

УДК 524.333:52-14

ОРБИТАЛЬНЫЕ И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СПЕКТРАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЦЕФЕИД V496 AQL, V1344 AQL, V1334 CYG И AW PER

© 2026 А. С. Расторгуев^{1, 2*} , М. В. Заболотских² , Н. А. Горыня^{2, 3} ¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия²Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия³Институт астрономии Российской академии наук, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 2 декабря 2025 года; после доработки 10 января 2026 года; принята к публикации 12 января 2026 года

Представлены результаты комплексного исследования четырех спектрально-двойных цефеид с большими орбитальными периодами, базирующегося на использовании всей доступной фотометрической, спектроскопической и астрометрической информации и разработанных ранее методиках анализа. В основе лежит новый каталог, содержащий 702 измерения лучевых скоростей: V496 Aql (232 измерения), V1344 Aql (194 измерения), V1334 Cyg (138 измерений), AW Per (138 измерений). Они проведены в 1997–2021 гг. на телескопе Цейсс-1000 Симеизской обсерватории Института астрономии РАН (ИНАСАН) с помощью корреляционного спектрографа-измерителя лучевых скоростей (ИЛС) конструкции А. А. Токовина. С привлечением других опубликованных рядов наблюдений существенно уточнены орбитальные периоды (V496 Aql: $P_{\text{orb}} \approx 1351^{\text{d}3} \pm 0^{\text{d}7}$; V1344 Aql: $P_{\text{orb}} \approx 6358^{\text{d}} \pm 30^{\text{d}}$; V1344 Cyg: $P_{\text{orb}} \approx 1934^{\text{d}4} \pm 0^{\text{d}8}$; AW Per: $P_{\text{orb}} \approx 13663^{\text{d}} \pm 128^{\text{d}}$) и другие параметры орбит. По функции масс получены дополнительные ограничения на массы спутников и ориентацию плоскости относительной орбиты. Для V496 Aql и V1344 Aql определен полный набор астрофизических параметров, включающий избытки цвета, пульсационные оценки радиусов, светимости и эволюционные оценки массы (V496 Aql: $M \sim 5.6\text{--}5.8 M_{\odot}$; V1344 Aql: $M \sim 5.8\text{--}6.0 M_{\odot}$). Для цефеиды V1334 Cyg с массивным спутником и большим значением функции масс найдено жесткое ограничение на угол наклона плоскости ее орбиты: $i \sim 56^{\circ}\text{--}60^{\circ}$. Пульсационный радиус и светимость цефеиды AW Per, обладающей орбитальным периодом более 37 лет и высоким значением функции масс, неплохо согласуются с эволюционной оценкой ее массы $M \sim 5.6\text{--}5.9 M_{\odot}$. Показано, что при $i \leq 63^{\circ}\text{--}65^{\circ}$ спутник может быть только тесной двойной системой, состоящей из двух горячих звезд вблизи точки поворота от главной последовательности (ГП).

Ключевые слова: *звезды: двойные — звезды: переменные: цефеиды — звезды: отдельные: V496 Aql, V1344 Aql, V1334 Cyg, AW Per — звезды: эволюция — звезды: фундаментальные параметры*

1. ВВЕДЕНИЕ

Статья продолжает цикл исследований спектрально-двойных цефеид Северного неба с использованием лучевых скоростей, измеренных в ходе многолетнего мониторинга, проводившегося в ГАИШ МГУ и ИНАСАН в 1987–2021 гг. на различных телескопах с помощью корреляционного спектрографа-измерителя лучевых скоростей (ИЛС) конструкции А. А. Токовина (Tokovinin, 1987). Ряды измерений, охватывающие более чем 30-летний интервал времени, позволяют эффек-

тивно исследовать цефеиды с большими орбитальными периодами. В данной работе на основе ранее не публиковавшихся измерений лучевых скоростей, выполненных в 1997–2021 гг. в рамках этой программы, изучаются четыре цефеиды: V496 Aql, V1344 Aql, V1334 Cyg и AW Per. Основная задача заключается в уточнении параметров орбит двойных систем и выделении вкладов в лучевые скорости орбитального движения по эллиптической относительной орбите и пульсаций фотосферы. Далее, благодаря использованию пульсационных лучевых скоростей и кривых блеска и цвета, открывается возможность дополнительно оценить пульсационный радиус цефеиды, а по величине

*E-mail: Alex.Rastorguev@gmail.com, RastorguevAS@my.msu.ru

функции масс наложить ограничения на отношение масс компонентов и ориентацию плоскости орбиты относительно картинной плоскости (Rastorguev et al., 2024a; 2025). При наличии измерений эффективной температуры удастся независимо оценить избыток цвета и уточнить светимость цефеиды (Rastorguev et al., 2022). При этом байесовские оценки расстояний (Bailer-Jones et al., 2021), рассчитанные на основе прецизионной астрометрии миссии Gaia (Prusti et al., 2016; Brown et al., 2018, 2021; Vallenari et al., 2023), в ряде случаев могут быть использованы для взаимного согласования набора астрофизических параметров цефеид. Таким образом, спектрально-двойные цефеиды являются природной лабораторией комплексного изучения физических свойств спектрально-двойных звезд.

Для определения орбитальных параметров и декомпозиции вкладов орбитального движения и пульсаций для четырех цефеид, изучавшихся в настоящей работе, мы использовали ранее опубликованные нами каталоги лучевых скоростей цефеид Северного неба (Гогупа et al., 1992; 1996; 1998), результаты более поздних наших измерений, представленные в данной работе, а также наблюдения других авторов.

2. V496 AQL

2.1. Наблюдательные данные

История наблюдений этой довольно яркой ($V \sim 7^m.5 - 8^m.0$) цефеиды весьма интересна. Фотометрическая переменность звезды HD 178287 (BD—07 4861, Gaia DR3 4204653587029046400) с периодом около $P_{\text{pls}} \approx 6^d.807$ была открыта Oosterhoff (1943), который отнес ее к типу классических цефеид. Первые немногочисленные измерения ее лучевых скоростей выполнены Stibbs (1955) и Lloyd Evans (1980). Gieren (1981a; b) заподозрил двойственность V496 Aql и ряда других цефеид по изменению средней лучевой скорости. Уверенный вывод о спектральной двойственности V496 Aql сделали Barnes et al. (1988) путем сравнения нескольких рядов наблюдений, включая собственный. По результатам наблюдений цефеид в ближнем УФ-диапазоне, проведенным на обсерватории IUE в диапазоне 200–320 нм, Evans (1992a) заподозрила наличие у цефеиды спутника спектрального класса позднее A4 V. Groenewegen (2008), на основе имеющихся измерений лучевой скорости, оценил орбитальный период двойной системы и амплитуду изменения орбитальной скорости в предположении круговой орбиты: $P_{\text{orb}} \approx 1331^d \pm 6^d.5$, $K \sim 3 \text{ км с}^{-1}$. Короткий плотный ряд из 19 измерений лучевых скоростей в период JD 2454235–2454281 был

получен Storm et al. (2011) для определения светимости цефеиды по пульсационному радиусу. Groenewegen (2013), дополнив уже имеющиеся наблюдения коротким плотным рядом из 20 собственных измерений, выполненных в период JD 2454304–2454633, дал новую оценку орбитального периода и амплитуды орбитальной скорости (также в предположении круговой орбиты): $P_{\text{orb}} \approx 1066^d.2 \pm 1^d.9$ и $K \approx 3.63 \pm 0.18 \text{ км с}^{-1}$. Довольно большой ряд из 34 высокоточных кросс-корреляционных измерений, охватывающих период JD 2456213–2457198, был выполнен Borgniet et al. (2019). По всем опубликованным к тому времени данным наблюдений авторы нашли полное решение для параметров орбиты: $P_{\text{orb}} \approx 1351^d.5 \pm 5^d.8$, $e \approx 0.45 \pm 0.04$, $K \approx 9.50 \pm 0.46 \text{ км с}^{-1}$.

Наш мониторинг лучевой скорости V496 Aql на телескопе Цейсс-1000 Симеизской обсерватории ИНАСАН проводился в период с 14 июня 1997 г. по 30 сентября 2021 г. (JD 2450614–2459488). За это время было получено 232 однородных измерения лучевой скорости с характерной точностью порядка 0.3–0.5 км с⁻¹. Из них только 11 измерений вошли в каталог лучевых скоростей (Гогупа et al., 1998). Основываясь на приведенном выше кратком обзоре исследований, с уверенностью можно утверждать, что новое уточнение параметров орбиты цефеиды V496 Aql, опирающееся на многократно больший объем данных, охватывающих более 24 лет мониторинга, представляется актуальным. Отметим, что Hoscé et al. (2024) использовали наши неопубликованные наблюдения для предварительного выделения и детального изучения формы пульсационной кривой лучевых скоростей. Мы считаем необходимым опубликовать полный каталог лучевых скоростей, привести все рассчитанные нами параметры орбиты, включая значения функции масс $f(M)$ и большой полуоси орбиты $a_1 \sin i$ (см. таблицу 1), а также дополнительно оценить некоторые астрофизические параметры цефеиды.

Для определения параметров орбиты и декомпозиции лучевой скорости на вклады орбитального движения и пульсаций были использованы наиболее точные и однородные данные, полученные начиная с 1997 г. (см. таблицу 2 и ссылки в ней). В итоге в нашем распоряжении имеется 24-летний ряд данных, насчитывающий 305 высокоточных измерений лучевой скорости и охватывающий более 1300 циклов пульсаций.

Необходимые для оценки пульсационного радиуса и других астрофизических параметров цефеиды фотометрические наблюдения в полосах B , V в интервале дат JD 2449521–2452383, пересекающихся с датами измерений лучевой скорости, были взяты из работ Berdnikov and Vozyakova (1995), Berdnikov and Turner (1995, 2001, 2004),

Таблица 1. Параметры орбиты V496 Aql. Характеристики качества решения RMS и MAD — среднеквадратическое отклонение и медианное абсолютное отклонение от общего решения соответственно. Пульсационные фазы отсчитываются от фотометрической эпохи $t_0 = 2450005^{\text{d}}60$

Параметр	Значение
P_{pls} , сут.	6.80705
$T_0 - 2400000$, сут.	$54\,846.57 \pm 3.31$
P_{orb} , сут.	1351.33 ± 0.67
e	0.414 ± 0.006
Ω , рад.	5.26 ± 0.02
K , км с ⁻¹	8.82 ± 0.07
V_γ , км с ⁻¹	7.76 ± 0.04
$f(M)$, M_\odot	0.073 ± 0.002
$a_1 \sin i$, а.е.	0.998 ± 0.009
RMS, км с ⁻¹	0.66
MAD, км с ⁻¹	0.45

Таблица 2. Выборка данных для определения параметров орбиты V496 Aql и декомпозиции лучевых скоростей. N — количество измерений

Observation period, JD	N	Reference
2450614–2459488	232	Gogunya et al. (1998) и данная работа
2454235–2454281	19	Storm et al. (2011)
2454304–2454633	20	Groenewegen (2013)
2456213–2457198	34	Borgniet et al. (2019)

Berdnikov et al. (1998), Ignatova and Vozyakova (2000). Квазиодновременность измерений блеска и лучевых скоростей, как было отмечено Sachkov et al. (1998), позволяет избежать значительных систематических ошибок определения радиусов. Общее число измерений блеска и цвета составило 128. Кроме того, использованы фотометрические измерения в полосах BP и RP миссии Gaia DR3, представленные в каталоге I/355/erphot (службы каталогов Vizier CDS). Список содержит 26 измерений блеска, из которых использованы 23 измерения RP и $(BP - RP)$, вследствие наличия очевидных больших ошибок некоторых измерений блеска в полосе RP этой яркой цефеиды.

Спектроскопические мультифазные измерения T_{eff} , необходимые для оценки избытка цвета $E(B - V)$, среднего радиуса, абсолютной величины и расстояния цефеиды методом моделирования кривой блеска и изменений T_{eff} (Rastorguev et al.,

2022), были взяты из работ Luck (2018) (два измерения) и da Silva et al. (2023) (восемь измерений).

2.2. Параметры орбиты V496 Aql

Орбита двойной системы описывается в рамках движения компонентов вокруг общего центра масс по относительным эллиптическим орбитам. Пульсационный вклад в лучевые скорости представлялся тригонометрическим полиномом вида

$$V_{\text{pls}}(i) = \sum_{k=1}^K \left[A_k \sin \left(2\pi k \frac{t_i - t_0}{P_{\text{pls}}} \right) + B_k \cos \left(2\pi k \frac{t_i - t_0}{P_{\text{pls}}} \right) \right], \quad (1)$$

где K — порядок полинома ($K = 4$ для V496 Aql), A_k, B_k — амплитуды гармоник, P_{pls} — период пульсаций, t_i — время наблюдений, $t_0 = 2450005^{\text{d}}60$ — эпоха максимума блеска.

Предварительный анализ показал, что на всем интервале дат, охватывающем около 1315 циклов пульсаций, изменения блеска и лучевых скоростей хорошо описываются единым значением пульсационного периода $P_{\text{pls}} = 6^{\text{d}}80705$. При определении параметров орбиты по всей совокупности данных в ряд измерений Storm et al. (2011) была внесена систематическая поправка: $\Delta V_R = -0.50$ км с⁻¹.

2.3. Астрофизические параметры V496 Aql

Для вычисления среднего радиуса и его изменений использованы пульсационные скорости, кривые блеска и цвета V , $(B - V)$. Изменения радиуса (рис. 1с) вычислялись путем интегрирования пульсационной кривой лучевых скоростей с использованием проекционного фактора PF , переводящего лучевую скорость в скорость пульсаций фотосферы: $\dot{R} = -PF V_{\text{pls}}$. Вопрос о величине проекционного фактора имеет долгую и противоречивую историю, но до сих пор отсутствуют достаточно убедительные данные о его возможной зависимости от каких-либо физических параметров звезд. По этой причине оценки радиусов неизбежно могут различаться на 3–4% из-за различия значений PF , используемых в разных работах (см. обсуждение проблемы в нашей работе Rastorguev et al., 2024b). В данной работе вычисления проведены для значений $PF = 1.24, 1.28$. В пределах ошибок вычисленные параметры близки (см., в частности, приведенные в соответствующих столбцах таблицы 3), поэтому для оценки масс цефеид мы далее используем значения, рассчитанные с $PF = 1.28$.

В основе применяемого метода лежит оценка значения избытка цвета $E(B - V)$, обеспечивающая наилучшее согласие измеренных и вычисленных эффективных температур с использованием цветовой калибровки T_{eff} , взятой из работы

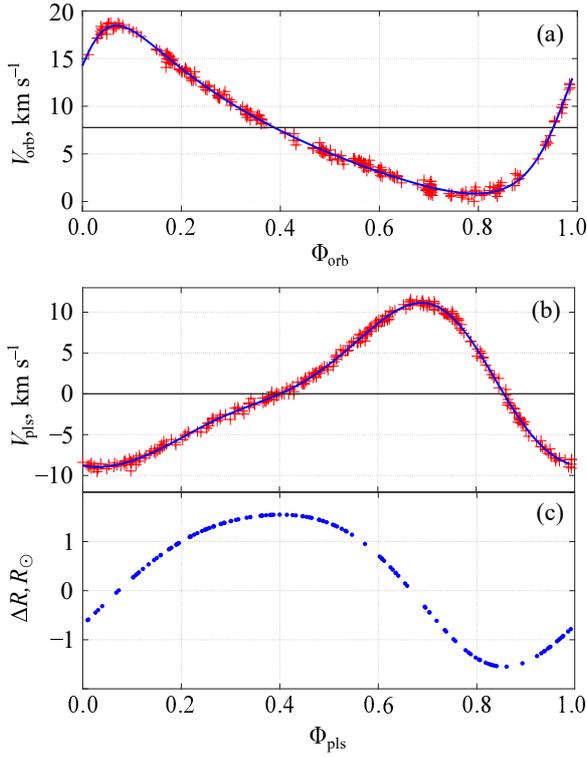


Рис. 1. Панель (а): орбитальная кривая лучевых скоростей V496 Aql. Панель (б): пульсационная кривая лучевых скоростей. Сплошные синие линии: точное решение для кеплеровской орбиты и разложение пульсационного вклада в тригонометрический полином (1) соответственно. Невязки решения, как это обычно делается, поровну поделены между вкладами орбитальной и пульсационной скорости (красные кресты). Черная горизонтальная линия на панели (а) — скорость центра масс системы. Панель (с): пульсационные изменения радиуса, рассчитанные путем интегрирования пульсационной кривой с учетом проекционного фактора $PF = 1.28$. Пульсационные фазы отсчитываются от фотометрической эпохи $t_0 = 2450005^{\text{d}}60$; изменения радиуса рассчитаны для моментов измерения блеска и цвета.

Rastorguev et al. (2022). Благодаря высокой чувствительности T_{eff} к нормальному цвету удается оценить избыток цвета с точностью около $0^{\text{m}}01$. Для V496 Aql получена оценка $E(B - V) \approx 0^{\text{m}}44$, прекрасно согласующаяся со средним значением $\langle E(B - V) \rangle \approx 0^{\text{m}}453 \pm 0^{\text{m}}020$ из семи оценок, приведенных в базе данных обсерватории DDO по классическим цефеидам¹⁾ (Fernie et al., 1995) и в точности совпадающая с оценкой, приведенной Turner (2016).

Результаты согласованного вычисления астрофизических параметров цефеиды V496 Aql приведены в таблице 3 и показаны на рис. 2. В расчетах принято $R_V = A_V/E(B - V) = 3.1$ для

¹⁾<https://www.astro.utoronto.ca/DDO/research/cepheids/cepheids.html>

Таблица 3. Астрофизические параметры цефеиды V496 Aql, определенные по данным B - и V -фотометрии для двух значений проекционного фактора PF

Параметр	Значение	
	$PF = 1.24$	$PF = 1.28$
$E(B - V)$, mag	0.44 ± 0.01	0.44 ± 0.01
$\langle R/R_{\odot} \rangle$	54.01 ± 3.24	55.75 ± 3.34
$\langle R/R_{\odot} \rangle_I$	55.43 ± 3.0	57.22 ± 3.0
D_{phe} , кпк	1.027 ± 0.050	1.059 ± 0.050
$(m - M)_0$, mag	10.057 ± 0.02	10.124 ± 0.02
$\langle B - V \rangle_0$, mag	0.72 ± 0.01	0.72 ± 0.01
$\langle V \rangle_I$, mag	7.77 ± 0.01	7.78 ± 0.01
$\langle M_V \rangle_I$, mag	-3.65 ± 0.05	-3.71 ± 0.05
$\langle M_{\text{bol}} \rangle_I$, mag	-3.76 ± 0.05	-3.82 ± 0.05
Масса, M_{\odot}	—	5.6–5.8

«стандартного» или среднего закона поглощения (Cardelli et al., 1989; Fitzpatrick and Massa, 2007; Fitzpatrick et al., 2019). Легко видеть, что наши оценки расстояния D , сделанные методом пульсирующих фотосфер и не использующие никакой дополнительной астрометрической информации, при выбранных значениях проекционного фактора $PF = 1.24, 1.28$ в пределах ошибок хорошо согласуются с байесовскими оценками расстояний: $r_{\text{geo}} \approx 1.025^{+0.038}_{-0.028}$ кпк и $r_{\text{pgeo}} \approx 1.013^{+0.038}_{-0.035}$ кпк (Bailer-Jones et al., 2021). Наши оценки среднего радиуса и абсолютной величины цефеиды V496 Aql заключены в пределах $\langle R \rangle \sim 54\text{--}56 R_{\odot}$ и $\langle M_V \rangle \approx -3^{\text{m}}65\text{--} - 3^{\text{m}}71$ соответственно. В работе Lazovik and Rastorguev (2020) приведены параметры около десяти современных зависимостей «период – светимость» и «период – радиус», полученных разными методами. Для цефеиды V496 Aql эти зависимости дают оценки радиуса и светимости в интервалах $\langle R \rangle \sim 49\text{--}56 R_{\odot}$ и $\langle M_V \rangle \sim -3^{\text{m}}52\text{--} - 3^{\text{m}}72$ соответственно, в прекрасном согласии с нашими оценками. Это доказывает хорошую применимость развиваемого нами подхода к уточнению светимостей цефеид, рассматриваемых в качестве надежных «стандартных свечей».

Для оценки массы цефеиды мы использовали эволюционные треки MESA (Dotter, 2016), рассчитанные для $M/M_{\odot} = 5.6$, $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$, $V_{\text{rot}}/V_{\text{crit}} = 0, 0.4$ и $M/M_{\odot} = 5.8$, $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.12$, $V_{\text{rot}} = 0$. Фрагменты треков и положение рассчитанной нами пульсационной петли V496 Aql (для значения проекционного фактора $PF = 1.28$) на диаграммах « $\lg T_{\text{eff}} - \lg(L_{\text{bol}}/L_{\odot})$ », « $\lg T_{\text{eff}} - \lg(R/R_{\odot})$ »

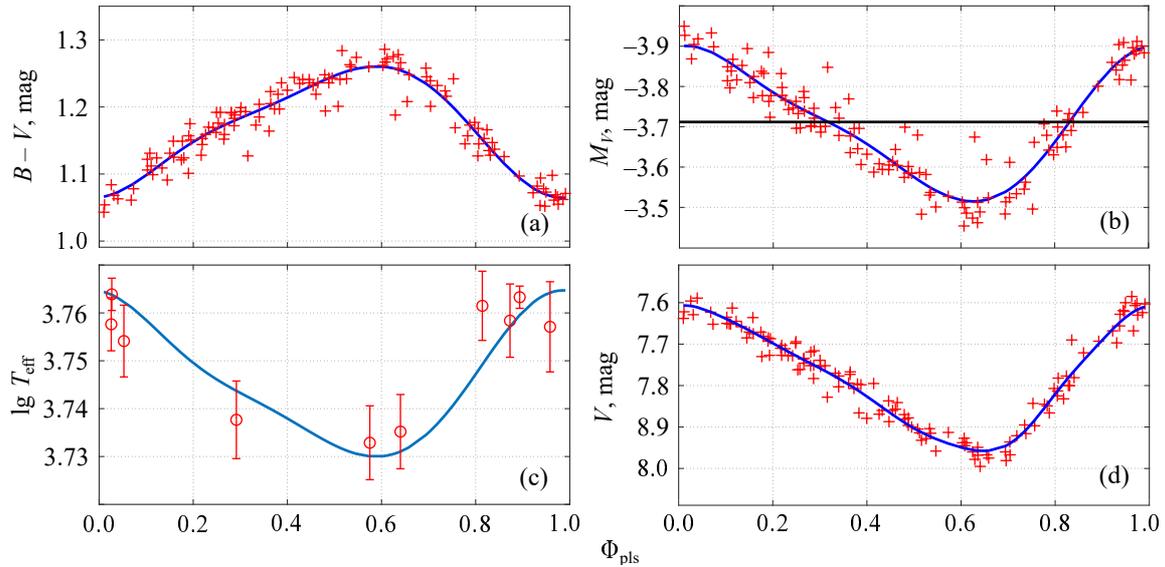


Рис. 2. Результаты моделирования изменений T_{eff} и кривой блеска цефеиды V496 Aql. Панель (a): кривая показателя цвета ($B - V$). Красные кресты — наблюдения; сплошная синяя линия — сглаживание с помощью тригонометрического полинома 3-го порядка. Панель (b): абсолютные величины цефеиды, рассчитанные по текущим значениям пульсационного радиуса и T_{eff} с использованием цветовой калибровки болометрических поправок BC_V (Flower, 1996). Красные кресты — индивидуальные оценки для моментов наблюдений, сплошная синяя линия — оценки с интервалом по фазе $\Delta\Phi_{\text{pls}} = 0.01$. Сплошная черная линия — уровень средней по пульсационному циклу абсолютной величины $\langle M_V \rangle_I$. Панель (c): мультифазные измерения T_{eff} (красные кружки с интервалами ошибок); сплошная синяя линия — модельная кривая изменения T_{eff} , основанная на цветовой калибровке эффективной температуры (Rastorguev et al., 2022) для значения избытка цвета $E(B - V) = 0^{\text{m}}44$. Панель (d): кривая блеска в полосе V. Красные кресты — индивидуальные измерения блеска; сплошная синяя линия — основанная на оценке радиуса модель кривой блеска. В расчетах принято значение проекционного фактора $PF = 1.28$.

