

ОГРАНИЧЕНИЕ НА РАДИУС ЗВЕЗДЫ, АККРЕЦИРУЮЩЕЙ ИЗ ДИСКА

© 2026 Н. Г. Бескровная^{1, 2*}, Н. Р. Ихсанов^{1, 3}, М. А. Погодин¹¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук, Санкт-Петербург, 196140 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук, Нижний Архыз, 369167 Россия³Институт прикладной астрономии Российской академии наук, Санкт-Петербург, 191187 Россия

Поступила в редакцию 23 декабря 2025 года; после доработки 9 июня 2026 года; принята к публикации 16 июня 2026 года

Обсуждается возможность независимой оценки радиуса молодой массивной звезды, аккрецирующей из диска, на основе анализа профилей эмиссионных линий в спектре ее оптического излучения. В качестве примера мы взяли первичный компонент системы HD 53367 — массивную молодую Ве-звезду. Спектральные характеристики ее оптического излучения указывают на присутствие в непосредственной окрестности кеplerовского аккреционного диска, скорость вращения газа на внутреннем радиусе которого достигает величины 700 км с^{-1} . Полагая, что эта скорость не превосходит кеplerовскую, можно оценить внутренний радиус диска снизу, а значит — радиус самой звезды сверху. Предложенная методика наиболее оптимальна для оценки максимально возможного радиуса массивных молодых звезд, у которых ось вращения аккреционного диска перпендикулярна направлению на наблюдателя.

Ключевые слова: аккреционные диски — магнитные поля — звезды: звезда до главной последовательности — звезды: отдельные: HD 53367

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение физических и эволюционных параметров молодых звезд является одной из ключевых и крайне непростых задач астрофизики. В условиях неполного набора наблюдательных данных предлагаемые решения зачастую оказываются неоднозначными. Провести независимую проверку и повысить уровень достоверности того или иного решения позволяет комплексный подход, основанный на одновременном использовании нескольких независимых методов оценки параметров как самого объекта, так и его ближайшего окружения. Расширение спектра возможных методик в этом случае компенсирует текущий недостаток наблюдательной информации, позволяя получить новые ограничения на возможные величины параметров объекта и наметить дальнейшую стратегию его наблюдательного исследования. В данной работе на примере первичного компонента молодой системы HD 53367 мы представляем один из методов оценки верхнего предела на величину магнитного поля и собственного радиуса звезды, аккрецирующей из диска.

В основе метода, обсуждаемого нами в настоящей статье, лежит простая идея: радиус аккрецирующей из диска звезды (R_*) и радиус ее магнитосферы (r_m) не превосходят внутренний радиус самого диска (r_d). Несмотря на простоту, соотношение $R_* \leq r_m \leq r_d$ может оказаться полезным для независимой оценки параметров молодых звезд, в окрестностях которых наблюдения выявляют признаки аккреционного диска. Такая ситуация реализуется, в частности, в отношении первичного компонента системы HD 53367, представляющего собой молодую массивную Ве-звезду. Информацию об этом объекте, представленную в литературе к настоящему времени, мы кратко приводим в разделе 2. Проанализировав накопленные данные, Zarrilli et al. (2022) пришли к выводу о присутствии в непосредственной окрестности звезды аккреционного и/или истекающего диска. Дополняя их аргументы результатами, представленными в работе Pogodin et al. (2006), в разделе 3 мы отмечаем, что характеристики наблюдаемой газовой оболочки у HD 53367 более всего соответствуют проявлениям кеplerовского аккреционного диска, скорость движения газа на внутреннем радиусе которого до-

*E-mail: beskrovnaya@yahoo.com

стигает 700 км с^{-1} . В совокупности с приведенной в литературе оценкой массы звезды это позволяет нам оценить внутренний радиус диска и, соответственно, определить верхний предел на величину радиуса звезды. В разделе 4 мы обсуждаем этот результат и на его основе оцениваем магнитное поле звезды и ограничиваем возраст исследуемого объекта. Предложенная методика может обеспечить независимую оценку основных параметров (радиуса, магнитного поля и возраста) массивных молодых звезд, аккрецирующих из кеplerовского диска. Основные выводы исследования обсуждаются в разделе 5 и кратко сформулированы в разделе 6.

