

А.Ж. Ақниязова^{1*} , А.С. Мирошниченко^{2,3} , З.Ж. Жанабаев¹ 

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Университет Северной Каролины в Гринсборо, Гринсборо, США

³Астрофизический институт им. В. Г. Фесенкова, Алматы, Казахстан

*e-mail: aigerimakniyazova@gmail.com

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА С ФЕНОМЕНОМ В[Е] MWC 342 ЗА 40-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЙ

MWC 342 (V1972 Cyg) представляет собой эмиссионную звезду раннего спектрального класса, открытая около 90 лет назад. Объект проявляет характерный феномен В[е], включающий разрешенные и запрещенные эмиссионные линии и инфракрасный избыток вследствие излучения околозвездной пыли, впервые обнаруженный в 1970-х годах. Однако его эволюционный статус до сих пор остаётся предметом дискуссий. В разные годы MWC 342 классифицировалась как звезда Ве Хербига, двойная система с холодным компаньоном или долгопериодическая переменная. В данной работе представлены результаты спектроскопического и фотометрического анализа объекта, выполненного на основе данных 1986 - 2024 годов. Спектры среднего и высокого разрешения были сопоставлены с переменностью оптического блеска. Мы выявили квазипериодические фотометрические вариации с характерным масштабом ~20 лет, а также установили корреляцию между оптической яркостью и эквивалентной шириной линии H α , что, вероятно, связано с изменениями плотности околозвездного вещества. Анализ распределения энергии в спектре (РЭС) в диапазоне длин волн до 160 μ m показал резкое снижение потока на длинных волнах, исключающее наличие значительного количества холодной околозвездной пыли в системе. Это согласуется с предположением о наличии компактного пылевого диска. Теоретическое РЭС с эффективной температурой ~25,000 K хорошо описывает фотометрические данные в оптическом диапазоне спектра. Использование расстояния Gaia DR3 и новой карты межзвездного покраснения в направлении на объект позволило уточнить его светимость $\log\left(\frac{L}{L_\odot}\right) \approx 3.9$. Результаты подчёркивают важность продолжения спектрального и многоцветного фотометрического мониторинга MWC 342, необходимого для уточнения её природы и динамики околозвездной среды.

Ключевые слова: спектроскопия, фотометрия, звезды с эмиссионными линиями, околозвездное вещество.

Ә.Ж. Ақниязова^{1*}, А.С. Мирошниченко^{2,3}, З.Ж. Жанабаев¹

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Гринсборо қаласындағы Северная Каролина Университеті, Гринсборо, АҚШ

³В.Г. Фесенков атындағы астрофизикалық институт, Алматы, Қазақстан

*e-mail: aigerimakniyazova@gmail.com

В[Е] құбылысы бар MWC 342 нысанының спектрлік және фотометриялық сипаттамаларын 40 жылдық бақылау негізінде кешенді талдау

MWC 342 (V1972 Cyg) — шамамен 90 жыл бұрын ашылған ерте спектрлік класстағы эмиссиялық жүлдіз. Нысанда В[е] құбылысы байқалады, сонымен қоса оның спектрінде рұқсат етілген және тыйым салынған эмиссиялық сзықтар мен 1970 жылдары алғаш рет табылған жүлдіз маңындағы шаңының сәулеленуіне байланысты инфрақызыл артықшылық байқалады. Алайда нысанының эволюциялық қүйі әлі күнге дейін талқылану үстінде. MWC 342 Хербиг Ве жүлдізы, сүйк серігі бар қос жүлдізды жүйе немесе ұзақ мерзімді айныамалы

жұлдыз ретінде жіктелген. Бұл жұмыста 1986 - 2024 жылдардағы мәліметтер негізінде жасалған объектіні спектроскопиялық, және фотометриялық талдау нәтижелері көлтірілген. Орташа және жоғары ақыратымдылықтағы спектрлер оптикалық жарықтылықтың айныма-лылығымен салыстырылды. Біз ~20 жыл шкаласы бар квази-периодты фотометриялық өз-герістерді анықтадық, сонымен қатар оптикалық жарықтылық пен H α сызығының эквивалентті ені арасындағы корреляцияны анықтадық. Бұл жұлдыз маңындағы заттың тығыздығының өзгеруіне байланысты болуы мүмкін. 160 μm дейінгі толқын ұзындығы ауқымында спектрлік энергия таралуын (СЭТ) талдау ұзын толқындарда ағынның күрт төменде-генін көрсетті, бұл жүйеде салқын жұлдыз маңындағы шаңың айтарлықтай мөлшерінің жоқтығын білдіреді. Бұл қорытынды ықшам шаң дискісінің бар болуы мүмкін деген жорамалмен үйлеседі. Тиімді температурасы шамамен $\sim 25,000$ K болатын теориялық СЭТ спектр-дің оптикалық диапазонындағы фотометриялық деректерді жақсы сипаттайды. Gaia DR3 қашықтығын және жұлдызаралық қызарудың жаңа картасын объектіге қарай пайдалану оның жарықтығын нақтылауға мүмкіндік берді $\log\left(\frac{L}{L_\odot}\right) \approx 3.9$. Нәтижелер MWC 342 спектрлік және көп түсті фотометриялық мониторингін жалғастырудың маңыздылығын көрсетеді, бұл оның табиғаты мен айналмалы ортаның динамикасын нақтылау үшін қажет.

Түйін сөздер: спектроскопия, фотометрия, эмиссиялық сызықтары бар жұлдыздар, жұлдызды зат.

A.Zh. Akniyazova^{1*}, A.S. Miroshnichenko^{2,3}, Z.Zh. Zhanabaev¹

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²University of North Carolina at Greensboro, Greensboro, USA

³ Fesenkov Astrophysical Institute, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: aigerimakniyazova@gmail.com

Comprehensive analysis of spectral and photometric characteristics of the B[e] PHENOMENON object MWC 342 over a 40-year observation period

MWC 342 (V1972 Cyg) is an early-type emission-line star discovered approximately 90 years ago. The object exhibits the characteristic B[e] phenomenon, including both permitted and forbidden emission lines, as well as an infrared excess caused by emission from circumstellar dust, first identified in the 1970s. However, its evolutionary status remains under debate. Over the years, MWC 342 has been classified as a Herbig Be star, a binary system with a cool companion, or a long-period variable star. This paper presents the results of spectroscopic and photometric analyses of the object based on data collected from 1986 to 2024. Medium- and high-resolution spectra were compared with optical brightness variations. We identified quasi-periodic photometric variability on a characteristic timescale of ~20 years and established a correlation between optical brightness and the equivalent width of the H α line, likely related to changes in the density of the circumstellar environment. An analysis of the spectral energy distribution (SED) up to 160 μm revealed a sharp decline in flux at longer wavelengths, indicating the absence of a significant amount of cold circumstellar dust in the system. This supports the hypothesis of a compact dust disk. A theoretical SED with an effective temperature of $\sim 25,000$ K fits the photometric data well in the optical range. Using the Gaia DR3 distance and a new map of interstellar reddening in the direction of the object, we refined its luminosity to $\log\left(\frac{L}{L_\odot}\right) \approx 3.9$. These results highlight the importance of continued spectroscopic and multicolor photometric monitoring of MWC 342 to further clarify its nature and the dynamics of its circumstellar environment.