показаны на рис. 3. Положение центра петли, соответствующее средним значениям T_{eff} , L_{bol} , R , неплохо описывается треками для масс $M/M_{\odot} \sim 5.6-5.8$, причем нижняя граница массы, соответствующая металличности $[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0$, близка к $M/M_{\odot} \sim 5.6$. С учетом всех неопределенностей можно принять для V496 Aql эволюционную оценку массы $M/M_{\odot} \sim 5.6-5.8$. Цефеида предположительно находится на стадии 3-го пересечения полосы неустойчивости, что согласуется с обнаруженным Verdnikov et al. (1997) небольшим вековым увеличением пульсационного периода цефеиды; ее возраст составляет 80–90 млн лет.

Функции масс $f(M)$ определялась как

$$\begin{aligned} f(M) &= \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} \\ &= 1.03615 \times 10^{-7} (1 - e^2)^{3/2} K^3 P_{\text{orb}}, \end{aligned}$$

где массы цефеиды и спутника, M_1, M_2 соответственно, и функция масс $f(M)$ выражены в M_{\odot} , K — амплитуда орбитальной скорости главного компонента, P_{orb} — орбитальный период. Полученное значение, приведенное в таблице 1, было использовано для уточнения ограничений, налагаемых на M_2 и угол наклона орбиты.

Массу спутника можно оценить, исходя из верхнего ограничения (Evans, 1992a) на его спектральный класс (A4 V). Оценки масс и светимостей звезд ГП приводятся в базе данных Majaek (2022), где $M(\text{A4 V})/M_{\odot} \sim 1.93$, $M_V(\text{A4 V}) \sim +1^{\text{m}}94$. С учетом неопределенностей оценку максимальную массу спутника можно считать равной $2 M_{\odot}$. Попутно отметим, что вклад спутника в суммарный блеск системы не превышает 0.6% и им можно пренебречь. Связь массы главного компонента с массой спутника показана на диагностической диаграмме на рис. 4. Минимальная масса спутника $1.55 M_{\odot}$ соответствует максимальному углу наклона орбиты $i \sim 82^{\circ}-83^{\circ}$ (при больших значениях угла в системе наблюдались бы взаимные затмения), а максимальная масса — углу $i \sim 54^{\circ}-55^{\circ}$; при этом большая полуось относительной орбиты составила бы $A \approx 4.7 \pm 0.1$ a.e.

3. V1344 AQL

3.1. Наблюдательные данные

Фотометрическая переменность яркой малоамплитудной звезды HD 179315 (BD+04 4009, Gaia DR3 4293157229319068544) с периодом около $P_{\text{pls}} \approx 7^{\text{d}}48$ открыта Kovacs and Szabados

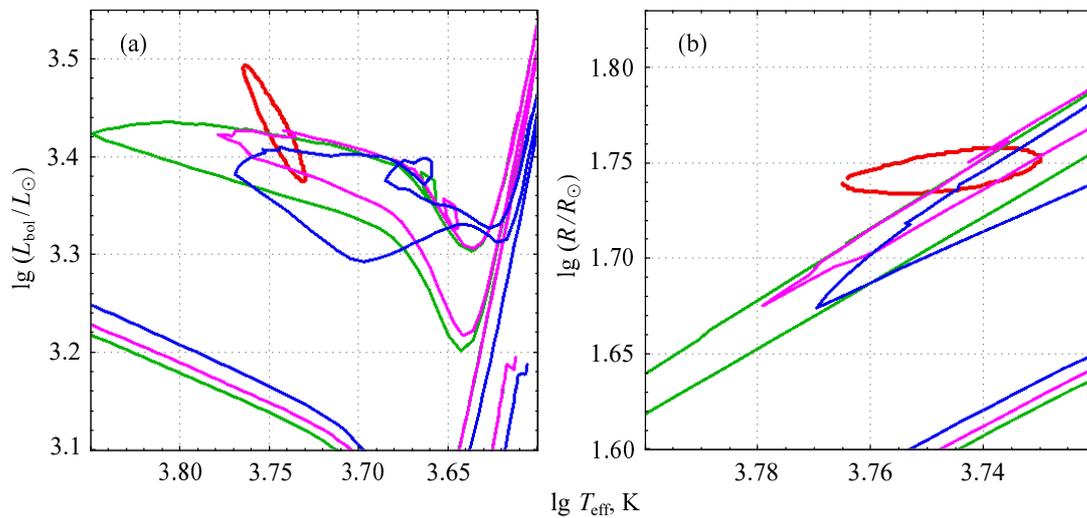


Рис. 3. Голубые цефеидные петли на диаграммах $\langle \lg T_{\text{eff}} - \lg(L_{\text{bol}}/L_{\odot}) \rangle$ (a) и $\langle \lg T_{\text{eff}} - \lg(R/R_{\odot}) \rangle$ (b) и рассчитанная нами пульсационная петля цефеиды V496 Aql (красные эллипсы). Зеленым и розовым цветом показаны эволюционные треки MESA для начальной массы $M/M_{\odot} = 5.6$, $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ (для $V_{\text{rot}}/V_{\text{crit}} = 0, 0.4$ соответственно). Синим цветом показан эволюционный трек для $M/M_{\odot} = 5.8$, $V_{\text{rot}} = 0$, $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.12$.

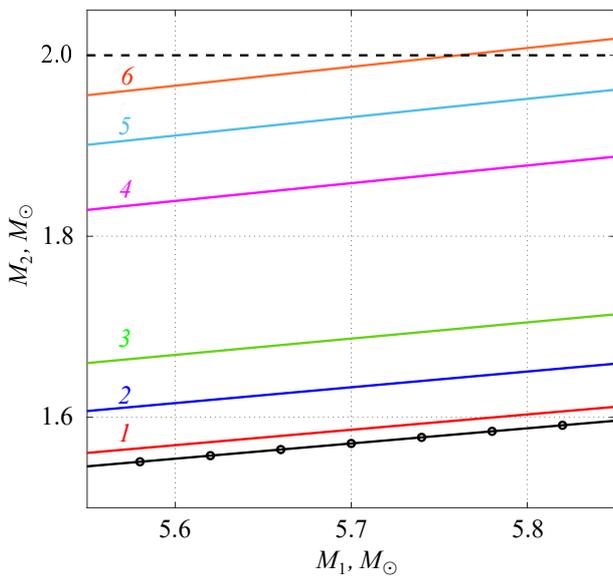


Рис. 4. Диагностическая диаграмма, показывающая связь масс главного компонента цефеиды V496 Aql M_1 и спутника M_2 для разных значений угла наклона орбиты к картинной плоскости. Верхняя черная штриховая линия ограничивает сверху массу спутника значением $M/M_{\odot} = 2.0$; нижняя сплошная черная линия с кружками — верхняя граница области взаимных затмений компонентов. Красная (1), синяя (2), зеленая (3), розовая (4), голубая (5), оранжевая (6) линии рассчитаны для углов наклона орбиты $i = 82^{\circ}, 75^{\circ}, 70^{\circ}, 60^{\circ}, 57^{\circ}, 55^{\circ}$ соответственно.

(1979). Первые измерения ее лучевых скоростей сделаны Valona (1981), однако в то время двойственность звезды обнаружена не была. По наблюдениям в УФ-диапазоне Evans (1992a)

указала верхнее ограничение на вклад спутника в излучение, соответствующее спектральному классу A1 V. Уверенный вывод о двойственности звезды сделали Szabados et al. (2014), обнаружившие изменения средней лучевой скорости цефеиды по новым измерениям. Тем не менее вскоре Evans et al. (2015a) выразили сомнение в двойственности цефеиды. V1344 Aql исследовалась на двойственность в ходе наблюдений с HST (Evans et al., 2016), но без определенного результата. Наконец, Cseh et al. (2023) на основе собственных, а также ранее опубликованных измерений лучевой скорости с использованием шаблонов пульсационной кривой лучевых скоростей по девяти эпохам оценок средней скорости оценили орбитальный период в $P_{\text{orb}} \approx 12\,649 \pm 42$ суток.

Мы проводили систематические измерения лучевых скоростей V1344 Aql в период с 11 июня 1998 г. по 30 сентября 2021 г. (JD 2450976–2459488). За это время получено 194 измерения с характерной точностью порядка $0.3\text{--}0.5 \text{ км с}^{-1}$, они впервые публикуются в данной работе.

В каталоге Bailer-Jones et al. (2021) имеются байесовские оценки расстояния V1344 Aql, рассчитанные на основании астрометрических данных Gaia DR3: $r_{\text{geo}} \approx 0.907^{+0.015}_{-0.014}$ кпк и $r_{\text{pgeo}} \approx 0.905^{+0.011}_{-0.013}$ кпк.

Для определения параметров орбиты и декомпозиции орбитального и пульсационного вкладов в лучевую скорость мы использовали однородные ряды наблюдений, полученных за 25 лет, начиная с 1997 г. Они представлены в таблице 4 и насчитывают 260 измерений лучевой скорости, охватывая более 1200 циклов пульсаций.

Таблица 4. Выборка данных для определения параметров орбиты V1344 Aql и декомпозиции лучевых скоростей. N — количество измерений

Observation period, JD	N	Reference
2450976–2459488	194	Данная работа
2456053–2456582	38	Szabados et al. (2014)
2456909–2460110	28	Cseh et al. (2023)

Фотометрические наблюдения в полосах B и V в интервале дат JD 2450305–2452383, частично пересекающихся с периодом измерений лучевой скорости, были взяты из работ Berdnikov and Turner (1995, 2001, 2004), Berdnikov and Vozyakova (1995), Ignatova and Vozyakova (2000). Изменения блеска и лучевых скоростей хорошо описываются значением пульсационного периода $P_{\text{pls}} \approx 7^{\text{d}}.47683$, что было также отмечено Cseh et al. (2023). В качестве фотометрической эпохи принят момент $t_0 = 2455869^{\text{d}}.20$, далее использованный во всех вычислениях.

