

УТВЕРЖДАЮ

Директор САО РАН

Г.Г. Валявин

«22» июня 2026 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук

Диссертация «Исследование звезд предельных светимостей на промежуточных стадиях эволюции: от наблюдательной статистики к радиационно-гидродинамическим моделям ветра», представляемая на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия выполнена в лаборатории физики звезд Федерального государственного бюджетного учреждения науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН).

В период подготовки диссертации соискатель Костенков Александр Евгеньевич работал в САО РАН в должности младшего научного сотрудника лаборатории физики звезд.

В 2016 г. окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ) по специальности 03.05.01 «Астрономия» и ему присвоена квалификация «Астроном. Преподаватель». В 2021 году соискатель окончил аспирантуру СПбГУ по направлению подготовки «Астрономия» и ему присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь», в 2023 году был прикреплен для сдачи кандидатских экзаменов в Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Карачаево-Черкесский государственный университет имени У.Д. Алиева».

Справка об обучении с результатами сдачи кандидатских экзаменов выдана в 2026 г. в САО РАН.

Научный руководитель — Винокуров Александр Сергеевич работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук в должностях старшего научного сотрудника лаборатории физики звезд и заведующего лабораторией физики звезд.

По итогам обсуждения принято следующее заключение.

Диссертационная работа Костенкова Александра Евгеньевича посвящена исследованию звезд предельных светимостей на промежуточных стадиях эволюции.

Актуальность исследования определяется ключевой ролью массивных звезд в исследовании межзвездной среды и галактик. Особый интерес представляют краткосрочные промежуточные стадии эволюции массивных звезд, для которых характерны высокий темп оттока вещества в виде ветра и эруптивные выбросы значительной части массы. Одним из примеров объектов, находящихся в подобной переходной фазе эволюционного пути, являются яркие голубые переменные (luminous blue variables, LBVs), однако, физическая природа их наблюдательных проявлений на сегодняшний день не установлена. Неразрешенным остается и фундаментальный вопрос о том, является ли фаза LBV переходной стадией от горения водорода

к горению гелия в одиночной массивной звезде, заключительным этапом эволюции перед вспышкой сверхновой или продуктом взаимодействия в тесных двойных системах. Исследование возможных эволюционных сценариев упирается в сложность надежного определения параметров звезд с мощным ветром, где условия далеки от локального термодинамического равновесия, а плотный отток вещества формирует псевдо-фотосферу, искажающую спектральные линии. Несмотря на значительный прогресс в моделировании звездных ветров, полноценные самосогласованные гидродинамические не-ЛТР модели, учитывающие баланс радиальных сил в ветре и рассчитанные непосредственно для LBVs, отсутствуют, что ограничивает определение ряда параметров подобных звезд. Существенным дополнением к методам спектрального моделирования выступает анализ звездного окружения, который позволяет углубить понимание возможных механизмов образования массивных звезд, а возраст объекта, полученный из сопоставления результатов не-ЛТР моделирования с эволюционными треками, может служить важным ограничением при интерпретации локального звёздного окружения. Таким образом, комбинирование данных методов для исследования LBVs представляет собой актуальную задачу, направленную на выяснение природы этих объектов и уточнение эволюционного пути наиболее массивных звезд.

В рамках диссертационной работы получен ряд ключевых **результатов**.

Выполнено исследование пространственного распределения LBV и различных LBV-кандидатов (cLBV) относительно центров ближайших OB-ассоциаций в галактике M33. Поиск групп голубых звезд проводился при помощи алгоритмов DBSCAN и OPTICS с параметрами, подобранными в ходе Монте-Карло моделирования. Распределение расстояний до ближайшей OB-ассоциации для полной выборки LBV/cLBV оказалось близко к распределениям для наиболее массивных голубых звезд, красных сверхгигантов и звезд Вольфа-Райе (WR), что согласуется с представлением о LBV как промежуточной стадии эволюции массивных одиночных звезд.

При помощи не-ЛТР моделирования оптического и инфракрасного спектров получены оценки основных параметров ветра LBV-кандидата MN112. Модель указывает на наличие у звезды протяженной фотосферы, формируемой плотным ветром с пологим скоростным профилем. Химический состав ветра MN112 близок к составу её прототипа — звезды Р Лебеда, но характеризуется несколько большим содержанием гелия относительно водорода. Рассчитана сетка не-ЛТР моделей протяженных атмосфер в широком диапазоне температур, на основе которой построены диаграммы эквивалентных ширин характеристических линий, позволяющие проводить массовые оценки температуры и темпа потери массы для LBV и схожих объектов. Показано хорошее согласие полученных оценок с результатами детального моделирования.

