magnetic energies and with various degrees of nonuniformity. The simulations are carried out using the two-dimensional MHD code Enlil. The simulations show that an increase in the initial degree of inhomogeneity of the cloud leads to the growth of the sizes of the elements of its hierarchical structure — oblate envelope and primary disk. The influence of magnetic braking also increases in the center of the cloud. Magnetic braking transports from 40 to 90% of the total angular momentum of the cloud into the interstellar medium, depending on the initial ratio of the cloud's magnetic energy to the modulus of its gravitational energy, $\varepsilon_m = 0.2 - 0.6$. The efficiency of angular momentum transport weakly depends on the initial ratio of rotational and gravitational energies. At the end of the isothermal stage of the collapse of an inhomogeneous protostellar cloud, a “dead” zone is formed with the degree of ionization $x \leq 10^{-12}$. The “dead” zone radius is 90–220 au for clouds with $\varepsilon_m = 0.2 - 0.6$. A comparison of the characteristic diffusion and dynamical times shows that ambipolar diffusion will lead to weakening of magnetic braking inside the “dead” zone within 1–10 thousand years after the first core formation.

Received 02.08.2023. Accepted 29.08.2023.

Keywords: magnetic fields, magnetic-gas-dynamics (MHD), numerical simulation, star formation, interstellar medium

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.007

1. Введение

Звезды образуются в гравитационно связанных ядрах межзвездных молекулярных облаков — протозвездных облаках (далее ПЗО). Это холодные облака с температурой $T = 10 - 20$ К, концентрацией газа $n = 10^4 - 10^6$ см⁻³, размером $R = 0.03 - 0.3$ пк и массой $M = 0.5 - 70 M_\odot$ [1, 2, 3]. Наблюдения ПЗО в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах свидетельствуют о неоднородной структуре ПЗО и сложном характере внутренних движений. Дисперсия скорости в ПЗО составляет $\sigma_v \leq 3$ км/с [4], а угловая скорость $\Omega = 10^{-12} - 10^{-14}$ с⁻¹ [5, 6]. Наблюдаемые радиальные профили удельного углового момента ПЗО характеризуются зависимостью $j_{\text{obs}} \sim R^n$ с показателем $n = 1.6 - 2.4$, что указывает на близкое к твердотельному вращение [6]. К настоящему времени надежно установлено, что большинство ПЗО обладают крупномасштабным магнитным полем с индукцией $B = 10^{-5} - 10^{-4}$ Гс [7, 8]. В некоторых ПЗО линии магнитного поля имеют пинчевую геометрию или геометрию типа песочных часов, что свидетельствует о гравитационном сжатии таких облаков.

Предполагается, что гравитационно-неустойчивые ПЗО в процессе быстрого гравитационного сжатия (коллапса) эволюционируют в молодые звездные объекты (МЗО) класса 0, которые ассоциируют с протозвездой, окруженной протозвездным диском и сплюснутой оболочкой [9]. Размеры протозвездных дисков и оболочек оценивают в 2–300 а. е. и 500–12000 а. е. соответственно [10, 11]. Радиальные профили удельного углового момента в МЗО класса 0 описываются зависимостью $j_{\text{obs}} \sim R^n$ с показателем $n = 0.3$ в области $R < 1600$ а. е. и $n = 1.6$ в области $R > 1600$ а. е. [12]. Данная зависимость показывает, что при переходе от оболочки к протозвездному диску вращение газа меняется с твердотельного на дифференциальное.

Анализ наблюдательных данных указывает, что образование кеплеровских протозвездных дисков, вероятно, происходит на самой ранней стадии звездообразования. В дальнейшем протозвездные диски эволюционируют в аккреционные и протопланетные диски, в которых происходит образование планет. Размеры протозвездных дисков в значительной степени определяются эффективностью отвода углового момента из центральной части ПЗО на начальной стадии коллапса. Основным механизмом переноса углового момента на начальных стадиях звездообразования является магнитное торможение, обусловленное действием натяжений тороидального магнитного поля в дифференциально вращающемся облаке. Первые численные расчеты коллапса ПЗО с магнитным полем столкнулись с проблемой катастрофического магнитного торможения, которая выражается в том, что отвод углового момента происходит настолько эффективно, что образования протозвездных дисков не происходит [13]. Для решения данной проблемы необходимо проведение расчетов с учетом диффузионных эффектов (см. обзор [14]). Наиболее эффективно магнитное торможение происходит на изотермической стадии коллапса, когда облако прозрачно к собственному тепловому излучению [15]. В связи с этим, представляет интерес проведение численного МГД-моделирования изотермической стадии коллапса ПЗО с учетом основных МГД-эффектов.

Хайбрахманов и др. [16] показали, что на изотермической стадии коллапса ПЗО формируется иерархическая структура облака, состоящая из сплюснутой оболочки, внутри которой находится квазимагнито-статический первичный диск (ПД). На границе ПД происходит формирование быстрой ударной МГД-волны, распространяющейся наружу из облака. ПД являются резервуарами массы, магнитного потока и углового момента для дальнейшего формирования протозвездных дисков. Каргальцева и др. [17] определили, что фронт быстрой ударной МГД-волны ограничивает область магнитного торможения, в которой происходит перенос углового момента, накопленного вблизи поверхности ПД, к периферии облака. При увеличении начальной магнитной энергии увеличиваются размер первичного диска и эффективность магнитного торможения [18].

В данной работе исследуется эволюция углового момента в процессе коллапса неоднородных ПЗО при различных начальных параметрах. В разделе 2 описана численная модель, МГД-код и начальные параметры облака. Далее анализируется влияние начальной степени неоднородности на размеры элементов иерархической структуры облака и эволюцию углового момента (раздел 3.1.), определяется эффективность отвода углового момента в зависимости от начальных магнитной и вращательной энергий облака (раздел 3.2.) и исследуется ионизационная структура облака (раздел 3.3.). Заключение и основные выводы представлены в разделе 4.

2. Численная модель и начальные параметры

Рассматривается эволюция изначально сферического вращающегося ПЗО, пронизанного крупномасштабным магнитным полем. Облако характеризуется начальными массой $M_0 = 1 M_{\odot}$ и температурой $T_0 = 10$ К. Коллапс ПЗО исследуется в двумерной осесимметричной постановке задачи в цилиндрических координатах $\{r, \phi, z\}$. Распределение плотности задается с помощью формулы Пламмера [19],

$$\rho_0(R) = \frac{\rho_c}{1 + \left(\frac{R}{R_c}\right)^k}. \quad (1)$$

Такое распределение описывает сферическое облако с почти однородной центральной частью радиусом R_c и плотностью ρ_c и неоднородной периферией, в которой плотность уменьшается с расстоянием от центра облака R по степенному закону с показателем k . Для исследования эволюции облаков с различной степенью неоднородности расчеты проводились при различных k в диапазоне 0.5 – 2. Стандартное значение $k = 2$ соответствует автомодельному распределению плотности свободно коллапсирующего облака [20].

Начальное распределение магнитного поля в облаке также является неоднородным и вычисляется согласованно с распределением плотности из условия вмороженности в предположении сферически-симметричного сжатия среды [21].

Основными параметрами модели являются начальные отношения тепловой, магнитной и вращательной энергий к модулю гравитационной энергии облака: ε_t , ε_m и ε_w соответственно. Для исследования влияния начальной интенсивности магнитного поля на эффективность переноса углового момента в облаке в расчетах

использованы следующие значения параметров: $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = [0, 0.2, 0.6]$ и $\varepsilon_w = 0-0.1$. Начальное вращение облака предполагается твердотельным.

Моделирование гравитационного коллапса протозвездного облака с магнитным полем выполняется с помощью численного двумерного МГД-кода Enlil, использующего адаптивную подвижную сетку [22, 23]. В коде реализовано решение системы уравнений гравитационной магнитной газодинамики (МГД) с учетом амбиполярной диффузии. Гиперболическая часть системы уравнений решается с помощью разностной TVD-схемы годуновского типа повышенного порядка точности. Уравнение диффузии магнитного поля решается с помощью полностью неявной абсолютно устойчивой разностной схемы.

Степень ионизации рассчитывается из уравнений ионизационно-рекомбинационного баланса следуя Дудорову и Сазонову [24]. Учитываются ионизация космическими лучами и межзвездным рентгеновским излучением, ионизация за счет распада радиоактивных элементов, лучистые рекомбинации и рекомбинации на пылинках среднего размера 0.1 мкм. Используются стандартные значения скоростей ионизации космическими лучами и радиоактивными элементами (см. [25]).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Коллапс облаков с различной начальной степенью неоднородности

Рассмотрим четыре расчета с $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_m = 0.2$ и $\varepsilon_w = 0.01$ с различными показателями степени начального распределения плотности $k = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$. При данных параметрах ПЗО имеет начальный радиус $R_0 = 0.021$ пк, центральную плотность $\rho_0 = (3.2 - 3.5) \cdot 10^{-18}$ г см $^{-3}$, угловую скорость $\Omega_0 = 1.37 \cdot 10^{-13}$ с $^{-1}$, полный угловой момент $J_0 = 4.0 \cdot 10^{53} - 1.2 \cdot 10^{54}$ г см 2 с $^{-1}$ и магнитную индукцию в центре $B_0 = (1.59 - 1.68) \cdot 10^{-4}$ Гс. Радиус центральной однородной части облака R_c выбирался таким образом, чтобы в этой части было сосредоточено 75% массы облака.

На рис. 1 показана двумерная структура ПЗО для расчетов с $k = 0.5$ (I, слабо неоднородное облако) и $k = 2.0$ (II, сильно неоднородное облако) в начальный момент времени и в конце изотермической стадии коллапса, когда в центре начинается формирование непрозрачного ядра.

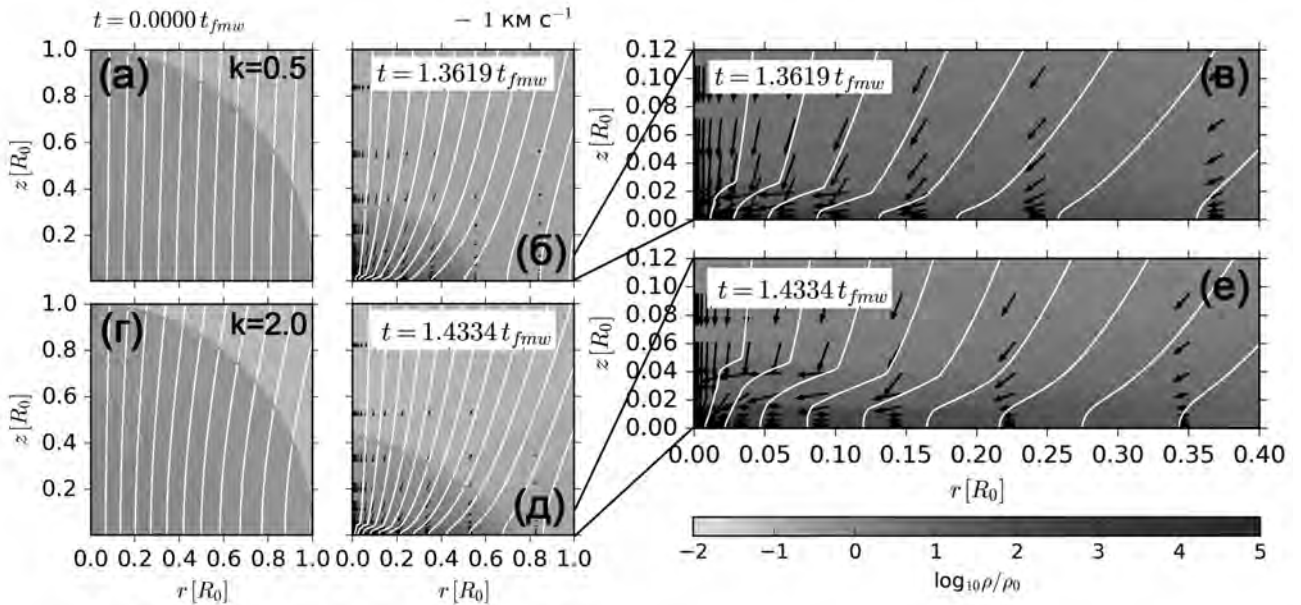


Рис. 1: Двумерное распределение плотности (цветовая заливка) для расчетов с $k = 0.5$ (панели «а», «б» и «в») и с $k = 2.0$ (панели «г», «д» и «е»). Панели «а» и «г» соответствуют начальному моменту времени. Панели «б» и «д» — окончанию изотермической стадии коллапса. Панели «в» и «е» показывают увеличенную центральную часть облака. Стрелками показано поле скорости, белыми линиями — линии полоидального магнитного поля.

В расчете I изотермическая стадия коллапса закончилась при $t_I = 1.3619 t_{fmw} = 5.45 \cdot 10^4$ лет, где t_{fmw} — характерное время коллапса с учетом влияния электромагнитной и центробежной сил [16]. Рис. 1б показывает, что к этому моменту времени радиус и полутолщина оболочки составляют $R_{cl} \approx 0.55 R_0$ и $Z_{cl} \approx 0.35 R_0$ соответственно. В центральной части облака (см. рис. 1в) различим первичный диск с максимальной полутолщиной $Z_{pd} \approx 0.01 R_0$.

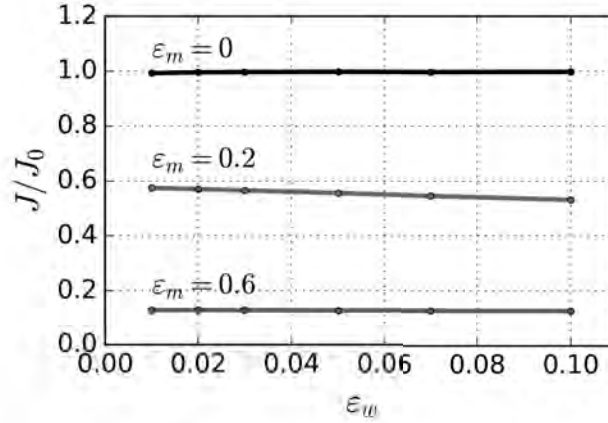


Рис. 2: Зависимость безразмерного полного углового момента облака, J/J_0 , в конце изотермической стадии от вращательного параметра ε_w при $\varepsilon_m = 0$ (черная линия), $\varepsilon_m = 0.2$ (красная линия) и $\varepsilon_m = 0.6$ (зеленая линия) при $\varepsilon_t = 0.3$. Здесь J_0 — начальный угловой момент облака.

Согласно рис. 1д и 1е, в расчете II в конце изотермического коллапса, $t_I = 1.4334t_{\text{fmw}} = 5.73 \cdot 10^4$ лет, радиус и полутолщина оболочки составляют $R_{\text{cl}} \approx 0.70R_0$ и $Z_{\text{cl}} \approx 0.40R_0$, а максимальная полутолщина ПД $\approx 0.02R_0$. Таким образом, в случае коллапса сильно неоднородного облака элементы его внутренней иерархии (оболочка и первичный диск) имеют большие размеры, чем в случае слабо неоднородного облака.

Расчеты показывают, что при выбранных параметрах к концу изотермической стадии коллапса из облака в окружающую межзвездную среду отводится 40% начального углового момента — независимо от степени начальной неоднородности. При этом распределение удельного углового момента внутри облака меняется с изменением k . Например, в момент времени t_I удельный угловой момент в центре облака с $k = 0.5$ составляет $10^{16} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$. В облаке с $k = 2.0$ эта величина на порядок меньше: $10^{15} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$. Следовательно, в изначально более неоднородном облаке перераспределение углового момента из центра облака к его периферии происходит эффективнее. Это связано с тем, что в изначально более неоднородном облаке быстрее устанавливается дифференциальное вращение, генерируется тороиадальное магнитное поле и запускается процесс магнитного торможения центральной части облака.

3.2. Зависимость от магнитного и вращательного параметров

Для исследования эволюции углового момента в процессе коллапса ПЗО с различными начальными магнитной и вращательной энергией, рассмотрим расчеты с $\varepsilon_m = 0$ (без магнитного поля), $\varepsilon_m = 0.2$ и $\varepsilon_m = 0.6$ (сильное магнитное поле) при различных вращательных параметрах $\varepsilon_w = 0.01 - 0.1$. Для всех расчетов $\varepsilon_t = 0.3$.

На рис. 2 показана зависимость безразмерного полного углового момента в конце изотермической стадии от ε_m и ε_w . Рис. 2 показывает, что полный угловой момент облака с $\varepsilon_m = 0$ сохраняется, $J/J_0 = 1$. Это связано с тем, что в облаке без магнитного поля магнитного торможения не происходит.

Угловой момент облаков с $\varepsilon_m > 0$ уменьшается по сравнению с начальным вследствие отвода углового момента магнитными натяжениями. Согласно рис. 2, эффективность магнитного торможения увеличивается с ростом ε_m . Например, при $\varepsilon_m = 0.2$ (красная линия) полный угловой момент облака уменьшается на ~40% по отношению к J_0 , при $\varepsilon_m = 0.6$ (зеленая линия) — примерно на 90%. Относительная доля отведенного углового момента практически не зависит от вращательного параметра ε_w .

3.3. Степень ионизации и амбиполярная диффузия

Ранее Каргальцева и др. [18] исследовали ионизационное состояние изначально однородных ПЗО. Расчеты показали, что к окончанию изотермической стадии коллапса облака степень ионизации в центре не опускается ниже 10^{-11} , то есть в облаке не формируется область низкой степени ионизации и эффективной диффузии магнитного поля — так называемая «мертвая» зона (пр., [26]).

Проанализируем ионизационное состояние неоднородных ПЗО. На рис. 3 представлены профили степени ионизации вдоль осей r и z в конце изотермической стадии коллапса ПЗО с $\varepsilon_m = 0.2$ и 0.6 , $\varepsilon_t = 0.3$, $\varepsilon_w = 0.01$. Рис. 3 показывает, что неоднородное ПЗО характеризуется более низкими значениями степени ионизации в центре облака в конце изотермической стадии коллапса. В центральной части облака образуется «мертвая» зона, которая характеризуется степенью ионизации $x \leq 10^{-12}$. Внутри «мертвой» зоны степень ионизации

опускается до 10^{-13} . В случае $\varepsilon_m = 0.2$ «мертвая» зона характеризуется радиальной протяженностью $L \approx 90$ а. е., центральной плотностью $\rho_c = 3.4 \cdot 10^{-14}$ г см $^{-3}$ и индукцией магнитного поля $B_c = 1.9 \cdot 10^{-2}$ Гс. В случае облака с сильным магнитным полем, $\varepsilon_m = 0.6$: $L \approx 220$ а. е., $\rho_c = 7.0 \cdot 10^{-14}$ г см $^{-3}$ и $B_c = 2.9 \cdot 10^{-2}$ Гс. Таким образом, в ПЗО с более сильным магнитным полем образуется «мертвая» зона большего размера.

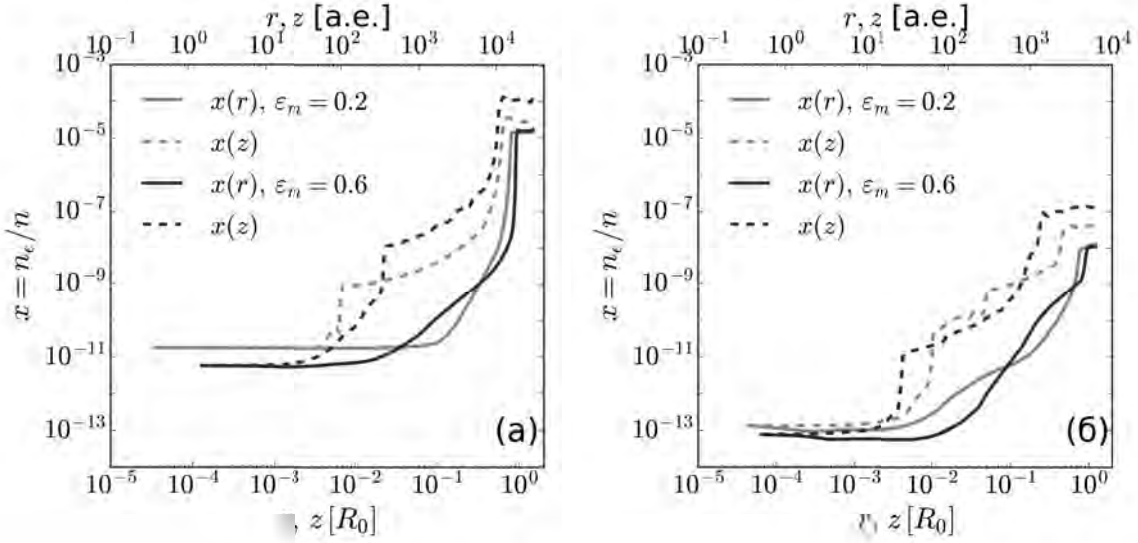


Рис. 3: Степень ионизации вдоль осей r и z в расчетах с однородным (а) и неоднородным (б) начальным распределением плотности при $\varepsilon_m = 0.2$ (оранжевые линии) и $\varepsilon_m = 0.6$ (фиолетовые линии).

«Мертвая» зона характеризуется эффективными омической и амбиполярной диффузиями. В рассматриваемом диапазоне плотностей основным эффектом является амбиполярная диффузия. Для оценки ее роли в области «мертвой» зоны сравним характерное время амбиполярной диффузии, t_{AD} , и время свободного падения, $t_{ff} = \sqrt{3\pi/(32G\rho)}$, где G — гравитационная постоянная. Время амбиполярной диффузии можно определить по формуле (пр., [26]):

$$t_{AD} = \frac{L^2}{\eta_{AD}} = \frac{4\pi x \rho^2 \eta_{in} L^2}{B^2}, \quad (2)$$

где η_{AD} — лианеризованный коэффициент амбиполярной диффузии, $\eta_{in} = m_i \langle \sigma V \rangle_{in} / (m_n (m_i + m_n))$ — коэффициент, определяющий эффективность переноса импульса во взаимных столкновениях ионов и нейтралов в плазме, $m_i = 30m_H$ — средняя масса иона, $m_n = 2.3m_H$ — масса нейтральной частицы, m_H — масса атома водорода и $\langle \sigma V \rangle_{in} = 2.0 \cdot 10^{-9}$ см 3 с $^{-1}$ — коэффициент столкновений ионов с нейтральными частицами. Для оценок характерных времен будем использовать значения B , ρ и x в центре облака. В качестве характерного размера «мертвой» зоны выберем цилиндрический радиус области $x < 10^{-12}$. Запишем времена амбиполярной диффузии и свободного падения в безразмерном виде при типичных характеристиках газа внутри «мертвой» зоны:

$$t_{AD} = 1.08 \cdot 10^3 \left(\frac{x}{10^{-13}} \right) \left(\frac{\rho}{10^{-14} \text{ г см}^{-3}} \right)^2 \left(\frac{L}{500 \text{ а. е.}} \right)^2 \left(\frac{B}{10^{-2} \text{ Гс}} \right)^{-2} \text{ лет}, \quad (3)$$

$$t_{ff} = 6.6 \cdot 10^2 \left(\frac{\rho}{10^{-14} \text{ г см}^{-3}} \right)^{-1/2} \text{ лет}. \quad (4)$$

При параметрах «мертвой» зоны, приведенных выше, формулы (3) и (4) показывают, что $t_{AD} \gtrsim t_{ff}$. Необходимо учесть, что динамическое время в рассматриваемом случае превышает t_{ff} из влияния центробежной и электромагнитной сил внутри «мертвой» зоны первичного диска. Следовательно, в конце изотермической стадии коллапса неоднородных ПЗО в течение $t_{AD} \sim 1 - 10$ тыс. лет амбиполярная диффузия приведет к отводу части магнитного потока из образовавшейся мертвой зоны.

4. Заключение и выводы

В работе выполнено численное МГД-моделирование коллапса ПЗО с начальной массой $1 M_\odot$ и температурой 10 К при различных начальных значениях вращательной и магнитной энергий облаков с различной степенью неоднородности.

Расчеты показывают, что степень неоднородности облака слабо влияет на количество полного углового момента, отведенного из облака в межзвездную среду. Однако в более неоднородных облаках перенос углового момента из центра облака к его периферии происходит эффективнее. Облака с большей степенью неоднородности характеризуются большими размерами оболочки ПЗО и полутолщины первичного диска.

Анализ расчетов подтверждает предыдущие выводы о том, что эффективность переноса углового момента увеличивается при росте начального магнитного параметра, ε_m . При этом относительная доля отведенного полного углового момента слабо зависит от вращательного параметра.

Сравнение результатов расчетов коллапса однородных и неоднородных ПЗО показывает, что «мертвая» зона (область низкой степени ионизации) в конце изотермической стадии образуется только в последнем случае. Согласно оценкам характерных диффузионного и динамического времен, в течение 1 – 10 тыс. лет амбиполярная диффузия внутри «мертвой» зоны первичного диска приведет к отводу части магнитного потока на периферию облака и ослаблению магнитного торможения. Результаты работы указывают на то, что «мертвые» зоны могут образовываться на самых ранних стадиях звездообразования, еще до образования первого гидростатического ядра.

Работа Каргальцевой Н.С. выполнена в рамках Программы «Инженер-исследователь УрФУ, Приоритет 2030» и при поддержке Фонда поддержки молодых ученых ЧелГУ.

Список литературы

1. E. A. Bergin and M. Tafalla, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, **45**, 339, 2007.
2. Y. Shimajiri, P. André, E. Ntormousi, A. Men'shchikov, D. Arzoumanian, and P. Palmeirim, *Astron. and Astrophys.*, **632**, A83, 2019.
3. K. Morii, P. Sanhueza, F. Nakamura, J. M. Jackson, et al., *Astrophys. J.*, **923**, 147, 2021.
4. A. E. Dudorov and S. A. Khaibrakhmanov, *Open Astronomy*, **26**, 285, 2017.
5. P. Caselli, P. J. Benson, P. C. Myers, and M. Tafalla, *Astrophys. J.*, **572**, 238, 2002.
6. A. Punanova, P. Caselli, J. E. Pineda, A. Pon, M. Tafalla, A. Hacar, and L. Bizzocchi, *Astron. and Astrophys.*, **617**, A27, 2018.
7. R. M. Crutcher, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, **50**, 29, 2012.
8. H.-B. Li, *Galaxies*, **9**, 41, 2021.
9. P. Andre, D. Ward-Thompson, and M. Barsony, *Astrophys. J.*, **406**, 122, 1993.
10. C.-F. Lee, N. Hirano, Q. Zhang, H. Shang, P. T. P. Ho, and R. Krasnopolsky, *Astrophys. J.*, **786**, 114, 2014.
11. J. J. Tobin, P. D. Sheehan, S. T. Megeath, A. K. Díaz-Rodríguez, et al., *Astrophys. J.*, **890**, 130, 2020.
12. M. Gaudel, A. J. Maury, A. Belloche, S. Maret, et al., *Astron. and Astrophys.*, **637**, A92, 2020.
13. D. Galli, S. Lizano, F. H. Shu, and A. Allen, *Astrophys. J.*, **647**, 374, 2006.
14. B. Zhao, K. Tomida, P. Hennebelle, J. J. Tobin, et al., *Space Science Reviews*, **216**, 43, 2020.
15. Y. Tsukamoto, S. Okuzumi, K. Iwasaki, M. N. Machida, and S.-i. Inutsuka, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **69**, 95, 2017.
16. S. A. Khaibrakhmanov, A. E. Dudorov, N. S. Kargaltseva, and A. G. Zhilkin, *Astronomy Reports*, **65**, 693, 2021.
17. N. S. Kargaltseva, S. A. Khaibrakhmanov, A. E. Dudorov, and A. G. Zhilkin, *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, **48**, 268, 2021.
18. N. S. Kargaltseva, S. A. Khaibrakhmanov, A. E. Dudorov, S. N. Zamozdra, and A. G. Zhilkin, *Open Astronomy*, **31**, 172, 2022.
19. H. C. Plummer, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **71**, 460, 1911.
20. A. Whitworth and D. Summers, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **214**, 1, 1985.
21. S. Khaibrakhmanov, S. Zamozdra, N. Kargaltseva, A. Zhilkin, and A. Dudorov, *IAU Symposium*, **362**, 273, 2023.
22. A. E. Dudorov, A. G. Zhilkin, and O. A. Kuznetsov, in S. M. Miyama, K. Tomisaka, and T. Hanawa, eds., *Numerical Astrophysics*, **240**, 389 (1999).
23. A. G. Zhilkin, Y. N. Pavlyuchenkov, and S. N. Zamozdra, *Astronomy Reports*, **53**, 590, 2009.
24. A. E. Dudorov and Y. V. Sazonov, *Nauchnye Informatsii*, **63**, 68, 1987.
25. T. Umebayashi and T. Nakano, *Astrophys. J.*, **690**, 69, 2009.
26. A. E. Dudorov and S. A. Khaibrakhmanov, *Astrophys. and Space Sci.*, **352**, 103, 2014.