3.2. Орбитальные и астрофизические параметры V1344 Aql

Найденные нами орбитальные параметры, рассчитанные по той же методике, что и для V496 Aql, приведены в таблице 5. Период оказался ровно вдвое меньше по сравнению с оценкой Cseh et al. (2023), которые не решали кеплеровскую задачу непосредственно, а использовали шаблон пульсационной скорости. Несомненно, однозначное и весьма точное решение мы получили только благодаря проведенному нами многолетнему мониторингу лучевых скоростей. Отметим также малые невязки решения (RMS и MAD), заметно меньшие 1 км с^{-1} . Декомпозиция на вклады орбитального движения и пульсаций показана на рис. 5.

Как и для цефеиды V496 Aql, мы использовали пульсационные лучевые скорости и результаты фотометрии в полосах B и V для оценки избытка цвета, пульсационного радиуса, светимости и фотометрического расстояния V1344 Aql. Пять спектроскопических оценок эффективной температуры были найдены в работах Luck (2018) и da Silva et al. (2023); в работе da Silva et al. (2023) также приведено значение металличности: $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.03$. Вычисления путем моделирования изменений T_{eff} (Rastorguev et al., 2022) проведены для значений проекционного фактора $PF = 1.24, 1.28$. Результаты вычислений представлены в таблице 6 и показаны на рис. 6. Исходя из приведенной Majaek (2022) оценки светимости звезды A1 V ($M_V \sim +1^{\text{m}}14$), можно

Таблица 5. Параметры орбиты V1344 Aql. Обозначения те же, что и в таблице 1. Пульсационные фазы отсчитываются от фотометрической эпохи $t_0 = 2455869^{\text{d}}.20$

Параметр	Значение
P_{pls} , сут.	7.47683
$T_0 - 2400000$, сут.	55016.77 ± 309.62
P_{orb} , сут.	6358.13 ± 30.12
e	0.042 ± 0.013
Ω , рад.	2.51 ± 0.30
K , км с $^{-1}$	5.11 ± 0.07
V_γ км с $^{-1}$	-0.96 ± 0.05
$f(M)$, M_\odot	0.088 ± 0.004
$a_1 \sin i$, a.e.	2.985 ± 0.043
RMS, км с $^{-1}$	0.67
MAD, км с $^{-1}$	0.37

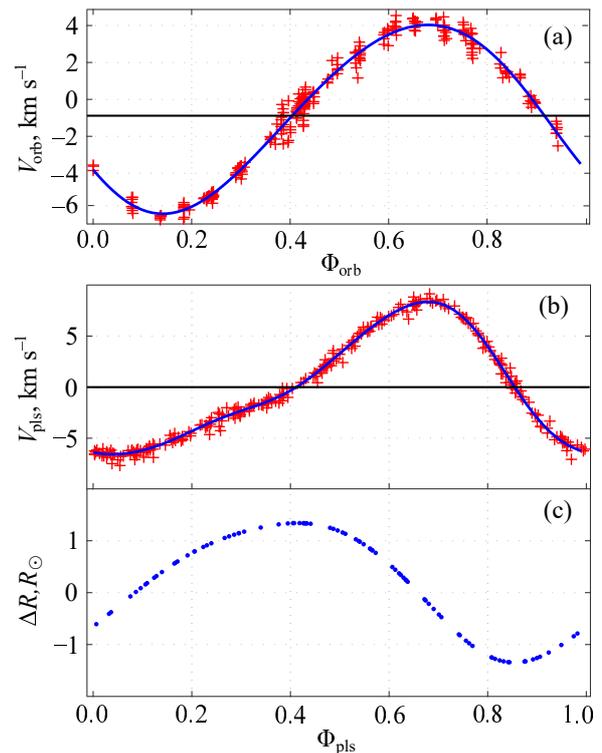


Рис. 5. Декомпозиция лучевых скоростей V1344 Aql на орбитальный и пульсационный вклады и изменение радиуса. Обозначения те же, что и на рис. 1. Вычисления проведены для $PF = 1.28$. Пульсационные фазы отсчитываются от фотометрической эпохи $t_0 = 2455869^{\text{d}}.20$.

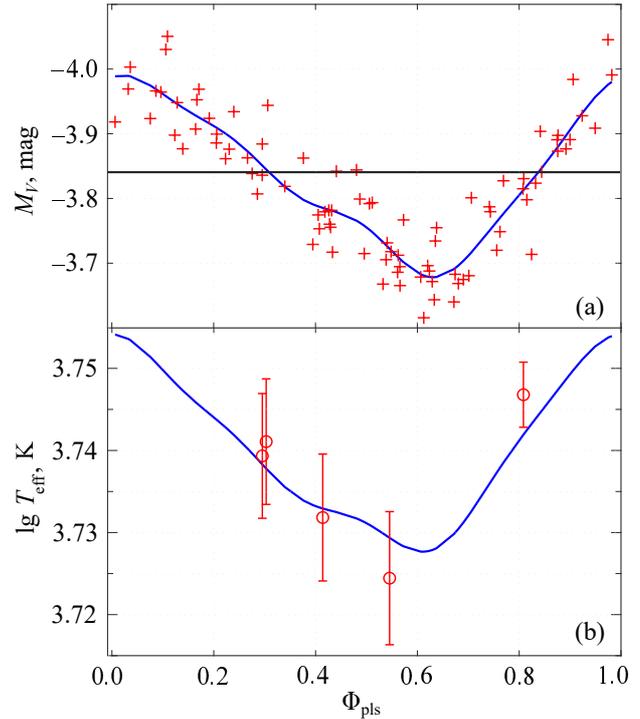
Таблица 6. Астрофизические параметры цефеиды V1344 Aql, определенные по данным B - и V -фотометрии

Параметр	Значение	
	$PF = 1.24$	$PF = 1.28$
$E(B - V)$, mag	0.59 ± 0.01	0.59 ± 0.01
$\langle R/R_{\odot} \rangle$	59.5 ± 4.6	61.4 ± 4.8
$\langle R/R_{\odot} \rangle_I$	60.7 ± 4.6	62.7 ± 4.0
D_{phe} , кпк	0.878 ± 0.050	0.906 ± 0.050
$(m - M)_0$, mag	9.717 ± 0.02	9.785 ± 0.02
$\langle B - V \rangle_0$, mag	0.77 ± 0.01	0.77 ± 0.01
$\langle V \rangle_I$, mag	7.77 ± 0.01	7.77 ± 0.01
$\langle M_V \rangle_I$, mag	-3.77 ± 0.05	-3.84 ± 0.05
$\langle M_{\text{bol}} \rangle_I$, mag	-3.90 ± 0.05	-3.97 ± 0.05
Масса M/M_{\odot}	—	5.8–6.0

утверждать, что вклад невидимого спутника в суммарный блеск системы не превышает 1% и не требует коррекции фотометрических данных. Из таблицы 6 также очевидно, что с байесовскими оценками расстояния Gaia DR3 лучше всего согласуется решение с $PF = 1.28$. Наша оценка избытка цвета $E(B - V) \approx 0^{\text{m}}59 \pm 0^{\text{m}}01$ находится в неплохом согласии со средним значением $\langle E(B - V) \rangle \approx 0^{\text{m}}626 \pm 0^{\text{m}}030$, приведенным в базе данных Fernie et al. (1995), а также с оценкой $E(B - V) \approx 0^{\text{m}}567$ (Turner, 2016).

На рис. 7 красным эллипсом показаны рассчитанные для значения проекционного фактора $PF = 1.28$ пульсационные петли V1344 Aql на диаграммах « $\lg T_{\text{eff}} - \lg(L_{\text{bol}}/L_{\odot})$ » и « $\lg T_{\text{eff}} - \lg(R/R_{\odot})$ » и эволюционные треки MESA, полученные для значений массы $M/M_{\odot} = 5.8, 6.0$, металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ и скоростей вращения $V_{\text{rot}}/V_{\text{crit}} = 0, 0.4$ соответственно. Вероятно, масса V1344 Aql заключена в пределах $M/M_{\odot} \sim 5.8\text{--}6.0$; цефеида находится на стадии 3-го или 2-го пересечения полосы неустойчивости (более определенный вывод о ее эволюционном статусе пока невозможен, ввиду отсутствия надежных данных об эволюционном изменении пульсационного периода). Возраст цефеиды составляет 70–80 млн лет.

На рис. 8 показана диагностическая диаграмма, построенная с использованием данных для V1344 Aql из таблиц 5 и 6. Верхний предел массы спутника — звезды A1 V — можно принять равным $M_2 \sim 2 M_{\odot}$ (Matajek, 2022). Минимальная масса спутника, соответствующая углу наклона орбиты к картинной плоскости $i \sim 85^{\circ}$, может


Рис. 6. Результаты моделирования изменений T_{eff} и светимости цефеиды V1344 Aql. Обозначения те же, что и на рис. 2. Избыток цвета $E(B - V) \approx 0^{\text{m}}59$; в расчетах принято значение $PF = 1.28$.

составлять $M/M_{\odot} \sim 1.70\text{--}1.75$, а интервал углов наклона ограничен снизу значением $i \sim 60^{\circ}\text{--}65^{\circ}$. Размер большой полуоси относительной орбиты составляет $A \approx 13.3 \pm 0.3$ а.е.

4. V1334 Cyg

4.1. Наблюдательные данные

V1334 Cyg (Gaia DR3 1964855904803120640, HD 203156) — яркая спектрально-двойная цефеида с периодом изменения блеска $P_{\text{pls}} \approx 3^{\text{d}}3325$ и малой амплитудой изменения блеска и показателя цвета. Ее изучению посвящено множество работ. Antonello and Aikawa (1995), Evans (2000), Kovtyukh et al. (2012) отнесли ее к числу цефеид, пульсирующих в 1-м оберitone. Наличие спутника у V1334 Cyg было заподозрено Evans (1992b). Позднее по результатам наблюдений IUE был обнаружен возможный третий компонент на угловом расстоянии менее 300 мсд от V1334 Cyg, причем было установлено, что в спектральном диапазоне 110–200 нм доминирует вклад горячей звезды B6.0 V–B8.0 V (Evans, 1995). Оставалось, однако, неясным, является ли эта горячая звезда близким спутником цефеиды

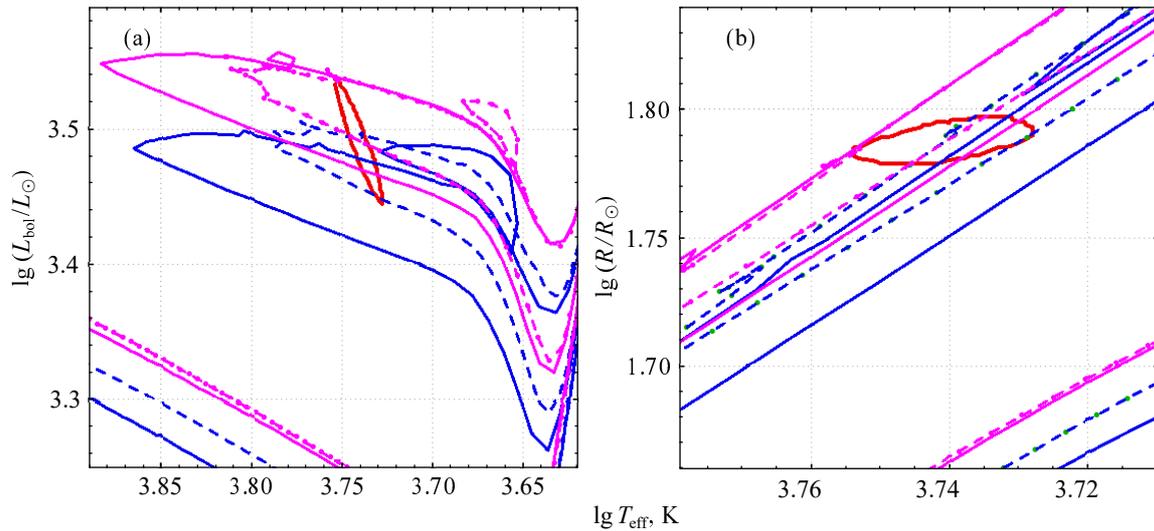


Рис. 7. То же, что на рис. 3, для цефеиды V1344 Aql. Сплошной и штриховой синими линиями показаны эволюционные треки MESA для начальной массы $M/M_{\odot} = 5.8$, $[\text{Fe}/\text{H}] = 0$ для $V_{\text{rot}}/V_{\text{crit}} = 0, 0.4$ соответственно; розовыми линиями — то же для звезды с начальной массой $M/M_{\odot} = 6.0$.