Key words: spectroscopy, photometry, emission-line stars, circumstellar matter.

Введение

MWC 342, звезда 10-й звездной величины в созвездии Лебедя, в спектре которой были обнаружены линии излучения водорода в ходе обзора звезд с эмиссионными линиями обсерваторией Маунт-Уилсон [1]. В ранних исследованиях спектра этой звезды были обнаружены разрешенные и запрещенные линии излучения FeII [2]. MWC 342 одна из первых горячих звезд, у которой был обнаружен избыток инфракрасного излучения [3]. Основываясь на наличии запрещенных эмиссионных линий в ее оптическом спектре, MWC 342 был включен в первоначальный список пекулярных звезд Be, которые в настоящее время известны как объекты с феноменом B[e] [4].

После первых оптических спектроскопических и многоволновых фотометрических наблюдений в 1970 - 1980-х годах, было выдвинуто несколько гипотез относительно природы объекта. [5]. На основе анализа фотографических спектров было обнаружено, что ее свойства соответствуют свойствам звезды спектрального типа B3 III, окруженной оптически тонкой оболочкой из газа и пыли [6]. В свою очередь, исходя из спектрального распределения энергии (РЭС) в оптической области было предложено наличие гиганта спектрального класса M [7]. А в 1990 году MWC 342 отнесли к классу звезд Ae/Be Хербига, находящихся на стадии до главной последовательности [5]. Однако при анализе наблюдаемых характеристик всего первоначального списка звезд с B[e]-феноменом, пришли к выводу, что MWC 342 не может быть отнесён ни к одному из известных эволюционных классов, и включили его в группу неклассифицированных объектов с B[e]-феноменом [8].

Анализ многоцветной фотометрии и оптических спектров высокого разрешения позволил отвергнуть гипотезу о молодом эволюционном статусе MWC 342 и выдвинуть предположение о ее принадлежности к числу эволюционировавших звезд, вероятно входящих в состав двойной системы [9]. Позднее объект был отнесен к группе звезд типа FS СМа с феноменом B[e], в которую вошло большинство ранее неклассифицированных B[e] звезд [10]. Основная гипотеза относительно природы таких объектов заключается в

том, что это двойные системы промежуточной массы ($2 - 10 M_{\odot}$), находящиеся на стадии активной или завершившейся переноса массы между компонентами. С момента выделения группы объектов FS СМа в ряде таких объектов действительно была подтверждена двойственность, однако наличие спутника у MWC 342 остается не выясненным [11].

Фотометрические и спектроскопические наблюдения переменности MWC 342, проводившиеся в течение десяти лет, выявили наличие различных циклов. Так, между 1986 и 1988 годами в переменности яркости в полосе U был зарегистрирован 132-дневный цикл [5]. В данных 1990 года в нескольких оптических фотометрических диапазонах также наблюдался цикл аналогичной продолжительности, который в последующем начал сокращаться [9]. Кроме того, в 1989 и 1993 годах с использованием фотометрии Стремгрена были зафиксированы 16-дневные циклические изменения яркости [12].

В спектроскопических данных была обнаружена волна длительностью около ~ 1500 дней в параметрах линии излучения $\text{H}\alpha$ [13]. Однако до настоящего времени отсутствуют убедительные доказательства существования устойчивого периодического процесса в поведении данного объекта.

Вопрос об эволюционном статусе MWC 342 по-прежнему остается предметом дискуссий. В ряде последних работ объект рассматривается либо как молодая звезда на стадии до выхода на главную последовательность [14], либо как превоэволюционировавшая звезда, возможно входящая в состав двойной системы [11]. Ввиду отсутствия опубликованных результатов длительных серий наблюдений в оптической области спектров высокого разрешения нами были собраны соответствующие данные, полученные в ряде различных обсерваторий, а также фотометрические наблюдения, охватывающие несколько десятилетий.

Целью данного исследования является поиск регулярной спектральной и фотометрической переменности с целью проверки о двойственности системы.

Наблюдения

В этой статье мы анализируем спектры, которые были получены в следующих обсерваториях: 14 спектров на 2.1-метровом телескопе Национальной астрономической обсерватории San

Pedro Martir (OAN SPM, Нижняя Калифорния, Мексика) со спектрографом REOSC (со спектральной разрешающей способностью $R = 18,000$) [15]; 2 спектра на 2.7-метровом телескопе имени

Harlan J. Smith обсерватории McDonald (Техас, США) со спектрографом Tull coudé TS2 ($R = 60,000$) [16]; 10 спектров на 3.6-метровом телескопе Canada–France–Hawaii в обсерватории Mauna Kea (CFHT; Мауна-Кеа, Гавайи, США) со спектрополя-риметром ESPaDOnS ($R = 65,000$) [17]; 2 спектра на 0.8-метровом телескопе обсерватории TCO (Three College Observatory, Северная Каролина, США) [18]; 2 спектра на 3.5-метровом телескопе Astrophysical Research Consortium в обсерватории Apache Point (Санспот, Нью-Мексико, США) со спектрографом ARCES ($R = 31,500$) [19]; 4 спектра на 2-метровом Гималайском телескопе Chandra (HCT) в Индийской астрономической обсерватории (IAO, Ханле, Индия) с инструментом HESP ($R = 30,000$) [20]; 30 спектра были получены с помощью 1.2-метрового телескопа Mercator в обсерватории del Roque de Los Muchachos (о. Ла-Пальма, Канарские острова, Испания) со спектрографом HERMES ($R = 85,000$) [21]; 1 спектр, полученный с помощью эшелл-спектрополяриметра NARVAL ($R = 60,000$) на 2-метровом телескопе Bernard Lyot в обсерватории Pic du Midi (TBL, Пик-дю-Миди, Французские Пиренеи) [22]. В рамках настоящего исследования

удалось собрать 65 оптических спектров высокого разрешения, полученных в период с 2004 по 2023 год.

Фотометрические данные были получены из обзора ASAS-SN в фильтрах g и V [23, 24], в системе Johnson-Cousins (BVR), с использованием 1-метрового телескопа Астрофизической обсерватории Ассы-Тургень и Тянь-Шанской астрономической обсерватории (ТШАО) в период с 2002 по 2024 годы [5, 9], с 60-см телескопа обсерватории Majdanak (Узбекистан) – в период с 1999 по 2008 годы [25] и на 1.25-метровом телескопе Крымской астрофизической обсерватории в 2008 году, а также из обсерватории Abastumani на 1.25-метровом телескопе в период с 1989 по 1993 годы [12], из обсерватории APAS DR10 в 2011 году [26], из системы оптического мониторинга на борту космического корабля INTEGRAL в период с 2002 по 2008 годы [27].

Дополнительно использовались данные в инфракрасном диапазоне, полученные с космических телескопов WISE (22.1 μm [28], AKARI (9 и 18 μm) [29], MSX (8.28; 12.13; 14.65 и 21.34 μm) [30], IRAS (12 и 25 μm) [31], а также Herschel (70 и 160 μm) [32].

