

УДК 524.333-33

СПЕКТРАЛЬНО-ДВОЙНАЯ ЦЕФЕИДА V350 SGR: РЕВИЗИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ЭВОЛЮЦИОННОГО СТАТУСА

© 2024 А. С. Расторгуев^{1,2*}, М. В. Заболотских², Н. А. Горыня^{3,2}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия²Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия³Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 6 мая 2024 года; после доработки 6 июня 2024 года; принята к публикации 8 июня 2024 года

На основе оригинального варианта метода пульсирующих фотосфер, опирающегося на моделирование изменений эффективной температуры, проведена ревизия физических характеристик уникальной двойной цефеиды V350 Sgr. Используются ранее опубликованные, а также полученные нами новые измерения лучевых скоростей, позволившие уточнить параметры орбиты цефеиды. Выбор значения проекционного фактора $PF = 1.34$ позволил согласовать наши оценки среднего по циклу радиуса $\langle R \rangle_I / R_\odot \approx 41.3-41.9$, светимости $M_V \approx -3^m.52 - -3^m.57$, нормального цвета $(B - V)_0 \approx 0^m.56 \pm 0^m.01$, эффективной температуры $\langle \lg T_{\text{eff}} \rangle_I \approx 3.788 \pm 0.002$, расстояния $D \approx 992 \pm 14$ пк и избытка цвета $E(B - V) \approx 0^m.35 \pm 0^m.01$ с теоретическими эволюционными треками MESA для значения массы $5.1 M_\odot$ и металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18$ dex (или массы $5.2 M_\odot$, $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.10$ dex) и треком PARSEC 2.0 для массы $5.2 M_\odot$, $Z \approx 0.01$. Эволюционный возраст цефеиды, находящейся в фазе третьего пересечения полосы неустойчивости, оценивается в 100 млн лет. Показано, что в каталогах Gaia eDR3/DR3 приведено завышенное примерно на 25% значение расстояния. По функции масс для имеющихся оценок массы цефеиды и спутника впервые определены угол наклона плоскости относительной орбиты $i \approx 53^\circ \pm 3^\circ$ и величины больших полуосей орбит $a_1 \approx 1.63 \pm 0.05$ а.е., $a_2 \approx 3.42 \pm 0.09$ а.е. с размером относительной орбиты около 5 а.е.

Ключевые слова: *звезды: двойные и кратные — звезды: эволюция — звезды: фундаментальные параметры — звезды: отдельные: V350 Sgr*

1. ВВЕДЕНИЕ

Спектрально-двойные цефеиды являются природной лабораторией комплексного исследования популяции молодых массивных звезд и их эволюции, а также процессов звездообразования. Параметры орбит, рассчитанные по лучевым скоростям цефеид, в частности значения функции масс, позволяют сделать динамические оценки масс спутников, а при наличии дополнительных данных о физических характеристиках спутника — даже оценить массы самих цефеид. Наряду с пульсационными оценками радиусов эти данные позволяют существенно уточнить стадию эволюции цефеиды и ее положение в полосе неустойчивости. Очевидно, прояснение эволюционного статуса цефеид в принципе может привести к уточнению параметров зависимостей «период — светимость». Именно по этим причинам спектрально-двойные

цефеиды стали одной из главнейших целей более чем 30-летней кампании массового измерения лучевых скоростей около 160 цефеид северного неба с помощью корреляционного спектрографа ИЛС¹ (Tokovinin, 1987), совместно проведенной ИНАСАН и ГАИШ МГУ. С 1987 по 2022 г. в рамках этой программы измерено более 14 000 лучевых скоростей с характерной точностью около $0.3-0.5 \text{ км с}^{-1}$. Часть результатов опубликована (Gogunya et al., 1992; 1996; 1998), данные последних 20 лет наблюдений будут изданы в ближайшее время.

Орбитальные периоды большинства известных спектрально-двойных цефеид составляют от сотен суток до нескольких лет. Легко понять, что на расстояниях более 1 кпк они выглядят как очень тесные визуально-двойные системы, для раздельного наблюдения компонентов которых необходимы инструменты с угловым разрешением выше миллисе-

*E-mail: alex.rastorguev@gmail.com

¹Измеритель Лучевых Скоростей.

кунды дуги: наземные оптические интерферометры или космические телескопы класса HST, Gaia и JWST. Раздельные наблюдения компонентов дополнительно усложняются большой разницей в блеске между цефеидой (сверхгигантом) и компаньоном, как правило, горячим карликом спектрального класса В–А.

Спектрально-двойная (SB1) цефеида V350 Sgr на протяжении многих лет привлекала и продолжает привлекать внимание исследователей. Ее фотометрическому и спектроскопическому изучению посвящено около 220 работ, полный список которых можно найти в базе данных SIMBAD CDS (Wenger et al., 2000). В этой статье мы упомянем только наиболее существенные работы: в них двойственность цефеиды рассматривается в качестве ключа к определению ее основных физических характеристик и стадии эволюции.

Переменность блеска яркой звезды BD $-20^{\circ} 5253$ (Gaia EDR3 4080122796947250176, HD 173297, V350 Sgr) была открыта по наблюдениям в Симеизской обсерватории В. А. Альбицким, который и отнес ее к классу цефеид (Albitzky, 1930). Спектральная двойственность цефеиды была заподозрена Lloyd Evans (1971) и впоследствии подтверждена Gieren (1981). Первое надежное определение орбитальных параметров V350 Sgr сделали Gogunya et al. (1995) по результатам измерений с ИЛС. Орбитальный период был оценен в $P_{\text{orb}} \approx 1467^{\text{d}}$, что составляет почти в точности четыре года. Именно это обстоятельство объясняет концентрацию всех наземных спектральных измерений к четырем интервалам фаз орбитального движения. Evans and Sugars (1997) на основании всех опубликованных измерений лучевых скоростей уточнили орбитальные параметры V350 Sgr. Более того, они привлекли данные космической ультрафиолетовой обсерватории IUE о спектре спутника цефеиды в диапазоне от 120–200 нм, соответствующем звезде B9.0 V с массой около $2.5 \pm 0.1 M_{\odot}$ или чуть больше, если спутник успел проэволюционировать от начальной главной последовательности (НГП). Наличие данных о массе компаньона предоставляет уникальную возможность наложить ограничения на массу самой цефеиды, что очень важно для уточнения ее эволюционной фазы. Evans et al. (1997), используя данные наблюдений спутника V350 Sgr на HST со спектрографом GHRS в диапазоне 184–188 нм, определили разность его лучевых скоростей в двух орбитальных фазах: она равна $-23.1 \pm 3.8 \text{ км с}^{-1}$. Сравнение этой величины с разностью рассчитанных для тех же орбитальных фаз скоростей самой цефеиды, равной 11 км с^{-1} , привело к оценке ее массы $5.2 \pm 0.9 M_{\odot}$. Попутно проекция скорости

вращения спутника на луч зрения была оценена в 150 км с^{-1} .

Очередное уточнение параметров орбиты V350 Sgr было выполнено Evans et al. (2011) с привлечением новых измерений лучевых скоростей, проведенных в 2005–2009 г. на 2-м телескопе AST² обсерватории Фэрборн университета штата Теннесси (США) с высоким спектральным разрешением ($R \approx 30\,000$). По этим данным $P_{\text{orb}} \approx 1473^{\text{d}} \pm 1^{\text{d}}$, а эксцентриситет орбиты $e \approx 0.37 \pm 0.01$. Была уточнена также оценка массы цефеиды: $5.0 \pm 0.8 M_{\odot}$. С целью дальнейшего уточнения массы цефеиды была подана заявка на спектральные наблюдения спутника цефеиды V350 Sgr на HST со спектрографом STIS в диапазоне 132–151 нм со спектральным разрешением порядка 114 000 в заранее рассчитанных фазах, соответствующих максимальному различию скоростей цефеиды и ее спутника (Evans, 2013). Следует отметить, что в указанном спектральном диапазоне FUV (Far UltraViolet — диапазон дальней ультрафиолетовой области) вклад цефеиды пренебрежимо мал по сравнению со вкладом горячего спутника. Наблюдения были успешно проведены в начале октября 2013 г. и в конце августа 2016 г. Разность скоростей спутника в двух орбитальных фазах, практически близкая к их максимальному различию, составила $-43.0 \pm 1.9 \text{ км с}^{-1}$, и из отношения амплитуд изменения орбитальных скоростей спутника и цефеиды, равного $K \approx 2.1 \pm 0.084$, можно вывести наиболее надежную современную оценку массы V350 Sgr: $M_{\text{сер}} \approx 5.2 \pm 0.3 M_{\odot}$ (Evans et al., 2018).

В 2013 г. Gallenne et al. (2019) провели на интерферометре VLT/PIONIER наблюдения близких спутников ряда цефеид и также подтвердили спектральный класс спутника V350 Sgr B8–9 V, причем по вкладу в поток в полосе *H* его спектральный класс оказался ближе к B9 V. В работах Evans et al. (2016; 2020) приведены результаты поиска возможных более далеких оптических компаньонов 70 цефеид (включая V350 Sgr) по наблюдениям с HST. На угловом расстоянии $3''.1$ от V350 Sgr найдена слабая ($V \approx 16^{\text{m}}8$) звезда спектрального класса K6. Ее параллакс пока не известен; если бы она находилась вблизи цефеиды, то есть на расстоянии около 1 кпк от Солнца, ее минимальная удаленность от цефеиды составила бы примерно 0.01 пк, что существенно меньше среднего межзвездного расстояния 1 пк. В этом случае ее гравитационная связь с цефеидой в принципе была бы вполне вероятной. Kervella et al. (2019) указали, что V350 Sgr со своим компаньоном может входить

²Automatic Spectroscopic Telescope — автоматический спектроскопический телескоп

в состав широкой тройной системы вместе со звездами Gaia EDR3 4080121319521641344 (A2 V) и Gaia EDR3 4080121521343969024 (K4.5 V), находящимися от цефеиды на угловых расстояниях $29''.9$ и $34''.9$ соответственно. Они обе имеют довольно близкие значения параллакса Gaia DR3 (0.980 ± 0.018 и 1.093 ± 0.15 мсд) и компонент собственных движений ($pmRA \approx -1.208 \pm 0.018$ и -1.816 ± 0.14 мсд год $^{-1}$; $pmDE \approx -3.573 \pm 0.015$ и -3.65 ± 0.112 мсд год $^{-1}$ соответственно). Учитывая, что минимальное расстояние между цефеидой и этими звездами составляет примерно 0.15 пк, такую возможность не следует игнорировать.