Физические параметры затменно-двойной системы MX Her, полученные из BVRI фотометрии

Халикова А.В.¹, Гайнуллина Э.Р.¹, Эгамбердиев Ш.А.¹, Асфандияров И.М.¹, Матеков А.М.¹, Лиин Чжу²

¹Астрономический институт им. Улугбека АН РУз, Ташкент, Узбекистан

²Юннанские обсерватории Китайской АН, Кунминг, Китай

В работе представлены предварительные результаты анализа многоцветной BVRI фотометрии звезды MX Her. MX Her = TYC 3519-1418-1 является затменно-двойной системой типа Алголя с периодом обращения компонентов $P = 2.3476536$ дней, имеющей признаки пульсационной неустойчивости главной звезды. Наблюдения проводились в 2022 г. на телескопе Цейсс-600-Восточный, введенном в строй в том же году на обсерватории Майданак (Узбекистан) в рамках международного сотрудничества с Юннанскими обсерваториями (Китай). В настоящей работе впервые представлены решения многоцветных кривых блеска с помощью программы PHOEBE. В результате моделирования мы получили следующие оценки параметров системы: фотометрическое отношение масс системы $M_2/M_1 = 0.31$, отношение эффективных температур $T_2/T_1 = 0.57$, наклон орбиты $i = 83.8^\circ$ и эксцентриситет $e = 0.0008$.

Поступила в редакцию 20.07.2023 г. Принята в печать 22.08.2023 г.

Ключевые слова: многоцветная фотометрия, двойные звезды

Physical parameters of the MX Her eclipsing binary system obtained from BVRI photometry

Khalikova A.V.¹, Gaynullina E.R.¹, Eghamberdiev Sh.A.¹, Asfandiyarov I.M.¹, Matekov A. M.¹, Liying Zhu²

¹Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

²Yunnan Observatories of the Chinese Academy of Sciences, Kunming, China

The paper presents preliminary results of the analysis of multicolored BVRI photometry of the MX Her star. MX Her = TYC 3519-1418-1 is an Algol-type eclipsing binary system with an orbital period $P=2.3476536$ days, showing signs of pulsational instability of the main star. The observations were carried out in 2022 on the ZEISS-600-East telescope, put into operation in the same year at the Maidanak Observatory (Uzbekistan) in the framework of international cooperation with the Yunnan Observatories (China). In this paper, solutions of multicolored light curves using the PHOEBE software are presented for the first time. As a result of the simulation, we obtained the following estimates of the system parameters: the photometric mass ratio of the system $M_2/M_1 = 0.31$, the ratio of effective temperatures $T_2/T_1 = 0.57$, the inclination of the orbit $i = 83.8^\circ$ and the eccentricity $e = 0.0008$.

Received 20.07.2023. Accepted 22.08.2023.

Keywords: multicolored photometry, double stars

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.008

1. Введение

В рамках соглашения между Узбекской и Китайской Академиями наук в 2022 г. стартовал проект по наблюдению и исследованию специальных затменных двойных систем. На основе данных, полученных из спектров LAMOST [1], для совместных наблюдений на телескопах Узбекистана и Китая были отобраны 30 затменных двойных систем с особенностями трех видов:

1. Полуразделенные затменные двойные с очевидным присутствием переноса массы. Такие двойные системы являются хорошими лабораториями для выявления правил переноса массы и могут предоставить ценные наблюдательные свидетельства для улучшения теории эволюции двойных.
2. Глубоко контактные двойные с малым отношением масс (отношение масс $q \leq 0.25$ при коэффициенте заполнения $f \geq 50\%$). Считается, что такие двойные системы стремятся к слиянию в результате динамической эволюции и могут пролить свет на поздние стадии своей эволюции.
3. Осциллирующие затменные двойные в системах типа Алголя. Подобные объекты представляют собой двойные звезды, в которых главный компонент демонстрирует периодическую переменность типа δ Щита, а вторичный компонент является гигантом или субгигантом. Когда пульсирующая звезда является компонентом двойной системы, от анализа наблюдений таких систем можно получить больше информации, что позволит улучшить теорию звездной структуры и эволюции.

В июне 2022 г. на обсерватории Майданак был полностью введен в строй телескоп Цейсс-600-Восточный с диаметром главного зеркала 0.6 метра. Телескоп оснащен ПЗС камерой FLI ML0580911 с размером чипа 1028×1028 пикселей (масштаб пикселя равен 0.667 угловых секунд, поле зрения 11.4 угловых минут). На этом телескопе были получены первые тестовые BVRI наблюдения 9 кандидатов из нашего списка в течение 70

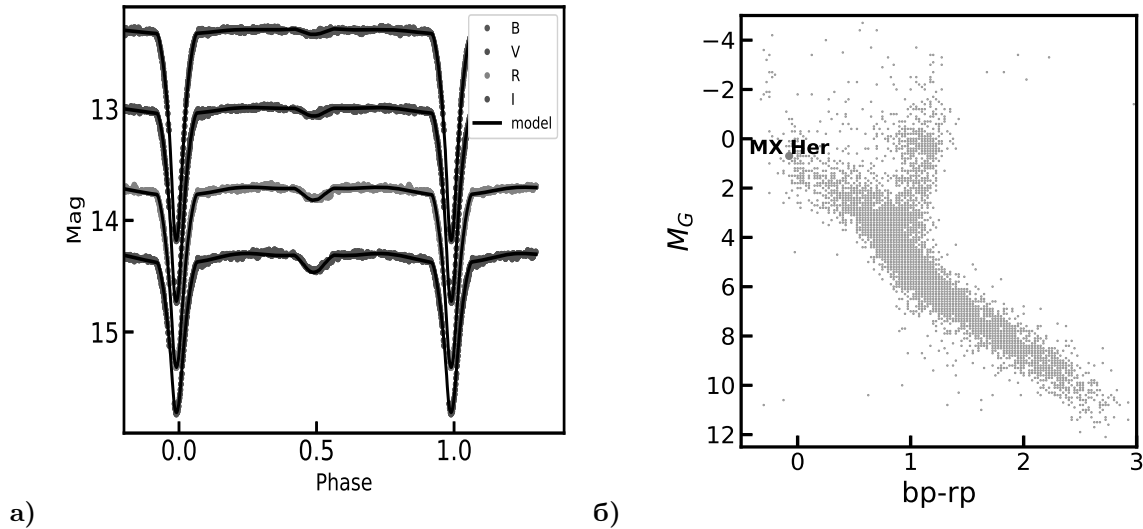


Рис. 1: а) BVRI фазовые кривые блеска MX Her (цветные точки) и предварительная модель (черная линия). Кривые блеска в I, V и R были смещены на +2.7, +1 и +1.9 звездных величин соответственно. б) Положение MX Her (красная точка) на диаграмме «цвет — звездная величина», исправленной за поглощение, согласно GAIA DR3 (использованы 100000 случайно выбранных звезд с параллаксами высокого качества).

ночей (254.5 часов). Количество полученных изображений объектов составило более 22 тысяч, и более 4400 калибровочных кадров. К настоящему времени проведен анализ двух систем V1309 Her и AS CrB, результаты которого опубликованы в [2]. Обе системы показывают полные затмения и являются глубоко контактными двойными системами с малым отношением масс (0.213 и 0.16). Найдено, что периодические колебания в их O–C кривых можно объяснить наличием третьего тела. Из анализа O–C диаграммы AS CrB обнаружено долговременное изменение периода $dP/dt = 5.22(\pm 0.28) \times 10^{-7}$ дня за год.

В данной работе мы представляем предварительные результаты анализа многоцветной BVRI фотометрии MX Her (=TYC 3519-1418-1= TIC 356240274), затменной звезды типа Алголя с орбитальным периодом $P=2.3476536$ дней. Согласно работе [3] в этой двойной системе у главного компонента присутствуют пульсации типа δ Щита (доминирующий период 0.041 дня).

2. Наблюдения

MX Her наблюдалась в течение 31 наблюдательной ночи в июле-октябре 2022 г. в фильтрах Бесселя B, V, R и I с экспозициями 120, 90, 60, 60 секунд, соответственно. В качестве звезды сравнения мы использовали звезду TYC 3519-1191-1. Из других звезд, попавших в поле зрения телескопа и сравнимых по яркости с MX Her, звезды TYC 3519-1199-1, 2MASS J17511655+5005372 и 2MASS J17513462+5004002 имеют гораздо более поздние спектральные классы ($(B - V) > 1$), а звезда 2MASS J17513459+5007436 не все ночи попадает в поле зрения.

Общая информация о MX Her и звезде сравнения приведена в табл. 1: экваториальные координаты (прямое восхождение RA и склонение DEC на эпоху 2000) приведены в соответствии с Gaia DR3 (космическая миссия Gaia [4]), звездные величины V и показатели цвета $B - V$ были взяты из каталога APASS DR9 [5].

Таблица 1: Общая информация о MX Her и звезде сравнения.

Звезда	RA(J2000) [h:m:s]	DEC(J2000) [°:':"]	V [mag]	$B - V$ [mag]
MX Her	17:50:50.728	+50:02:49.901	12.1 ± 0.2	0.4 ± 0.3
TYC 3519-1191-1	17:51:18.172	+50:01:04.351	11.36 ± 0.05	0.6 ± 0.1

Предварительная обработка и дифференциальная много-апертурная фотометрия были выполнены с использованием стандартного пакета IRAF [6]. Оптимальные фотометрические апертуры, использованные нами для вычисления кривых блеска, соответствуют минимальному среднеквадратичному разбросу дифференциальных кривых блеска. Мы не удаляли какие-либо тренды, поправки за дифференциальное поглоще-

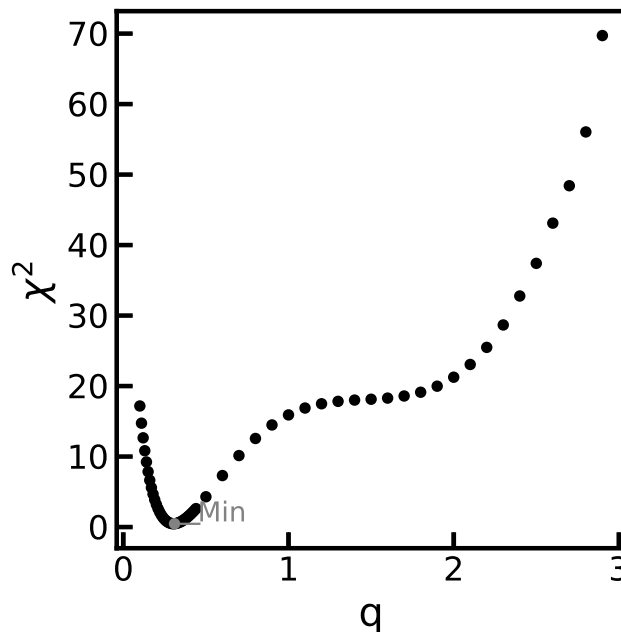


Рис. 2: Кривая q -поиска. Минимальное значение χ^2 соответствует $q=0.31$.

ние не применялись. За неопределенности инструментальных звездных величин принимались стандартные ошибки IRAF, которые составили для MX Her порядка 0.002 звездной величины.

Наблюдения, проводимые на воздушных массах более 2.5 и при величине фона больше 1000 ADUs, удалялись из анализа. Чтобы в дальнейшем при моделировании иметь более реалистичные показатели цвета, к дифференциальным звездным величинам мы прибавили соответствующие значения для звезды сравнения ($B = 13.48$, $V = 12.3$, $R = 11.69$, $I = 11.15$) из [4]. Результирующие многоцветные фазовые кривые блеска MX Her можно увидеть на рис. 1а. На рис. 1b показано положение звезды на диаграмме «цвет – звездная величина», где цвет $B_p - R_p$ и абсолютная звездная величина M_G взяты из [4] (звездная величина в полосе $G = 11.9637$, эффективная температура $T_{\text{eff}} = 10092.3$ К, гравитационная постоянная $\lg(g) = 4.2$).

3. Моделирование

Имея почти полные многоцветные фазовые кривые (отсутствует небольшой участок главного минимума), мы смогли осуществить моделирование двойной системы с целью получения оценок физических и орбитальных параметров (преимущественно относительных). Для этого мы использовали программу РНОЕВЕ [7], версия 2010 г. Эта программа предназначена для моделирования кривых блеска двойных систем и основана на алгоритме Wilson-Devinney. Поскольку MX Her классифицируется как система типа Алголь (морфологический коэффициент двойной звезды равен 0.547 согласно [8]), была выбрана модель «полуразделенной системы, где второй компонент заполнил свою полость Роша».