Результаты и обсуждения

Оптический спектр MWC 342 характеризуется множеством эмиссионных линий, среди которых особенно выделяются линии серии Бальмера с раздвоенными пиками, при этом красносмещенный пик заметно сильнее синесмещенного. Эти спектральные особенности были первоначально зафиксированы в ранних работах [2] и позднее подтверждены в [9]. Анализ серии из 102 спектров, собранных в обсерватории Ондрейкова (Чехия) в период 2004 - 2010 годов, показал переменность формы пиков, интенсивности линий и эквивалентной ширины (EW), особенно выраженную в синесмещенном пике линии $\text{H}\alpha$ [13]. Полученные результаты указывают на наличие возможного цикла вариаций отношения интенсивностей пиков V/R в линии $\text{H}\alpha$ с периодом около ≈ 1500 дней. Однако, из-за ограниченности временного интервала наблюдений были зафиксированы лишь два максимума этого цикла.

Линии He I и O I демонстрируют сложные профильные изменения, включая асимметричные эмиссионные крылья. Подобные спектральные особенности характерны для объектов с феноменом B[e], где взаимодействие между звездным ветром и дисковой структурой играет важную роль. В спектре также выявлены несколько линий поглощения, преимущественно межзвездного происхождения, что указывает на значительное

ослабление излучения звезды в межзвездной среде. Данная особенность согласуется с наблюдаемым расхождением между межзвездным и полным поглощением, ранее зафиксированным в работе [9].

Благодаря более высокому спектральному разрешению и лучшему соотношению сигнал/шум по сравнению с ранее опубликованными данными, нам удалось уточнить описание ряда спектральных особенностей, что способствует более глубокому пониманию природы основного источника энергии в системе. Так, при анализе спектра низкого разрешения ($R \approx 5000$), полученном в 1997 году, было высказано предположение о наличии линий поглощения O II на длинах волн 4649 и 5208 \AA , а также C II на 5242 \AA [33].

Слабый намек на присутствие линии поглощения вблизи 4649 \AA виден в наших спектрах с соотношением сигнал/шум не ниже 100. Однако, его происхождение остается неизвестным, поскольку это может быть связано со сложностями проведения континуума между линиями излучения Fe II в этой области. Мультиплет 8 O II не содержит дополнительных линий. Кроме того, достоверных признаков поглощения не обнаружено вблизи 5208 и 5242 \AA .

В исследовании [9] рассматривалась вероятность наличия эмиссионных линий Не II на длинах волн 4541, 4686 и 5411 Å. Однако, в наших спектрах с высоким соотношением сигнал/шум не обнаружено признаков ни излучения, ни поглощения на длине волны 4686 Å. Эмиссионные особенности, наблюдаемые вблизи 4541 и 5412 Å, могут быть с высокой степенью уверенности интерпретированы как линии Fe II (мультиплет 38) при 4541.52 Å и [Fe II] (мультиплет 17) при 5412.64 Å соответственно.

Спектральная особенность в области 4541 Å может быть интерпретирована как линия Не II 4541.59 Å, однако её близкое расположение к линии Fe II (мультиплет 38) 4541.52 Å, а также наличие других компонентов того же мультиплета с аналогичными профилями, указывает на более вероятную идентификацию в пользу Fe II. Аналогично, линия в области 5412 Å совпадает по положению и форме с [Fe II] (мультиплет 17F) 5412.64 Å и демонстрирует радиальные скорости, сопоставимые с другими идентифицированными [Fe II] линиями. При этом линия Не II 5411.52 Å, являющаяся компонентом того же мультиплета 2, что и 4541.59 Å, должна обладать сходными характеристиками, чего не наблюдается. Таким образом, учитывая отсутствие достоверных признаков линий Не II в спектре, можно заключить, что эффективная температура ионизующего источника, не превышает $\approx 28\,000$ K [34].

Спектроскопические оценки спектрального типа центрального источника варьируются от B3 III [6] до B0/B1 [9, 33], тогда как по результатам спектрофотометрии он был классифицирован как B8 [7]. Постоянное присутствие выраженного эмиссионного спектра свидетельствует о наличии горячего возбуждающего компонента. В полученных спектрах линии Не I при 4471 и 4713 Å преимущественно проявляются в виде чистого поглощения, тогда как компоненты при 5876, 6678 и 7065 Å демонстрируют переменные профили, включая тип R Суг и чистую эмиссию. Кроме того, наблюдаются выраженные эмиссионные линии кислорода (триплет 7772 - 7775 Å), Si II (5979, 6347 и 6371 Å), а также водородные линии серии Пашена [см. рис. 1 в 33], что в совокупности подтверждает принадлежность объекта к ранним спектральным типам B-звезд. Эмиссионные линии демонстрируют значительные вариации как по форме профиля, так и по радиальной скорости. Особенно выраженные изменения наблюдаются в линии Не I 5875 Å (рис. 1) и в ближнем инфракрасном триплете О I. Хотя наличие периодичности в этих колебаниях не установлено, их характер, по-видимому, отражает динамичные процессы в околозвёздной среде, обусловленные неустойчивым распределением газа вблизи центрального источника.

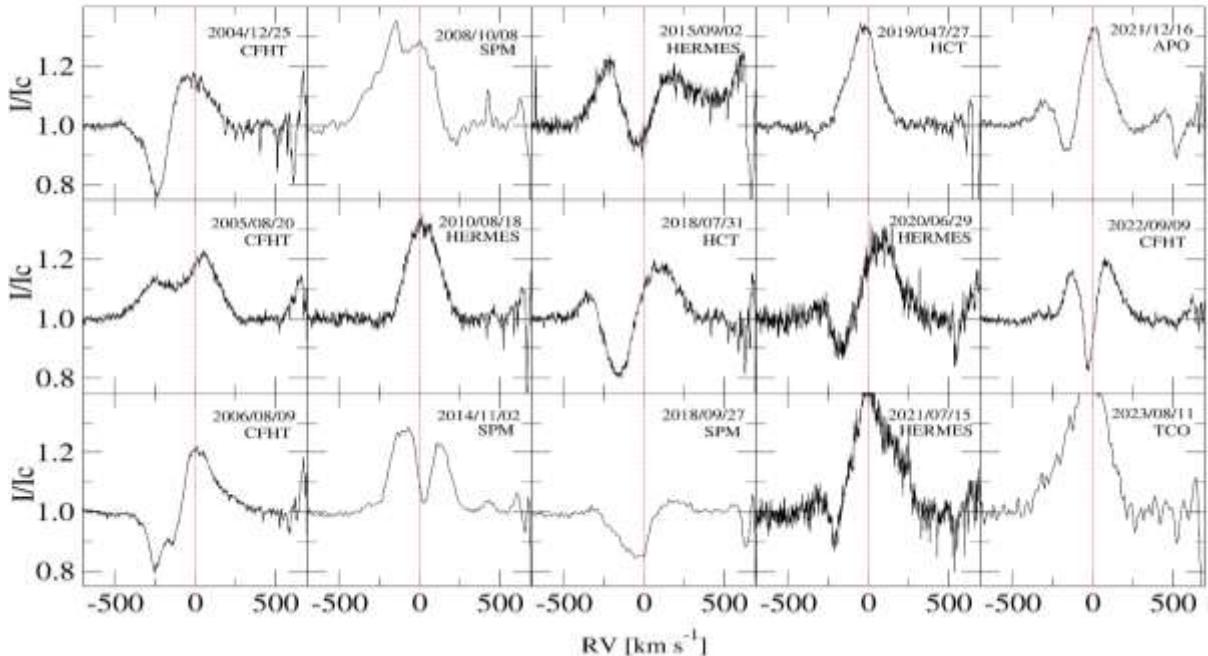


Рисунок 1 – Примеры изменения профилей линий Не I (5875 Å) за период с 2004 по 2023 гг.