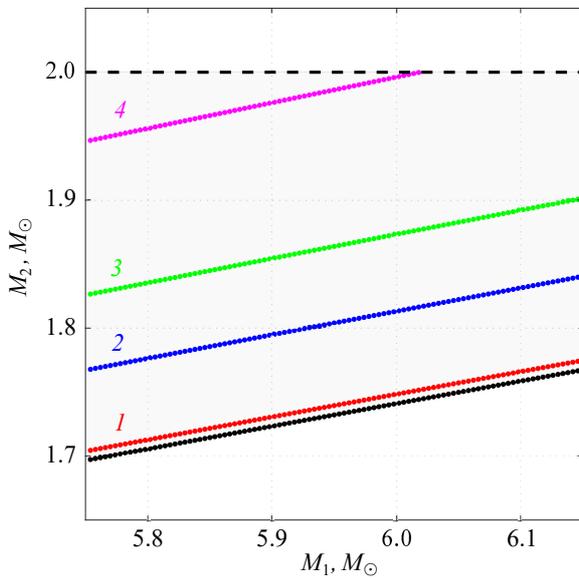


Рис. 8. Диагностическая диаграмма для V1344 Aql. Линии разных цветов (1–4) соответствуют углам наклона орбиты $i = 85^{\circ}, 75^{\circ}, 70^{\circ}, 63^{\circ}$ соответственно.

или более далеким компонентом тройной системы. По массиву лучевых скоростей, измеренных на интервале 28 лет (JD 2440400–2450727), Evans (2000) впервые с большой точностью определила орбитальные параметры V1334 Cyg, наложила ограничения на массу спутника M_2 : $3.1 M_{\odot} < M_2 < 4.4 M_{\odot}$, а также заподозрила, что горячий компонент является более далеким третьим телом. Отметим, однако, что указанный интервал масс спутника, согласно калибровкам Matajek (2022), соответствует горячим карликам

V6 V–B8 V, поэтому логичнее предположить, что вклад в УФ–поток вносит именно спутник, а не третий компонент системы.

В работе Evans et al. (2015b) приведены новые оценки масс цефеиды и спутника: $M_1 \approx 4.9 M_{\odot}$ и $M_2 \approx 4.0 M_{\odot}$. По результатам интерферометрических наблюдений в оптическом и ИК–диапазонах Gallenne et al. (2013) обнаружили спутник цефеиды V1334 Cyg на угловом расстоянии около 9 мсд, оценили его массу как $M_2 > 3.6 M_{\odot}$ и отметили значительный вклад спутника в интегральный блеск системы в оптическом диапазоне. По фотометрическим, спектроскопическим, интерферометрическим данным и рассчитанным орбитальным параметрам Gallenne et al. (2018) привели оценку расстояния до цефеиды V1334 Cyg, $D \approx 720 \pm 8$ пк, и дали оценки масс компонентов: $M_1 \approx 4.288 \pm 0.133 M_{\odot}$, $M_2 \approx 4.040 \pm 0.048 M_{\odot}$. Сразу же отметим, что Bailer-Jones et al. (2021) приводят заметно отличающиеся байесовские оценки геометрического ($r_{\text{geo}} \approx 924_{-70}^{+74}$ пк) и фотогеометрического ($r_{\text{pgeo}} \approx 892_{-66}^{+61}$ пк) расстояний. Нельзя исключить, что оценка расстояния, полученная Gallenne et al. (2018), является более правильной, так как для V1334 Cyg в каталоге Gaia DR3 приводится довольно большое значение $RUWE = 2.768$, заставляющее относиться с некоторой осторожностью к оценкам астрометрических параметров этой цефеиды.

Как показали наши предварительные расчеты, малая амплитуда изменения блеска и показателя цвета, а также невозможность достаточно надежно вычлечь заметный (в среднем порядка 25%) вклад спутника из интегрального потока в оптическом

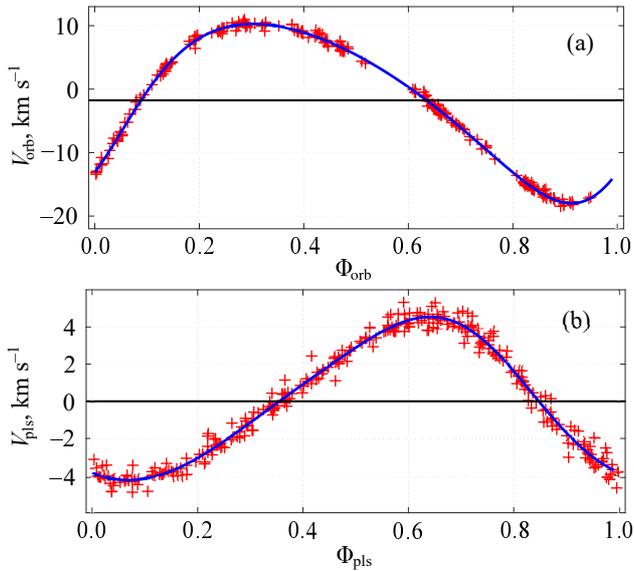


Рис. 9. Декомпозиция лучевых скоростей V1334 Cyg на орбитальный и пульсационный вклады. Обозначения те же, что и на рис. 1. Пульсационные фазы отсчитываются от фотометрической эпохи $t_0 = 2457080^{\text{d}}80$.

диапазоне сильно затрудняют оценку пульсационного радиуса цефеиды. По этой причине мы решили ограничиться уточнением ее орбитальных параметров с привлечением для этой цели собственных неопубликованных измерений лучевой скорости, полученных с помощью ИЛС (Tokovinin, 1987), дополнив их данными из литературы (см. таблицу 7 и ссылки в ней). В итоге для уточнения орбитальных элементов мы использовали суммарный 30-летний ряд, охватывающий более 3250 пульсационных циклов и включающий 304 измерения лучевой скорости.

Отметим, что наши однородные по точности измерения составляют около 45% всех использованных данных. Предварительный анализ показал, что весь ряд хорошо описывается единым значением пульсационного периода: $P_{\text{pls}} = 3^{\text{d}}33253$. Отсчет пульсационных фаз ведется от момента максимального блеска, соответствующего эпохе $t_0 = \text{JD } 2457080.80$. Пульсационный вклад в лучевые скорости описывался тригонометрическим полиномом вида (1) 3-го порядка.

4.2. Орбитальные параметры

На рис. 9 показаны орбитальная и пульсационная кривые изменения лучевых скоростей цефеиды V1334 Cyg, а в таблице 8 представлены значения параметров орбиты. В целом они хорошо согласуются с определениями Evans (2000), Gallenne

Таблица 7. Выборка данных для определения параметров орбиты V1334 Cyg и декомпозиции лучевых скоростей. N — количество измерений

Observation period, JD	N	Reference
2448761–2450727	75	Evans (2000)
2450337–2450738	10	Kiss and Vinkó (2000)
2450345–2459489	138	настоящая работа
2455523–2458074	70	Borgniet et al. (2019)

Таблица 8. Параметры орбиты V1334 Cyg. Обозначения те же, что и в таблице 1. Пульсационные фазы отсчитываются от фотометрической эпохи $t_0 = 2457080^{\text{d}}80$

Параметр	Значение
P_{pls} , сут.	3.33253
$T_0 - 2400000$, сут.	49437.18 ± 6.23
P_{orb} , сут.	1934.43 ± 0.76
e	0.226 ± 0.005
Ω , рад.	4.00 ± 0.02
K , км с ⁻¹	14.13 ± 0.08
V_γ км с ⁻¹	-1.77 ± 0.05
$f(M)$, M_\odot	0.524 ± 0.009
$a_1 \sin i$, a.e.	2.449 ± 0.014
RMS, км с ⁻¹	0.79
MAD, км с ⁻¹	0.43

et al. (2018) но благодаря более точным и многочисленным данным, безусловно, являются самыми надежными.

Поскольку из-за малой амплитуды переменности независимая надежная оценка пульсационного радиуса, в отличие от V496 Aql и V1344 Aql, не представляется возможной, для расчета диагностической диаграммы мы решили использовать грубую оценку радиуса, основанную на зависимостях «период–радиус» для классических цефеид, приведенных в работе Lazovik and Rastorguev (2020). Период основного тона V1334 Cyg можно оценить как $P_{\text{pls}(F)} \approx 4^{\text{d}}7$, и приблизительная оценка среднего радиуса составит $\langle R \rangle \sim 40\text{--}42 R_\odot$. Отметим, что похожую оценку ($40.6 \pm 3.0 R_\odot$) вывели Gallenne et al. (2018) по интерферометрическим измерениям пульсационного радиуса.

С учетом приведенных в таблице 8 значений функции масс $f(M)$ и $a_1 \sin i$ мы построили диагностическую диаграмму цефеиды V1334 Cyg (рис. 10) для интервала масс главного компонента

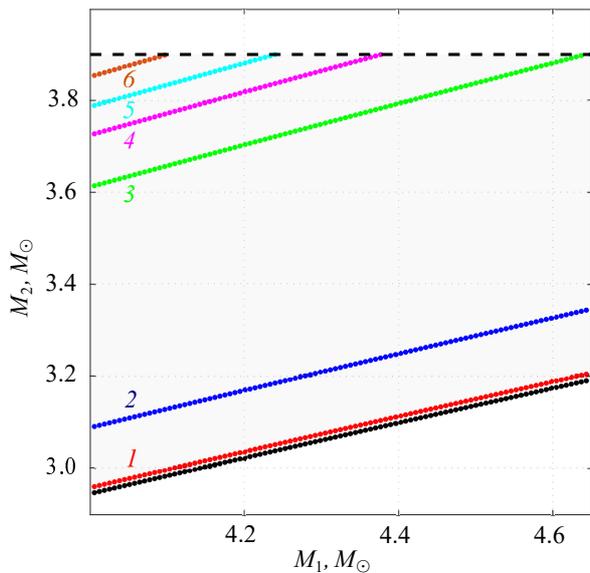


Рис. 10. Диагностическая диаграмма для V1334 Cyg. Верхняя штриховая линия соответствует массе спутника B7 V, равной $M_2 \sim 3.9 M_\odot$. Наклонная нижняя черная линия ограничивает сверху область затмений. Линии разных цветов (1–6) соответствуют углам наклона орбиты $i = 85^\circ, 75^\circ, 60^\circ, 58^\circ, 57^\circ, 56^\circ$ соответственно.

$M_1 \sim 4.0\text{--}4.7 M_\odot$ и массы спутника B7 V, равной $M_2 \approx 3.9 M_\odot$. Кривыми разных цветов показаны соотношения между массами M_1, M_2 для разных углов наклона плоскости относительной орбиты к картинной плоскости. Хорошо видно, что во всем указанном диапазоне масс цефеиды для принятой величины массы спутника угол наклона может находиться в пределах $56^\circ\text{--}60^\circ$. Отсюда можно легко оценить линейный размер большой полуоси орбиты главного компонента и большую полуось относительной орбиты: $a_1 \sim 2.83\text{--}2.96$ а.е. и $A \sim 5.79\text{--}6.45$ а.е.