Для калибровки зависимости «период – светимость» цефеид необходимо знать их надежные расстояния и величину межзвездного поглощения. Отметим, что в каталогах Gaia DR2 (Prusti et al., 2016; Brown et al., 2018) и Gaia eDR3/DR3 (Brown et al., 2021; Vallenari et al., 2023) приведены заметно различающиеся значения тригонометрических параллакса V350 Sgr: 0.9859 ± 0.0472 мсд и 0.7739 ± 0.0606 мсд соответственно. Различаются и вычисленные с учетом систематических ошибок параллакса байесовские наивероятнейшие оценки расстояний до цефеиды: «геометрического» — $r_{\text{geo}}(2018) \approx 988.6_{-44.5}^{+48.8}$ пк (Bailer-Jones et al., 2018); модифицированного «геометрического» — $r_{\text{geo}}(2021) \approx 1239.9_{-86.0}^{+98.8}$ пк и «фотогеометрического» — $r_{\text{pgeo}} \approx 1256.7_{-97.5}^{+87.9}$ пк (Bailer-Jones et al., 2021). Известно, что пятипараметрическая модель изменения координат звезд, используемая при обработке наблюдений Gaia, не учитывает физическую двойственность объектов. Поэтому различие между данными Gaia DR2 и Gaia eDR3/DR3, скорее всего, связано со смещением фотоцентра системы из-за орбитального движения (по оценке Evans et al. (2011), $a \sin i \approx 1.33$ а.е., что на расстоянии цефеиды порядка 1 кпк соответствует периодическому угловому смещению около 1 мсд). Можно предположить, что на выведенные значения астрометрических параметров в каталоге Gaia DR2, основанном на наблюдениях в течение всего лишь 22 месяцев, орбитальное смещение фотоцентра повлияло в меньшей степени по сравнению с каталогом Gaia DR3, основанным на 34 месяцах наблюдений (с учетом того, что орбитальный период составляет четыре года). Косвенным подтверждением этому предположению служит приведенное в каталоге Gaia DR3 значение $RUWE = 2.427$, заметно превышающее рекомендованный «предел надежности» $RUWE = 1.4$, а также относительно большие ошибки компонент собственных движений, составляющие примерно 0.05–0.07 мсд год $^{-1}$. Легко понять, что разность приведенных выше байесовских оценок расстояний, вычисленных по

данным каталогов Gaia DR2 и Gaia eDR3/DR3, соответствует различию истинных модулей расстояния $\Delta(m - M)_0 \approx 0^m 50$; оно недопустимо велико для вывода надежных оценок основных физических параметров и эволюционного статуса V350 Sgr.

В данной работе мы привлекаем дополнительные измерения лучевых скоростей V350 Sgr, в том числе собственные, для уточнения орбитальных параметров цефеиды, ее физических характеристик, фазы эволюции и расстояния. Для этой цели используется разработанный нами модифицированный «температурный» метод определения избытка цвета, среднего радиуса и светимости цефеиды (Rastorguev et al., 2019, 2022; Lazovik and Rastorguev, 2020).

2. ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ И ПАРАМЕТРЫ ОРБИТЫ V350 SGR

Данные об использованных измерениях лучевых скоростей приведены в таблице 1. Общее число измерений, взятых из 11 источников данных, составило 435. Отметим, что ряд измерений под номером 1 включает 58 ранее не опубликованных наших измерений с ИЛС, проведенных в 1998–2016 гг. (см. Приложение). Укажем, что в наших вычислениях некоторые ряды показали заметный систематический сдвиг относительно общего решения и мы внесли в исходные ряды соответствующие поправки; они показаны в четвертом столбце таблицы 1 и учтены в дальнейшем при вычислении параметров орбиты. Мы считаем, что причины систематических отклонений кроются скорее в недоучете систематических ошибок измерений лучевых скоростей, чем в эволюционном изменении периода пульсаций цефеиды (в работе Evans et al. (2011) показано, что соответствующий сдвиг пульсационных фаз для всего ряда наблюдений не превышает 0.006, что пренебрежимо мало). Косвенным подтверждением может служить и тот факт, что смещение и рассеяние показывают современные ряды 5 и 6, а не только «исторические» 8 и 9. В качестве меры рассеяния в пятом и шестом столбцах таблицы 1 приведены среднеквадратичное отклонение (RMS) и робастная характеристика медианного абсолютного отклонения (MAD) (в расчете на одно измерение).

Вычисления параметров орбиты основывались на представлении измеренной лучевой скорости в виде вклада орбитального движения по эллиптической орбите относительно общего центра масс и пульсационного вклада, описываемого тригонометрическим рядом порядка $N = 5$:

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

Таблица 1. Источники данных о лучевых скоростях цефеиды V350 Sgr. В столбцах (1), (2) и (3) приведены соответственно номер ряда, число наблюдений и интервал JD; столбец (4) содержит поправки для учета систематического сдвига, столбцы (5) и (6) — среднеквадратичное отклонение и медианное абсолютное отклонение (подробнее см. в тексте); (7) — ссылка

Номер ряда	Число измерений	JD – 2400000	Поправка, км с ⁻¹	RMS, км с ⁻¹	MAD, км с ⁻¹	Источник данных
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	111 58	47370–57655	–	1.03	0.61	Gorynya et al. (1992; 1996; 1998) Эта работа*
2	24	54 302–54 633	–	1.01	0.45	Groenewegen (2013)
3	40	48 761–49 942	–	1.19	0.87	Evans and Sugars (1997)
4	17	50 683–51 391	–0.7	0.48	0.24	Pettersen et al. (2004)
5	6	56 877–56 910	–3.7	4.03	1.07	Gallenne et al. (2019)
6	19	56 399–57 198	–4.0	0.54	0.42	Gallenne et al. (2019)
7	22	40 353–40 828	+2.1	2.64	1.10	Lloyd Evans (1980)
8	22	44 415–44 428	+2.0	2.65	2.26	Gieren (1981)
9	12	44 060–44 892	–5.3	4.25	3.28	Barnes et al. (1988)
10	1	55 085	–	–	1.09	RAVE DR6 (Steinmetz et al., 2020)
11	103	53 416–55 129	–	0.47	0.32	Evans et al. (2011)

* Новые данные ИЛС (см. Приложение).

Здесь A_k , B_k — амплитуды гармоник (приведены в таблице 2 для решения, полученного только по рядам с номерами 1 и 11), P_{pls} — период пульсаций, t_i — момент времени наблюдений. Поскольку основной вклад в объем данных в нашей работе вносят ряды наиболее точных наблюдений под номерами 1 и 11 (более 270 измерений), как и в статье Evans et al. (2011), значение периода пульсаций, равное $P_{\text{pls}} = 5^{\text{d}}15425024$, мы взяли из упомянутой публикации. Начальная фотометрическая эпоха $t_0 = \text{JD } 2450003.52$ выбрана для удобства восприятия так, чтобы в фазе $\Phi_{\text{pls}} = 0$ пульсационная скорость $v_{\text{pls}} = 0$ (см. рис. 1).

Для экономии времени вычислений мы использовали простой прием, состоящий в делении всех определяемых параметров на «нелинейные» и «линейные». К числу «нелинейных» неизвестных относятся момент прохождения через перигеум орбиты T_0 , орбитальный период P_{orb} , эксцентриситет e и долгота линии узлов Ω . Все остальные параметры — амплитуда орбитальной скорости K , скорость центра масс v_γ и коэффициенты тригонометрического разложения (A_i, B_i) — входят в задачу линейно. Для минимизации целевой функции в подобных задачах обычно используют один из алгоритмов нелинейной оптимизации (градиентный спуск, метод деформируемых многогранников и т. д.), выполняющих «перебор» пробных значений

Таблица 2. Коэффициенты разложения пульсационной кривой для эпохи $t_0 = \text{JD } 2450003.52$ и периода пульсаций $P_{\text{pls}} = 5^{\text{d}}15425024$

Гармоника k	A_k	B_k
1	+15.14146	–0.45043
2	–5.82615	+0.37572
3	+2.95992	+0.21552
4	–1.45857	–0.25309
5	+0.65301	+0.27445

параметров по определенным правилам. Наш прием состоит в том, что на каждой такой итерации по «нелинейным» неизвестным все остальные параметры задачи находятся путем минимизации невязки при мгновенных (зафиксированных на текущей итерации) значениях этих «нелинейных» параметров с использованием простого метода наименьших квадратов, который во многих современных вычислительных средах реализован в виде решения линейного матричного уравнения. Данный прием хорошо зарекомендовал себя в многопараметрических задачах моделирования.

Результаты расчета параметров орбиты и их ошибок по всем 11 рядам наблюдений, а также только по наиболее длинным рядам под номерами 1 и 11, приведены в таблице 3. В последней строке

таблицы 3 приводится среднеквадратичное отклонение от общего решения для каждого варианта вычислений. Сравнение полученных в данной работе результатов определения параметров орбиты V350 Sgr с наилучшими определениями Evans et al. (2011) (см. таблица 3, четвертый столбец) показывает, что использование дополнительных наблюдений не привело к значительным различиям. Отметим только, что новое решение для рядов наблюдений 1 и 11 (в совокупности 272 измерения) обладает примерно на 25% меньшим рассеянием по сравнению с решением Evans et al. (2011). Решения по всем рядам наблюдений и решение по рядам 1 и 11 показывают неплохое общее согласие для всех параметров.

