

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ ADS 15571 МЕТОДОМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2024 г. Е. Н. Соков<sup>1</sup>\*, Д. Л. Горшанов<sup>1</sup>, И. С. Измайлов<sup>1</sup>, Н. А. Шахт<sup>1</sup>, И. А. Сокова<sup>1</sup>,  
А. С. Бескакетов<sup>2</sup>, В. В. Дьяченко<sup>2</sup>, А. Ф. Максимов<sup>2</sup>, А. А. Митрофанова<sup>2</sup>, Д. А. Расстегаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

Поступила в редакцию 10.11.2022 г.

После доработки 29.12.2023 г.; принята к публикации 24.01.2024 г.

По спекл-интерферометрическим наблюдениям широкой двойной звезды ADS 15571 на БТА САО РАН в 2014 г. подтверждено существование у компонента А близкого спутника, который был ранее обнаружен по астрометрическим наблюдениям Пулковской обсерватории. Продолжение наблюдений на БТА с 2014 по 2022 г. позволило получить 28 положений спутника относительно главной звезды. По этому ряду построена относительная орбита спутника и определена сумма масс подсистемы А ( $1.686 \pm 0.014 M_{\odot}$ ). Сравнение этой орбиты с орбитой фотоцентра компонента А, построенной по пулковским фотографическим наблюдениям, позволило оценить также отношение масс главной звезды и спутника и их индивидуальные массы:  $M_{Aa} = (1.10 \pm 0.07) M_{\odot}$  и  $M_{Ab} = (0.59 \pm 0.07) M_{\odot}$ . По оценкам разности блеска двух звезд системы ADS 15571А были оценены спектральные типы компонент: ADS 15571Aa — F8V; ADS 15571Ab — K5V–K5.5V. Спекл-интерферометрические наблюдения компонента В показали отсутствие у него разрешимых спутников.

*Ключевые слова:* двойные звезды — невидимые спутники, орбиты, спекл-интерферометрия.

**DOI:** 10.31857/S0320010824020039, **EDN:** OJOJZP

### ВВЕДЕНИЕ

Двойная звезда ADS 15571 представляет собой широкую пару с угловым расстоянием между компонентами А и В  $\rho = 13''.7$ . Некоторые другие обозначения этих звезд: WDS J21582+8252 А и В, HD 209942 и HD 209943, HIP 108456 и HIP 108461. В каталоге WDS (Мэйсон и др., 2001) к этой системе относят еще один компонент — С, находящийся в десять раз дальше расстояния между компонентами А и В ( $140''$ ).

Пара ADS 15571 АВ имеет длительную наблюдательную историю и зафиксирована во многих списках и каталогах, она наблюдалась с помощью наземных инструментов и космических аппаратов. Большая часть результатов ее исследования собрана в базе данных каталога WDS.

Наиболее точные значения параллакса для компонентов пары ADS 15571 были получены космической миссией Gaia. Для компонента А в каталоге Gaia DR3 приводится значение параллакса  $\pi_{tr} = 24.93 \pm 0.65$  мсд. В каталоге NSS (Non-Single Star catalogue) (Арено и др., 2023; каталог Vizier, 2022) приводится орбита предполагаемого слабого компонента (период 5.4 года, большая

полуось 22.2 мсд), построенная по трехлетним наблюдениям Gaia, и более точное значение параллакса, исправленное за орбитальное движение:  $\pi_{tr} = 25.030 \pm 0.049$  мсд. Однако, как будет видно ниже, эта орбита, скорее всего, является ошибочной (истинный период и размер орбиты значительно больше указанных значений). