ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ

на диссертацию Костенкова Александра Евгеньевича
«Исследование звёзд предельных светимостей на промежуточных стадиях эволюции: от наблюдательной статистики к радиационно-гидродинамическим моделям ветра»

Диссертационная работа А. Е. Костенкова посвящена актуальной проблеме эволюции массивных звёзд с высокими светимостями, близкими к пределу Эддингтона, проходящих краткосрочные промежуточные стадии эволюции, для которых характерны высокий темп оттока вещества в виде ветра и эруптивные выбросы значительной части массы. Массивные звёзды играют ключевую роль в эволюции межзвёздной среды и галактик в целом, а особый интерес представляют их краткосрочные ($\sim 10^4 - 10^5$ лет) переходные фазы, такие как яркие голубые переменные (luminous blue variables, LBVs), в значительной степени определяющие дальнейшую эволюцию таких объектов.

Несмотря на значительный прогресс в исследовании физики массивных звёзд последних десятилетий, ещё многие вопросы остаются без ответов. Главными препятствиями по-прежнему являются малочисленность таких объектов и их короткое время жизни, а также сложное влияние множества физических процессов на последующий эволюционный путь. В рамках классического сценария эволюции массивных звёзд стадия LBV соответствует переходу от горения водорода к горению гелия в ядре, сопровождаемому интенсивным оттоком массы и эпизодическими эруптивными выбросами вещества, которые приводят к потере внешних водородных слоёв. При этом некоторые данные указывают, что LBV могут являться непосредственными предшественниками сверхновым типа IIn. Таким образом, в зависимости от начальной массы, темпа потери вещества и скорости вращения LBV могут как эволюционировать в звёзды Вольфа-Райе, так и вспыхнуть в виде сверхновой. Наличие LBV-фазы перед переходом к стадии Вольфа-Райе объясняет низкие наблюдаемые массы последних, которые должны были быть значительно выше в рамках стандартной теории звёздных ветров.

Альтернативный взгляд на LBV предполагает, что данные объекты являются продуктом эволюции тесных двойных систем с обменом массы. Одним из доводов в пользу данного сценария эволюции является значимая изолированность LBV и LBV-кандидатов относительно O-звёзд в сравнении с другими типами массивных звёзд.

Цель работы заключается в исследовании LBVs и LBV-кандидатов при помощи статистического анализа их звёздного окружения и определения звёздных параметров в ходе не-ЛТР моделирования ветров. Комбинирование данных подходов при изучении наиболее массивных звёзд даст основу для ответа на вопросы о природе многих наблюдаемых особенностей ярких голубых переменных и подобных им объектов.

Задачи диссертационного исследования включали:

1. Отбор голубых звёзд в поле галактики M33 с заданным порогом по начальной массе, потенциальных эволюционных предшественников LBVs, и создание оптимального алгоритма поиска компактных групп таких голубых звёзд в окрестностях LBVs.
2. Построение функций распределения проекционных расстояний массивных звёзд различных подтипов (голубые звёзды Главной последовательности, красные сверхгиганты, LBV/cLBV, звёзды Вольфа-Райе) относительно центров найденных звёздных групп и проведение их сравнительного анализа.

3. Определение фундаментальных параметров LBV с использованием не-ЛТР моделей протяженных атмосфер при аналитическом задании распределения скорости в ветре.
4. Расчет сетки моделей протяженных атмосфер, позволяющих делать быстрые оценки параметров ветра для LBV-звёзд и некоторых других объектов с плотными ветрами.

Все перечисленные задачи были успешно решены.

Диссертация А. Е. Костенкова состоит из введения, четырех глав и заключения. Во введении кратко изложены исторические и современные представления об эволюции массивных звёзд, более детально охарактеризованы промежуточные стадии эволюции, рассмотрены основные гипотезы, объясняющие природу ярких голубых переменных.

В первой главе представлено исследование пространственного распределения LBV и LBV-кандидатов относительно центров ближайших молодых звёздных групп в галактике M33. Подробно описана методика поиска компактных групп ярких голубых звёзд. На основе сравнительного анализа распределений расстояний массивных звёзд разных типов до ближайшей звёздных групп показано, что пространственное положение подтвержденных LBV в данной галактике вполне укладываются в сценарии вылета из скоплений одиночных массивных звёзд, тогда как существенно большая удаленность так называемых Fe II звёзд (один из подтипов LBV-кандидатов) делает предпочтительным канал формирования этих объектов в двойных системах.

Во второй главе содержатся результаты детального не-ЛТР моделирования оптического и ИК спектров Галактического LBV-кандидата MN112. Проведен подбор оптимального закона ускорения ветра и распределения неоднородностей плотности вещества ветра с расстоянием, получены оценки основных параметров звезды и ее ветра, в том числе его химического состава. На основе сопоставления параметров MN112 с результатами моделирования близким по наблюдаемым свойствам сверхгигантом P Cygni, прототип класса «спящих» LBV, сделаны выводы о различиях в структурах атмосфер этих звёзд.

В третьей главе представлены сетки моделей протяженных атмосфер LBV-подобных звёзд в относительно широком диапазоне температур и построенные на их основе диаграммы эквивалентных ширин эмиссионных линий. Обсуждается ряд критериев, позволяющих оценить температуру и темп потери массы в различных объектах, имеющих признаки мощного истечения вещества.

В четвертой главе представлен разработанный алгоритм решения уравнения движения ветра с учетом основных радиальных сил. Применение этого алгоритма для моделирования полученного на БТА/SCORPIO спектра «спящей» яркой голубой переменной Var 2 в галактике M33 позволило получить надежные оценки не только «стандартного» набора параметров, но и массы звезды, что позволило наложить жесткие ограничения на ее эволюционный статус.

В заключении кратко сформулированы основные выводы диссертации.

Отзыв о диссертационной работе А. Е. Костенкова безусловно положительный. Применение уже зарекомендовавших себя методов в комбинации с разработкой новых подходов и глубокое понимание физики процессов, в частности переноса излучения в атмосферах звёзд, позволили получить новые надежные данные о редких и сложных в изучении типах массивных звёзд, прежде всего LBV, опубликованные в ведущих российских и зарубежных

изданиях. Высокая степень самостоятельности в проведении исследований и выборе оптимального инструментария, продемонстрированная соискателем в процессе работы, явно указывает, что перед нами полностью сложившийся специалист высокого уровня.

Я считаю, что работа Костенкова А Е. «Исследование звёзд предельных светимостей на промежуточных стадиях эволюции: от наблюдательной статистики к радиационно-гидродинамическим моделям ветра» полностью удовлетворяет требованиям ВАК к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. наук, а соискатель заслуживает присуждения ему искомой степени по специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия».

21 сентября 2026 г.

Научный руководитель,
кандидат физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник САО РАН А. С. Винокуров

Подпись А. С. Винокурова заверяю,
учёный секретарь САО РАН,
кандидат физ.-мат. наук Е. И. Кайсина