До моделирования необходимо определиться с некоторыми параметрами. К сожалению, для MX Her отсутствуют кривые лучевых скоростей, нет информации LAMOST, эффективные температуры и значения фотометрического отношения масс $q = M_2/M_1$ в литературе различаются (спектральный класс F5 в ОКПЗ [9] и более ранний согласно [4], $q=0.33$ [10] и $q=0.62$ [11]). Хотя MX Her не является контактной системой, мы оценили фотометрическое отношение масс методом q -поиска. Установив диапазон q от 0.1 до 3, мы получали соответствующие решения кривой блеска, для которых определялись значения «приведенного» χ^2_v . Результаты показаны на рис. 2, где минимальное значение χ^2 соответствует $q=0.31$, что вполне соответствует [10].

Для получения оптимальной модели мы фиксировали значение q на значении 0.31. Эффективную температуру главной звезды мы зафиксировали на значении $T_{\text{eff1}}=7394$ К ([12]). Значительная разница в глубине первичного и вторичного минимумов — 1.9 (B), 1.8 (V), 1.6 (R), 1.4 (I) против 0.04 (B), 0.08 (V), 0.11 (R), 0.16 (I) звездных величин — подразумевает, что вторая звезда намного холоднее. В каталоге приближенных элементов двойных звезд [13] в качестве второго компонента предполагается звезда класса K5IV. Другими фиксированными параметрами были значения болометрических альбедо и гравитационного потемнения: $A_1 = 1$, $A_2 = 0.5$, $g_1 = 1$ и $g_2 = 0.32$, орбитальный период ($P=2.3476536$ дней) и начальная эпоха ($\text{HJD}_0=2458990.4392$). Коэффициенты потемнения к краю были получены из модели атмосферы — Phoebe:

Castelli & Kurucz, 2004 [14]. Для минимизации был взят метод «Differential Correction» и параметры вычислялись до тех пор, пока не был найден минимальный разброс «остатков». Уровень значимости p-value в соответствии с F-test был меньше 0.001. Синтетическая кривая блеска показана на рис. 1а.

Таблица 2: Фотометрическое решение для MX Her.

Параметры	Значения
$q = M_2/M_1$	0.31
T_1 (К)	7394
T_2 (К) / T_1 (К)	0.57 ± 5.5
i°	83.8 ± 0.05
Ω_1	5.7 ± 0.02
e	0.0008
ω°	140
$L_1/(L_1 + L_2)_B$	0.88
$L_1/(L_1 + L_2)_V$	0.84
$L_1/(L_1 + L_2)_R$	0.78
$L_1/(L_1 + L_2)_I$	0.69
r_1 (pole)	0.1843
r_1 (side)	0.1850
r_1 (back)	0.1855
r_1 (point)	0.1857
r_2 (pole)	0.0437
r_2 (side)	0.0437
r_2 (back)	0.0438
r_2 (point)	0.0438
фактор заполнения полости Роша f_1	0.51
f_2	1
χ^2	1617
число степеней свободы	3234
приведенный χ^2	0.5

4. Заключение

Моделирование двойной системы MX Her с использованием полученных из наблюдений Майданакской обсерватории многоцветных BVRI фазовых кривых блеска позволило определить некоторые предварительные параметры орбиты системы, а также физические характеристики самих компонентов, которые можно принять как начальные значения для последующих исследований этой системы.

В табл. 2 мы приводим параметры MX Her, полученные для оптимальной модели. Указанные ошибки получены с помощью 1000 Монте-Карло моделирований.

Температура вторичного компонента двойной MX Her получается равной $T_{\text{eff}2} = 4188 \pm 5.5$ К, что относит звезду к спектральному классу K5-6 (IV?) и поддерживает предположение [13]. Наклон орбиты 83.8 ± 0.05 близок к $i = 85^\circ$ в [10], а эксцентриситет $e=0.0008$ достаточно мал, чтобы считать орбиту практически круговой. При моделировании мы предполагали отсутствие третьего света, а также не вводили в модель пятна, хотя кривые блеска миссии TESS [15] указывают на присутствие переменного от сезона к сезону эффекта О'Коннелла. Согласно [16] в этой двойной системе возможно вековое изменение периода величиной $\Delta P = -0.86811 \pm 0.08918$ секунд в год. Таким образом затменная двойная MX Her является перспективным объектом для дальнейших наблюдений и исследований.

Работа выполняется в рамках гранта AL-5921122128 Министерства Инноваций Республики Узбекистан. Авторы выражают благодарность наблюдателям Ф. Хамракулову, А. Хафизову, О. Пармонову. Авторы также выражают признательность рецензенту, Игорю Ивановичу Антохину, за вдумчивый подход и ценные рекомендации, которые позволили улучшить качество статьи. В статье использовались также ресурсы NASA Astrophysics Data System и базы данных VizieR (Страсбург, Франция).

Список литературы

1. X.-Q. Cui, Y.-H. Zhao, Y.-Q. Chu, G.-P. Li, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics*, **12**, 1197, 2012.
2. A. Matekov, F. Meng, S. Qian, I. Asfandiyarov, L. Li, S. Ehgamberdiev, and L. Zhu, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2023.
3. X. Chen, X. Ding, L. Cheng, X. Zhang, et al., *Astrophys. J. Supp.*, **263**, 34, 2022.

4. Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al., *Astron. and Astrophys.*, **649**, A1, 2021.
5. A. A. Henden, S. Levine, D. Terrell, and D. L. Welch, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts #225*, **225**, 336.16 (2015).
6. D. Tody, in D. L. Crawford, ed., *Instrumentation in astronomy VI*, **627**, 733 (1986).
7. A. Prša and T. Zwitter, *ApJ*, **628**, 426, 2005.
8. A. Prša, A. Kochoska, K. E. Conroy, N. Eisner, et al., *Astrophys. J. Supp.*, **258**, 16, 2022.
9. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durevich, N. N. Kireeva, and E. N. Pastukhova, *Astronomy Reports*, **61**, 80, 2017.
10. E. Budding, A. Erdem, C. Çiçek, I. Bulut, F. Soydugan, E. Soydugan, V. Bakiş, and O. Demircan, *Astron. and Astrophys.*, **417**, 263, 2004.
11. H. K. Brancewicz and T. Z. Dworak, *Acta Astron.*, **30**, 501, 1980.
12. K. G. Stassun, R. J. Oelkers, M. Paegert, G. Torres, et al., *Astron. J.*, **158**, 138, 2019.
13. M. A. Svechnikov and E. F. Kuznetsova, *Katalog priblizhennykh fotometricheskikh i absolutnykh elementov zatmennykh peremennykh zvezd* (1990).
14. F. Castelli and R. L. Kurucz, *Astron. and Astrophys.*, **419**, 725, 2004.
15. G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, D. W. Latham, et al., in J. Oschmann, Jacobus M., M. Clampin, G. G. Fazio, and H. A. MacEwen, eds., *Space Telescopes and Instrumentation 2014: Optical, Infrared, and Millimeter Wave*, **9143**, 914320 (2014).
16. M. E. Lohr, A. J. Norton, S. G. Payne, R. G. West, and P. J. Wheatley, *Astron. and Astrophys.*, **578**, A136, 2015.

Результаты наблюдений атмосферного поглощения на плато Суффа в период 2015–2020 гг. в миллиметровом диапазоне

Ильясов С.П., Раупов Д.А.

Астрономический институт им. Улугбека АН РУз, Ташкент, Узбекистан

Представлены результаты измерений атмосферного поглощения в Радиоастрономической обсерватории РТ-70 на плато Суффа (Узбекистан, $\lambda = 65^{\circ}26'$, $\phi = 39^{\circ}37'$, $h = 2500$ м). Наблюдения проводились в автоматическом режиме каждые 11 минут в течение года с января 2015 г. по ноябрь 2020 г. с помощью измерительного комплекса МИАП-2. Рассмотрены сезонные изменения атмосферного поглощения и количества осаждаемой воды в атмосфере, построены статистические диаграммы. Основным результатом работы являются статистические данные, характеризующие астроклимат и позволяющие прогнозировать возможность радиоастрономических наблюдений в окнах прозрачности миллиметрового диапазона длин волн.

Поступила в редакцию 31.07.2023 г. Принята в печать 28.08.2023 г.

Ключевые слова: атмосферное поглощение, количество осаждаемой воды, межзвездные атомы, молекулы, наземно-космическая связь, дистанционное зондирование Земли

The results of observations of atmospheric absorption on the Suffa plateau in the period 2015–2020 in the millimeter range

Pyasov S.P., Raupov D.A.

Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, Uzbekistan

The results of atmospheric absorption measurements at the RT-70 Radio Astronomy Observatory on the Suffa plateau (Uzbekistan, $\lambda = 65^{\circ}26'$, $\phi = 39^{\circ}37'$, $h = 2500$ m) are presented. The observations were carried out automatically every 11 minutes during one year, from January 2015 to November 2020, using the MIAP-2 measuring complex. Seasonal changes in atmospheric absorption and the amount of precipitated water in the atmosphere are considered, statistical diagrams are constructed. The main result of the work is statistical data characterizing the astroclimate, allowing to predict the possibility of radio astronomical observations in the transparency windows of the millimeter wavelength range.

Received 31.07.2023. Accepted 28.08.2023.

Keywords: atmospheric absorption, amount of precipitated water, interstellar atoms, molecules, ground-space communication, remote sensing of the Earth

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.009

1. Введение

Известно, что наиболее перспективной областью спектра электромагнитных колебаний в решении фундаментальных проблем космологии, поиска и исследования органических молекул космического происхождения и других фундаментальных проблем астрофизики, а также в решении прикладных задач, имеющих народно-хозяйственное значение, таких как наземно-космическая связь, дистанционное зондирование Земли, создание глобальной навигационной системы и многих других, является миллиметровый диапазон длин волн [1].

Преимущества миллиметрового диапазона в радиоастрономии, помимо того, что доминирующим в этом диапазоне является реликтовое космологическое излучение, слабое рассеяние и поглощение радиоволн в космической плазме, богатый спектр вращательно-колебательных линий большинства межзвездных атомов и молекул, является возможность реализовать самое высокое угловое разрешение [2].

В последнее десятилетие, благодаря стремительному развитию техники сверхвысоких частот, созданию адаптивных радиотелескопов большой апертуры и возможности объединения их в систему наземных и наземно-космических интерферометров со сверхдлинными базами, появилась реальная возможность в полной мере реализовать преимущество миллиметрового диапазона в решении фундаментальных проблем космологии, а также в решении ряда прикладных задач на совершенно новом уровне [3].

Однако нестабильность многих параметров атмосферы Земли (как из-за глобальной циркуляции, так и из-за перемешивания атмосферных слоев и локальной турбулентности, вызываемых неоднородностью земной поверхности) и ее влияние на прохождение электромагнитных волн микроволнового диапазона исключают возможность построения универсальной радиомодели атмосферы. Также они обуславливают необходимость постоянного наблюдения за состоянием атмосферы, в дополнение к использованию наблюдаемых параметров для решения фундаментальных проблем физики атмосферы и продиктованных экономической целесообразностью с точки зрения более эффективного использования больших (дорогих) радиотелескопов в реализации исследовательских программ [4].

Поэтому в настоящее время во всех крупных радиобсерваториях мира (в местах установки радиотелескопов) проводятся систематические наблюдения параметров атмосферы с использованием современных измерительных систем для накопления статистического материала и прогнозирования условия прохождения микроволнового излучения от космических объектов [5, 6, 7, 8, 9].

В данной работе мы представляем результаты мониторинга атмосферного поглощения и осажденной воды в атмосфере, проведенного на плато Суффа в период с января 2015 г. по ноябрь 2020 г. с использованием измерительного комплекса МИАП-2.

2. Измерительный комплекс

Измеритель представляет собой радиометрическую систему, включающую в себя два радиометра с рабочими диапазонами 84–99 ГГц ($\lambda_{\text{ср}} = 3$ мм) и 132–148 ГГц ($\lambda_{\text{ср}} = 2$ мм), опорно-поворотное устройство и систему управления, сбора и обработки на базе персонального компьютера. Все радиометрическое оборудование установлено на единой платформе с герметичным жестким корпусом из нержавеющей стали, обеспечивающим надежную защиту от неблагоприятных погодных условий, и имеет радиопрозрачное фторопластовое окно. Ширина луча рупорной антенны радиометра на половинном уровне мощности в обоих диапазонах составляет 2.5° . Структура и принцип работы комплекса МИАП-2 подробно описаны в работах [2, 10]. Функциональная схема приемного блока МИАП-2 показана на рис. 1. Измерение полного вертикального поглощения радиоволн на указанных частотах осуществляется методом вертикальных сечений, основанным на измерении собственного теплового излучения атмосферы при различных углах над горизонтом (60.5° , 76.3° , 81.4° , 84.2° , 88.6°). Последний угол находится как можно ближе к горизонту.