2. ПАРАМЕТРЫ HD 53367

Объект HD 53367 (известный также как MWC 166, HIP 34116 и V 750 Mon) был изначально включен в список Be-звезд Херbiga из-за значительного избытка интенсивности излучения в инфракрасной и микроволновой областях спектра. Дальнейшие исследования позволили разрешить этот источник как визуально-двойную систему, компоненты которой, HD 53367 A (B0 IV/Ve) и HD 53367 B (B1 Ve), в картинной плоскости разнесены на угол $\Delta\rho \simeq 0''.6$ (Fabricius et al., 2002). Система удалена на расстояние $d \simeq 990 \pm 50$ пк (Siebenmorgen et al., 2018), следовательно, ее размер составляет не менее 600 а.е., и входящие в ее состав компоненты, по-видимому, физически не связаны.

HD 53367 A доминирует в этом объекте и представляет собой спектрально-двойную систему (параметры приведены в таблице 1). Ее спектральные особенности обусловлены прежде всего более массивным компонентом — молодой звездой HD 53367 Aa спектрального класса B0e, которая характеризуется относительно медленным осевым вращением ($P \approx 5^{\text{д}}5$, что соответствует линейной скорости на экваторе примерно 40 км с^{-1}) и наличием в ее непосредственной окрестности развитой дискообразной оболочки (Pogodin et al., 2006). Масса и радиус этой звезды, $M_a \simeq 12.2 \pm 2.2 M_\odot$ и $R_a \simeq 4.2\text{--}4.3 R_\odot$, были оценены в работе Zarrilli et al. (2022) путем моделирования параметров двойной системы.

Анализируя эмиссионные линии He I и Br γ , Zarrilli et al. (2022) пришли к выводу, что оболочка, окружающая основной компонент системы, HD 53367 Aa, по своим проявлениям ближе всего к кеplerовскому диску. Несколько раньше такой же вывод сделали Pogodin et al. (2006), изучив параметры и эволюцию эмиссионных линий H α и H β , наблюдавшихся в период с 1994 по 2004 г. Авторы отмечали, что характерный двухпиковый профиль

этих линий (см., например, рис. 2 в статье Pogodin et al., 2006) более всего соответствует проявлениям диска, наблюдаемого под значительным углом к его оси вращения (то есть почти в ребро). Наибольшая интенсивность излучения в линиях отмечалась в 1994–1995 гг., когда их профиль включал в себя широкие крылья со скоростями, достигающими значения $v_{\text{max}} \simeq \pm 700 \text{ км с}^{-1}$. По мере сужения профиля линий, сопровождаемого исчезновением высокоскоростных крыльев, интегральная интенсивность излучения в них снижалась. Данная картина согласуется с представлениями о диске: сокращение его высокоскоростной части сопровождается уменьшением общей площади. Симметричный характер изменений профиля в синей и красной частях линий свидетельствует в пользу интерпретации их высокоскоростных крыльев в рамках эффекта Доплера, что дает возможность определить скорость на внутренней части диска.

Таким образом, анализ опубликованных к настоящему времени спектральных наблюдений HD 53367 Aa позволяет заключить, что этот объект представляет собой относительно медленно вращающуюся молодую Be-звезду, окруженную кеplerовским диском. В следующем разделе мы примем этот вывод за рабочую гипотезу и, опираясь на параметры объекта из таблицы 1, приведем аргументы в пользу аккреционной природы диска вокруг HD 53367 Aa. Это открывает возможность выполнить независимую оценку параметров исследуемого объекта, которую мы приводим в разделе 4.