Вертикальные красные пунктирные линии обозначают стационарные положения спектральной линии. По оси абсцисс отложены гелиоцентрические радиальные скорости (в км с^{-1}), по оси ординат — интенсивность линий, нормированная на локальный континуум.

Переменность оптической яркости MWC 342 неоднократно изучалась на основании наблюдений, проведённых в 1980 - 1990-х годах [5, 9, 12, 13]. Объект демонстрировал квазипериодические колебания с характерными временными масштабами от нескольких недель до нескольких месяцев. Однако, ни один из выявленных циклов не показал устойчивой долговременной стабильности. Более поздний анализ данных ASAS-SN выявил возможный длительный цикл с периодом около 632.75 дней на основе наблюдений в фотометрической полосе V за интервал порядка 1400 дней с амплитудой изменения яркости около 0.37 mag. Тем не менее, совокупность всех доступных на сегодняшний день данных ASAS-SN не обеспечивает однозначного подтверждения данного периода.

В результате анализа собранных фотометрических данных было обнаружено, что существует более длительный цикл изменения яркости объекта, продолжительностью примерно ≈ 20 лет (см. верхнюю панель на рис. 2). За период с 1987 по 2025 год, были замечены два локальных максимума яркости, примерно 1995 и 2017 годы, а также три минимума яркости, примерно 1987, 2007 и 2024 годы. Кроме того, наблюдается тенденция к постепенному снижению яркости: в минимуме 1987 года она составляла ≈ 11 mag, а в минимуме 2024 года составляет ≈ 11.2 mag. В максимуме 1999 года яркость была ≈ 10.2 mag, а в максимуме 2017 года ≈ 10.4 mag. В то же время показатель цвета (B-V) демонстрировал лишь незначительные изменения; он показал тенденцию к небольшому увеличению с 1986 по 2015 год и меньшую амплитуду изменений по сравнению с изменениями в полосе V.

Из-за небольшого количества наблюдений до 2005 года описание изменений интенсивности эмиссионной линии $\text{H}\alpha$ затруднено. Данная линия не демонстрировала значительного ослабления в течение последних двадцати лет. В частности, учитывая более высокий уровень шума в наборе данных, различия в процедуре нормализации спектров могут быть связаны с различиями в измерении эквивалентных ширин [13] (отмеченными зелеными точками в нижней панели на рис. 2). Сопоставление измеренных нами эквивалентных ширин (EW) линии $\text{H}\alpha$ с фотометрическими наблюдениями из обзора ASAS-SN позволяет предположить, что снижение яркости, зафиксированное в период 2017 - 2024 годов, связано со снижением интенсивности линии $\text{H}\alpha$, которое частично связано с уменьшением уровня континуума. В противном случае, это может быть результатом усиления процесса потери или переноса массы, которые могут привести к увеличению

эмиссии. Значения отношения V/R в линии $\text{H}\alpha$, показывают различия, сходные с теми, что были отмечены в исследовании [13]. Однако эти значения не подтверждают предполагаемый этими авторами цикл 1560 дней.

В нашей выборке были зафиксированы два эпизода увеличения V/R, которые произошли около дат JD 2,457,200 и JD 2,459,500, примерно через 2300 дней. По сравнению с кривой блеска в полосе V видно, что эти увеличения V/R происходят в моменты, когда объект кажется менее ярким, чем обычно. Если эта взаимосвязь верна, это может означать, что скорость потери массы центральной звездой уменьшается. Это связано с тем, что в звездных ветрах синесмещенная абсорбционная компонента профиля типа P Суг уменьшается, что приводит к увеличению отношения V/R.

Изменения показателя цвета B - V, представленные на средней панели рис. 2, демонстрируют относительно слабые вариации в пределах от 1.1 до 1.3 mag. В ходе активного фотометрического мониторинга в период 2010 - 2015 гг. наблюдалась тенденция к незначительному увеличению значения индекса. На основании синхронных измерений в фильтрах V и g, выполненных до перехода проекта ASAS-SN на исключительно g-диапазоне, было определено среднее значение показателя цвета $g - V$, равное 0.48 ± 0.04 mag. Преобразование этого значения в B - V по эмпирическому соотношению, приведённому в [36], даёт $B - V = 1.07 \pm 0.04$ mag. Тем не менее, с учётом значительного вклада эмиссионной линии $\text{H}\alpha$ в поток в полосе V, можно заключить, что показатель цвета B - V остаётся в целом стабильным и не демонстрирует существенных отклонений от значений, полученных ранее в фотометрической системе Джонсона.

Анализ кривой блеска звезды MWC 342 с использованием статистических методов Random Forest и скользящего среднего (Moving Average) позволил выявить устойчивые признаки квазипериодичности с близкими значениями периода: $P = 7186$ и $P = 7156$ суток, соответственно. Оба метода обеспечили получение фазовых кривых, демонстрирующих сходный характер переменности яркости. Применение алгоритма Random Forest, основанного на ансамбле решающих деревьев, дало возможность учсть сложные нелинейные взаимосвязи между наблюдаемыми величинами, а также повысить чувствительность к мелкомасштабным особенностям кривой блеска [37]. В то же время метод скользящего среднего, базирующийся на сглаживании временного ряда, позволил эффективно выделить основные тренды и длительные циклические компоненты в изменчивости объекта [38].