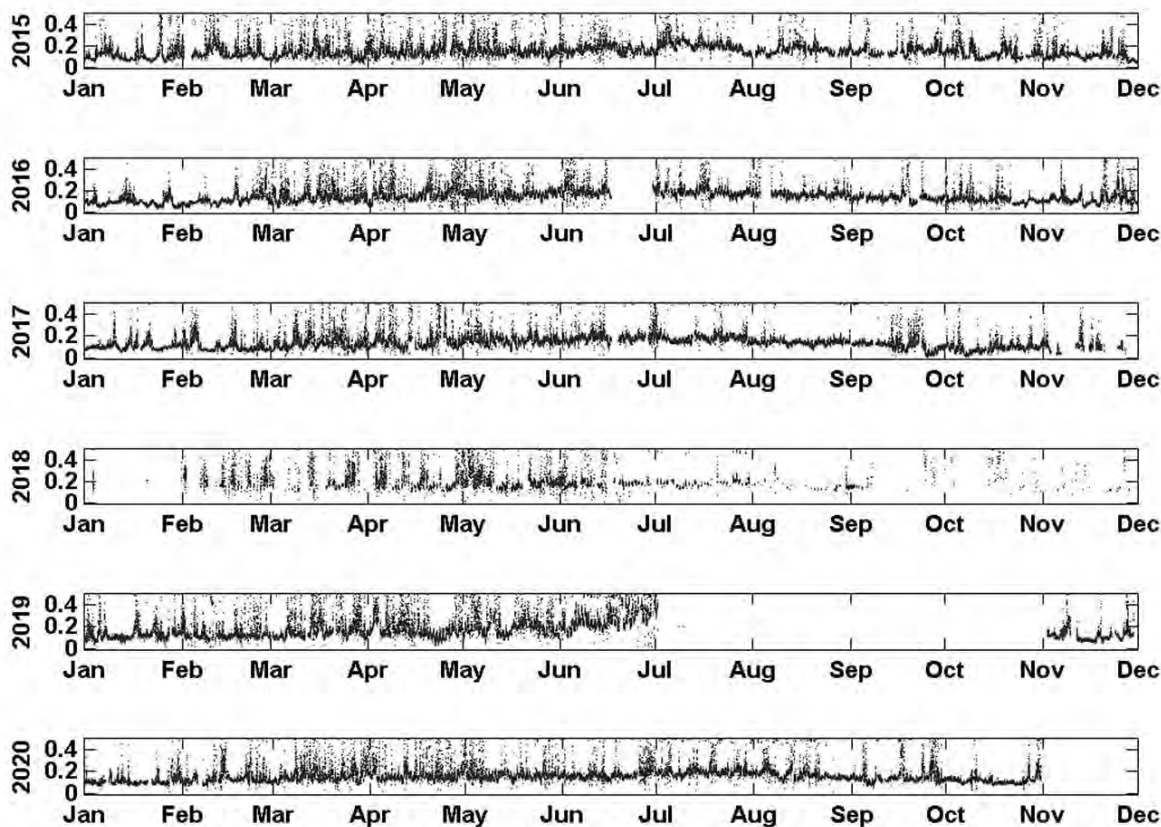


Рис. 1: Временной ряд атмосферного поглощения, полученный с января 2015 г. по ноябрь 2020 г. на плато Суффа в диапазоне 3 мм.

Измерения атмосферного поглощения радиоволн миллиметрового диапазона проводятся методом вертикальных разрезов, хорошо описанным в работах [11]. Метод реализуется путем сравнения приращений яркостных температур двух участков атмосферы, при различных зенитных углах относительно известной температуры некоторой опорной области. В качестве опорной области обычно используется атмосферное излучение в направлении горизонта, если предположить, что яркостная температура атмосферы в направлении антенны близка к термодинамической температуре приземного слоя воздуха, а сама атмосфера изотермична в горизонтальных координатах.

Расчетное значение атмосферного поглощения в зените выражается в Непрах (1 Неп = 8.686 дБ), т. е. на графике отображается так называемая оптическая толщина атмосферы. Как отмечалось выше, измерения параметров атмосферы на плато Суффа проводятся с января 2015 г. по ноябрь 2020 г. За этот период нами были получены более 250 000 значений параметров атмосферы.

3. Статистика наблюдений

В период с января 2015 г. по ноябрь 2020 г. на плато Суффа накоплен значительный массив измерений атмосферного поглощения в миллиметровом диапазоне спектра. В качестве примера на рис. 1. приведены полные временные ряды атмосферного поглощения, полученные на плато Суффа за указанный выше период в диапазоне 3 мм радиоволн. Некоторые пробелы в данных наблюдений обусловлены техническими причинами. Как видно из рисунка, величина атмосферного поглощения за весь период наблюдений остается стабильной. Аналогичная тенденция наблюдается и в значениях атмосферного поглощения в 2 мм диапазоне. Следует отметить, что в 2018 г. появились неисправности оборудования и полученные данные сильно отличались от предыдущих значений параметров атмосферы. Поэтому при расчете параметров атмосферы данные 2018 г. были отброшены.

Наблюдения в двух окнах атмосферного поглощения позволяют рассчитать количество осаждаемой воды по методу, представленному в работе [12], используя методы расчета удельного коэффициенты поглощения для данного радиометра, приведенные в работе [13]. Результаты расчетов количества осаждаемой воды (PWV) находятся отдельно для каждого канала, но в чистом времени они совпадают с точностью до погрешности измерения.

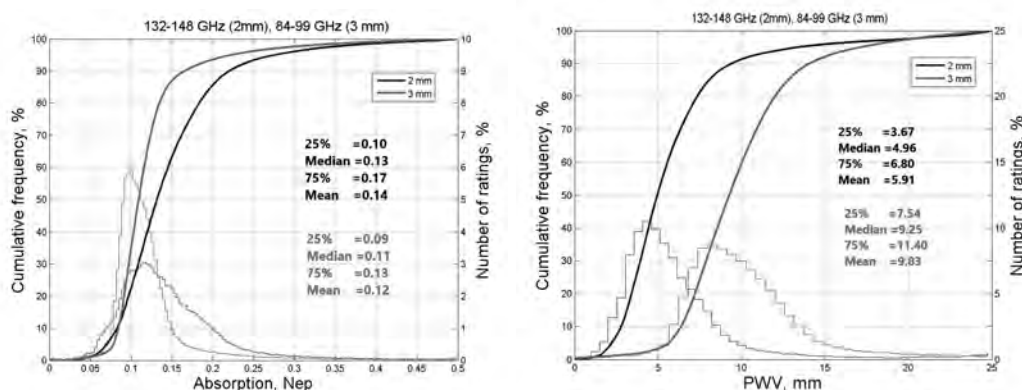


Рис. 2: Статистическое распределение атмосферного поглощения (слева) и количества осаждаемой воды (справа) на плато Суффа, рассчитанное для диапазонов радиоволн 2 и 3 мм, с января 2015 г. по ноябрь 2020 г. Ось ординат гистограммы направлена справа, кумулятивное распределение слева.

На рис. 2 показано статистическое распределение атмосферного поглощения и количества осаждаемой воды. Медианное значение атмосферного поглощения за весь период наблюдений составило 0.13 и 0.11 Неп для 2 и 3 мм радиодиагона, соответственно. Медианное значение атмосферного количества осаждаемой воды за весь период наблюдений в радиодиапазоне 2 мм составило 4.96 мм, в диапазоне 3 мм — 9.25 мм.

В табл. 1 показаны среднемесячные значения атмосферного поглощения и интегрального количества осаждаемой воды с января 2015 г. по декабрь 2020 г. Как видно из данных, в период с 2015 по 2020 гг. среднемесячные значения атмосферных параметров на плато Суффа остаются достаточно стабильными. Основной диапазон изменения атмосферного поглощения и количества осаждаемой воды лежит в пределах 0.11–0.19 Неп и 4.84–7.40 мм для 2 мм диапазона спектра радиоволн, а для 3-мм диапазона — 0.11–0.14 Неп и 8.81–13.38 мм.

Для наглядного представления статистики параметров атмосферы и тенденции ее изменения, времена года были выбраны по принципу погодных условий: к зимнему сезону относятся ноябрь, декабрь, январь и февраль; переходный сезон включает март, апрель, сентябрь и октябрь, летний сезон — май, июнь, июль и август. В зимний период средняя величина атмосферного поглощения составляет менее 0.10 Неп, в переходный сезон — менее 0.12 Неп, а в летний период более 0.12–0.15 Неп, для диапазона 3 мм, а для диапазона 2 мм в зимний период среднее значение атмосферного поглощения составляет менее 0.12 Неп, в переходный сезон — менее 0.14 Неп, а в летний период более 0.14–0.15 Неп.

Временная динамика осадков в январе и июле характерна для экстремальных климатических условий. Среднее значение осаждаемой воды в январе составляет около 4.84 мм для диапазона 2 мм, 10.0 мм для диапазона 3 мм, а в июле 7.40 и 13.38 мм для диапазона 2 и 3 мм, соответственно.

Таблица 1: Среднемесячные значения атмосферного поглощения и интегрального количества осаждаемой воды с января 2015 г. по декабрь 2020 г.

Месяц	Поглощение	Поглощение	PWV	PWV
	3 мм	2 мм	3 мм	2 мм
Январь	0.11	0.11	8.81	4.84
Февраль	0.12	0.14	10.44	5.05
Март	0.12	0.15	11.42	5.89
Апрель	0.13	0.16	12.22	6.22
Май	0.14	0.18	12.82	7.21
Июнь	0.14	0.19	13.26	7.27
Июль	0.14	0.17	13.38	7.40
Август	0.14	0.16	13.25	7.28
Сентябрь	0.14	0.14	12.57	7.09
Октябрь	0.13	0.14	12.05	6.62
Ноябрь	0.12	0.12	11.11	5.56
Декабрь	0.12	0.11	9.25	4.69
Сред.	0.12	0.14	11.30	5.91

Суточный ход осаждаемой воды в летний период более значителен, чем в зимний. В отдельные ночи в декабре и январе ее количество падает до 2 мм, летом возрастает до 15 мм.

Известно, что облака не влияют на работу радиотелескопов кроме крайних сантиметровых и миллиметровых диапазонов. Поскольку в данной работе речь идет об измерениях в миллиметровом диапазоне, нами были проанализированы данные радиоизмерений, полученных в абсолютно ясные и пасмурные дни. Зимой в ясные дни величина осаждаемой воды всегда ниже на 30%, чем в пасмурные дни в 3 мм диапазоне, а 2 мм диапазоне — 35%.

Количество осаждаемой воды в переходном периоде в пасмурные дни на 60% выше, чем в ясные дни для диапазона 2 мм, а для 3 мм диапазона — 57%. Летом в пасмурные дни значение осаждаемой воды всегда на 31% выше, чем в ясные дни в 2 мм диапазоне и 46% в 3 мм диапазоне.

4. Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что за шестилетний период времени параметры атмосферы на плато Суффа остаются достаточно стабильными. Приведенные здесь значения атмосферного поглощения и осаждаемой воды соответствуют значениям всей толщии атмосферы в зените. Измерения параметров атмосферы на плато Суффа показали, что величина атмосферного поглощения в зените на длине волны 3 мм иногда на протяжении нескольких лет находилась в пределах 0.06–0.08 Неп, а на длине волны 2 мм — в пределах 0.08–0.10 Неп. На более коротких промежутках времени, в течение нескольких часов, поглощение волны 3 мм иногда падает до 0.06–0.08 Неп, а на длине волны 2 мм — до 0.05–0.06 Неп. Такие случаи происходят зимой. Количество осаждаемой воды за несколько суток находится в пределах 1.6–2.0 мм. Их можно привести к параметрам под любым углом, а также экстраполировать на любую высоту с учетом стандартной модели атмосферы.

Список литературы

1. Y. P. Kalmykov and S. V. Titov, *Radiophysics and Quantum Electronics*, **33**, 13, 1989.
2. Y. N. Artemenko et al., *Uzbek Physical Journal*, **18**, 421, 2014.
3. D. B. Danilevskiy, A. I. Jelejnyakova, D. A. Raupov, and G. I. Sanin, *Uzbek Physical Journal*, **18**, 206, 2016.
4. G. M. Bubnov et al., *Radiophysics and Quantum Electronics*, **59**, 763, 2017.
5. S. J. Radford et al., *ASP Conf. Ser.*, **339**, 177, 2005.
6. S. J. Radford et al., *National Radio Science Meeting*, 364, 2002.
7. P. G. Calisse et al., *Publications of the Astronomical Society of Australia*, **21**, 256–263, 2004.
8. P. G. Calisse, M. C. B. Ashley, M. G. Burton, J. S. Lawrence, et al., in S. Pfalzner, C. Kramer, C. Staubmeier, and A. Heithausen, eds., *The Dense Interstellar Medium in Galaxies*, **91**, 353 (2004).
9. P. G. Calisse et al., *Astronomy in Antarctica*, **13**, 33, 2003.
10. J. B. Peterson, S. J. E. Radford, P. A. R. Ade, R. A. Chamberlin, O. M. J., K. M. Peterson, and E. Schartman, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **115**, 383, 2003, URL <https://dx.doi.org/10.1086/368101>.
11. K. A. G., *Radiophysics and Quantum Electronics*, **13**(7), 1161, 1968.
12. H. Liebe, P. Rosenkranz, and G. Hufford, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **48**, 629, 1992, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002240739290127P>, special Issue Conference on Molecular Spectroscopic Databases.
13. B. L. Ulich, *Astrophysical Letters*, **21**, 21, 1980.

Яркие голубые переменные: методы их поиска и наблюдательные свойства

Соловьева Ю.Н., Винокуров А.С., Костенков А.Е., Саркисян А.Н., Шолухова О.Н., Тихонов Н.А., Фабрика С.Н.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

Яркие голубые переменные (luminous blue variables, LBV) представляют собой редкий тип звезд высокой светимости, обладающих сильной фотометрической и спектральной переменностью. Вопрос об их происхождении остается открытым, поскольку существуют две противоположные точки зрения: LBV — стадия эволюции массивной одиночной звезды, и LBV — результат эволюции массивных тесных двойных. Известно немногим более 50 звезд этого типа в нашей и других галактиках, в основном принадлежащих Местной группе. В работе обсуждаются различные методы поиска LBV в зависимости от расстояния, особое внимание уделено результатам поиска LBV в галактиках за пределами Местной группы по данным 6-метрового телескопа САО РАН.

Поступила в редакцию 01.08.2023 г. Принята в печать 23.08.2023 г.

Ключевые слова: переменные типа S Doradus, звезды высокой светимости

Luminous blue variables: search methods and observational properties

Solovyeva Yu.N., Vinokurov A.S., Kostenkov A.E., Sarkisyan A.N., Sholukhova O.N., Tikhonov N.A., Fabrika S.N.