3. АККРЕЦИОННЫЙ ДИСК В HD 53367 Aa

Вывод о присутствии в окрестности HD 53367 Aa кеplerовского диска, сделанный в работе Zarrilli et al. (2022), допускает два возможных сценария: аккреционного и истекающего диска. Сценарий аккреционного диска предпочтительнее, если HD 53367 Aa — молодая звезда, находящаяся на заключительной фазе своего формирования. Сценарий истекающего диска более соответствует ситуации, когда исследуемый объект по своему эволюционному статусу ближе к классической Be-звезде. В этом разделе мы обращаем внимание, что комплексный анализ данных, представленных в работах Pogodin et al. (2006) и Zarrilli et al. (2022), свидетельствует в пользу аккреционной природы диска.

Приняв эту гипотезу за основу, можно сделать выводы относительно локализации диска, его ориентации в пространстве и параметров наиболее массивного компонента системы. Стоит отметить, что скорость v_{max} , полученная из анализа крыльев эмиссионных линий, лишь незначительно уступает

Таблица 1. Параметры спектрально-двойной системы^a

Параметр	HD 53367 Aa	HD 53367 Ab
Расстояние, пк	990 ± 50	
Орбитальный период, сутки	367.7	
Эксцентриситет	0.498 ± 0.001	
Большая полуось, а.е.	2.61 ± 0.04	
Угол наклона, градусы	53–55	
Возраст системы, лет	(7 ± 2) × 10 ⁵	
Масса, $M_{\odot}$	$M_a \simeq 12.2 \pm 2.2$	$M_b \simeq 4.9 \pm 0.5$
Радиус, $R_{\odot}$	$R_a \simeq 4.2\text{--}4.3$	$R_b \simeq 2.5\text{--}8$
Температура, К	$T_a \simeq 28\,200 \pm 200$	$T_b \simeq 9000\text{--}17\,000$
Скорость вращения, км с ⁻¹	40 / sin i	—
Период вращения, сутки	$P \leq 5.6$	—

^a см. Zarrilli et al. (2022) и приведенную там литературу.

по величине кеплеровской скорости на поверхности компонента HD 53367 Aa:

$$v_k(R_a) \simeq 730 \text{ км с}^{-1} \times \left(\frac{M_a}{12 M_{\odot}} \right)^{1/2} \left(\frac{R_a}{4.3 R_{\odot}} \right)^{-1/2}, \quad (1)$$

где масса и радиус звезды нормированы на их средние значения, приведенные в таблице.

Согласно этой оценке, внутренний радиус диска, на котором кеплеровская скорость движения вещества достигает 700 км с⁻¹, слегка превосходит собственный радиус звезды. Важно, что диск в этом объекте виден почти с ребра: угол между осью вращения диска и направлением на наблюдателя близок к прямому. В противном случае скорость газа на внутреннем радиусе диска оказалась бы выше кеплеровской скорости на поверхности звезды, $v_k(R_a)$, что очевидно является абсурдным.

Гипотеза о декреционной природе диска в HD 53367 Aa, обсуждавшаяся в работе Zarrilli et al. (2022) наряду с аккреционной моделью, встречается с серьезными трудностями при попытке объяснить широкие крылья эмиссионных линий, достигающие скоростей порядка 700 км с⁻¹. В рамках этой гипотезы диск возникает вследствие значительного углового момента, с которым газ истекает из атмосферы быстро вращающейся звезды. Формированию декреционного диска может способствовать также присутствие у звезды сильного крупномасштабного магнитного поля, облегчающего передачу углового момента от звезды к истекающему газу.

Первое из приведенных выше условий в случае HD 53367 Aa не реализуется, так как звезда

вращается относительно медленно. Азимутальная скорость газа в области ее фотосферы (порядка 40 км с⁻¹) почти в 20 раз меньше кеплеровской (Pogodin et al., 2006). В такой ситуации формирование кеплеровского декреционного диска оказывается возможным лишь на расстоянии порядка радиуса коротации

$$r_{\text{cor}} = \left(\frac{GM_*}{\omega_s^2} \right)^{1/3} \simeq 7 R_a \left(\frac{M_a}{12 M_{\odot}} \right)^{1/3} \left(\frac{P_a}{5.6 \text{ сут}} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