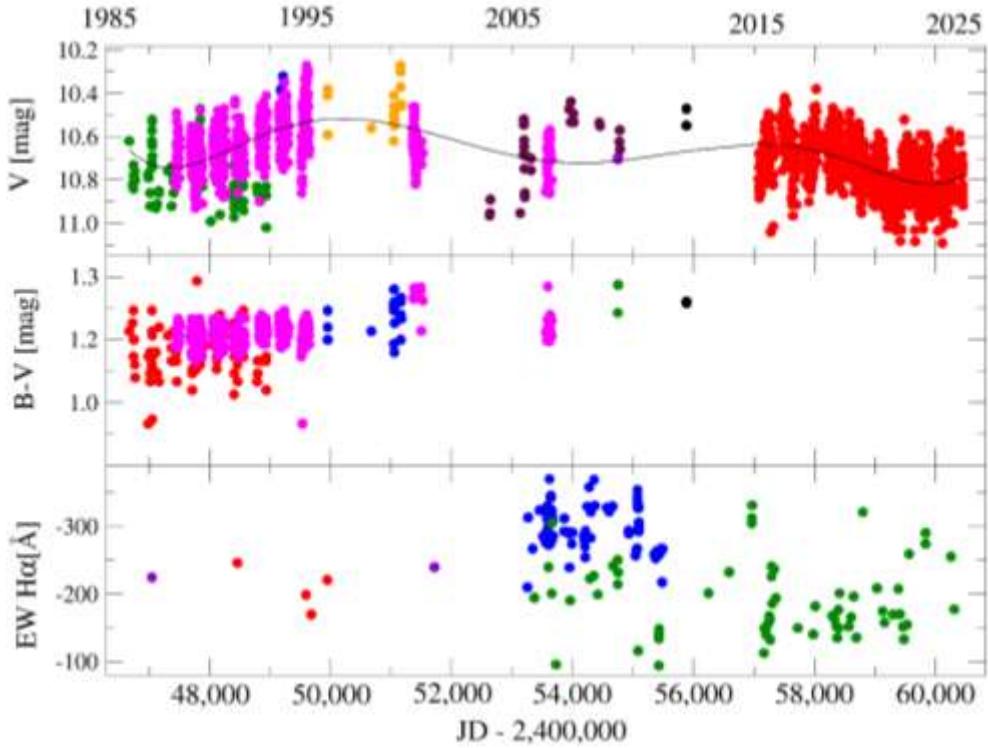


Рисунок 2 – Кривая блеска звезды MWC 342 в полосе V (верхняя панель), показатель цвета B – V (средняя панель) и эквивалентная ширина линии Нα (нижняя панель). Различные символы соответствуют данным, полученным на следующих обсерваториях: Majdanak (пурпурный цвет), ТШАО (оранжевый), Ассы-Тургень (зелёный), Abastumani (синий), а также из каталогов CraO (фиолетовый), INTEGRAL (бордовый), APASS DR10 (чёрный) и ASAS-SN (красный). Данные ASAS-SN в полосе g приведены к полосе V путём смещения на 0.48 mag. Чёрная сплошная линия на верхней панели соответствует средней яркости в полосе V. Символы, представляющие значения эквивалентной ширины линии Нα, получены из следующих источников: красный — [9], синий — [13], фиолетовый — [18], зелёный — настоящая работа.

Несмотря на качественное согласие результатов, полученных двумя различными подходами, последующий спектральный анализ не выявил достоверной связи обнаруженных периодов с физическими механизмами, такими как вращение звезды или орбитальное движение в рамках возможной двойной системы (рис. 3). Отсутствие корреляции с характеристиками звёздной динамики указывает на то, что обнаруженная периодичность, вероятно, связана с изменениями в структуре или плотности околозвёздной оболочки. Такие вариации могут быть обусловлены нерегулярными выбросами вещества, перераспределением материи в диске или другими процессами, характерными для эволюционирующих объектов с феноменом B[e].

Из-за значительных неопределённостей, связанных как с величиной межзвёздного и околозвёздного поглощения, так и с расстоянием до MWC 342, её светимость долгое время оставалась определённой с невысокой точностью.

В одной из ранних работ расстояние до объекта было оценено примерно в 1 kpc на основе анализа закона межзвёздного поглощения, полученного из данных UBV фотометрии для звёзд, проекционно расположенных вблизи направления на MWC 342 [7]. Позднее уточнение межзвёздной компоненты покраснения было выполнено на основе эквивалентных ширин (EW) наиболее выраженных диффузных межзвёздных полос (DIB), которые дали значение $E_{IS}(B - V) = 0.7 \pm 0.2$ mag [9].

Дополнительно был учтён вклад околозвёздного вещества в общее покраснение: вклад газовой компоненты оценен как $E_{ff}(B - V) \approx 0.3$ mag, а пылевой — как $E_{dust}(B - V) \approx 0.5$ mag [9]. Приняв стандартное отношение полного визуального поглощения к селективному $\frac{A_V}{E(B-V)} = 3.1$, характерное для межзвёздной среды, была получена общая величина визуального поглощения $A_V = 3.7 \pm 0.6$ mag. На

оснований средней визуальной звёздной величины $V = 10.5 \text{ mag}$ и оцененного

поглощения светимость объекта была определена как $\log\left(\frac{L}{L_\odot}\right) = 4.2 \pm 0.4$.

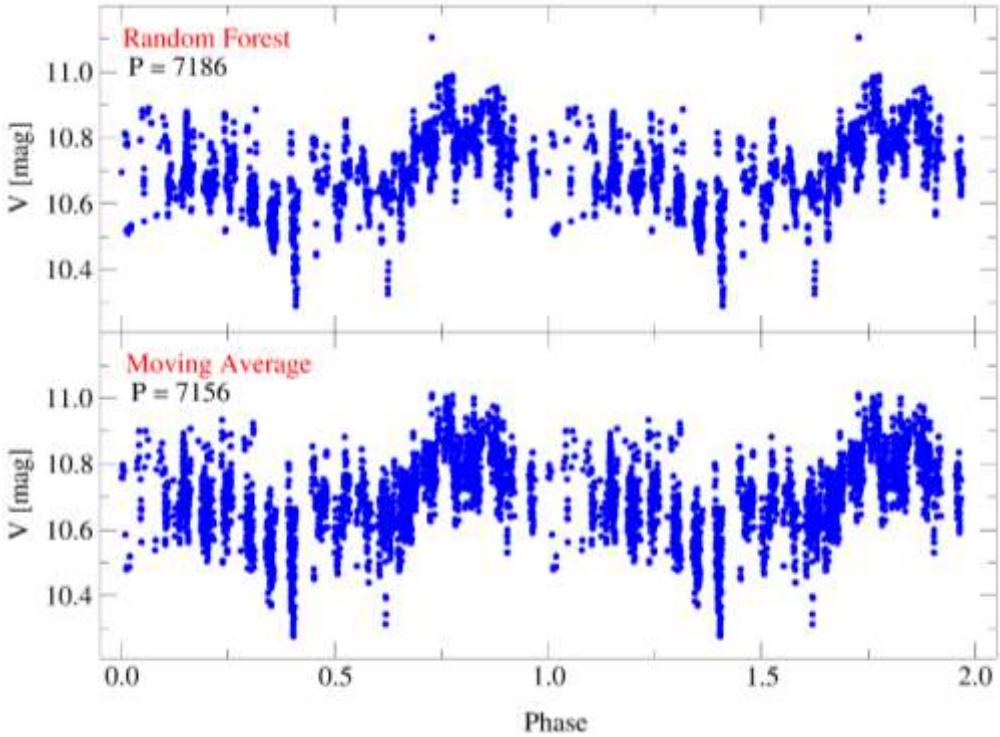


Рисунок 3 – Фазовые кривые яркости MWC 342, основанные на моделировании с использованием двух различных методов: случайного леса (верхний график) и скользящего среднего (нижний график).