3. ФОТОМЕТРИЯ, ИЗБЫТОК ЦВЕТА И ПУЛЬСАЦИОННЫЙ РАДИУС V350 Sgr

Для определения пульсационного радиуса цефеиды мы использовали модифицированный метод моделирования кривой блеска Balona (1977) и разработанный нами «температурный» метод (Rastorguev et al., 2022). В отличие от метода поверхностной яркости, предложенного Barnes and Evans (1976) и Barnes et al. (1978), простой метод Balona (1977) с разложением по наблюдаемому показателю цвета до второго–третьего порядка не требует предварительного исправления фотометрических данных за покраснение и поглощение света и в этом смысле является робастным, если речь идет об оценке радиусов. «Температурный» метод (Rastorguev et al., 2022) в дополнение к фотометрии использует мультифазные измерения эффективной температуры, цветовые калибровки эффективной температуры и болометрической поправки и позволяет сделать независимую оценку избытка цвета, светимости и расстояния до цефеиды. В частности, тот же метод был использован для калибровки зависимости «период – светимость» (Lazovik and Rastorguev, 2020).

В нашем распоряжении оказалось 145 измерений блеска в полосах B , V и I , взятых из базы данных Л. Н. Бердникова (см. ссылки в Evans et al., 2011) в интервалах дат, квазисинхронных с измерениями лучевых скоростей (Следует отметить, что вызванный эволюционными изменениями периода сдвиг фаз между рядами фотометрических и спектральных наблюдений может привести к значительным систематическим ошибкам в оценке радиуса Sachkov et al., 1998). Кроме того, мы сделали попытку использовать 26 измерений блеска в полосах G , BP , RP из каталога Gaia DR3.

3.1. Избыток цвета, модуль расстояния и учет вклада спутника

Перед использованием фотометрических данных для решения основной задачи следует предварительно исправить их за вклад компаньона цефеиды, который предположительно является звездой спектрального класса $B8.5V$ – $B9V$ (Evans et al., 2018; Gallenne et al., 2019) с $T_{\text{eff}} \approx 10\,700$ – $11\,000$ К. Для этого необходимо знать предварительную оценку расстояния, избыток цвета и абсолютные величины спутника. По калибровке « $T_{\text{eff}} - M_V$ » из работы Torres et al. (2010), основанной на результатах наблюдений оптических двойных систем, можно найти нижнюю оценку светимости компаньона $M_V \approx +1^m0 \pm 0^m2$, если допустить, что он находится вблизи НГП на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. Мы оценили абсолютные величины спутника в разных полосах по калибровкам, опубликованным частично Pesaft and Matajek (2013) и более детально в регулярно обновляемой базе данных Matajek (2022). Взятые из этих источников данные об абсолютных величинах звезд спектральных классов $B8V$, $B9V$ приводятся в таблице 4. Для вычитания вклада спутника в разные цветовые полосы нужно оценить его видимую величину с учетом расстояния до него и поглощения света.

Оценки избытка цвета V350 Sgr довольно многочисленны. Так, в базе данных Fernie et al. (1995; 1997) приведено семь значений $E(B - V)$ в интервале 0^m31 – 0^m38 со средневзвешенной величиной $0^m328 \pm 0^m009$. С ней согласуются оценки из работ Tammann et al. (2003), Laney and Caldwell (2007), Kovtyukh et al. (2008), Turner (2016), Madore et al. (2017), Trahin et al. (2021) (список не полон). Типичное для цефеид рассеяние оценок, достигающее $\pm 0^m03$, отражает различие использованных методов определения избытков цвета. Все они находятся в неплохом согласии с данными 3D-карты покраснения Stilism³ (Lallement et al., 2014, 2019; Capitanio et al., 2017), где для расстояния 1 кпк дается значение $E(B - V) \approx 0^m32 \pm 0^m03$, которое мы и примем для предварительного учета вклада спутника.

Определим правдоподобное значение расстояния до цефеиды, необходимое для учета вклада спутника. Средняя по потоку видимая звездная величина составила $\langle V \rangle_I \approx 7^m48$, а средний показатель цвета — $\langle B - V \rangle_I \approx 0^m88$. Оценки истинного модуля расстояния, сделанные на основе приведенных в разделе 1 байесовских оценок расстояний Bailer-Jones et al. (2018; 2021), составляют соответственно $(m - M)_0 \approx 9^m97 \pm 0^m02$ (DR2)

³<https://stilism.obspm.fr/> последнее обновление 19 марта 2018 г.

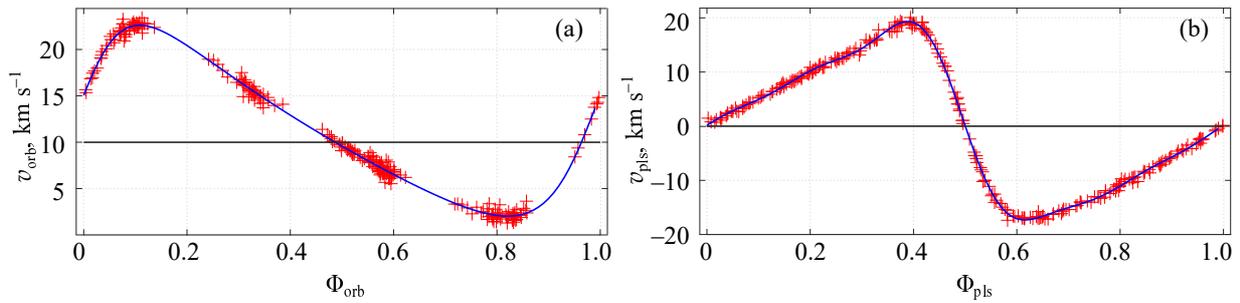


Рис. 1. Графики орбитального (а) и пульсационного (б) вкладов в лучевую скорость для решения, полученного по рядам наблюдений 1 и 11. Φ_{orb} и Φ_{pls} — соответственно орбитальная и пульсационная фазы. Сплошные синие линии — точное решение. Горизонтальная линия на верхней панели — уровень системной скорости v_γ . Красными крестами показаны индивидуальные измерения (остаточное отклонение от модельной скорости поровну делилось между орбитальным и пульсационным вкладами).

Таблица 3. Параметры орбиты V350 Sgr

Параметры	Варианты		
	Все ряды	Только 1 + 11	Evans et al. (2011)
$T_0(\text{JD} - 2400000)$	50550.53 ± 11.38	50551.13 ± 6.93	50526.63 ± 6.60
P_{orb} , сут	1468.14 ± 0.94	1468.42 ± 1.56	1472.91 ± 1.33
e	0.352 ± 0.009	0.352 ± 0.010	0.369 ± 0.011
Ω , рад	4.97 ± 0.02	4.98 ± 0.02	4.87 ± 0.03
K , км с ⁻¹	10.42 ± 0.08	10.30 ± 0.08	10.59 ± 0.10
v_γ км с ⁻¹	11.51 ± 0.06	11.35 ± 0.07	11.36 ± 0.07
$f(M)$, M_\odot	0.1412 ± 0.0037	0.1366 ± 0.0037	0.146 ± 0.005
$a_1 \sin i$, а.е.	1.3164 ± 0.0114	1.3019 ± 0.0117	1.33 ± 0.014
RMS, км с ⁻¹	1.464	0.850	1.161

Таблица 4. Калибровки абсолютной величины спутника цефеиды V350 Sgr, определенные по данным работы Matajek (2022), и отношения поглощений A_λ/A_V (Cardelli et al., 1989; Wang and Chen, 2019)

Параметры	Варианты		
	B8 V	B9 V	A_λ/A_V
M_B	-0.109	+0.430	1.317
M_V	0.00	+0.500	1.000
M_I	+0.108	+0.561	0.483
M_G	-0.01	+0.515	0.789
M_{BP}	—	+0.431	1.002
M_{RP}	—	+0.551	0.589

и $(m - M)_0 \approx 10^{\text{m}}48 \pm 0^{\text{m}}05$ (DR3). Для «стандартного» значения $R_V = 3.1$ и избытка цвета

$E(B - V) \approx 0^{\text{m}}32$ получаем оценки абсолютной величины V350 Sgr $\langle M_V \rangle_I \approx -3^{\text{m}}49$ (DR2) и $\langle M_V \rangle_I \approx -4^{\text{m}}00$ (DR3). Последняя оценка, безусловно, приводит к сильно завышенной светимости по сравнению с предсказаниями зависимости «период — светимость»; она скорее соответствует цефеиде с периодом 9–10 суток. Применяв, например, зависимость «период — светимость — нормальный цвет»

$$M_V = -4.18(\lg P_{\text{pls}} - 1.0) + 3.84(B - V)_0 - 6.75,$$

выведенную Madore et al. (2017), получим для $(B - V)_0 \approx 0^{\text{m}}56$ и $E(B - V) \approx 0^{\text{m}}32$ оценку $\langle M_V \rangle_I \approx -3^{\text{m}}42$ (очевидно, для предварительной оценки светимости цефеиды вкладом гораздо более слабого спутника с $M_V \approx 0^{\text{m}} - 0^{\text{m}}5$ можно было пренебречь).