Special Astrophysical Observatory of the RAS, Nizhnij Arkhyz, Russia

Luminous blue variables (LBVs) are a rare type of luminous stars with strong photometric and spectral variability. Their evolutionary status remains unclear, since there are two opposite points of view: LBV is a short stage of evolution of a massive single star, and LBV is the result of the evolution of interacting massive binaries. A little more than 50 stars of this type are known in our and other galaxies, mainly belonging to the Local Group. The paper discusses various methods for searching for LBVs depending on the distance, with special attention to the results of searching in galaxies outside the Local Group according to the data obtained with 6-m telescope SAO RAS.

Received 01.08.2023. Accepted 23.08.2023.

Keywords: S Doradus variables, luminous stars

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.010

1. Введение

Яркие голубые переменные — это массивные звезды высокой светимости, показывающие иррегулярную переменность различной амплитуды. Исторически первыми примерами LBV могут служить звезды Р Суг и η Саг, которые показывали вспышки в 17 и 19 в. Целенаправленное изучение звезд этого типа стартовало с начала 20 в., когда наблюдатели, включая Эдвина Хаббла, стали обнаруживать голубые иррегулярные переменные звезды высокой светимости в галактиках М31 и М33 [1, 2, 3, 4]. Впоследствии такие переменные во внешних галактиках стали называть «переменными Хаббла-Сэндиджа». При этом отдельно изучались переменные звезды типа S Dor в Магеллановых облаках [5]. Несмотря на то, что в 1970-х годах высказывались предположения о схожести переменных «Хаббла-Сэндиджа» и звезд типа S Dor [6], только в 1980-х годах Питер Конти объединил перечисленные типы с горячими переменными звездами типа Р Суг в нашей Галактике под названием «luminous blue variables» или яркие голубые переменные на основании их сходных наблюдательных характеристик [7].

2. Наблюдательные характеристики и эволюционный статус LBV

Обычно принято различать два типа фотометрической переменности ярких голубых переменных:

1. переменность типа S Dor амплитудой приблизительно до 2.5^m , наблюдаемая на временах от нескольких лет до десятилетий [8]. Считается, что болометрическая светимость звезды при этом остается приблизительно постоянной. Однако известно несколько примеров ярких голубых переменных, которые показывали некоторые изменения болометрической светимости, не испытывая гигантских вспышек. Например, полная светимость звезды AG Саг уменьшилась в 1.5 раза во время максимума оптического блеска по сравнению с значением светимости во время визуального минимума [9], что, вероятно, связано с затратами энергии на расширение внешних слоев звезды. Подобное поведение болометрической светимости отмечалось и у других ярких голубых переменных, например, AFGL2298 [10] в нашей Галактике, S Dor [11] и R 71 [12].

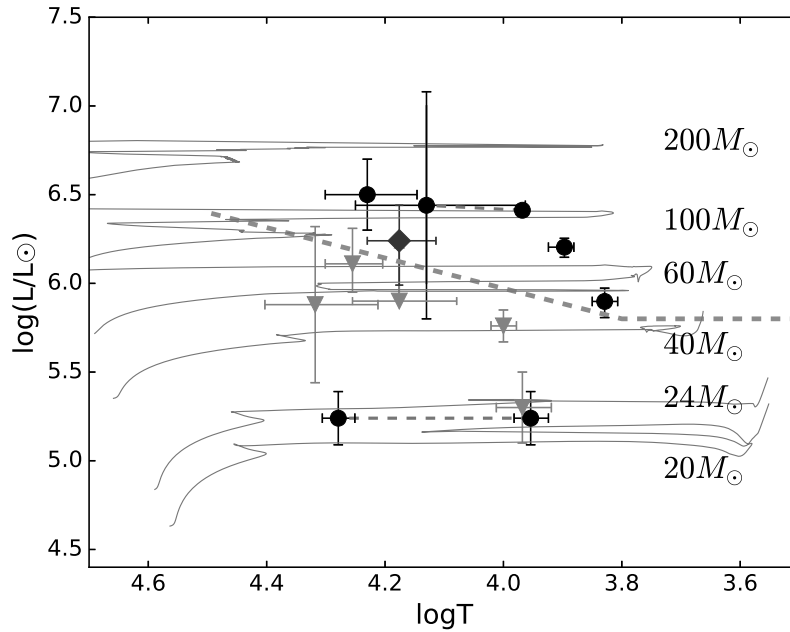


Рис. 1: Черные круги — обнаруженные LBV, красные треугольники — LBV кандидаты, синие ромбы — B[e]-сверхгиганты. Черные тонкие пунктирные линии — переходы LBV между состояниями, серые пунктирные линии — предел «Хэмфрис-Дэвидсона» [17]. Серые кривые — эволюционные треки одиночных массивных звезд [18] при металличности $Z = 0.5 Z_{\odot}$.

- редкие гигантские вспышки или переменность типа η Car амплитудой более $\approx 2.5^m$. Во время гигантских вспышек полная светимость звезды не сохраняется, а темп потери массы может возрастать на порядки величины. В других галактиках такие переменные ассоциируются с импосторами сверхновых (supernova impostor, см. обзор [13]). Импосторы сверхновых часто ошибочно принимаются за вспышки сверхновых типа II, поскольку в спектрах наблюдаются характерные узкие эмиссионные линии ($10^2 - 10^3 \text{ km s}^{-1}$), однако при вспышке импостора массивная звезда не разрушается и энергетика взрыва гораздо ниже ($\sim 10^{49} \text{ erg}$). Тем не менее, некоторые импосторы сверхновой могут предшествовать истинной вспышке массивной звезды как сверхновой типа II [14].

Спектральный класс ярких голубых переменных в зависимости от температуры фотосферы варьируется от B или Of/позднего WN во время визуального минимума (T_{eff} до 35000 K) до A-F во время визуального максимума ($T_{\text{eff}} \sim 7000 - 9000 \text{ K}$). В спектрах наблюдается множество эмиссионных линий, в частности линии водорода с широкими крыльями, линии железа Fe II и [Fe II], гелия He I и He II, кремния Si II, азота N II и многие другие, часто имеющие профили типа P Cyg.

В спектральном распределении энергии ярких голубых переменных наблюдается избыток в ближнем ИК-диапазоне (1–2 микрона), связанный со свободно-свободным излучением газа в ветре [15]. У некоторых LBV также можно наблюдать избыток на длинах волн больше 8 микрон, который, вероятно, вызван излучением холодных пылевых околозвездных оболочек, которые образуются во время вспышек [16].

Эволюционный статус ярких голубых переменных до сих пор остается неясен. Наиболее распространенной теорией является та, в которой LBV звезды соответствует весьма непродолжительной фазе перехода одиночной массивной O-звезды к звезде Вольфа-Райе [19]. Иногда LBV являются непосредственными предшественниками сверхновых II типа [20, 21]. В противовес классическому представлению в работе [22] для объяснения наблюдаемой изоляции LBV относительно молодых массивных O-звезд предложен альтернативный вариант, в котором яркие голубые переменные рассматриваются как результат эволюции массивной двойной системы с обменом масс. В таком сценарии в процессе эволюции LBV и их аналоги с меньшей массой, например, B[e]-сверхгиганты, приобретают угловой момент при перетекании массы и могут оказываться далеко от места своего формирования из-за взрыва более массивного компонента системы как сверхновой, чем и объясняется обнаруженная изоляция LBV. И хотя впервые подобная идея высказывалась еще в 1980-х годах [23, 24], развиваться она начала только в последнее время.

В работе [25] представлен список всех известных к 2018 г. ярких голубых переменных в галактиках Местной группы, который насчитывает 41 объект и включает в себя переменные типа S Dor и некоторые переменные типа η Car. При этом импосторы сверхновых, насчитывающие около 40 объектов [26], обычно рассматриваются отдельно. К 2023 г. список расширен до ≈ 50 объектов преимущественно за счет LBV в галактиках Местного объема, однако подавляющее большинство ярких голубых переменных обнаружены

в пределах 1 Мпк. Многие проблемы в области изучения LBV звезд, в частности вопрос об их происхождении, связаны в том числе и с малой выборкой объектов, которая вдобавок является очень неоднородной по наблюдательным свойствам. В связи с этим, очевидна необходимость расширять список ярких голубых переменных за счет мониторинга LBV кандидатов и поиска новых объектов данного типа, причем наиболее перспективным представляется поиск звезд этого типа в галактиках за пределами Местной группы.

3. Некоторые методы поиска

Первые яркие голубые переменные были обнаружены по изменению их блеска в оптическом диапазоне, что требовало большого количества наблюдательного времени (десятки лет), поэтому позже для отбора кандидатов стали применять другие методы. Например, в нашей Галактике LBV обнаруживают благодаря излучению их газопылевых оболочек в инфракрасном диапазоне, так как известно, что многие LBV ($\approx 70\%$, [27]) окружены компактными околос звездными оболочками различной морфологии, которые образуются в процессе их вспышечной активности. Применение данного метода позволило найти несколько LBV и кандидатов LBV за последнее десятилетие [28, 29, 30, 31, 27, 32].

Также отбор кандидатов LBV производят и в далеком УФ диапазоне, поскольку в минимуме визуального блеска, когда температура фотосферы достигает значений вплоть до 35000 К, LBV имеют высокую светимость в данном диапазоне длин волн. Выделенные данным способом объекты затем исследуются в оптическом диапазоне [33]. Во внешних галактиках, для которых доступны снимки в широкополосных фильтрах и фильтрах, центрированных на длину волны $H\alpha$, звезды данного типа ищут как яркие голубые источники с $H\alpha$ -избытком [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42]. Дополнительную информацию о выделенных таким образом источниках могут дать изображения в полосах, максимум пропускания которых соответствует линии серы [S II]: объекты с мощным звездным ветром имеют очень низкое отношение потоков в фильтрах [S II] и $H\alpha$ [43], что позволяет исключить области H II и остатки сверхновых. Несмотря на то, что перечисленные методы упрощают отбор LBV кандидатов, для подтверждения статуса LBV также требуется обнаружение значительной оптической ($> 0.5 - 1.0^m$) и спектральной переменности.

4. Поиск LBV по данным БТА САО РАН

Поиск ярких голубых переменных по данным 6-метрового телескопа БТА САО РАН начался с середины 1990-х годов. Первоначальной задачей был поиск объектов типа SS 433 в галактике M 33, однако по мере выполнения наблюдательной программы стали обнаруживаться звезды с сильными ветрами, включая LBV, после чего начался целенаправленный поиск звезд этого типа в близких галактиках M 33, M 31, NGC 2403 и M 81 [44, 36, 45, 46]. Отбор объектов осуществлялся на основе глазомерных оценок блеска голубых звезд с показателем цвета, характерным для спектрального класса O-B, на $H\alpha$ -изображениях, полученных на телескопе БТА, после чего выполнялась мультиобъектная спектроскопия с помощью спектрографа MFS (Multiobject fiber spectragraph). Затем для отбора LBV-подобных объектов стали использовать методы апертурной фотометрии широкополосных и $H\alpha$ -изображений, полученных на 4-метровом телескопе обсерватории Китт-Пик [38, 47], а спектральные наблюдения стали проводиться в длиннощелевой моде редуктора светосилы SCORPIO [48]. Таким образом удалось обнаружить несколько новых LBV-кандидатов в вышеперечисленных галактиках и одну новую LBV звезду в M 33 [49].

Дальнейшие поиски LBV звезд стали проводиться в галактиках за пределами Местной группы северной и южной полусферы. Поскольку при расстояниях в несколько мегапарсек высокая плотность звезд зачастую не позволяла их пространственно разрешать, отбор кандидатов выполнялся по архивным широкополосным изображениям космического телескопа имени Хаббла. В качестве потенциальных кандидатов отбирались яркие ($M_V \leq -8^m$) точечные источники с голубым континуумом. При наличии $H\alpha$ -изображений (фильтры F656N, F657N, F658N) принимался в расчет соответствующий избыток цвета. Кроме того, дополнительным критерием было расположение звезды неподалеку от области звездообразования или звездной ассоциации. В результате отбора были выделены 177 объектов в галактиках северного неба и около 300 объектов южной полусферы. Спектральные наблюдения выбранных объектов северной полусферы начались с 2014 г. и выполняются в режиме длинной щели с помощью спектрографов SCORPIO и SCORPIO-2 [50]. Спектроскопия южных объектов выполнялась на спектрографах RSS телескопа SALT (ЮАР) и FOCAS телескопа Subaru (Гавайи). К настоящему моменту найдено 5 новых LBV звезд, 5 LBV кандидатов и один B[e]-сверхгигант в галактиках NGC 4736 (4.59 Мпк, [51]), NGC 247 (3.52 Мпк, [51]), NGC 4449 (4.27 Мпк, [51]), NGC 1156 (7.01 Мпк, [42]) (рис. 1). В табл. 1 приведены обозначения объектов, их классификация и некоторые фундаментальные параметры. Сравнение положения этих звезд на диаграмме «температура-светимость» с эволюционными треками одиночных не вращающихся массивных звезд [18] дает приблизительный диапазон начальных масс $20 - 100 M_{\odot}$.

Таблица 1: Звезды высокой светимости в галактиках за пределами Местной группы, обнаруженные по данным БТА, SALT и Subaru с 2014 г.