Построена самосогласованная гидродинамическая не-ЛТР модель протяженной атмосферы LBV Var 2, учитывающая баланс радиальных сил в ветре. Полученные параметры соответствуют звезде с начальной массой около 50 масс Солнца, движущейся на диаграмме Герцшпрунга-Рассела от более низких температур в направлении WR-звезд. Профиль скорости ветра оказался близок к характеру ускорения ветров OB-сверхгигантов при меньшей терминальной скорости, а соотношение момента ветра и светимости соответствует значениям, найденным для звезд Вольфа-Райе азотной последовательности. Статистический анализ окружения Var 2 свидетельствует о её вероятном формировании в локальной малонаселенной группе.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем. В рамках представленного исследования впервые проведено статистическое исследование проекционного

распределения LBVs/cLBVs и ряда других подтипов массивных объектов относительно компактных групп ярких голубых звезд. Выполнено не-ЛТР моделирование оптического и инфракрасного спектров галактического LBV-кандидата MN112, на основе которого определены его фундаментальные параметры и эволюционный статус. Создана специализированная сетка не-ЛТР моделей протяженных атмосфер, охватывающая характерный для LBVs диапазон температур и светимостей и предназначенная для определения параметров ярких голубых переменных и других объектов с плотными ветрами. Принципиально новым результатом является то, что наблюдаемый спектр LBV был воспроизведен в рамках самосогласованной гидродинамической не-ЛТР модели, учитывающей баланс радиальных сил в ветре.

Научная и практическая значимость диссертационной работы определяется комплексным характером проведенных исследований и возможностью применения разработанных методик к широкому кругу задач. Выполненное статистическое исследование положения ярчайших звезд в галактике M33 углубило понимание происхождения подобных объектов и их эволюции, а предложенная методика анализа проекционного распределения массивных звезд, основанная на классическом машинном обучении, может быть расширена на другие объекты и галактики. Полученный скоростной профиль ветра галактического LBV-кандидата MN112 служит основой для моделирования протяженных атмосфер подобных звезд и уточнения гидродинамических моделей звездного ветра, предсказывающих его динамику. Рассчитанные сетки не-ЛТР моделей протяженных атмосфер предоставляют быстрый и удобный инструмент для определения параметров объектов, демонстрирующих признаки мощного истечения вещества. Разработанный метод расчета гидродинамических не-ЛТР моделей ветров применим для исследования широкого класса звезд с ветрами, а продвинутые модели протяженных атмосфер, учитывающие баланс радиальных сил в ветре, позволяют получать надежные оценки параметров звезды и ее ветра, что критически важно для совершенствования эволюционных расчетов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современного и широко апробированного в астрофизическом сообществе кода CMFGEN для не-ЛТР моделирования протяженных атмосфер звезд и ветра. Надежность результатов подтверждается высоким качеством использованных наблюдательных данных, полученных на телескопах обсерваторий САО РАН (Россия), Калар-Альто (Испания) и Апачи-Пойнт (США), а также хорошим согласием рассчитанных модельных спектров с наблюдениями в широком диапазоне длин волн и соответствием полученных параметров звезд результатам независимых исследований других авторов. Статистическая обоснованность выводов по анализу пространственного распределения подкрепляется использованием хорошо зарекомендовавших себя в различных областях науки алгоритмов кластеризации DBSCAN и OPTICS, параметры которых подбирались в ходе Монте-Карло моделирования с учетом различной плотности фонового окружения. Дополнительным свидетельством обоснованности работы служит успешное представление ее основных положений на профильных всероссийских и международных научных конференциях, а также публикация результатов в рецензируемых научных журналах.

Личный вклад Костенкова А.Е. в представленную работу является определяющим и включает концепцию исследований, разработку и программную реализацию ключевых методов, расчет моделей ветра при помощи кода CMFGEN, а также подготовку публикаций. Автором

были подготовлены и реализованы методика отбора ярких голубых звезд, алгоритм моделирования звездных полей, построение функций распределения различных массивных звезд по расстояниям до ближайшей ОВ-ассоциации, графическое программное обеспечение для работы с моделями CMFGEN, скрипты для аппроксимации фотометрических данных и построения сеток моделей, а также итеративный алгоритм расчета самосогласованных радиационно-гидродинамических не-ЛТР моделей ветра.

Все результаты, выносимые на защиту, аргументированы и подробно изложены в четырех статьях соискателя, опубликованных в рецензируемых журналах списка ВАК. Представленные результаты и выводы обсуждались на восьми международных и всероссийских конференциях.

По докладу Костенкова А.Е. на Ученом совете CAO РАН были заданы вопросы, на которые докладчик исчерпывающе ответил.

При обсуждении Валявин Г.Г. отметил прекрасный доклад и хорошее представление результатов работы. Романюк И.И. высказал мнение, что работа выполнена на высоком профессиональном уровне, получены результаты мирового уровня. Сотникова Ю.В. обратила внимание на необходимость включить в личный вклад в представленную работу Александра Евгеньевича участие в наблюдениях и обработку данных. Винокуров А.С. отметил, что работа в основном выполнена Костенковым А.Е. самостоятельно и соискатель является уже состоявшимся исследователем. Он также высказал мнение, что проделанная работа очень важна.

Ученый совет пришел к заключению, что представляемая диссертация является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой. Выполненная работа удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, паспорту научной специальности, а соискатель заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Исследование звезд предельных светимостей на промежуточных стадиях эволюции: от наблюдательной статистики к радиационно-гидродинамическим моделям ветра» Костенкова Александра Евгеньевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.1 Физика космоса, астрономия.

Заключение принято на заседании Ученого совета CAO РАН 19 июня 2026 года.

Присутствовало на заседании 12 чел.

Результаты голосования: "за" – единогласно, протокол №446 от 19 июня 2026 г.

Председатель Ученого совета,
директор CAO РАН,
доктор физ.-мат. наук

Ученый секретарь CAO РАН,
кандидат физ.-мат. наук



/Валявин Г.Г./

/Кайсина Е.И./