Можно утверждать, что в пределах сделанных нами допущений предсказываемая оценка светимости V350 Sgr лучше согласуется с нашей оцен-

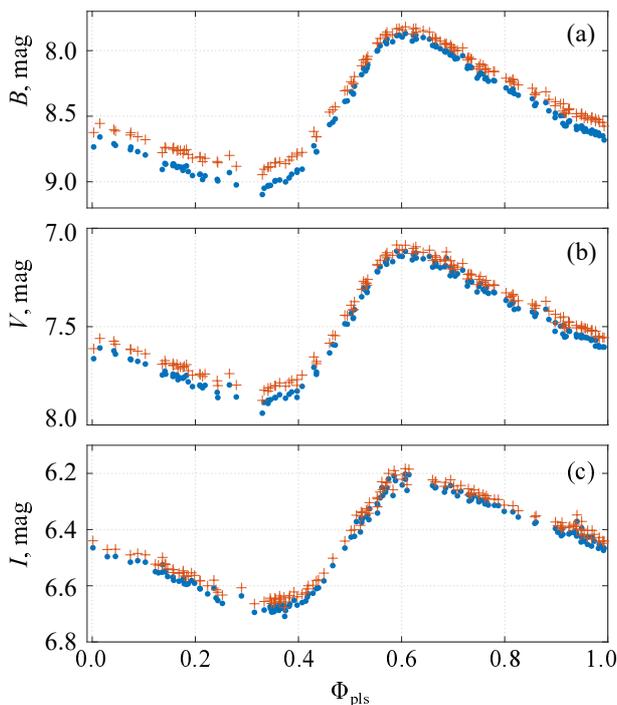


Рис. 2. Скорректированные кривые блеска в полосах B, V, I (голубые точки) для спутника B8 V; оранжевые кресты — исходные данные. Отсчет пульсационной фазы от $t_0 = \text{JD } 2\,450\,003.52$. Учет вклада спутника увеличивает амплитуду изменения блеска и показателя цвета. Для спутника B9 V коррекция блеска и цвета несколько меньше, чем для B8 V.

кой светимости на основе параллакса Gaia DR2 и, безусловно, отвергает оценку расстояния в каталоге Gaia DR3. Это дает нам основание вычесть вклад спутника в суммарный видимый блеск системы, приняв предварительное значение $(m - M)_0 \approx 9^{\text{m}}97$. Необходимые значения отношений поглощения A_λ/A_V приведены в третьем столбце таблицы 4. Для A_I использовано значение из классической работы Cardelli et al. (1989), в то время как для поглощения в остальных полосах — из недавней работы Wang and Chen (2019). Поскольку для вычислений пульсационного радиуса следует использовать оригинальные фотометрические ряды, мы на основании данных из таблицы 4 вначале вычислили неисправленный за поглощение видимый блеск спутника во всех указанных полосах по очевидной формуле $V_\lambda \approx M_\lambda + A_\lambda + (m - M)_0$ для истинного модуля расстояния, равного $(m - M)_0 \approx 9^{\text{m}}97$ (DR2). Путем перевода звездных величин в относительные потоки, вычитания вклада спутника и обратного перевода в шкалу звездных величин были получены скорректированные кривые блеска. Для полос B, V, I коррекция проведена в двух вариантах: для спутников B8 V и B9 V, а для полос Gaia — только

для спутника B9 V. Примеры коррекции данных в полосах B, V, I показаны на рис. 2. Разумеется, для спутника B9 V величины коррекции несколько меньше.

Дополнительно для оценки светимости спутника мы использовали данные эволюционных расчетов для звезды $2.5 M_\odot$, $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18 \text{ dex}$, $v_{\text{rot}} = 0.4v_{\text{cr}}$ (MIST, Dotter, 2016) для типичного значения возраста цефеиды с периодом 5 суток, составляющего примерно 100 млн лет. Светимость спутника во всех полосах оказалась примерно на $0^{\text{m}}5$ слабее по сравнению с данными для звезды B9 V в таблице 4. Отдавая себе отчет в том, что фотометрические данные на треках основаны на целом ряде калибровок эффективной температуры и болометрической поправки и не являются вполне независимыми, мы отмечаем, что реальный вклад спутника в суммарный блеск в действительности может быть даже несколько меньше, чем для звезды B9 V. Результаты расчетов для этого случая приведены в таблице 5 и обсуждаются ниже.

3.2. Выбор значения проекционного фактора PF

Переход от лучевых скоростей к скорости пульсирующей оболочки производится по формуле $dR/dt = -PF v_r(\text{pls})$, где PF — так называемый проекционный фактор. Его значение определяется коэффициентом потемнения к краю лимба звезды и должно зависеть от эффективной температуры, следовательно, от пульсационного периода. Подходы к калибровке PF , опирающиеся на интерферометрические измерения радиусов и наблюдения цефеид с надежно определенными расстояниями (в том числе цефеид БМО), обсуждались во многих работах с весьма противоречивыми результатами. Так, в работах Storm et al. (2011a,b), Groenewegen (2013), Trahin et al. (2021) выводятся весьма сильные зависимости PF от периода. Напротив, в работах Groenewegen (2007), Nardetto et al. (2007, 2009) и более поздних работах Breifelder et al. (2016), Gallenne et al. (2017), Kervella et al. (2017) рассматриваются варианты существенно более слабой зависимости PF от периода и указывается, что все оценки согласуются с единым средним значением PF , заключенным в интервале 1.28–1.36 с заметным рассеянием, требующим дальнейшего изучения. Во всех указанных работах делается вывод о малой зависимости PF от химического состава. Для цефеид с периодом около пяти суток за вычетом нижней $PF \approx 1.25$ (Nardetto et al., 2009) и верхней $PF \approx 1.42$ (Storm et al., 2011a) оценок можно принять значение $PF \approx 1.32$ –1.34. Дальнейшие расчеты проведены в двух указанных вариантах.

Таблица 5. Результаты вычислений: данные для спутника взяты из эволюционного трека Dotter (2016) звезды $2.5 M_{\odot}$ для возраста 100 млн лет

Параметры	$V, (B - V)$	
	$PF = 1.32$	$PF = 1.34$
(1)	(2)	(3)
$\langle R \rangle / R_{\odot}$	42.8 ± 1.1	43.5 ± 1.1
$\langle R \rangle_I / R_{\odot}$	40.7 ± 1.1	41.3 ± 1.1
$E(B - V), \text{mag}$	0.33 ± 0.01	0.33 ± 0.01
$\langle M_{\text{bol}} \rangle_I, \text{mag}$	-3.56 ± 0.03	-3.59 ± 0.03
$\langle M_V \rangle_I, \text{mag}$	-3.49 ± 0.03	-3.52 ± 0.03
$(B - V)_0, \text{mag}$	0.571 ± 0.01	0.571 ± 0.01
$\langle \lg T_{\text{eff}} \rangle_I, [\text{K}]$	3.786 ± 0.003	3.786 ± 0.003
$D, \text{пк}$	979 ± 14	993 ± 15

3.3. Эффективная температура и $[\text{Fe}/\text{H}]$

В расчетах параметров цефеид мы используем предложенный нами метод моделирования мультифазных изменений эффективной температуры с использованием цветовой калибровки T_{eff} (Rastorguev et al., 2022):

$$\begin{aligned} \lg T_{\text{eff}} = & 3.88 - 0.20(B - V)_0 + 0.026(B - V)_0^2 \\ & + 0.009 \lg g - 0.010(B - V)_0 \lg g \\ & - 0.051[\text{Fe}/\text{H}] + 0.051(B - V)_0[\text{Fe}/\text{H}], \end{aligned}$$

выведенной нами по нормальным цветам более чем 35 цефеид с общим числом измерений T_{eff} свыше 400, взятых из работы Luck (2018). Для определения нормальных цветов в качестве первого шага мы использовали цветовые калибровки Flower (1996) и Bessell et al. (1998), которые ранее продемонстрировали наилучшее описание кривых блеска при их моделировании обобщенным методом Valona (1977). Далее по уточненным нормальным цветам $(B - V)_0$ и значениям $\lg g$, вычисленным с использованием предварительных оценок масс цефеид, удалось вывести новую цветовую калибровку $\lg T_{\text{eff}}$ для цефеид и сверхгигантов спектральных классов F, G и K. Указанная калибровка, как показано в Rastorguev et al. (2019; 2022), прекрасно воспроизводит мультифазные измерения T_{eff} .

Суть температурного метода сводится к подбору такого значения избытка цвета $E(B - V)$, которое обеспечивает наилучшее согласие измеренных и предвычисленных с помощью указанной выше калибровки значений T_{eff} для всех фаз пульсаций с имеющимися измерениями температуры. Из-за

высокой чувствительности предвычисленной температуры к нормальному показателю цвета с ее помощью удастся оценить избыток цвета с характерной точностью около $\delta E(B - V) \approx 0^{\text{m}}01$. По освобожденным от покраснения цветам, текущим значениям радиуса и калибровкам болометрической поправки (Flower, 1996) рассчитывались кривые изменения абсолютных величин M_{bol} и M_V .

Единственная обширная сводка всех определенных мультифазных температур цефеид, содержащая 1127 оценок T_{eff} , выведенных методом LDR (Line Depth Ratio) для 435 цефеид, опубликована в работе Luck (2018). Для V350 Sgr в ней имеется всего одно определение: $T_{\text{eff}} \approx (5567 \pm 37) \text{ K}$ (JD 2452932.56244). Второе измерение было найдено в каталоге RAVE DR6 (Steinmetz et al., 2020): $T_{\text{eff}} \approx (5731 \pm 243) \text{ K}$ (JD 2455085.90694). Сделанные в этих работах спектроскопические оценки поверхностного ускорения силы тяжести составляют $\lg g \approx 1.90, 1.80$ соответственно. В каталоге Gaia DR3 приводится средняя оценка $T_{\text{eff}} \approx 5797_{-35}^{+18} \text{ K}$, не привязанная к конкретной дате.

Наша цветовая калибровка T_{eff} является также функцией $[\text{Fe}/\text{H}]$ и $\lg g$, причем значение $\lg g$ в каждой фазе вычисляется программно по принятой величине массы (примерно $5.1\text{--}5.2 M_{\odot}$) и текущему значению радиуса. Для V350 Sgr мы приняли оценку $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.18 \pm 0.02 \text{ dex}$, взятую из каталогов Gaia DR3 (Vallenari et al., 2023) и RAVE DR6 (Steinmetz et al., 2020). Она сильно отличается от приводимых значений из других работ: $[\text{Fe}/\text{H}] \approx +0.15 \text{ dex}$ (Luck, 2018) и $[\text{Fe}/\text{H}] \approx +0.24 \pm 0.10 \text{ dex}$ (da Silva et al., 2023).

4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС V350 SGR

В таблице 6 приведены варианты расчетов основных параметров цефеиды V350 Sgr — радиуса (среднего $\langle R \rangle$) и соответствующего среднему потоку $\langle R \rangle_I$, избытка цвета $E(B - V)$, средней по потоку абсолютной величины $\langle M_V \rangle_I$, нормального показателя цвета $(B - V)_0$, эффективной температуры $\langle \lg T_{\text{eff}} \rangle_I$ и расстояния D (для спутников B8 V и B9 V и $PF = 1.32, 1.34$ и разных сочетаний цветов). Полный набор параметров определен только для блеска V и цвета $(B - V)$, в то время как для остальных цветовых полос получены только предварительные оценки радиуса, поскольку для них пока нет столь же надежных цветовых калибровок T_{eff} . Приводимые в таблице 6 ошибки светимости и расстояния оценены путем варьирования значения избытка цвета в пределах $\delta E(B - V) \approx 0^{\text{m}}01$ (что является реальным пределом чувствительности температурной кривой, предвычисленной по

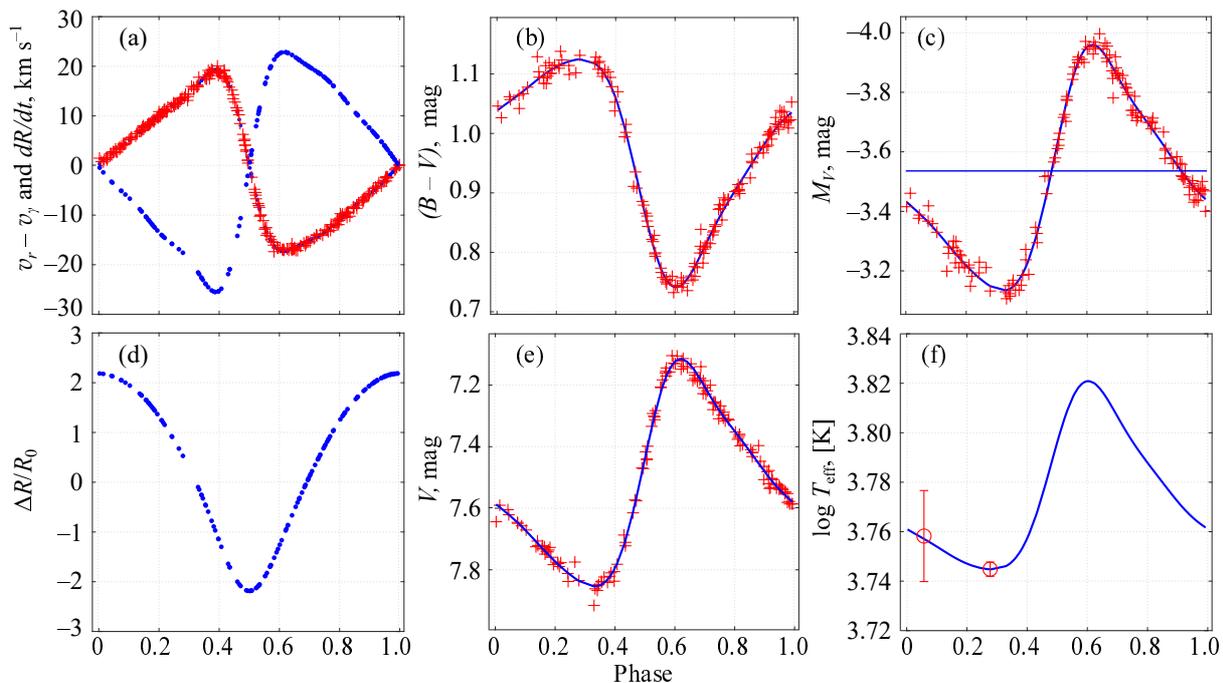


Рис. 3. Результаты расчета параметров V350 Sgr для $PF = 1.32$, спектрального класса спутника B9 V и $E(B - V) = 0^m35$. Зависимость параметров от фазы пульсаций: (a) — пульсационный вклад в лучевую скорость (красные кресты) и скорость пульсаций оболочки (синие точки); (b) — показатель цвета $(B - V)$: исходные данные (красные кресты) и сглаженная кривая (синяя линия); (c) — абсолютная величина M_V , рассчитанная по ΔR , T_{eff} и болометрической поправке $BC(V)$: для индивидуальных наблюдений (красные кресты) и для модельной кривой блеска (синяя линия), горизонтальная линия — уровень средней по потоку $\langle M_V \rangle_I$; (d) — изменение радиуса; (e) — кривая блеска V : исходные данные (красные кресты) и модельная кривая (синяя линия), полученная методом Balona (1977); (f) — T_{eff} : наблюдения (красные кружки) и модельная кривая (синяя линия), рассчитанная по калибровке из статьи Rastorguev et al. (2022).

нашей калибровке) и представляют собой скорее оценку снизу. Значение расстояния получено в предположении «стандартного» закона поглощения с $R_V = A_V/E(B - V) = 3.1$, поскольку нет никаких априорных данных об отклонении закона поглощения от «стандартного» в изучаемой области. Возможная величина погрешности поглощения из-за неточности принимаемого значения R_V полностью перекрывается влиянием погрешностей в $E(B - V)$.

Использованные в расчетах наблюдаемые данные (кривые лучевой скорости, блеска и цвета), а также рассчитанные нами кривые изменения радиуса ΔR , температуры T_{eff} и абсолютной величины M_V для одного из вариантов расчетов показаны на рис. 3. Оценка избытка цвета опирается на измерения T_{eff} всего в двух пульсационных фазах. Однако опыт применения нашего метода к цефеидам с множественными измерениями температур свидетельствует о надежности рассчитанной температурной кривой. Разумеется, для окончательного уточнения физических характеристик цефеиды крайне необходимы дополнительные измерения T_{eff} . На рис. 3e видно прекрасное согласие наблюдаемой кривой блеска с модельной, полученной с помощью наше-

го обобщения метода Balona (1977) с разложением третьего порядка по степеням $(B - V)$; метод детально описан в работе Rastorguev et al. (2022). На основании температурной кривой, показанной на рис. 3f, а также кривой изменения радиуса вычислена кривая абсолютного блеска M_V , его среднее по циклу значение $\langle M_V \rangle_I$, нормальный показатель цвета $(B - V)_0$ и другие параметры, приведенные в таблице 6. Отметим относительно небольшую амплитуду изменения радиуса V350 Sgr, составляющую всего $\pm 2 R_\odot$ (около 5% от среднего радиуса).

Как видно из таблицы 6, значения усредненных по пульсационному циклу радиусов $\langle R \rangle_I$ для всех четырех вариантов расчетов по данным BV-фотометрии различаются не более чем на 4%. Вычисленные нами значения среднего радиуса $\langle R \rangle$ в целом согласуются с приведенной в каталоге Gaia DR3 величиной $45.4\text{--}46.4 R_\odot$, оцененной на основе фотометрии и спектроскопии низкого разрешения (BP, RP) с помощью модуля Gaia APSIS, а также с результатами интерферометрических измерений Gallenne et al. (2019) в ИК-диапазоне (около $50 R_\odot$). Мы считаем, что наиболее предпочтительный вариант в наших расчетах относится к спутнику B9 V с $PF = 1.34$;

Таблица 6. Результаты вычислений (данные для спутника с параметрами, взятыми из калибровок Matajek (2022) для B8 V и B9 V)

Параметры	Варианты	
	B8 V	B9 V
$V, (B - V); PF = 1.32$		
$\langle R \rangle / R_{\odot}$	44.4 ± 1.2	43.4 ± 1.2
$\langle R \rangle_I / R_{\odot}$	42.3 ± 1.2	41.3 ± 1.2
$E(B - V), \text{mag}$	0.38 ± 0.01	0.35 ± 0.01
$\langle M_{\text{bol}} \rangle_I, \text{mag}$	-3.67 ± 0.03	-3.60 ± 0.03
$\langle M_V \rangle_I, \text{mag}$	-3.61 ± 0.03	-3.54 ± 0.03
$\langle B - V \rangle_0, \text{mag}$	0.549 ± 0.01	0.562 ± 0.01
$\langle \lg T_{\text{eff}} \rangle_I, [\text{K}]$	3.790 ± 0.003	3.788 ± 0.003
$D, \text{пк}$	975 ± 14	977 ± 14
$V, (B - V); PF = 1.34$		
$\langle R \rangle / R_{\odot}$	45.1 ± 1.2	44.1 ± 1.2
$\langle R \rangle_I / R_{\odot}$	42.9 ± 1.2	41.9 ± 1.2
$E(B - V), \text{mag}$	0.38 ± 0.01	0.35 ± 0.01
$\langle M_{\text{bol}} \rangle_I, \text{mag}$	-3.70 ± 0.03	-3.61 ± 0.03
$\langle M_V \rangle_I, \text{mag}$	-3.64 ± 0.03	-3.57 ± 0.03
$\langle B - V \rangle_0, \text{mag}$	0.549 ± 0.01	0.562 ± 0.01
$\langle \lg T_{\text{eff}} \rangle_I, [\text{K}]$	3.790 ± 0.003	3.788 ± 0.003
$D, \text{пк}$	990 ± 14	992 ± 14
$V, (V - I); PF = 1.34$		
$\langle R \rangle / R_{\odot}$	50.5 ± 1.3	50.1 ± 1.3
$\langle R \rangle_I / R_{\odot}$	48.3 ± 1.3	47.9 ± 1.3
$RP, (BP - RP); PF = 1.34$		
$\langle R \rangle / R_{\odot}$	—	57.3 ± 10.5
$\langle R \rangle_I / R_{\odot}$	—	55.0 ± 10.5

он дает более правдоподобное значение избытка цвета $E(B - V) = 0^{\text{m}}35$, как и вариант в таблице 5 для более слабого спутника (см. раздел 3.1). Определенные нами значения среднего радиуса находятся в прекрасном согласии с зависимостями «период – радиус» (Sachkov, 2002; Groenewegen, 2007; Molinaro et al., 2011 и др.). При этом M_V для V350 Sgr хорошо согласуется с зависимостью «период – светимость» (Molinaro et al., 2011), выведенной с $PF = 1.37$. Полученное нами значение избытка цвета $E(B - V) = 0^{\text{m}}35$ находится

в общем согласии с большинством имеющихся оценок и данными 3D-карты поглощения Stilism¹ (Lallement et al., 2014, 2019; Capitanio et al., 2017).