При расчёте светимости не был учтён вклад околозвёздного континуума, обусловленного свободно-свободными и свободно-связанными переходами. Наличие такого континуума представляется очевидным, учитывая высокую интенсивность эмиссионного спектра и частичное заполнение излучением ряда линий поглощения, таких как H I, He I и Si II. Исключение вклада околозвёздного континуума из общего потока привело бы к снижению оценённой светимости самой звезды.

Ещё одна неопределённость в определении светимости связана с выбором значения визуальной яркости фотосферы звезды. В работе [9] в качестве усреднённой величины была использована яркость в полосе V, полученная на основе фотометрических наблюдений, доступных на конец XX века ($V = 10.5 \text{ mag}$). Наблюдения, проведённые в XXI веке, расширили диапазон яркости, однако среднее значение визуальной яркости существенно не изменилось. Тем не менее использование среднего значения может быть некорректным, поскольку эмиссионные линии и, соответственно, вклад околозвёздного

континуума сохраняются даже в периоды минимальной яркости.

В интерферометрических наблюдениях MWC 342 на длине волны $10.7 \text{ } \mu\text{m}$ с использованием 10-метрового телескопа Кека была обнаружена асимметричная структура — пылевой диск, который ограничено разрешен вдоль главной оси (полная ширина при полумаксимуме, FWHM, $39 \pm 11 \text{ mas}$) и неразрешён вдоль малой оси (FWHM $37 \pm 37 \text{ mas}$) [39]. Эти результаты согласуются с тем, что околозвёздный диск наблюдается почти с ребра, что может объяснить наличие профилей с двойным пиком и значительно более слабым синесмещённым пиком, а также глубокой центральной дисперсии в высоких членах серии Бальмера (см. рис. 3 в [9]).

Кроме того, в [39] была использована диаграмма зависимости размера молодых звезд от светимости в среднем ИК-диапазоне для оценки светимости объекта, которая оказалась около $10^4 L_\odot$ [39].

Согласно данным Gaia DR3 [40], расстояние до MWC 342 составляет $D = 1.68 \pm 0.33 \text{ kpc}$, что

примерно на 70% больше по сравнению с оценкой из [9]. Объединение наших спектров CFHT с высоким разрешением для увеличения отношения сигнал/шум в континууме до ≥ 250 позволило повысить точность оценки межзвездного поглощения, основанной на значениях DIB EW, по сравнению с результатами [9].

Используя диффузные межзвездные полосы на 5780, 5797 и 6614 Å с эквивалентными ширинами (EW) 0.35 Å, 0.14 Å и 0.17 Å соответственно, а также калибровки из [41, 42], мы определили межзвездное покраснение $E(B-V) = 0.8 \pm 0.1 \text{ mag}$. Эта оценка практически совпадает с данными карты межзвездного поглощения [43] для расстояния до объекта, публикованного в Gaia DR3 в направлении MWC 342.

Для новой оценки светимости объекта необходимо учесть вклад околозвездного континуума, обусловленного процессами «свободно-свободного» и «связанно-свободного» излучений. При этом важно отметить, что даже при минимальной оптической яркости около $V \approx 11.2 \text{ mag}$ спектр эмиссионных линий остается достаточно интенсивным.

Это свидетельствует о существенном присутствии околозвездного континуума. Однако, его вклад в общее визуальное излучение не должен быть слишком большим, так как в спектре по-прежнему наблюдаются отдельные линии поглощения, которые, скорее всего, формируются в атмосфере самой звезды. Исходя из этих соображений, можно приблизительно оценить, что вклад околозвездного континуума в визуальную яркость составляет $\approx 0.5 \text{ mag}$.

Таким образом, учитывая обновленные согласованные данные о расстоянии до MWC 342 и межзвездном покраснении, а также предполагаемую яркость фотосфера в диапазоне $\approx 11.5 - 12 \text{ mag}$ и полное межзвездное поглощение $A_V \approx 3.7 \text{ mag}$, можно оценить абсолютную визуальную звездную величину как $M_V \approx -3.1 \text{ mag}$. С учетом болометрической поправки $BC_V \approx -1.9 \text{ mag}$, соответствующей эффективной температуре $T_{eff} = 20,000 \text{ K}$, получаем болометрическую светимость $\log\left(\frac{L}{L_\odot}\right) \approx 3.9$.

Следует отметить, что эта оценка подвержена значительной неопределенности, связанной с погрешностями в определении расстояния, вклада околозвездного континуума, значений T_{eff} и общего поглощения. Тем не менее, полученное значение находится в пределах ранее предложенных диапазонов и согласуется с ними с учетом допустимой погрешности.

Нижний предел светимости ($\log\left(\frac{L}{L_\odot}\right) \sim 3.5$) соответствует положению звезды раннего B-типа на линии начальной главной последовательности. Маловероятно, чтобы лежащая в основе система имела столь низкую светимость исключительно из-за особенностей температурного режима поверхности звезды.

Если объект является одиночной звездой, то ее предполагаемые фундаментальные параметры соответствуют начальному диапазону масс порядка $6 - 10 M_\odot$, при условии что вклад околозвездного вещества – как в виде дополнительного поглощения, так и в виде излучения – в наблюдаемую яркость не отличается существенно от принятых оценок.

Присутствие значительного количества околозвездного материала вокруг звезды средней массы является довольно необычным явлением, за исключением случая, если она находится в ранней стадии эволюции до достижения главной последовательности. Однако, вероятность такого сценария низка, поскольку вблизи объекта не обнаружено активной области звездообразования, а также наблюдается быстрое снижение инфракрасного потока при длинах волн около $\lambda \sim 10 \text{ \mu m}$.

Последняя особенность типична для объектов, не относящихся к молодой популяции и указывает на более зрелый эволюционный статус звезды.

На основе новых данных, полученных с инфракрасных обзоров неба (IRAS, Herschel, AKARI, MSX, WISE), была выполнена более точная реконструкция РЭС MWC 342 в инфракрасном диапазоне, охватывающем длины волн от 0.3 до 160 μm . Эти данные позволили заменить устаревшие и менее надёжные значения потоков, представленных в начале 1990-х годов на основе измерений спутника IRAS, которые были ограничены по чувствительности.

Обновлённое распределение энергии (рис. 4) демонстрирует устойчивый спад потока в направлении длинноволновой части спектра, что свидетельствует об отсутствии значительного количества холодной пыли в околозвездной среде.

Отсутствие характерного "плато" или вторичного подъёма потока в области 0.3 - 160 μm указывает на то, что субмиллиметровая и дальнейнфракрасная компоненты РЭС представлены слабо, а значит, присутствие большого количества холодной околозвездной пыли в оболочке звезды маловероятно.

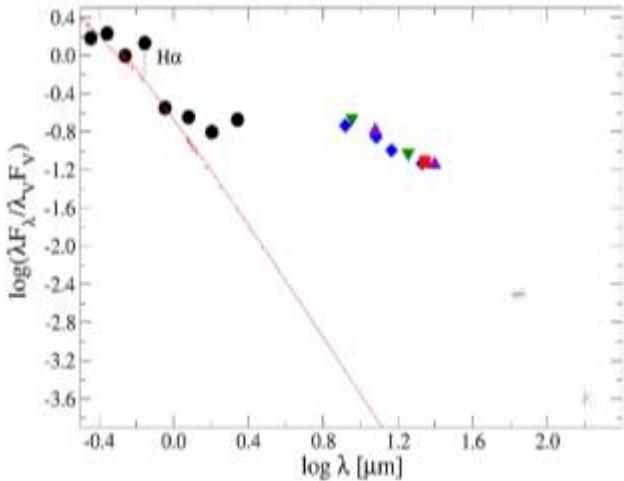


Рисунок 4 – Распределение энергии спектра MWC 342 в диапазоне 0.3–160 $\mu\text{м}$ с наложением модели Kurucz для температуры 25 000 К [44].

В то же время, в спектре чётко прослеживается избыток инфракрасного излучения по сравнению с предсказаниями чисто фотосферной модели для горячей звезды. Это избыточное ИК-излучение, наблюдаемое начиная с ближнего инфракрасного диапазона, скорее всего, обусловлено переизлучением звёздного света горячей пылью, локализованной в диске или уплощённой оболочке, что типично для объектов с феноменом B[e]. Данный факт поддерживает идею о наличии сложной, неоднородной околозвёздной среды, включающей в себя как газовую, так и пылевую компоненты.

Заключение

В настоящей работе представлены результаты спектроскопического и фотометрического анализа звезды с эмиссионными линиями MWC 342, природа и эволюционный статус которой до настоящего времени остаются не до конца определёнными. Проведённый анализ показал, что профили и положения спектральных линий, а также оптическая яркость объекта демонстрируют сильную переменность, не обладающую строгой периодичностью. Вместо этого наблюдаются квазипериодические изменения, которые, по-видимому, обусловлены вариациями оптической глубины в околозвёздной среде. В частности, обнаружены признаки длительного, порядка двух десятилетий, квазипериода, проявляющегося в изменении фотометрических характеристик.

Кроме того, выявлена антикорреляция между эквивалентной шириной линии H α и оптической яркостью, что может свидетельствовать о

Особое внимание заслуживает заметное отклонение фотометрической точки в полосе R (примерно при $\log \lambda \approx -0.05$), проявляющееся в виде превышения наблюдаемого потока над предсказанным моделью. Это отклонение связано с сильной эмиссионной линией H α , расположенной в центральной части полосы пропускания R-фильтра ($\lambda = 6563 \text{ \AA}$). Известно, что у звёзд типа B[e], включая MWC 342, линия H α может демонстрировать значительные изменения интенсивности и эквивалентной ширины (EW), обусловленные изменениями в структуре и плотности околозвёздной оболочки или диска. Это согласуется с результатами спектроскопических наблюдений, показывающих корреляцию между изменениями EW линии H α и оптической яркостью объекта.

Сравнение наблюдаемого РЭС с теоретическими фотосферными моделями атмосфер горячих звёзд, в частности моделью Kurucz, подтверждает высокую эффективную температуру центрального источника — порядка $\sim 25\,000$ К. Это значение соответствует спектральному классу B1 и согласуется с результатами спектрального анализа и классификацией объекта как звезды B[e]-типа.

Таким образом, обновлённые данные в инфракрасном диапазоне позволили не только устранить ранее существовавшие неопределённости, связанные с характеристиками пылевой компоненты, но и предоставили важную информацию для более точного понимания физической природы околозвёздной среды звезды MWC 342.

изменениях основного континуума как одной из причин усиления эмиссионных признаков. Проведённый спектральный анализ с использованием данных более высокого спектрального разрешения и лучшего отношения сигнал/шум не подтвердил наличие ранее предполагаемых эмиссионных линий H ϵ II.

Определение межзвездного покраснения, основанное на современных фотометрических картах и усовершенствованных оценках вклада околозвёздного континуума, позволило уточнить светимость объекта, которая оказалась равной $\log \left(\frac{L}{L_\odot} \right) \sim 3.9$. Эта величина находится в согласии с ранее опубликованными оценками, хотя остаётся значительная неопределенность (до 0.4 dex), обусловленная совокупным влиянием факторов, включая точность определения расстояния, температурные параметры и особенности распределения излучения в околозвёздной среде.

Полученные результаты подчёркивают необходимость проведения дальнейших, систематических и многоволновых наблюдений за MWC 342. Особое значение имеют инфракрасные исследования, позволяющие глубже понять структуру и эволюцию пылевой и газовой оболочки. Организация длительного фотометрического и спектрскопического мониторинга с высоким времененным разрешением представляется особенно актуальной для установления механизмов, лежащих в основе наблюдаемой переменности. Сочетание таких наблюдений с анализом данных спутниковых обзоров, таких как ASAS-SN, существенно расширит понимание физических процессов, происходящих в системе.

Таким образом, MWC 342 остаётся ярким представителем группы звёзд с феноменом B[e]

типа FS CMa и представляет собой ценный объект для исследования взаимодействия звезды со своим околозвёздным окружением. Совокупность наблюдаемых характеристик делает его важной лабораторией для изучения поздних стадий эволюции звёзд промежуточной массы и процессов формирования сложной структуры околозвёздного вещества.

В дальнейшем планируется провести аналогичный анализ других активных представителей группы FS CMa, таких как FS CMa (HD 45677) и HD 50138, с целью формирования более полного представления об эволюционном статусе объектов данной категории. Обзор последних результатов по объектам группы FS CMa можно найти в [11].

Благодарность

В этом исследовании использовалась база данных SIMBAD, работающая в CDS, Страсбург, Франция; информационные продукты SAO/NASA ADS, ASAS и Gaia. Эта статья частично основана на наблюдениях, полученных на 2.1-метровом телескопе Национальной астрономической обсерватории San Pedro Martir (Нижняя Калифорния, Мексика), 2.1-метровом телескопе Otto Struve и 2.7-метровом телескопе имени Harlan J. Smith в обсерватории McDonald (Техас, США), на телескопе Canada–France–Hawaii (CFHT), которым управляет Национальный исследовательский совет Канады, Национальный институт наук об университетах Национального центра научных исследований Франции и Гавай-

ский университет; на телескопе Mercator на острове Ла-Пальма фламандским сообществом, в испанской обсерватории del Roque de los Muchachos Института астрофизики Канарских островов, на 2-метровом Гималайском телескопе Chandra (Ханле, Индия) и на 0.81-метровом телескопе обсерватории Three College (Северная Каролина, США). Благодарим за техническую поддержку Dan Gray (Sidereal Technology company), Joshua Haislip (Университет Северной Каролины в Чапел-Хилле) и Mike Shelton (Университет Северной Каролины в Гринсборо), а также за финансирование со стороны Колледжа искусств и наук Университета Северной Каролины в Гринсборо и факультета физики и астрономии этого Университета.