На расстоянии около 900 пк, приведенном Bailer-Jones et al. (2021), максимальное угловое расстояние между цефеидой и спутником должно составить 6.4–7.2 мсд, а на расстоянии 720 пк (Gallenne et al., 2018) — 8–9 мсд, что неплохо согласуется с интерферометрической оценкой углового размера относительной орбиты 8.54 мсд, полученной в работе Gallenne et al. (2018). Этот факт, вероятно, подтверждает высказанные выше сомнения в качестве байесовских оценок расстояния до V1334 Cyg.

5. AW PER

5.1. Наблюдательные данные

Объект AW Per (Gaia DR3 174489098011145216, HD 30282), как и V1334 Cyg, принадлежит к числу ярчайших спектрально-двойных цефеид Северного

неба. Наличие у нее горячего спутника было заподозрено Miller and Preston (1964) на основе данных спектроскопии в линиях H и K Ca II, а впоследствии подтверждено Evans (1989; 1992b) данными наблюдений IUE, позволившими обнаружить вклад спутника (B7 V–B8 V) в излучение в УФ-диапазоне 120–200 нм; отмечалась также возможность его химической peculiarity. Решения для орбитальных элементов с периодом, достигающим 13 000–15 000 суток (30–40 лет), были сделаны Vinkó (1993), Welch and Evans (1989), Evans et al. (2000). На основе самого длинного однородного ряда корреляционных измерений, охватывающего более 40 лет, Griffin (2016) выполнил наиболее точное на тот момент определение орбитальных параметров. В ряде работ обсуждались проявления запаздывания пульсаций (так называемый Light-Time Effect), связанного с большой радиальной протяженностью орбиты (Evans, 1983). Csörgyei et al. (2022) уверенно обнаружили периодические (с периодом около 12 100 суток и амплитудой примерно $0^d.07$, что составляет около 1% от величины периода) изменения остатка ($O - C$), накладывающиеся на медленный эволюционный рост пульсационного периода. Большая величина функции масс ($f(M) > 1 M_\odot$) заставляет предположить, что спутник цефеиды — массивная звезда (Vinkó, 1993).

Мы решили выполнить ревизию определения орбитальных параметров системы AW Per, добавив к опубликованным рядам лучевых скоростей наши довольно многочисленные измерения, проведенные с помощью ИЛС (Tokovinin, 1987) в разное время, в том числе в период с 20 сентября 1998 г. по 2 октября 2021 г., впервые представляемые в данной работе. Проведенный нами мониторинг охватывает 34.5 года и является вторым по длительности после цикла наблюдений Griffin (2016). В таблице 9 приведена краткая информация о конечной выборке, которая содержит 660 измерений лучевой скорости на интервале почти 46 лет (JD 2442807–2459490), что составляет примерно 1.25 орбитального периода и включает 2581 пульсационный цикл. Отметим, что наш однородный ряд наблюдений составляет примерно 27% всего объема современных данных.

5.2. Орбитальные параметры

Предварительный анализ показал, что изменения блеска и лучевых скоростей на всем интервале наблюдений хорошо описываются пульсационным периодом $P_{\text{pls}} \approx 6^d.46368$ с фотометрической эпохой $t_0 = 2457265^d.03$. Пульсационный вклад в лучевые скорости стандартно описывался тригонометрическим полиномом вида (1) 4-го порядка. Значения орбитальных параметров приведены в

Таблица 9. Выборка данных для определения параметров орбиты AW Per и декомпозиции лучевых скоростей. N — количество измерений

Observation period, JD	N	Reference
2446865–2459490	180	Gorynya et al. (1992, 1996, 1998) и данная работа
2443548–2445010	6	Evans (1983)
2443564–2445338	16	Barnes et al. (1987)
2443153–2447094	16	Welch and Evans (1989)
2450718–2450737	5	Kiss and Vinkó (2000)
2448660–2450552	37	Evans (2000)
2457645–2458152	9	Borgniet et al. (2019)
2442807–2457484	359	Griffin (2016)
2455816–2458383	32	Anderson et al. (2024)

Таблица 10. Параметры орбиты AW Per. Обозначения те же, что и в таблице 1. Пульсационные фазы отсчитываются от фотометрической эпохи $t_0 = 2457265^d.03$

Параметр	Значение
P_{pls} , сут.	6.46368
$T_0 - 2400000$, сут.	$52\,585.41 \pm 37.25$
P_{orb} , сут.	$13\,662.92 \pm 128.27$
e	0.462 ± 0.009
Ω , рад.	4.40 ± 0.03
K , км с $^{-1}$	10.17 ± 0.10
V_γ , км с $^{-1}$	7.09 ± 0.07
$f(M)$, M_\odot	1.039 ± 0.036
$a_1 \sin i$, а.е.	11.328 ± 0.164
RMS, км с $^{-1}$	1.46
MAD, км с $^{-1}$	0.90

таблице 10. Декомпозиция лучевой скорости на вклады орбитального движения и пульсаций показана на рис. 11. Судя по сравнительно небольшой величине невязок решения RMS и MAD, приведенных в таблице 10, влиянием эффекта запаздывания на решение можно пренебречь. Найденные в данной работе орбитальные параметры, основанные на самом большом массиве измерений, являются в настоящее время наиболее точными.

5.3. Светимость, радиус, масса и эволюционная стадия AW Per

Из-за отсутствия современных надежных данных фотометрии в полосах B и V мы не можем определить пульсационный радиус цефеиды

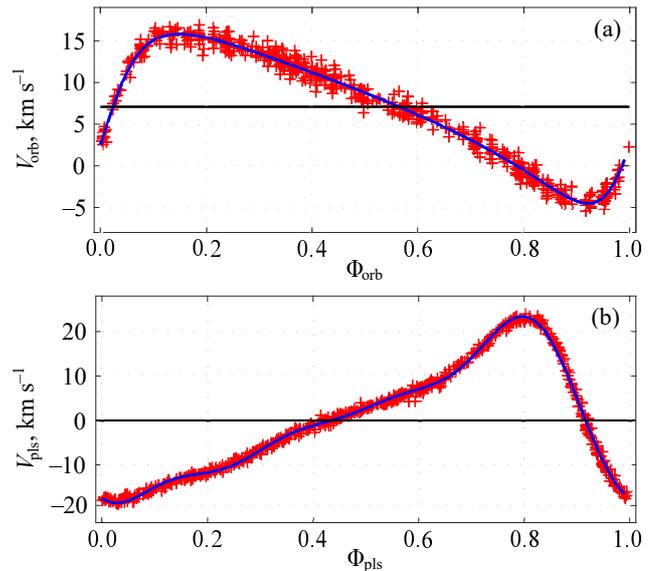


Рис. 11. Декомпозиция лучевых скоростей AW Per на орбитальный и пульсационный вклады. Обозначения те же, что и на рис. 1. Пульсационные фазы отсчитываются от фотометрической эпохи $t_0 = 2457265^d.03$.

AW Per методом моделирования T_{eff} , несмотря на наличие температурных данных. По этой причине мы ограничиваемся применением упрощенного приема определения радиуса, использованного нами, например, в работе Rastorguev et al. (2025), оставляя на будущее более тщательный анализ, в том числе учет вклада спутника в интегральный блеск и цвет системы.

Bailer-Jones et al. (2021) приводит байесовские оценки расстояния до AW Per: $r_{\text{geo}} \approx 911_{-20}^{+26}$ пк и $r_{\text{pgeo}} \approx 919_{-22}^{+27}$ пк. Они соответствуют значению истинного модуля расстояний $(m - M)_0 \approx 9^m.81 \pm 0^m.03$. В базе данных о цефеидах (Fernie et al., 1995) приводится усредненное по пяти измерениям значение избытка цвета $\langle E(B - V) \rangle \approx 0^m.51 \pm 0^m.02$, которое с помощью таблиц из работы Wang and Chen (2019), связывающих величины поглощения в разных фотометрических системах, можно перевести в избыток цвета $E(BP - RP)$. В каталоге Gaia DR3 также приведено 49 измерений блеска AW Per в полосах G, BP, RP , позволившие определить средние видимые величины, а после учета поглощения и расстояния — оценить средние абсолютные величины цефеиды в указанных полосах. Соответствующие оценки приведены в таблице 11.

Кроме того, по фотометрическим данным в полосах BP и RP и пульсационной кривой лучевых скоростей с помощью упрощенного варианта моделирования кривой блеска была сделана

Таблица 11. Параметры цефеиды AW Per, определенные по данным BP - и RP -фотометрии. Для оценки радиуса использовано значение $PF = 1.28$

Параметр	Значение
$\langle G \rangle$, mag	7.05 ± 0.02
$\langle BP \rangle$, mag	7.70 ± 0.02
$\langle RP \rangle$, mag	6.30 ± 0.02
$\langle BP - RP \rangle$, mag	1.40 ± 0.02
$E(B - V)$, mag	0.59 ± 0.02
$E(BP - RP)$, mag	0.67 ± 0.03
A_G , mag	1.27
A_{BP} , mag	1.63
A_{RP} , mag	0.96
$\langle M_G \rangle$, mag	-4.03 ± 0.10
$\langle M_{BP} \rangle$, mag	-3.74 ± 0.10
$\langle M_{RP} \rangle$, mag	-4.47 ± 0.10
$(BP - RP)_0$, mag	0.73 ± 0.10
$\langle R/R_\odot \rangle$	50.3 ± 2.2
$\Delta R/R_\odot$	2.8 ± 0.05
$(m - M)_0$, mag	9.81 ± 0.03
Масса, M_\odot	5.6–5.9

оценка среднего пульсационного радиуса: AW Per $\langle R/R_\odot \rangle \approx 50.3 \pm 2.2$ (см. таблицу 11).

На рис. 12 показано примерное положение AW Per относительно теоретических изохрон MESA (Dotter, 2016) на диаграмме « $(BP - RP)_0 - M_{RP}$ » для $\lg t = 7.95, 7.90$. Данные для главного компонента взяты из таблицы 11, причем указанные на рисунке ошибки отражают неизбежные неточности, возникающие при оценке абсолютных величин, поглощения и возможного вклада горячего спутника. С большой вероятностью следует ожидать, что массивный горячий спутник находится вблизи или немного ниже точки поворота от ГП, так как последующая эволюция идет в очень короткой временной шкале Кельвина–Гельмгольца. Оценка светимости AW Per по данным Gaia DR3 в пределах ошибок согласуется с положением звезды на верхних частях голубых петель обеих изохрон, где цефеида, пересекая полосу неустойчивости в сторону низких температур, показывает эволюционный рост периода пульсаций. Радиус цефеиды на верхних ветвях изохрон составляет примерно $R/R_\odot \approx 49.5, 54.4$ соответственно и прекрасно согласуется с нашей упрощенной пульсационной оценкой $\langle R/R_\odot \rangle \approx 50.3 \pm 2.2$. Как следует из рис. 12, в полосе RP спутник слабее цефеиды

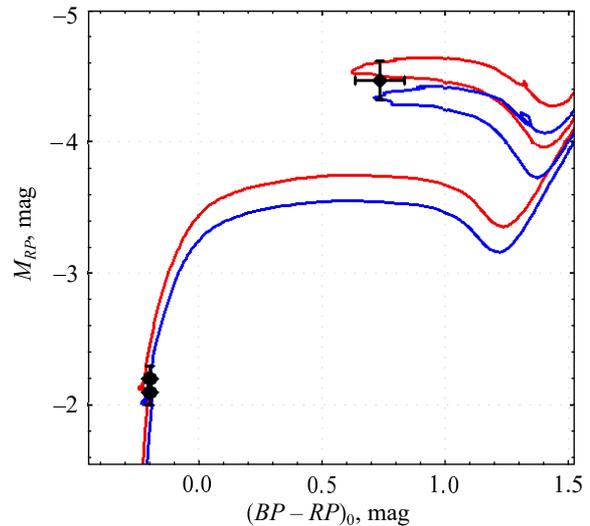


Рис. 12. Черными значками показаны положения цефеиды AW Per (в области голубых петель) и ее горячего спутника (вблизи точки поворота от ГП) на диаграмме « $(BP - RP)_0 - M_{RP}$ ». Синим и красным цветом показаны изохроны MESA, построенные для значений возраста 89.1 и 79.4 млн лет ($\lg t = 7.95, 7.90$ соответственно) и солнечного химического состава.