Объект	A_V^m	Температура фотосферы, К	$\lg(L_{\text{Bol}}/L_{\odot})$	Классификация
J125057.26+410723.13	1.0 ± 0.1	17000 ± 3000	6.5 ± 0.2	LBV [39]
J125055.84+410625.44	–	15000 ± 3000	> 5.9	cLBV [39]
J125103.35+410635.37	0.47 ± 0.21	9300 ± 1000	5.3 ± 0.2	cLBV [39]
J004703.27-204708.4	0.8 ± 0.1	18000 ± 2000	$6.11^{+0.20}_{-0.16}$	cLBV [40]
J004702.18-204739.93	0.9 ± 0.2	15000 ± 2000	$6.24^{+0.20}_{-0.25}$	B[e]sG [40]
J122810.94+440540.6	0.2 ± 0.2	10000 ± 500	5.76 ± 0.09	cLBV [41]
J122811.70+440550.9	0.3 ± 0.2	20800 ± 4500	5.88 ± 0.44	cLBV [41]
J122817.83+440630.8	0.4 ± 0.2	19000 ± 1200	5.12 ± 0.15	LBV [41]
J122809.72+440514.8	0.8 ± 0.2	9000 ± 600 13500 ± 4300 9300	6.41 ± 0.03	LBV [41]
J025941.21+251412.2	0.90 ± 0.13	7900 ± 400	$6.20^{+0.06}_{-0.05}$	LBV [42]
J025941.54+251421.8	0.90 ± 0.13	6750 ± 330	$5.90^{+0.08}_{-0.09}$	LBV [42]

5. Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

Список литературы

1. J. C. Duncan, *Proc. Astron. Soc. Pacif.*, **34**, 290, 1922.
2. E. P. Hubble, *Astrophys. J.*, **63**, 236, 1926.
3. E. P. Hubble, *Astrophys. J.*, **69**, 103, 1929.
4. E. Hubble and A. Sandage, *Astrophys. J.*, **118**, 353, 1953.
5. A. D. Thackeray, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **168**, 221, 1974.
6. R. M. Humphreys, *Astrophys. J.*, **219**, 445, 1978.
7. P. S. Conti, in A. Maeder and A. Renzini, eds., *Observational Tests of the Stellar Evolution Theory*, **105**, 233 (1984).
8. A. M. van Genderen, *Astron. and Astrophys.*, **366**, 508, 2001.
9. J. H. Groh, D. J. Hillier, A. Daminieli, P. A. Whitelock, F. Marang, and C. Rossi, *Astrophys. J.*, **698**, 1698, 2009.
10. J. S. Clark, P. A. Crowther, V. M. Larionov, I. A. Steele, B. W. Ritchie, and A. A. Arkharov, *Astron. and Astrophys.*, **507**, 1555, 2009.
11. H. J. G. L. M. Lamers, in R. S. Stobie and P. A. Whitelock, eds., *IAU Colloq. 155: Astrophysical Applications of Stellar Pulsation*, **83**, 176 (1995).
12. A. Mehner, D. Baade, T. Rivinius, D. J. Lennon, C. Martayan, O. Stahl, and S. Štefl, *Astron. and Astrophys.*, **555**, A116, 2013.
13. N. Smith, W. Li, J. M. Silverman, M. Ganeshalingam, and A. V. Filippenko, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **415**, 773, 2011.
14. A. Pastorello and M. Fraser, *Nature Astronomy*, **3**, 676, 2019.
15. R. M. Humphreys, M. S. Gordon, J. C. Martin, K. Weis, and D. Hahn, *Astrophys. J.*, **836**, 64, 2017.
16. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Proc. Astron. Soc. Pacif.*, **106**, 1025, 1994.
17. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Astrophys. J.*, **232**, 409, 1979.
18. J. Tang, A. Bressan, P. Rosenfield, A. Slemmer, P. Marigo, L. Girardi, and L. Bianchi, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **445**, 4287, 2014.
19. P. A. Crowther, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, **45**, 177, 2007.
20. C. Trundle, R. Kotak, J. S. Vink, and W. P. S. Meikle, *Astron. and Astrophys.*, **483**, L47, 2008.
21. J. H. Groh, G. Meynet, and S. Ekström, *Astron. and Astrophys.*, **550**, L7, 2013.
22. N. Smith and R. Tombleson, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **447**, 598, 2015.
23. S. J. Kenyon and I. Gallagher, J. S., *Astrophys. J.*, **290**, 542, 1985.
24. J. S. Gallagher, in K. Davidson, A. F. J. Moffat, and H. J. G. L. M. Lamers, eds., *IAU Colloq. 113: Physics of Luminous Blue Variables*, **157**, 185 (1989).
25. N. D. Richardson and A. Mehner, *Research Notes of the American Astronomical Society*, **2**, 121, 2018.
26. K. Weis and D. J. Bomans, *Galaxies*, **8**, 20, 2020.
27. A. Y. Kniazev, V. V. Gvaramadze, and L. N. Berdnikov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **449**, L60, 2015.
28. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, S. Fabrika, O. Sholukhova, L. N. Berdnikov, A. M. Cherepashchuk, and A. V. Zharova, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **405**, 520, 2010.

29. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, A. S. Miroshnichenko, L. N. Berdnikov, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **421**, 3325, 2012.
30. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, L. N. Berdnikov, N. Langer, E. K. Grebel, and J. M. Bestenlehner, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **445**, L84, 2014.
31. V. V. Gvaramadze, A. Y. Kniazev, and L. N. Berdnikov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **454**, 3710, 2015.
32. A. Y. Kniazev, V. V. Gvaramadze, and L. N. Berdnikov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **459**, 3068, 2016.
33. P. Massey, L. Bianchi, J. B. Hutchings, and T. P. Stecher, *Astrophys. J.*, **469**, 629, 1996.
34. C. L. Neese, T. E. Armandroff, and P. Massey, in K. A. van der Hucht and B. Hidayat, eds., *Wolf-Rayet Stars and Interrelations with Other Massive Stars in Galaxies*, **143**, 651 (1991).
35. L. J. Corral, *Astron. J.*, **112**, 1450, 1996.
36. O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, V. V. Vlasyuk, and A. N. Burenkov, *Astronomy Letters*, **23**, 458, 1997.
37. P. Massey, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, S. B. Strong, G. H. Jacoby, W. Schlingman, and R. C. Smith, *Astron. J.*, **131**, 2478, 2006.
38. A. F. Valeev, O. N. Sholukhova, and S. N. Fabrika, *Astrophysical Bulletin*, **65**, 140, 2010.
39. Y. Solovyeva, A. Vinokurov, S. Fabrika, A. Kostenkov, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **484**, L24, 2019.
40. Y. Solovyeva, A. Vinokurov, A. Sarkisyan, K. Atapin, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **497**, 4834, 2020.
41. Y. Solovyeva, A. Vinokurov, A. Sarkisyan, A. Kostenkov, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **507**, 4352, 2021.
42. Y. Solovyeva, A. Vinokurov, N. Tikhonov, A. Kostenkov, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **518**, 4345, 2023.
43. N. L. King, R. A. M. Walterbos, and R. Braun, *Astrophys. J.*, **507**, 210, 1998.
44. S. Fabrika and O. Sholukhova, *Astrophys. and Space Sci.*, **226**, 229, 1995.
45. O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, V. V. Vlasyuk, and S. N. Dodonov, *Astronomy Letters*, **24**, 507, 1998.
46. O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, and V. V. Vlasyuk, *Astronomy Letters*, **24**, 603, 1998.
47. A. F. Valeev, O. N. Sholukhova, and S. N. Fabrika, *Astrophysical Bulletin*, **65**, 381, 2010.
48. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters*, **31**, 194, 2005.
49. A. F. Valeev, O. Sholukhova, and S. Fabrika, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **396**, L21, 2009.
50. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy*, **20**, 363, 2011.
51. R. B. Tully, H. M. Courtois, A. E. Dolphin, J. R. Fisher, et al., *Astron. J.*, **146**, 86, 2013.

Новый LBV-кандидат в галактике NGC 891

Соловьева Ю.Н.¹, Винокуров А.С.¹, Калдыбекова А.Б.²

¹ *Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия*

² *Казанский федеральный университет, Казань, Россия*

Мы продолжаем поиск ярких голубых переменных (luminous blue variables, LBVs) в галактиках за пределами Местной группы. LBV — малочисленный тип (около 50 известных LBV) звезд высокой светимости с неясным эволюционным статусом, показывающих существенную спектральную и фотометрическую переменность. В данной работе мы представляем результаты поиска в галактике NGC 891, находящейся на расстоянии около 10 Мпк. Звезда J022237.31+422234.2 ($M_V < -9.7^m$) показала изменение блеска около 1.3^m с 2011 по 2021 гг. и возможную спектральную переменность по данным БТА CAO РАН. Вид зависимости изменения ее цвета (B-V) от изменения блеска в полосе В характерен для подтвержденных LBV звезд. Приблизительные оценки болометрической светимости и начальной массы составляют $0.8 \times 10^6 L_\odot$ и $50 M_\odot$ соответственно. По совокупности наблюдательных проявлений J022237.31+422234.2 предварительно классифицирован как LBV-кандидат.

Поступила в редакцию 01.08.2023 г. Принята в печать 22.08.2023 г.

Ключевые слова: переменные типа S Doradus, звезды высокой светимости

New candidate LBV in the NGC 891 galaxy

Solovyeva Yu.N.¹, Vinokurov A.S.¹, Kaldybekova A.B.²

¹ *Special Astrophysical Observatory of the RAS, Nizhny Arkhыз, Russia*

² *Kazan Federal University, Kazan, Russia*

We continue our search for the luminous blue variables (LBVs) in galaxies outside the Local Group. LBVs are a rare type (about 50 known LBVs) of luminous stars with an unclear evolutionary status and significant spectral and photometric variability. Here we present the results of a search in the NGC 891 galaxy (distance ~ 10 Mpc). The star J022237.31+422234.2 ($M_V < -9.7^m$) showed a photometric variability of about 1.3^m from 2011 to 2021. Its dependence “color (B-V) versus the brightness in the B (V) band” is typical for the other confirmed LBV stars. Preliminary estimates of the bolometric luminosity and initial mass are $0.8 \times 10^6 L_\odot$ and $50 M_\odot$, respectively. Based on the observational manifestations, we have classified J022237.31+422234.2 as an LBV candidate.

Received 01.08.2023. Accepted 22.08.2023.

Keywords: S Doradus variables, luminous stars

DOI: 10.51194/INASAN.2023.8.3.011

1. Введение

Яркие голубые переменные представляют собой редкий тип массивных звезд ($\gtrsim 25 M_\odot$) высокой светимости $\gtrsim 10^5 L_\odot$ [1], испытывающих нерегулярную фотометрическую и спектральную переменность. В стандартном представлении LBV звезда соответствует короткой стадии перехода между массивной молодой O-звездой и звездой Вольфа-Райе или стадией взрыва сверхновой в зависимости от массы на главной последовательности [2]. Однако, обнаруженная в работе [3] изоляция некоторых LBV от массивных молодых O-звезд привела авторов к выводу об их происхождении в результате эволюции двойной системы с обменом масс.

К настоящему моменту известно около 50 LBV звезд в галактиках Местного объема, причем, большая часть обнаруженных LBV находятся на расстояниях до 1 Мпк и имеющаяся выборка разнородна по наблюдательным характеристиками. В настоящей работе мы представляем результаты поиска подобных звезд в галактике NGC 891, находящейся на расстоянии $D = 9.82$ Мпк [4]. Звезда J022237.31+422234.2 была выделена для исследования на основе имеющегося H α -избытка избытка по архивным данным космического телескопа им. Хаббла (см. рис. 1).

2. Фотометрия и спектроскопия

Спектральные наблюдения J022237.31+422234.2 проводились на телескопе БТА CAO РАН в длиннощелевой моде с применением спектрографов SCORPIO-1 и SCORPIO-2 [5]. Приведенный на рис. 2 спектр J022237.31+422234.2, полученный 2022/08/22 с помощью SCORPIO-2 при $V = 20.65 \pm 0.05^m$, наиболее близок к максимуму блеска ($V_{\max} = 20.43 \pm 0.05^m$). В спектре наблюдаются эмиссионные линии Fe II, в частности $\lambda 4923$, $\lambda 5018$ и $\lambda 5169$, с различимым абсорбционным компонентом слева (профиль типа P Cyg), что особенно заметно у линий $\lambda 4923$ и $\lambda 5169$. При этом абсорбционный компонент линии Fe II 5018 перекрывается с эмиссионной линией туманности [O III] $\lambda 5007$. Линия водорода H β содержит вклад как проецирующейся туманности (узкий компонент), так и самого объекта (компонент с профилем типа P Cyg). В спектре присутствует линия гелия He I 5876, однако ее FWHM ($\approx 4.5 \text{ \AA}$) соответствует спектральному разрешению

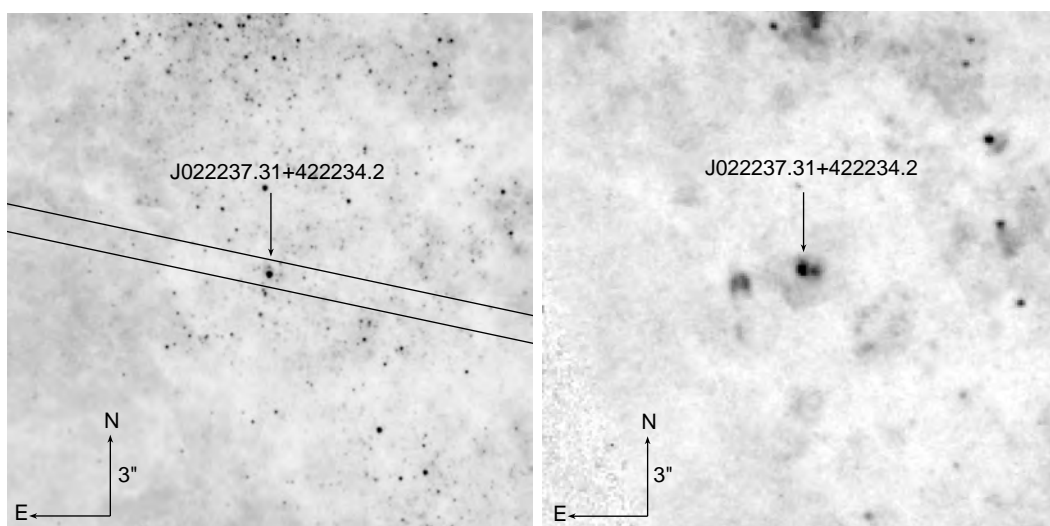


Рис. 1: Изображения областей галактики NGC 891 вокруг J022237.31+422234.2 в фильтрах HST/UVIS/F606W (слева) и HST/WFPC2/F656N (справа).