Результаты расчетов по данным фотометрии в полосах V и I , а также немногочисленным данным в полосах BP и RP приводят к заметно большему значению радиуса, причем в последнем случае они обладают значительной ошибкой. Причины систематических расхождений требуют отдельного обсуждения. Выскажем следующее соображение. В случае ИК-фотометрии расхождение может быть связано с разной оптической глубиной и температурой слоев, «ответственных» за поток излучения в длинноволновых полосах и за формирование спектральных линий в более коротковолновом спектральном диапазоне измерения лучевых скоростей (B, V). Следовательно, измерения лучевой скорости в диапазоне 305–600 нм отражают движение слоев, формирующих излучение в видимой области, а не в ИК-диапазоне. Устранить расхождение возможно при использовании разных значений PF для фотометрии в оптическом диапазоне и ближнем ИК.

Сравнение результатов наших вычислений с эволюционными треками MESA, рассчитанными для массы цефеиды $5.2 M_{\odot}$ и четырех значений $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18, -0.10, 0.0, +0.15$, а также для массы $5.1 M_{\odot}$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18 \text{ dex}$, показано на рис. 4. Красный эллипс — рассчитанный нами пульсационный петлеобразный трек цефеиды; отмеченная на нем красная окружность указывает на параметры звезды, вычисленные для фазы $\Phi_{\text{pls}} = 0.481$, соответствующей среднему потоку излучения. Очевидно, что значения всех параметров в этой пульсационной фазе и следует сравнивать с результатами эволюционных расчетов для звезд без пульсаций.

Возрастание пульсационного периода V350 Sgr (Evans et al., 2011) означает, что цефеида должна находиться на стадии третьего пересечения полосы нестабильности и двигаться вдоль верхней ветви эволюционной петли в область более низких температур. Можно утверждать, что полученные нами методом пульсирующих фотосфер оценки физических характеристик цефеиды лучше всего согласуются с эволюционными расчетами MESA для звезды с массой $5.1 M_{\odot}$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18 \text{ dex}$ (черная штриховая линия на рис. 4). Заметим, что трек звезды с массой $5.2 M_{\odot}$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18 \text{ dex}$ лежит явно выше, но для более высокой металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.10 \text{ dex}$ он столь же хорошо согласуется с рассчитанными нами параметрами звезды (розовая штриховая линия, практически совпадающая с черной штриховой линией в области высокотемпературной петли). Поэтому, с учетом погрешностей наших оценок всех параметров

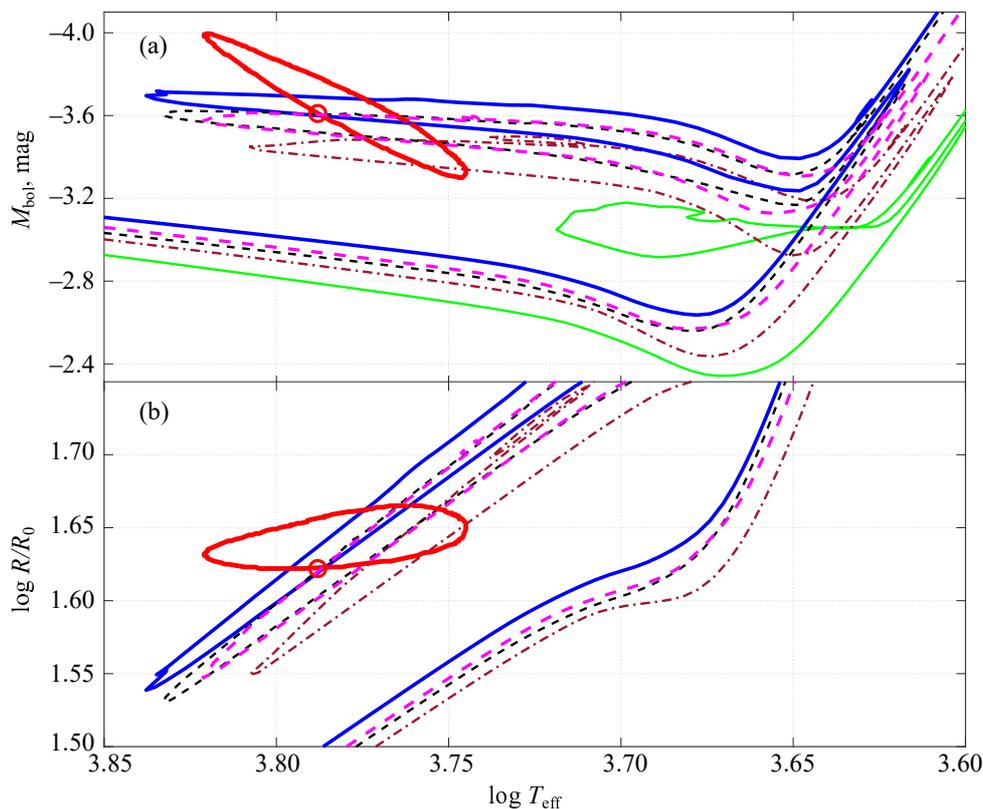


Рис. 4. Эволюционный статус цефеиды V350 Sgr. Сплошная синяя линия — эволюционный трек MESA (Dotter, 2016), рассчитанный для звезды с массой $5.2 M_{\odot}$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18$ dex. Штриховая черная линия и почти совпадающая с ней штриховая розовая линия — треки для звезд с массами $5.1 M_{\odot}$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18$ dex и $5.2 M_{\odot}$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.10$ dex соответственно. Штрихпунктирной коричневой и сплошной зеленой линиями для сравнения показаны треки для звезды с массой $5.2 M_{\odot}$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.00, +0.15$ dex соответственно. Красный эллипс — рассчитанный нами пульсационный «трек» цефеиды в пространстве координат $(\lg T_{\text{eff}}, M_{\text{bol}}, \lg R/R_{\odot})$. Красная окружность соответствует средним по потоку излучения значениям параметров и ассоциируется с положением устойчивой по отношению к пульсациям звезды на эволюционном треке. Расчеты проведены по нашей методике для полос B, V с принятым значением проекционного фактора $PF = 1.34$ для спутника спектрального класса B9 V (столбец (3) таблицы 6). Панель (a) — диаграмма « $\lg T_{\text{eff}} - M_{\text{bol}}$ », панель (b) — « $\lg T_{\text{eff}} - \lg R/R_{\odot}$ ». Положение звезды на эволюционных треках соответствует возрасту примерно 100 млн лет в фазе третьего пересечения полосы неустойчивости.

и неизбежных неточностей в результатах эволюционных расчетов, не исключается масса цефеиды около $5.2 M_{\odot}$ с $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.1$ dex. В подтверждение этого следует отметить, что эволюционный трек Падуанской группы PARSEC 2.0 (Costa et al., 2019a; b; Nguyen et al., 2022), рассчитанный для массы $5.2 M_{\odot}$ и $Z \approx 0.01$, столь же хорошо описывает положение V350 Sgr на диаграммах « $\lg T_{\text{eff}} - M_{\text{bol}} - \lg R/R_{\odot}$ ». Чтобы не загромождать рис. 4, этот трек не приводится.

Для случаев $[\text{Fe}/\text{H}] \geq 0.0$ эволюционные отклонения в сторону высоких температур на стадии термоядерного «горения» гелия, как можно видеть, имеют явно недостаточную протяженность и совершенно не согласуются с рассчитанными нами изменениями светимости, температуры и радиуса. Эволюционные треки для звезды с массой $5.2 M_{\odot}$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = 0.0, +0.15$ dex на рис. 4 показаны соответственно штриховой коричневой и сплошной

зеленой линиями. На этом основании, безусловно, следует отвергнуть оценку $[\text{Fe}/\text{H}] = +0.15$ dex, опубликованную Luck (2018).