примерно на $\Delta M_{RP} \sim 2^m 4$, то есть его вклад в суммарный поток в этой полосе, как и в полосе V , составляет не более 10%.

Оценки массы главного компонента цефеиды на указанных изохронах составляют $M_1/M_\odot \approx 5.6, 5.9$ для $\lg t = 7.95, 7.90$. Соответствующие оценки масс спутника вблизи точки поворота, составляющие $M_2/M_\odot \approx 5.3, 5.5$, вероятно, следует считать верхним пределом массы, поскольку они выше характерных масс звезд В7 V–В8 V ($3.5\text{--}4.0 M_\odot$ согласно калибровкам Matajsek, 2022). Максимальные значения M_2 подтверждают близость масс компонентов спектрально-двойной системы, что накладывает ограничения на геометрию ее орбиты, в первую очередь на угол ее наклона.

На рис. 13 показана диагностическая диаграмма для системы AW Per. Хорошо видно, что приведенные выше изохронные оценки массы главного компонента и массы спутника, не превышающей массу звезд вблизи точки поворота, допускают интервал углов наклона плоскости орбиты системы $i \gtrsim 63^\circ\text{--}65^\circ$. При этом величина большой полуоси относительной орбиты, как легко понять из данных, приведенных на рис. 13b, составляет около 26 ± 1 а.е.

Очевидно, что при углах наклона $i \lesssim 63^\circ\text{--}65^\circ$ масса второго компонента должна быть больше массы цефеиды. Одиночный спутник подобной массы должен быть отвергнут из эволюционных соображений, поэтому в таком случае спутник может представлять собой тесную двойную систему,

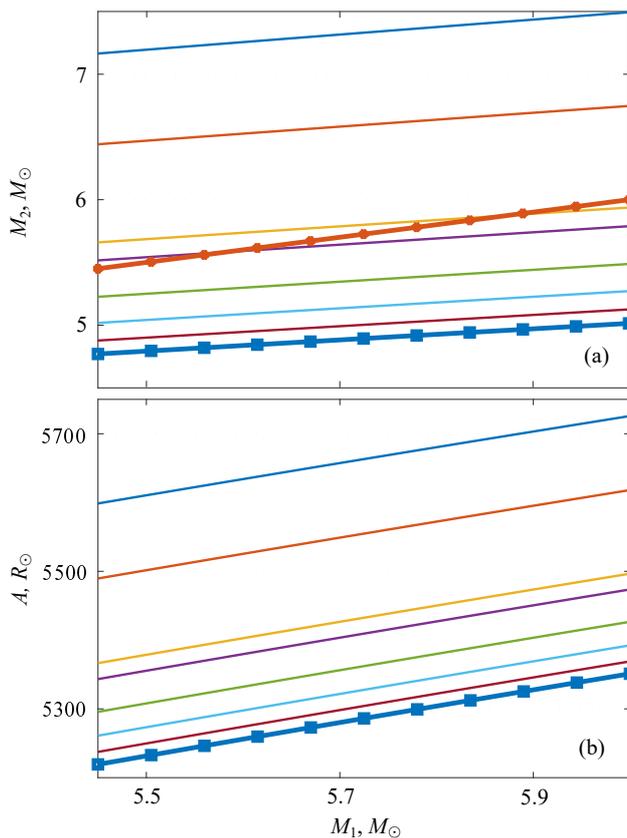


Рис. 13. Диагностическая диаграмма для AW Per. Панель (a): связь масс спутника M_2 и главного компонента M_1 для разных значений угла наклона плоскости относительной орбиты к картинной плоскости. Сплошные тонкие линии разных цветов соответствуют углам наклона (сверху вниз) $i = 50^\circ, 55^\circ, 63^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$. Толстая синяя линия с квадратами ограничивает сверху область взаимных затмений и соответствует $i \sim 89^\circ 4$. Толстая оранжевая линия соответствует равенству масс $M_1 = M_2$. Панель (b): выраженные радиусах Солнца расстояния между компонентами для разных масс главного компонента и разных углов наклона. Толстая нижняя линия соответствует углу наклона $i \sim 89^\circ 4$. Сплошные тонкие цветные линии соответствуют тем же углам наклона, что и на панели (a).

состоящую из двух горячих компонентов с большой суммарной массой. Примером подобной тройной системы является цефеида SU Cyg, спутник которой является тесной двойной системой из двух горячих звезд с массами около $2.5 M_\odot$ (Evans and Bolton, 1986). Следует, однако, заметить, что большая амплитуда эффекта запаздывания (Csörnyei et al., 2022) свидетельствует о значительной протяженности орбиты цефеиды вдоль луча зрения, поэтому большие углы наклона плоскости орбиты кажутся нам более вероятными.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе мы применили комплексный подход к изучению спектрально-двойных цефеид,

закрывающийся в использовании всего доступного фотометрического, спектроскопического и астрометрического материала и теоретических эволюционных моделей звезд. Значительное увеличение массива высокоточных лучевых скоростей четырех спектрально-двойных цефеид за счет добавления к имеющимся рядам наблюдений 702 наших ранее не публиковавшихся измерений, выполненных за последние 28 лет, позволило существенно уточнить параметры орбит этих звезд. Результаты длительного мониторинга оказались особенно важными для изучения объектов нашей выборки, орбитальные периоды которых составляют 1351^d для V496 Aql (305 измерений, включая 232 наших), 6358^d для V1344 Aql (260 измерений, включая 194 наших), 1934^d для V1334 Cyg (304 измерения, включая 138 наших), 13663^d для AW Per (660 измерений, включая 180 наших). Очевидно, в первых трех случаях наш вклад оказался решающим, что и обеспечило высокое качество решений, характеризующихся малыми невязками ($\text{RMS} \sim 0.66\text{--}0.79 \text{ км с}^{-1}$). Для последней из перечисленных цефеид невязка заметно больше ($\text{RMS} \sim 1.46 \text{ км с}^{-1}$), поскольку для определения столь большого орбитального периода были привлечены измерения недостаточно высокой точности, что, однако, не помешало найти самую точную оценку ее орбитальных параметров. Орбиты цефеид V1334 Cyg и AW Per характеризуются большими значениями функции масс, означающими наличие массивных спутников. Построенные для всех звезд диагностические диаграммы позволили наложить ограничения как на массы спутников, так и на наклон плоскости относительной орбиты к картинной плоскости.

Для цефеид V496 Aql и V1344 Aql проведены оценки их астрофизических параметров — избытков цвета, светимостей, радиусов и масс — на основе данных об эффективных температурах, фотометрии в полосах B, V и BP, RP Gaia DR3, а также данных о расстояниях Gaia DR3 с использованием метода одновременного моделирования кривой блеска и эффективной температуры и теоретических эволюционных треков. Показано, что угол наклона плоскости относительной орбиты цефеиды V1334 Cyg заключен в сравнительно узком интервале возможных значений, что позволило уточнить линейный размер орбиты. Цефеида AW Per представляет собой уникальную систему с орбитальным периодом более 37 лет и массивным горячим компонентом. Показано, что при углах наклона плоскости орбиты менее $63^\circ\text{--}65^\circ$ спутник должен быть массивнее главного компонента, и в этом случае он может быть только тесной двойной системой, включающей горячие звезды вблизи

Таблица 12. Каталог измерений лучевых скоростей цефеид V496 Aql, V1344 Aql, V1334 Cyg, AW Peg. Показан фрагмент таблицы; полная версия доступна в Дополнительных материалах

Обозначение	JD–2400000	V_R , км с ⁻¹	σ_{V_R} , км с ⁻¹
V0496 Aql	50614.521	3.21	0.31
V0496 Aql	50621.519	4.17	0.38
V0496 Aql	50705.294	12.37	0.26
V0496 Aql	50706.280	–0.52	0.22
V0496 Aql	50707.316	–1.97	0.28

точки поворота от ГП, суммарная масса которых превышает массу цефеиды.

Легко понять, что возраст цефеид непосредственно связан с их массами и пульсационными периодами. В данной работе мы приводим оценки эволюционного возраста цефеид V496 Aql, V1344 Aql и AW Peg, основанные на тайминге эволюционных треков MESA и составляющие соответственно $\lg t \sim 7.90\text{--}7.95$, $7.84\text{--}7.90$, $7.90\text{--}7.95$. Пульсационные периоды трех указанных цефеид весьма близки, в логарифмической шкале они составляют $\lg P_{\text{pls}} \approx 0.83, 0.87, 0.81$ соответственно. Наши оценки возраста цефеид хорошо согласуются с новой зависимостью «период–возраст», выведенной Deng et al. (2025) по цефеидам — членам рассеянных скоплений с использованием данных Gaia DR3, а также с полученной ранее тем же методом зависимостью Turner (2012). Согласие наших оценок с этими зависимостями не удивительно, поскольку возрасты рассеянных скоплений определяются методом наложения теоретических изохрон на диаграмму «цвет — звездная величина» в предположении близости возраста цефеиды и скопления. В то же время наши оценки систематически примерно на $\Delta \lg t \approx 0.1$ меньше оценок Anderson et al. (2016) и на $\Delta \lg t \approx 0.2$ больше оценок Wojo et al. (2005), в обеих работах выведенных на основе теории пульсаций. Расхождение эволюционных и пульсационных оценок возраста цефеид требует дополнительного теоретического анализа.

Полный каталог измерений лучевых скоростей доступен в виде Дополнительных материалов, а его фрагмент приведен в таблице 12.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Дополнительные материалы (таблица 12) представлены в электронном виде в текстовом и pdf-файлах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят всех участников многолетней программы измерений лучевых скоростей цефеид Северного неба — наблюдателей ГАИШ МГУ и ИНАСАН — и рецензентов за конструктивные замечания. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова. В работе использованы данные миссии Gaia Европейского космического агентства (ЕКА) (<https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные консорциумом по обработке и анализу данных Gaia (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>). Финансирование DPAC осуществлялось национальными организациями, в частности, организациями, участвующими в Многостороннем соглашении Gaia. В этом исследовании также использовался инструмент доступа к каталогу VizieR (CDS, Страсбург, Франция).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа финансировалась за счет средств бюджета учреждений.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. I. Anderson, H. Saio, S. Ekström, et al., *Astron. and Astrophys.* **591**, id. A8 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201528031
2. R. I. Anderson, G. Viviani, S. S. Shetye, et al., *Astron. and Astrophys.* **686**, id. A177 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202348400
3. E. Antonello and T. Aikawa, *Astron. and Astrophys.* **302**, 105 (1995).
4. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, et al., *Astron. J.* **161** (3), id. 147 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abd806
5. L. A. Balona, *The Observatory* **101**, 205 (1981).
6. T. G. Barnes, III, T. J. Moffett, and M. H. Slovak, *Astrophys. J. Suppl.* **65**, 307 (1987). DOI:10.1086/191226
7. T. G. Barnes, III, T. J. Moffett, and M. H. Slovak, *Astrophys. J. Suppl.* **66**, 43 (1988). DOI:10.1086/191245
8. L. N. Berdnikov, V. V. Ignatova, E. N. Pastukhova, and D. G. Turner, *Astronomy Letters* **23** (2), 177 (1997).
9. L. N. Berdnikov, V. V. Ignatova, and O. V. Vozyakova, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **17**, 87 (1998). DOI:10.1080/10556799808232091
10. L. N. Berdnikov and D. G. Turner, *Astronomy Letters* **21** (4), 534 (1995).