прибора, и можно заключить, что она излучается фоновой туманностью. Отсутствие собственных линий He I в спектре объекта с одновременным присутствием линий ионизованного железа указывает на довольно низкие температуры фотосферы звезды (~ 10000 К или ниже).

Фотометрия J022237.31+422234.2 выполнялась по новым данным телескопов Специальной астрофизической обсерватории (БТА, Цейсс-1000) и архивным данным наземных телескопов (WIYN 3.5-m, Subaru) и космического телескопа имени Хаббла (камеры WFPC2, WFC3/UVIS, ACS/WFC). Приблизительно с 1997 по 2021 гг. звезда постепенно ярчала, максимальное изменение звездной величины составило $\Delta V =$

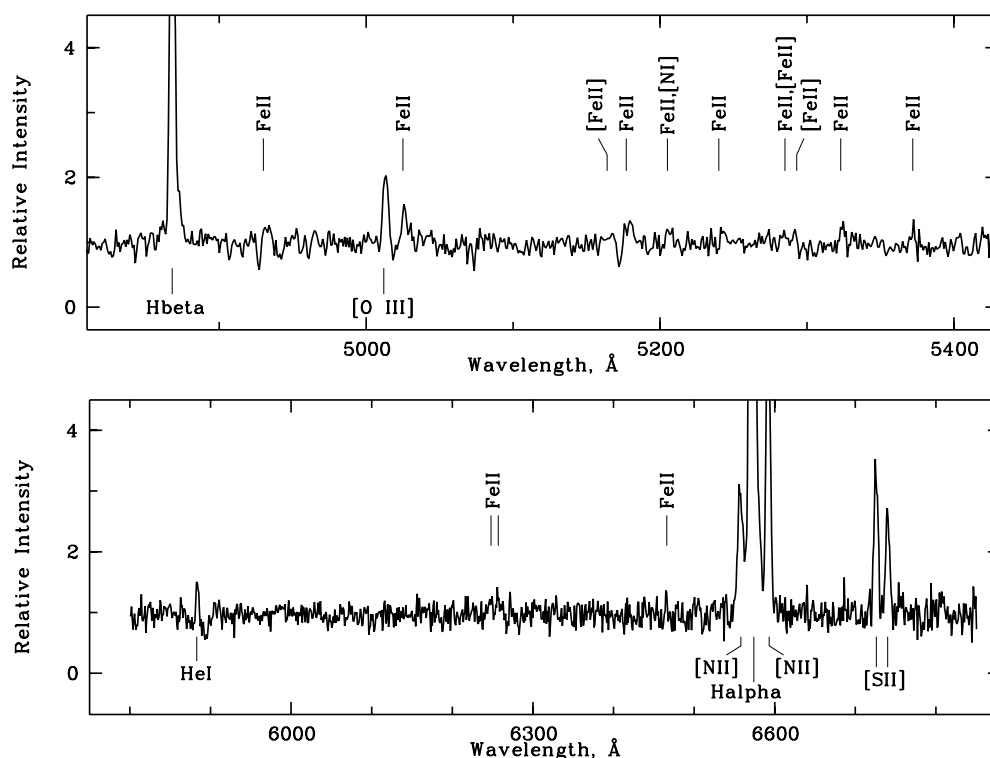


Рис. 2: Нормированный спектр J022237.31+422234.2, полученный БТА/SCORPIO-2 в 2022 г. Отмечены наиболее яркие спектральные линии.

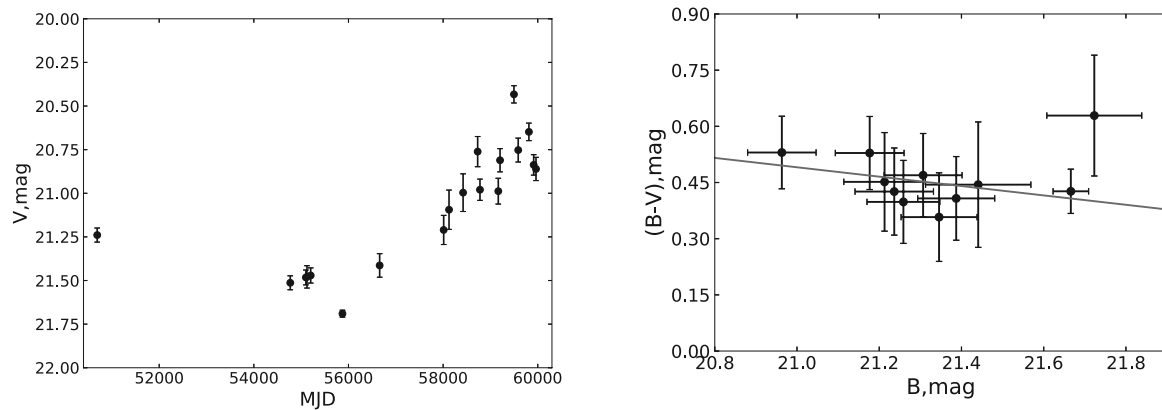


Рис. 3: Слева показана кривая блеска J022237.31+422234.2 в полосе V, справа — зависимость изменения цвета ($B - V$) от изменения блеска в полосе B. Значение показателя цвета ($B - V$) не исправлено за межзвездное покраснение.

1.26 ± 0.05^m с 2011 по 2021 гг. (рис. 3, слева). С 2021 г. и по настоящее время наблюдается медленное ослабление блеска звезды.

На рис. 3, панель справа, приведен график зависимости цвета $B - V$ от блеска в полосе B. Цвет $B - V$ не исправлен за межзвездное поглощение, поскольку оно неизвестно, однако его учет не повлияет на форму распределения цвета и коррекция цвета за поглощение представляет собой добавку постоянной величины ($A_B - A_V$). Из графика видно, что имеется нисходящий тренд в изменении цвета, что указывает на возрастание температуры фотосферы при уменьшении блеска звезды (и наоборот). Такое поведение цвета соответствует переменности типа S Dor [7] и свойственно подтвержденным LBV (напр., AF And [8], V532 в галактике M33 [9]). Аппроксимация зависимости выполнялась линейным полиномом $B - V = 0.125 \times B + 3.120$, ошибки коэффициентов линейной аппроксимации составляют 0.064 и 1.384 соответственно, приведенная статистика χ -квадрат: $\chi^2/dof = 0.21$, где $dof = 8$ — количество степеней свободы. Выпадающая точка (Цейсс-1000, 2018/01/07) не учитывалась при аппроксимации, поскольку ее заметное отклонение от тренда может быть связано с различием размера звездного изображения.

Для яркого состояния ($V = 20.43 \pm 0.05^m$, Цейсс-1000, САО РАН) нижняя оценка абсолютной звездной величины J022237.31+422234.2 с учетом поглощения в Галактике в направлении NGC 891 (0.18^m , [10]) составила $M_V < -9.7^m$. При оценке температуры фотосферы в ярком состоянии (~ 10000 К, см. выше) болометрическая поправка составляет приблизительно 0.3^m [11], что соответствует значению болометрической светимости $L_{Bol} > 0.8 \times 10^6 L_{\odot}$ (без учета A_V). На рис. 4 показано положение J022237.31+422234.2 на диа-

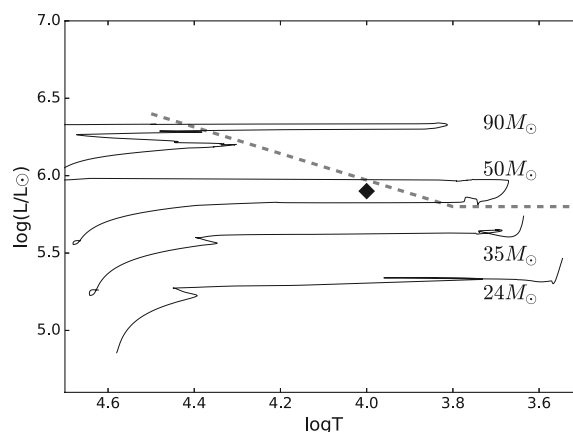


Рис. 4: Диаграмма «температура-светимость». J022237.31+422234.2 обозначен ромбом. Эволюционные треки массивных невращающихся звезд показаны черными кривыми. Серые пунктирные линии обозначают предел «Хэмфрис-Дэвидсона» [6].

грамме «температура-светимость». Оценка начальной массы звезды $\approx 50M_{\odot}$ получена на основе сравнения ее положения на диаграмме с эволюционными треками PARSEC¹, рассчитанными для металличности $Z=0.01$, что соответствует среднему значению оценки металличности NGC 891 [12].

На основе обнаруженной фотометрической переменности, наблюдаемых в спектре линий с профилями типа P Cyg и оценке болометрической светимости J022237.31+422234.2 предварительно классифицирован как LBV-кандидат.

3. Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

Список литературы

1. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Proc. Astron. Soc. Pacif.*, **106**, 1025, 1994.
2. P. A. Crowther, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.*, **45**, 177, 2007.
3. N. Smith and R. Tombleson, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **447**, 598, 2015.
4. N. A. Tikhonov and O. A. Galazutdinova, *Astrophysics*, **48**, 221, 2005.
5. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy*, **20**, 363, 2011.
6. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Astrophys. J.*, **232**, 409, 1979.
7. A. M. van Genderen, *Astron. and Astrophys.*, **366**, 508, 2001.
8. Y. C. Joshi, K. Sharma, A. Gangopadhyay, R. Gokhale, and K. Misra, *Astron. J.*, **158**, 175, 2019.
9. O. N. Sholukhova, S. N. Fabrika, A. V. Zharova, A. F. Valeev, and V. P. Goranskij, *Astrophysical Bulletin*, **66**, 123, 2011.
10. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.*, **737**, 103, 2011.
11. V. Straizys and G. Kuriliene, *Astrophys. and Space Sci.*, **80**, 353, 1981.
12. A. Eigenbrot and M. A. Bershad, *Astrophys. J.*, **853**, 114, 2018.

¹<http://stev.oapd.inaf.it/PARSEC/>

Содержание

<i>Костенков А.Е., Винокуров А.С., Соловьева Ю.Н.</i> Определение параметров протяженных атмосфер с использованием сеток моделей	110
<i>Гайсин Р.А., Каримов Р.Г.</i> Переменные звезды в области рассеянного звездного скопления NGC 6819	114
<i>Бартая Н.В., Хайбрахманов С.А.</i> Образование и динамика магнитных силовых трубок в аккреционных дисках молодых звезд	119
<i>Исмаилов Н.З., Алышов С.Ф., Исмайилова Ш.К., Гусейнова Ф.С.</i> Фотометрические и спектральные наблюдения Ве звезды Хербига AS 310	124
<i>Калдыбекова А.Б., Галимова Э.К., Соловьева Ю.Н., Винокуров А.С.</i> Исследование звезды высокой светимости J073620.47+653701.9 в галактике NGC 2403	131
<i>Турсункулов С.Б., Азимов А.М., Тиллаев Ю.А., Эгамбердиев Ш.А.</i> Качество астрономического изображения на Майданакской обсерватории	138
<i>Каргальцева Н.С., Хайбрахманов С.А.</i> Эволюция углового момента в процессе коллапса магнитных вращающихся протозвездных облаков	144
<i>Халикова А.В., Гайнуллина Э.Р., Эгамбердиев Ш.А., Асфандияров И.М., Матеев А.М., Лиин Чжун</i> Физические параметры затменно-двойной системы MX Her, полученные из BVRI фотометрии	150
<i>Ильясов С.П., Раупов Д.А.</i> Результаты наблюдений атмосферного поглощения на плато Суффа в период 2015–2020 гг. в миллиметровом диапазоне	155
<i>Соловьева Ю.Н., Винокуров А.С., Костенков А.Е., Саркисян А.Н., Шолухова О.Н., Тихонов Н.А., Фабрика С.Н.</i> Яркие голубые переменные: методы их поиска и наблюдательные свойства . . .	159
<i>Соловьева Ю.Н., Винокуров А.С., Калдыбекова А.Б.</i> Новый LBV-кандидат в галактике NGC 891 .	164

Contents

<i>Kostenkov A.E., Vinokurov A.S., Solovyeva Yu.N.</i> Determination of extended atmospheres parameters using model grids	110
<i>Gaysin R.A., Karimov R.G.</i> Variable stars near open star cluster the NGC 6819	114
<i>Bartaya N.V., Khaibrakhmanov S.A.</i> Formation and dynamics of magnetic flux tubes in the accretion disks of young stars	119
<i>Ismailov N.Z., Alishov S.A., Ismayilova Sh.K., Huseynova F.S.</i> Photometric and spectral observations of the Herbig Be star AS 310	124
<i>Kaldybekova A.B., Galimova E.K., Soloveva Y.N., Vinokurov A.S.</i> Study of the luminous star J073620.47+653701.9 in the galaxy NGC 2403	131
<i>Tursunkulov S.B., Azimov A.M., Tillayev Y.A., Ehgamberdiev Sh.A.</i> Astronomical seeing at Maidanak Observatory	138
<i>Kargaltseva N.S., Khaibrakhanov S.A.</i> Evolution of angular momentum during the collapse of magnetic rotating protostellar clouds	144
<i>Khalikova A.V., Gaynullina E.R., Ehgamberdiev Sh.A., Asfandiyarov I.M., Matekov A. M., Liying Zhu</i> Physical parameters of the MX Her eclipsing binary system obtained from BVRI photometry . . .	150
<i>Ilyasov S.P., Raupov D.A.</i> The results of observations of atmospheric absorption on the Suffa plateau in the period 2015–2020 in the millimeter range	155
<i>Solovyeva Yu.N., Vinokurov A.S., Kostenkov A.E., Sarkisyan A.N., Sholukhova O.N., Tikhonov N.A., Fabrika S.N.</i> Luminous blue variables: search methods and observational properties	159
<i>Solovyeva Yu.N., Vinokurov A.S., Kaldybekova A.B.</i> New candidate LBV in the NGC 891 galaxy	164