на котором азимутальная скорость движения газа в магнитосфере звезды, $v_{\phi}(r) = \omega_s r$, вращающейся твердотельно с угловой скоростью вращения самой звезды, ω_s , достигает величины кеплеровской скорости. При этом кеплеровская скорость на радиусе r_{cor} не превосходит 300 км с⁻¹. Высокие скорости, наблюдаемые в крыльях эмиссионных линий H α и H β , в условиях магнитосферы, твердотельно вращающейся со звездой, достигаются лишь на расстоянии $r \simeq 5.4 \times 10^{12} \text{ см} \simeq 18 R_a$. Для реализации такого сценария необходимо, чтобы магнитное поле звезды контролировало истекающие потоки газа вплоть до этого расстояния. Однако подобная ситуация представляется маловероятной, поскольку требуемая величина магнитного поля составила бы не менее нескольких килогаусс, что до сих пор не получило наблюдательного подтверждения (Bagnulo et al., 2015).

Таким образом, сценарий аккреционного кеплеровского диска, окружающего массивный компонент системы HD 53367 Aa, позволяет наиболее просто объяснить параметры наблюдаемых эмиссионных линий без привлечения предположений,

противоречащих имеющимся данным. В следующем разделе мы покажем, что этот сценарий открывает возможность для независимой оценки размера звезды и величины ее магнитного поля.

4. ОГРАНИЧЕНИЯ НА РАДИУС И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ HD 53367 Aa

В этом разделе мы рассматриваем сценарий, согласно которому широкие крылья эмиссионных линий H α и H β формируются в кеплеровском аккреционном диске, окружающем массивный компонент системы, HD 53367 Aa. В рамках этого сценария внутренний радиус диска ограничен условием $R_a < r_{\text{in}} \leq r_0$, где

$$r_0 = \frac{GM_*}{v_{\text{max}}^2} \simeq 4.7 R_\odot \left(\frac{M_a}{12 M_\odot} \right) \left(\frac{v_{\text{max}}}{700 \text{ км с}^{-1}} \right)^{-2}. \quad (3)$$

График зависимости $r_0 = r_0(M_a)$ приведен на рис. 1.

Сравнивая значение r_0 , вычисленное по формуле (3), с результатами моделирования параметров системы на разных этапах ее эволюции Zarrilli et al. (2022, таблица 5), мы заключаем, что возраст исследуемой системы с наибольшей вероятностью не превышает миллиона лет. В противном случае ожидаемый радиус звезды оказался бы больше полученного нами верхнего предела r_0 . Тем самым независимо подтверждается оценка возраста этого объекта, имеющаяся в литературе в настоящее время.

Незначительное превышение внутреннего радиуса диска над средним значением радиуса звезды (Zarrilli et al., 2022) указывает на отсутствие у нее развитой магнитосферы, а значит, и сильного магнитного поля. Используя выражение для нижнего предела на радиус магнитосферы звезды, аккрецирующей из диска с темпом $\dot{M}$, приведенное в работах Beskrovnaya and Ikhsanov (2024) и Ikhsanov and Beskrovnaya (2025),

$$r_N \simeq 0.94 \lambda_0 \left(\frac{c m_p}{e} \right)^{2/11} \frac{\mu^{6/11}}{\dot{M}^{4/11} (GM_*)^{1/11}}, \quad (4)$$

находим, что магнитное поле на внутреннем радиусе диска ограничено неравенством $B(r_0) < B_0$, где

$$B_0 \simeq 260 \text{ Гс} \times \lambda_0^{-11/6} \left(\frac{\dot{M}}{10^{-9} M_\odot \text{ год}^{-1}} \right)^{2/3} \times \left(\frac{M_a}{12 M_\odot} \right)^{1/6} \left(\frac{r_0}{4.7 R_\odot} \right)^{11/6} \left(\frac{R_a}{4.3 R_\odot} \right)^{-3}.$$

Здесь c — скорость света, m_p — масса протона, e — электрический заряд электрона, $\mu = (1/2) B_* R_*^3$ — дипольный магнитный момент