Наши расчеты параметров V350 Sgr, выполненные методом пульсирующих фотосфер, немного уменьшают полученную в работе Evans et al. (2018) динамическую оценку массы цефеиды $5.2 \pm 0.3 M_{\odot}$ и, судя по виду эволюционных треков на диаграммах « $\lg T_{\text{eff}} - M_{\text{bol}}$ » и « $\lg T_{\text{eff}} - \lg g$ », ограничивают интервал возможных оценок массы диапазоном $5.1 - 5.2 M_{\odot}$. Выведенное нами расстояние $D \approx 992 \pm 14$ пк прекрасно согласуется с байесовской оценкой r_{geo} (2018) $\approx 988.6^{+48.8}_{-44.5}$ пк (Bailer-Jones et al., 2018), сделанной по данным каталога Gaia DR2, и заметно отличается от байесовских оценок в каталоге Bailer-Jones et al. (2021) (причины различия, скорее всего, связаны с невозможностью точного разделения параллактического и заметного орбитального смещения за 34 месяца

Таблица 7. Геометрические параметры орбит компонентов V350 Sgr

Параметр	$\langle \sin i \rangle$	i , deg	a_1 , a.e.	a_2 , a.e.
Значение	0.80 ± 0.03	53 ± 3	1.63 ± 0.05	3.42 ± 0.09

наблюдений). Отметим, что полученные нами с помощью метода пульсирующих фотосфер результаты, рассматриваемые в совокупности с динамической оценкой массы цефеиды (Evans et al., 2018), позволили впервые найти согласованный и, пожалуй, наиболее точный набор физических параметров цефеиды V350 Sgr, приводимый в таблицах 5 и 6. Подчеркнем, что согласие полученных нами результатов с эволюционными расчетами одновременно обосновывает применимость выбранного значения проекционного фактора $PF = 1.34$, отмеченное и другими авторами.

5. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ РАЗМЕРЫ СИСТЕМЫ V350 SGR

Уникальные свойства цефеиды V350 Sgr, а именно довольно надежно определенные значения масс ее компонентов, позволяют наложить дополнительные ограничения на геометрические размеры орбит цефеиды и спутника. В выражение для функции масс

$$f(M) = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2} \\ = 1.0385 \times 10^{-7} (1 - e^2)^{3/2} K_1^3 P(M_\odot)$$

входит синус угла наклона плоскости орбиты к картинной плоскости. При известных оценках масс компонентов ($M_1 \approx 5.2 \pm 0.1 M_\odot$, $M_2 \approx 2.5 \pm 0.1 M_\odot$) и значении $f(M) \approx 0.1366 \pm 0.0037 M_\odot$ (см. таблицу 3) это выражение позволяет оценить значение $\sin i$ и линейные размеры орбит компонентов. Среднее значение $\sin i$ и его погрешность были вычислены методом Монте-Карло по результатам 1000 численных экспериментов с указанными ошибками масс компонентов: $\langle \sin i \rangle \approx 0.80 \pm 0.03$ (при увеличении ошибок масс до $\pm 0.2 M_\odot$ погрешность возросла до ± 0.05). Оцененные геометрические размеры орбит обоих компонентов и значение угла наклона приведены в таблице 7. Видно, что размер относительной орбиты примерно равен 5 а.е. На расстоянии порядка 1 кпк максимальное угловое расстояние между компонентами составляет около 4 мсд.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено комплексное исследование уникальной спектрально-двойной цефеиды V350 Sgr, у которой известны оценки масс обоих компонентов системы. Мы привлекли ранее неопубликованные 58 измерений лучевой скорости, выполненных со спектрографом ИЛС, и уточнили параметры орбиты. Для определения избытка цвета, радиуса, светимости, эффективной температуры и эволюционного статуса использован оригинальный вариант метода пульсирующих фотосфер, опирающийся на моделирование изменений эффективной температуры (Rastorguev et al., 2022). Вклад спутника цефеиды в суммарный блеск системы в полосах B , V , I , BP , RP оценивался в предположении его спектральной классификации как звезды $B8 V - B9 V$. Попутно было показано, что опубликованный в каталоге Gaia DR3 тригонометрический параллакс приводит к завышенному примерно на 25% расстоянию; более правильные значения параллакса и расстояния имеются в каталоге Gaia DR2 и работе Bailer-Jones et al. (2018). Мы полагаем, что причиной расхождений является 34-месячный интервал наблюдений, охваченный каталогом Gaia DR3, в течение которого фотоцентр системы мог заметно (до 1 мсд) дополнительно сместиться за счет орбитального движения.

Хорошее согласие наших расчетов — оценки расстояния 990 пк, радиуса $\langle R \rangle_I / R_\odot \approx 41.3 \div 41.9$ и светимости $\langle M_V \rangle_I \approx -3^m 52 \div -3^m 57$ — с результатами эволюционных вычислений MESA и PARSEC 2.0 для массы главного компонента $5.1 - 5.2 M_\odot$ и металличности $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18 \text{ dex}$ достигнуто при использовании значения проекционного фактора $PF = 1.34$, которое можно считать характерным для цефеид с периодом около 5 суток, учитывая данные BV -фотометрии. Эволюционный возраст V350 Sgr составляет 100 млн лет. Выведенные физические параметры могут использоваться для калибровки зависимостей «период — светимость» и «период — масса — возраст».

По функции масс при наличии оценок массы цефеиды и спутника впервые определены угол наклона плоскости относительной орбиты $i \approx 53^\circ \pm 3^\circ$ и величины больших полуосей орбит $a_1 \approx 1.63 \pm 0.05 \text{ а.е.}$, $a_2 \approx 3.42 \pm 0.09 \text{ а.е.}$ с размером относительной орбиты около 5 а.е.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 8. Измерения лучевой скорости V350 Sgr, проведенные в 1998–2016 гг.

JD – 2400000	Скорость, км с ⁻¹	Ошибка, км с ⁻¹	JD – 2400000	Скорость, км с ⁻¹	Ошибка, км с ⁻¹	JD – 2400000	Скорость, км с ⁻¹	Ошибка, км с ⁻¹
51020.429	28.00	0.48	53261.249	4.92	0.29	55804.260	24.01	0.47
51021.429	18.43	0.62	53262.247	13.93	0.24	55806.296	-2.38	0.55
51023.357	8.28	0.34	53263.239	17.69	0.34	56156.275	-12.00	0.18
51025.355	27.27	0.35	53270.247	-7.96	0.27	56157.295	-2.59	0.19
51028.364	12.05	0.82	53276.241	0.35	0.29	56160.251	1.77	0.41
51029.350	17.10	0.25	53278.182	21.43	0.77	56161.255	-13.57	0.22
51030.338	26.83	0.26	53279.206	-5.70	0.38	56163.309	6.44	0.21
53179.385	10.11	0.32	54634.414	13.88	0.41	56164.275	16.20	0.20
53181.387	-10.45	0.34	54635.409	-15.47	0.67	56174.243	12.15	0.21
53182.372	-12.23	0.35	54639.493	15.44	0.55	56175.230	20.16	0.27
53183.486	-0.23	0.31	54640.498	-12.41	0.45	56176.228	-14.37	0.28
53192.385	-14.73	0.46	55793.274	21.03	0.25	56177.237	-10.35	0.31
53196.373	13.42	0.44	55794.265	10.56	0.39	57646.226	-10.54	0.27
53199.441	5.67	0.42	55795.254	-8.27	0.39	57647.266	1.98	0.21
53202.483	-14.87	0.53	55796.265	-0.49	0.24	57648.219	10.69	0.28
53204.388	2.43	0.34	55797.255	10.17	0.25	57649.217	21.14	0.32
53208.427	-9.03	0.39	55798.294	21.21	0.21	57650.248	-12.95	0.25
53240.338	1.72	0.29	55800.251	-9.23	0.27	57655.200	-8.39	0.23
53247.367	19.11	0.65	55801.259	-1.72	0.28			
53250.340	-0.76	0.32	55802.245	8.79	0.29			

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны участникам многолетней программы измерения лучевых скоростей: Н. Н. Самусю, М. Е. Сачкову (ИНАСАН), Е. В. Глушковой (МГУ), А. А. Федоровой (ИКИ РАН), И. М. Угловой. Авторы выражают благодарность Л. Н. Бердникову (МГУ) и Н. Р. Эванс (Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики, Кембридж, США) за плодотворные идеи и сотрудничество в изучении двойных цефеид, а также рецензентам за полезные замечания. В этой работе использовались данные миссии Gaia Европейского космического агентства (ЕКА, <https://www.cosmos.esa.int/gaia>), обработанные Консорциумом обработки и анализа данных Gaia (DPAC, <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dpac/consortium>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа финансировалась за счет бюджета учреждений. Никаких дополнительных грантов на про-

ведение и руководство данным исследованием получено не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Albitzky, *Astronomische Nachrichten* **238**, 9 (1930). DOI:10.1002/asna.19302380104
2. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, et al., *Astron. J.* **156** (2), article id. 58 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aacb21
3. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, et al., *Astron. J.* **161** (3), id. 147 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abd806
4. L. A. Balona, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **178**, 231 (1977). DOI:10.1093/mnras/178.2.231