Литература

1. P. W. Merrill, C. G. Burwell, *Astrophys. J.* **78**, 87 (1933). <https://doi.org/10.1086/143490>
2. V. P. Swings, O. Struve, *Astrophys. J.* **97**, 194 (1943). <https://doi.org/10.1086/144513>
3. S. L. Geisel, *Astrophys. J.* **161**, L105 (1970). <https://doi.org/10.1086/180580>
4. D. A. Allen, J. P. Swings, *Astron. Astrophys.* **47**, 293-302 (1976).
5. Y.K. Bergner, A.S. Miroshnichenko, I.S. Sudnik, et al. *Astrophysics* **32**, 109-119 (1990). <https://doi.org/10.1007/BF01005474>
6. N. Brosch, E. M. Leibowitz, N. Spector, *Astron. Astrophys.* **65**, 259-263 (1978).
7. V. P. Arkhipova, A. P. Ipatov, *Sov. Astron. Lett.* **8**, 298–302 (1982).
8. H. J. G. L. M. Lamers, F.-J. Zickgraf, D. de Winter, L. Houziaux, & Zorec, J., *Astron. Astrophys.* **340**, 117-128 (1998).
9. A. S. Miroshnichenko, P. Corporon, *Astron. Astrophys.* **349**, 126-134 (1999).
10. A. S. Miroshnichenko, *Astrophys. J.* **667**, 497-504 (2007). <https://doi.org/10.1086/520798>
11. A. S. Miroshnichenko et al., *Galaxies* **11**, 36 (2023). <https://doi.org/10.3390/galaxies11010036>
12. J. N. Chkhikvadze, V. O. Kakhanian, E. B. Djaniashvili, *Astrophysics* **45**, 8-14 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1015386323943>
13. B. Kučerová, D. Korčáková, J. Polster, M. Wolf, V. Votruba, J. Kubát, P. Škoda, M. Šlechta and M. Křížek, *Astron. Astrophys.* **554**, A143 (2013). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201117437>
14. S. L. Grant et al., *Astrophys. J.* **926**, 229 (2022). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac450a>

15. G. Contarini, R. Gratton, in *Proceedings of the ESO Conference on Progress in Telescope and Instrumentation Technologies*, Garching 1992, p. 737.
16. R. G. Tull, Phillip J. MacQueen, Christopher Sneden, and David L. Lambert, *Publ. Astron. Soc. Pac.* **107**, 251-264 (1995). <https://doi.org/10.1086/133548>
17. N. Manset, J.F. Donati, in *Polarimetry in Astronomy*, SPIE **4843**, 425-436 (2003). <https://doi.org/10.1117/12.458230>
18. A. S. Miroshnichenko et al., *Galaxies* **11**, 8 (2023). <https://doi.org/10.3390/galaxies11010008>
19. S. Wang et al., in *SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation*, SPIE **4841**, 1145-1156 (2003). <https://doi.org/10.1117/12.461447>
20. S. Sriram et al., in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*, SPIE **10702**, 2007-2021 (2018). <https://doi.org/10.1117/12.2313165>
21. G. Raskin et al., *Astron. Astrophys.* **526**, A69 (2011). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201015435>
22. J. Arnaud, N. Meunier, and M. Aurière, *European Astronomical Society Publications Series* **9**, 105 (2003). <https://doi.org/10.1051/eas:2003091>
23. C. S. Kochanek et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.* **129**, 104502 (2017). <https://doi.org/10.1088/1538-3873/aa80d9>
24. K. Hart et al., [arXiv:2304.03791](https://arxiv.org/abs/2304.03791) [astro-ph.IM] (2023). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.03791>
25. W. Herbst, V. S. Shevchenko, *Astron. J.* **118**, 1043 (1999). <https://doi.org/10.1086/300966>
26. A. A. Henden, *J. Am. Assoc. Var. Star Obs.* **47**, 130 (2019).
27. J. Alfonso-Garzón et al., *Astron. Astrophys.* **548**, A79 (2012). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220095>
28. R. M. Cutri et al., *VizieR Online Data Catalog* **2328**, II/328 (2021).
29. D. Ishihara et al., *Astron. Astrophys.* **514**, A1 (2010). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913811>
30. M. P. Egan, S. D. Price, K. E. Kraemer, *Astron. Soc. Pac. Meet. Abstr.* **203**, 57.08 (2003).
31. G. Neugebauer et al., *Astrophys. J.* **278**, L1-L6 (1984); *Research supported by the Science and Engineering Research Council and NASA* **278**, L1-L6 (1984) <https://doi.org/10.1086/184259>
32. G. Marton et al., *Astron. Astrophys.* **688**, A203 (2024). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202450032>
33. Y. Andrillat, C. Jaschek, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **136**, 59-63 (1999).
34. W. Schmutz et al., *Astrophys. J.* **372**, 664-682 (1991). <https://doi.org/10.1086/170009>
35. F. J. K. Zickgraf, *Astron. Astrophys.* **408**, 257-285 (2003). <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030999>
36. M. Fukugita et al., *Astronomical Journal* **111**, 1748 (1996). <https://doi.org/10.1086/117915>
37. L. Breiman, *Machine Learning* **45**, 5-32 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
38. R. J. Hyndman, *Moving Averages* In book: *International Encyclopedia of Statistical Science* Springer (2011). https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_380
39. J. D. Monnier et al., *Astrophys. J.* **647**, 444 (2006). <https://doi.org/10.1086/505340>
40. C. A. L. Bailer-Jones et al., *Astron. J.* **161**, 147 (2021). <https://doi.org/10.3847/1538-3881/abd806>
41. G. H. Herbig, *Astrophys. J.* **407**, 142-156 (1993). <https://doi.org/10.1086/172481>
42. J. Kos and T. Zwitter, *Astrophys. J.* **774**, 72 (2013). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/72>
43. G. M. Green et al., *Astrophys. J.* **887**, 93 (2019). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab5962>
44. F. Castelli and R. L. Kurucz, *arXiv* (astro-ph/0405087) (2004). <https://doi.org/10.48550/arXiv.astro-ph/0405087>

История статьи:

Поступила – 20.05.2025
Принята – 10.06.2025

Информация об авторах:

- Акниязова Айгерим Жанатовна** (автор-корреспондент) – соискатель PhD, старший преподаватель кафедры электроники и астрофизики КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы Казахстан. e-mail: aigerimakniyazova@gmail.com
- Мирошниченко Анатолий Сергеевич** – директор обсерватории Three College и планетария UNCG, профессор факультет физики и астрономии Университета Северной Каролины в Гринсборо, г. Гринсборо США. e-mail: a_mirosh@uncg.edu
- Жанабаев Зейнулла Жанабаевич** – д.ф.-м.н., профессор кафедры электроники и астрофизики КазНУ им. аль-Фараби, г. Алматы Казахстан. e-mail: zhanabayev.zeynulla@gmail.com

Article history:

Received 20 May 2025
Accepted 10 June 2025

Information about authors:

- Aigerim Akniyazova** (corresponding author) – PhD student, senior lecturer, ¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. e-mail: aigerimakniyazova@gmail.com
- Anatoly Miroshnichenko** – Dr., Prof., Director of the Three College Observatory and UNCG Planetarium, Professor, Department of Physics and Astronomy, University of North Carolina at Greensboro, Greensboro, USA. e-mail: a_mirosh@uncg.edu
- Zeinulla Zhanabaev** – Dr., Prof. of the Department of Electronics and Astrophysics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. e-mail: zhanabayev.zeynulla@gmail.com