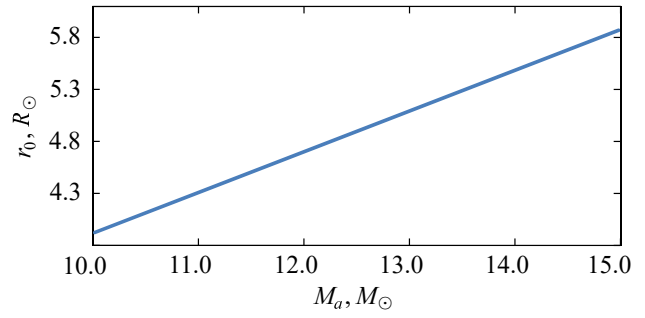


Рис. 1. График зависимости $r_0 = r_0(M_a)$ для $v_{\text{max}} = 700 \text{ км с}^{-1}$.

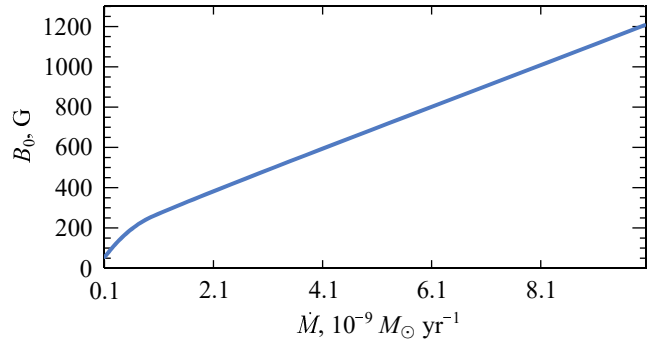


Рис. 2. Зависимость предельного значения величины магнитного поля звезды от темпа аккреции.

звезды радиуса R_* с напряженностью магнитного поля B_* на ее поверхности, и λ_0 — безразмерная характеристика порядка единицы, учитывающий отклонение параметров аккреционного диска от параметров стандартного вязкого α -диска (Shakura and Sunyaev, 1973). Зависимость предельного значения величины магнитного поля звезды от темпа дисковой аккреции приведена на рис. 2. Согласно этому графику, в рамках рассмотренного сценария напряженность магнитного поля на поверхности звезды HD 53367 Aa для наиболее реалистичных значений параметров не превышает нескольких сотен Гаусс.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотренный нами метод позволяет оценить максимально возможные значения радиуса и магнитного поля звезды, аккрецирующей из кеплеровского диска. Достоверность этих оценок зависит от величины погрешностей в определении массы звезды, угла наклона диска к лучу зрения и реализуемого темпа аккреции. Поэтому изложенную методику стоит рассматривать прежде всего как дополнительный инструмент для независимой проверки реалистичности решений, полученных другими методами. С наибольшей эффективностью она может быть использована в отношении звезд, обнаруживающих признаки аккреции

из кеплеровского диска. К объектам такого рода относятся в первую очередь источники с благоприятной ориентацией (когда диск наблюдается почти с ребра), которые входят в состав взаимодействующих двойных систем, допускающих независимую оценку масс их компонентов. С другой стороны, независимая оценка радиуса одиночной звезды в совокупности со спектральными характеристиками ее фотосферы позволяет ограничить массу и, соответственно, возраст исследуемого объекта. Таким образом, метод служит дополнительным инструментом для определения параметров, прежде всего молодых звезд непосредственно перед или в начале их эволюции на главной последовательности.