11. L. N. Berdnikov and D. G. Turner, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **19** (5), 689 (2001). DOI:10.1080/10556790108244090
12. L. N. Berdnikov and D. G. Turner, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **23** (3), 253 (2004). DOI:10.1080/10556790410001701300
13. L. N. Berdnikov and O. V. Vozyakova, *Astronomy Letters* **21** (3), 308 (1995).
14. G. Bono, M. Marconi, S. Cassisi, et al., *Astrophys. J.* **621** (2), 966 (2005). DOI:10.1086/427744
15. S. Borgniet, P. Kervella, N. Nardetto, et al., *Astron. and Astrophys.* **631**, id. A37 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201935622
16. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A1 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833051
17. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039657
18. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989). DOI:10.1086/167900
19. B. Cseh, G. Csörnyei, L. Szabados, et al., *Astron. and Astrophys.* **680**, id. A89 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202347360
20. G. Csörnyei, L. Szabados, L. Molnár, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **511** (2), 2125 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac115
21. R. da Silva, V. D'Orazi, M. Palla, et al., *Astron. and Astrophys.* **678**, id. A195 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346982
22. S. Deng, Z. He, A. Ren, et al., *Astron. J.* **170** (6), id. 320 (2025). DOI:10.3847/1538-3881/ae119c
23. A. Dotter, *Astrophys. J. Suppl.* **222** (1), article id. 8 (2016). DOI:10.3847/0067-0049/222/1/8
24. N. R. Evans, *Astrophys. J.* **272**, 214 (1983). DOI:10.1086/161281
25. N. R. Evans, *Astron. J.* **97**, 1737 (1989). DOI:10.1086/115114
26. N. R. Evans, *Astrophys. J.* **384**, 220 (1992a). DOI:10.1086/170865
27. N. R. Evans, *Astrophys. J.* **384**, 220 (1992b). DOI:10.1086/170865
28. N. R. Evans, *Astrophys. J.* **445**, 393 (1995). DOI:10.1086/175704
29. N. R. Evans, *Astron. J.* **119** (6), 3050 (2000). DOI:10.1086/301397
30. N. R. Evans, L. Berdnikov, J. Lauer, et al., *Astron. J.* **150** (1), article id. 13 (2015a). DOI:10.1088/0004-6256/150/1/13
31. N. R. Evans, L. Berdnikov, J. Lauer, et al., *Astron. J.* **150** (1), article id. 13 (2015b). DOI:10.1088/0004-6256/150/1/13
32. N. R. Evans and C. T. Bolton, in *Proc. Int. Symp. on New Insights in Astrophysics: 8 Years of UV Astronomy with IUE, University College London, 1986*, Ed. by E. J. Rolfe and R. Wilson (ESA Special Publication, Paris, 1986), p. 405.
33. N. R. Evans, H. E. Bond, G. H. Schaefer, et al., *Astron. J.* **151** (5), article id. 129 (2016). DOI:10.3847/0004-6256/151/5/129
34. N. R. Evans, J. Vinko, and G. M. Wahlgren, *Astron. J.* **120** (1), 407 (2000). DOI:10.1086/301444
35. J. D. Fernie, N. R. Evans, B. Beattie, and S. Seager, *Inform. Bull. Var. Stars* **4148**, 1 (1995).
36. E. L. Fitzpatrick and D. Massa, *Astrophys. J.* **663** (1), 320 (2007). DOI:10.1086/518158
37. E. L. Fitzpatrick, D. Massa, K. D. Gordon, et al., *Astrophys. J.* **886** (2), article id. 108 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab4c3a
38. P. J. Flower, *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996). DOI:10.1086/177785
39. A. Gallenne, P. Kervella, N. R. Evans, et al., *Astrophys. J.* **867** (2), article id. 121 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aae373
40. A. Gallenne, J. D. Monnier, A. Mérand, et al., *Astron. and Astrophys.* **552**, id. A21 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201321091
41. W. Gieren, *Revista Mexicana Astronom. Astrofis.* **6**, 103 (1981a).
42. W. Gieren, *Astrophys. J. Suppl.* **46**, 287 (1981b). DOI:10.1086/190748
43. N. A. Gorynya, T. R. Irsmbabetova, A. S. Rastorguev, and N. N. Samus, *Sov. Astron. Letters* **18**, 316 (1992).
44. N. A. Gorynya, N. N. Samus', A. S. Rastorguev, and M. E. Sachkov, *Astronomy Letters* **22** (2), 175 (1996).
45. N. A. Gorynya, N. N. Samus', M. E. Sachkov, et al., *Astronomy Letters* **24** (6), 815 (1998).
46. R. F. Griffin, *The Observatory* **136**, 209 (2016).
47. M. A. T. Groenewegen, *Astron. and Astrophys.* **488** (1), 25 (2008). DOI:10.1051/0004-6361:200809859
48. M. A. T. Groenewegen, *Astron. and Astrophys.* **550**, id. A70 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201220446
49. V. Hocdé, P. Moskalik, N. A. Gorynya, et al., *Astron. and Astrophys.* **689**, id. A224 (2024). DOI:10.1051/0004-6361/202347798
50. V. V. Ignatova and O. V. Vozyakova, *Astronomical and Astrophysical Transactions* **19** (2), 133 (2000). DOI:10.1080/10556790008241357
51. L. L. Kiss and J. Vinkó, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **314** (2), 420 (2000). DOI:10.1046/j.1365-8711.2000.03375.x
52. G. Kovacs and L. Szabados, *Inform. Bul. Var. Stars* **1719**, 1 (1979).
53. V. V. Kovtyukh, R. E. Luck, F. A. Chekhonadskikh, and S. I. Belik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **426** (1), 398 (2012). DOI:10.1111/j.1365-2966.2012.21763.x
54. Y. A. Lazovik and A. S. Rastorguev, *Astron. J.* **160** (3), id. 136 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/aba627
55. T. Lloyd Evans, *South African Astronomical Observatory Circular* **1**, 257 (1980).
56. R. E. Luck, *Astron. J.* **156** (4), article id. 171 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aadcaac

57. E. E. Mamajek, https://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt (last updated April 16, 2022).
58. J. Miller and G. Preston, *Astrophys. J.* **139**, 1126 (1964). DOI:10.1086/147853
59. F. Ochsenbein, P. Bauer, and J. Marcout, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **143**, 23 (2000). DOI:10.1051/aas:2000169
60. P. T. Oosterhoff, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **9**, 383 (1943).
61. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201629272
62. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, and N. A. Gorynya, *Astronomy Reports* **68** (12), 1457 (2024a). DOI:10.1134/S1063772925701409
63. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, and N. A. Gorynya, *Astrophysical Bulletin* **79** (4), 629 (2024b). DOI:10.1134/S1990341324600625
64. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, Y. A. Lazovik, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (2), 144 (2022). DOI:10.1134/S1990341322020079
65. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, N. N. Samus, and N. A. Gorynya, *Astrophysical Bulletin* **80** (2), 242 (2025). DOI:10.1134/S1990341325600103
66. M. E. Sachkov, A. S. Rastorguev, N. N. Samus', and N. A. Gorynya, *Astronomy Letters* **24** (3), 377 (1998).
67. D. W. N. Stibbs, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **115**, 363 (1955). DOI:10.1093/mnras/115.4.363
68. J. Storm, W. Gieren, P. Fouqué, et al., *Astron. and Astrophys.* **534**, id. A94 (2011). DOI:10.1051/0004-6361/201117155
69. L. Szabados, B. Cseh, J. Kovács, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **442** (4), 3155 (2014). DOI:10.1093/mnras/stu1066
70. A. A. Tokovinin, *Sov. Astron.* **31**, 98 (1987).
71. D. G. Turner, *J. Amer. Assoc. of Var. Star Observers* **40** (1), 502 (2012).
72. D. G. Turner, *Revista Mexicana Astronom. Astrofís.* **52**, 223 (2016). DOI:10.48550/arXiv.1603.02276
73. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
74. J. Vinkó, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **260**, 273 (1993). DOI:10.1093/mnras/260.2.273
75. S. Wang and X. Chen, *Astrophys. J.* **877** (2), article id. 116 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab1c61
76. D. L. Welch and N. R. Evans, *Astron. J.* **97**, 1153 (1989). DOI:10.1086/115058

Orbital and Astrophysical Parameters of Spectroscopic Binary Cepheids V496 Aql, V1344 Aql, V1334 Cyg and AW Per

A. S. Rastorguev^{1,2}, M. V. Zabolotskikh², and N. A. Gorynya^{3,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

²Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

³Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

We present the results of a comprehensive study of four spectroscopic binary Cepheids with long orbital periods. The study makes use of all the available photometric, spectroscopic and astrometric information, and previously developed analysis techniques. The paper is based on a new catalog containing 702 radial velocity measurements of V496 Aql (232 measurements), V1344 Aql (194 measurements), V1334 Cyg (138 measurements), and AW Per (138 measurements). All the measurements were obtained over 1997–2021 on the Zeiss-1000 telescope of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences Simeiz Observatory using the correlation Radial Velocity Meter (RVM) designed by A.A. Tokovinin. Using other published observations, the orbital periods and other orbital parameters were significantly refined: V496 Aql: $P_{\text{orb}} \approx 1351^{\text{d}3} \pm 0^{\text{d}7}$; V1344 Aql: $P_{\text{orb}} \approx 6358 \pm 30^{\text{d}}$; V1344 Cyg: $P_{\text{orb}} \approx 1934^{\text{d}4} \pm 0^{\text{d}8}$; AW Per: $P_{\text{orb}} \approx 13\,663 \pm 128^{\text{d}}$. Using the mass function, we have found additional constraints on the companion masses and the orientation of the orbital plane. For V496 Aql and V1344 Aql, a complete set of astrophysical parameters was found, including the color excess, pulsational radii, luminosity, and mass estimates based on the evolutionary tracks (for V496 Aql, $M \sim 5.6\text{--}5.8M_{\odot}$; for V1344 Aql, $M \sim 5.8\text{--}6.0M_{\odot}$). For the V1334 Cyg Cepheid with a massive companion, a strong constraint $i \sim 56^{\circ}\text{--}60^{\circ}$ on the inclination of its orbital plane was found based on the high mass function. AW Per, with an orbital period of over 37 years and a high mass function, has a companion of a comparable mass. The calculated pulsational radius and luminosity of the Cepheid are in good agreement with the evolutionary mass estimate of $M \sim 5.6\text{--}5.9M_{\odot}$. We show that at inclination angles smaller than $63^{\circ}\text{--}65^{\circ}$, the companion can only be a close binary system consisting of two hot stars near the main-sequence turnoff point.

Keywords: *stars: binaries; stars: variables: Cepheids; stars: individual: V496 Aql, V1344 Aql, V1334 Cyg, AW Per; stars: evolution; stars: fundamental parameters*