5. I. Barnes, G. Thomas, T. J. Moffett, and M. H. Slovak, *Astrophys. J. Suppl.* **66**, 43 (1988). DOI:10.1086/191245
6. T. G. Barnes and D. S. Evans, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **174**, 489 (1976). DOI:10.1093/mnras/174.3.489
7. T. G. Barnes, D. S. Evans, and T. J. Moffett, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **183**, 285 (1978). DOI:10.1093/mnras/183.3.285
8. M. S. Bessell, F. Castelli, and B. Plez, *Astron. and Astrophys.* **333**, 231 (1998).
9. J. Breiter, A. Mérand, P. Kervella, et al., *Astron. and Astrophys.* **587**, id. A117 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201527030
10. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **616**, id. A1 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201833051
11. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202039657
12. L. Capitanio, R. Lallement, J. L. Vergely, et al., *Astron. and Astrophys.* **606**, id. A65 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201730831
13. J. A. Cardelli, G. C. Clayton, and J. S. Mathis, *Astrophys. J.* **345**, 245 (1989). DOI:10.1086/167900
14. G. Costa, L. Girardi, A. Bressan, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **485** (4), 4641 (2019a). DOI:10.1093/mnras/stz728
15. G. Costa, L. Girardi, A. Bressan, et al., *Astron. and Astrophys.* **631**, id. A128 (2019b). DOI:10.1051/0004-6361/201936409
16. R. da Silva, V. D'Orazi, M. Palla, et al., *Astron. and Astrophys.* **678**, id. A195 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202346982
17. A. Dotter, *Astrophys. J. Suppl.* **222** (1), article id. 8 (2016). DOI:10.3847/0067-0049/222/1/8
18. N. R. Evans, HST Proposal ID 13368. Cycle 21 (2013).
19. N. R. Evans, L. Berdnikov, N. Gorynya, et al., *Astron. J.* **142** (3), article id. 87 (2011). DOI:10.1088/0004-6256/142/3/87
20. N. R. Evans, E. Böhm-Vitense, K. Carpenter, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **109**, 789 (1997). DOI:10.1086/133945
21. 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
22. N. R. Evans, H. M. Günther, H. E. Bond, et al., *Astrophys. J.* **905** (1), id. 81 (2020). DOI:10.3847/1538-4357/abc1f1
23. N. R. Evans, C. Proffitt, K. G. Carpenter, et al., *Astrophys. J.* **866** (1), article id. 30 (2018). DOI:10.3847/1538-4357/aade03
24. N. R. Evans and B. J. A. Sugars, *Astron. J.* **113**, 792 (1997). DOI:10.1086/118300
25. J. D. Fernie, N. R. Evans, B. Beattie, and S. Seager, *Inform. Bull. Var. Stars* **4148**, 1 (1995).
26. J. D. Fernie, N. R. Evans, B. Beattie, and S. Seager, *A Database of Galactic Classical Cepheids* (online at <https://www.astro.utoronto.ca/DDO/research/cepheids/cepheids.html>, last updated February 18, 1997).
27. P. J. Flower, *Astrophys. J.* **469**, 355 (1996). DOI:10.1086/177785
28. A. Gallenne, P. Kervella, S. Borgniet, et al., *Astron. and Astrophys.* **622**, id. A164 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201834614
29. A. Gallenne, P. Kervella, A. Mérand, et al., *Astron. and Astrophys.* **608**, id. A18 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201731589
30. W. Gieren, *Revista Mexicana Astronom. Astrofis.* **6**, 103 (1981).
31. N. A. Gorynya, T. R. Irsamambetova, A. S. Rastorgouev, and N. N. Samus, *Sov. Astron. Letters* **18**, 316 (1992).
32. N. A. Gorynya, N. N. Samus, L. N. Berdnikov, et al., *Information Bulletin on Variable Stars* **4199**, 1 (1995).
33. N. A. Gorynya, N. N. Samus', A. S. Rastorguev, and M. E. Sachkov, *Astronomy Letters* **22** (2), 175 (1996).
34. N. A. Gorynya, N. N. Samus', M. E. Sachkov, et al., *Astronomy Letters* **24** (6), 815 (1998).
35. M. A. T. Groenewegen, *Astron. and Astrophys.* **474** (3), 975 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20078225
36. M. A. T. Groenewegen, *Astron. and Astrophys.* **550**, id. A70 (2013). DOI:10.1051/0004-6361/201220446
37. P. Kervella, A. Gallenne, N. R. Evans, et al., *Astron. and Astrophys.* **623**, id. A117 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201834211
38. P. Kervella, B. Trahin, H. E. Bond, et al., *Astron. and Astrophys.* **600**, id. A127 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201630202
39. V. V. Kovtyukh, C. Soubiran, R. E. Luck, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **389** (3), 1336 (2008). DOI:10.1111/j.1365-2966.2008.13644.x
40. R. Lallement, C. Babusiaux, J. L. Vergely, et al., *Astron. and Astrophys.* **625**, id. A135 (2019). DOI:10.1051/0004-6361/201834695
41. R. Lallement, J. L. Vergely, B. Valette, et al., *Astron. and Astrophys.* **561**, id. A91 (2014). DOI:10.1051/0004-6361/201322032
42. C. D. Laney and J. A. R. Caldwell, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **377** (1), 147 (2007). DOI:10.1111/j.1365-2966.2007.11574.x
43. Y. A. Lazovik and A. S. Rastorguev, *Astron. J.* **160** (3), 136 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/aba627
44. T. Lloyd Evans, T. Lloyd Evans, *Proc. IAU Coll. No. 15*, Ed. by W. Strohmeier, K. Veroff, Remeis-S. Bamberg, p. 204 (1971).
45. T. Lloyd Evans, *South African Astronomical Observatory Circular* **1**, 257 (1980).
46. R. E. Luck, *Astron. J.* **156** (4), article id. 171 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aadcac
47. B. F. Madore, W. L. Freedman, and S. Moak, *Astrophys. J.* **842** (1), article id. 42 (2017). DOI:10.3847/1538-4357/aa64d

48. E. E. Mamajek, A Modern Mean Dwarf Stellar Color and Effective Temperature Sequence, https://www.pas.rochester.edu/~emamajek/EEM_dwarf_UBVIJHK_colors_Teff.txt (last updated April 16, 2022).
49. R. Molinaro, V. Ripepi, M. Marconi, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **413** (2), 942 (2011). DOI:10.1111/j.1365-2966.2010.18183.x
50. N. Nardetto, W. Gieren, P. Kervella, et al., Astron. and Astrophys. **502** (3), 951 (2009). DOI:10.1051/0004-6361/200912333
51. N. Nardetto, D. Mourard, P. Mathias, et al., Astron. and Astrophys. **471** (2), 661 (2007). DOI:10.1051/0004-6361:20066853
52. C. T. Nguyen, G. Costa, L. Girardi, et al., Astron. and Astrophys. **665**, id. A126 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202244166
53. M. J. Pecaut and E. E. Mamajek, Astrophys. J. Suppl. **208** (1), article id. 9 (2013). DOI:10.1088/0067-0049/208/1/9
54. O. K. L. Petterson, P. L. Cottrell, and M. D. Albrow, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **350** (1), 95 (2004). DOI:10.1111/j.1365-2966.2004.07555.x
55. T. Prusti et al. (Gaia Collab.) Astron. and Astrophys. **595**, id. A1 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201629272
56. A. S. Rastorguev, Y. A. Lazovik, M. V. Zabolotskikh, et al., arXiv e-prints astro-ph:1911.10413 (2019). DOI:10.48550/arXiv.1911.10413
57. A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, Y. A. Lazovik, et al., Astrophysical Bulletin **77** (2), 144 (2022). DOI:10.1134/S1990341322020079
58. M. E. Sachkov, Astronomy Letters **28**, 589 (2002). DOI:10.1134/1.1505502
59. M. E. Sachkov, A. S. Rastorguev, N. N. Samus', and N. A. Gorynya, Astronomy Letters **24** (3), 377 (1998).
60. M. Steinmetz, G. Guiglion, P. J. McMillan, et al., Astron. J. **160** (2), id. 83 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/ab9ab8
61. J. Storm, W. Gieren, P. Fouqué, et al., Astron. and Astrophys. **534**, id. A94 (2011a). DOI:10.1051/0004-6361/201117155
62. J. Storm, W. Gieren, P. Fouqué, et al., Astron. and Astrophys. **534**, id. A95 (2011b).
63. G. A. Tammann, A. Sandage, and B. Reindl, Astron. and Astrophys. **404**, 423 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20030354
64. A. A. Tokovinin, Sov. Astron. **31**, 98 (1987).
65. G. Torres, J. Andersen, and A. Giménez, Astron. and Astrophys. **18**(1-2), 67 (2010). DOI:10.1007/s00159-009-0025-1
66. B. Trahin, L. Breuval, P. Kervella, et al., Astron. and Astrophys. **656**, id. A102 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202141680
67. D. G. Turner, Revista Mexicana Astronom. Astrofis. **52**, 223 (2016). DOI:10.48550/arXiv.1603.02276
68. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), Astron. and Astrophys. **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
69. S. Wang and X. Chen, Astrophys. J. **877** (2), article id. 116 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab1c61
70. M. Wenger, F. Ochsenbein, D. Egret, et al., Astron. and Astrophys. Suppl. **143**, 9 (2000). DOI:10.1051/aas:2000332

Spectroscopic Binary Cepheid V350 Sgr: Revision of Physical Characteristics and Evolutionary Status

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

Based on the original version of the pulsating photosphere method that allows modeling the changes in the effective temperature, a revision of the physical characteristics of the unique binary Cepheid V350 Sgr was carried out. Previously published measurements of radial velocities were used, as well as new ones obtained by us, which allowed us to refine the parameters of the Cepheid orbit. The choice of the projection factor $PF = 1.34$ allowed us to reconcile our estimates of the cycle-averaged radius $\langle R \rangle_I / R_\odot \approx 41.3 - 41.9$, luminosity $M_V \approx -3^m52 - -3^m57$, normal color $(B - V)_0 \approx 0^m56 \pm 0^m01$, effective temperature $\langle \log T_{\text{eff}} \rangle_I \approx 3.788 \pm 0.002$, distance $D \approx 992 \pm 14$ pc and color excess $E(B - V) \approx 0^m35 \pm 0^m01$ with MESA theoretical evolutionary tracks for the mass $5.1 M_\odot$ and metallicity $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.18$ dex (or mass $5.2 M_\odot$, $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.10$ dex) and the PARSEC 2.0 track for the mass $5.2 M_\odot$, $Z \approx 0.01$. The evolutionary age of the Cepheid, which is in the phase of the third crossing of the instability strip, is estimated at 100 Myr. It is shown that the Gaia eDR3/DR3 catalogues provide a distance overestimated by approximately 25%. Using the mass function for the available estimates of the Cepheid and companion masses, the relative orbital plane inclination angle $i \approx 53^\circ \pm 3^\circ$ and the orbital semi-major axes $a_1 \approx 1.63 \pm 0.05$ AU, $a_2 \approx 3.42 \pm 0.09$ AU were determined for the first time, with the relative orbit size of about 5 AU.

Keywords: stars: binaries—stars: evolution—stars: fundamental parameters—stars: individual: V350 Sgr