Звезда HD 53367 Aa демонстрирует сложную и разнообразную фотометрическую и спектральную переменность, описанную в работе Pogodin et al. (2006). В нашей статье мы ограничились анализом эпохи, в течение которой скорости, измеренные в крыльях эмиссионных линий, достигали своих максимальных значений. Вероятный сценарий переменности этой звезды мы рассмотрим в одной из последующих статей. Но факт возможной переменности объекта, безусловно, следует учитывать при использовании предложенной нами методики. Этот аспект несколько ограничивает область ее применения в отношении малоизученных источников, по которым отсутствуют данные о переменности на временном масштабе хотя бы нескольких лет. Следовательно, регулярный мониторинг молодых звездных объектов с признаками аккреции из диска остается актуальным: он дает информацию для независимой проверки предложенных моделей этих источников.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа спектральных наблюдений объекта HD 53367 Aa, представленные в работах Pogodin et al. (2006) и Zarrilli et al. (2022), позволяют заключить, что это молодая пекулярная B0e-звезда с массой $M_a \simeq 12.2 \pm 2.2 M_\odot$ и радиусом $R_a \simeq 4.2\text{--}4.3 R_\odot$, отличающаяся относительно медленным осевым вращением (линейная скорость на экваторе около 40 км с^{-1}) и аккрецирующая газ на свою поверхность из кеплеровского диска, наблюдаемого почти с ребра. Широкие крылья, эпизодически появляющиеся у эмиссионных линий H α и H β , дают возможность оценить скорость газа на внутреннем радиусе диска как 700 км с^{-1} . Опираясь на это значение, с помощью выражений (3) и (5) мы определяем верхний допустимый предел на радиус звезды, r_0 , и величину магнитного поля на ее поверхности, B_0 . При этом учитываем условие:

ни радиус магнитосферы, ни собственный радиус звезды не могут превосходить внутренний радиус окружающего ее аккреционного диска. Полученное нами ограничение на радиус звезды соответствует значению, найденному ранее в работе Zarrilli et al. (2022), и, согласно представленной ими модели эволюции системы, указывает, что возраст исследуемого объекта не превосходит миллиона лет. Предложенный нами метод оценки радиуса HD 53367 Aa может быть использован для независимой оценки параметров молодых звезд средней и большой массы, находящихся на стадии аккреции из кеплеровского диска с благоприятной ориентацией к лучу зрения (наблюдаемого почти с ребра).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета учреждений. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Bagnulo, L. Fossati, J. D. Landstreet, and C. Izzo, *Astron. and Astrophys.* **583**, id. A115 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201526497
2. N. G. Beskrovnaya and N. R. Ikhsanov, *Astrophysical Bulletin* **79** (1), 104 (2024). DOI:10.1134/S1990341323600254
3. C. Fabricius, E. Høg, V. V. Makarov, et al., *Astron. and Astrophys.* **384**, 180 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20011822
4. N. R. Ikhsanov and N. G. Beskrovnaya, *Publications of the Pulkovo Observatory* **237**, 51 (2025). DOI:10.31725/0367-7966-2025-237-51-57
5. M. A. Pogodin, V. P. Malanushenko, O. V. Kozlova, et al., *Astron. and Astrophys.* **452** (2), 551 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20053704
6. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev, *Astron. and Astrophys.* **24**, 337 (1973).
7. R. Siebenmorgen, P. Scicluna, and J. Krelowski, *Astron. and Astrophys.* **620**, id. A32 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833546
8. S. A. Zarrilli, S. Kraus, A. Kreplin, et al., *Astron. and Astrophys.* **665**, id. A146 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202243957

Constraint on the Radius of a Star Accreting from a Disk

N. G. Beskrovnaya^{1,2}, N. R. Ikhsanov^{1,3}, and M. A. Pogodin¹

¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 196140 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

³Institute of Applied Astronomy, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 191187 Russia

We discuss the possibility of independently estimating the radius of a young massive star accreting from a disk based on an analysis of emission line profiles in its optical spectrum. As an example, we consider the primary component of the HD 53367 system—a massive young Herbig Be star. The spectral characteristics of its optical emission indicate the presence of a Keplerian accretion disk in its immediate vicinity, with the gas rotational velocity at the inner boundary reaching 700 km s^{-1} . Assuming that this velocity does not exceed the Keplerian value, we get the lower estimate of the inner radius of the disk, and consequently, an upper limit on the radius of the star itself. This approach turns out to be the most efficient for estimating the maximum possible radius of young massive stars whose accretion disk spin axes are perpendicular to the line of sight.

Keywords: *accretion disks, magnetic fields, stars: young stars, stars: individual: HD 53367*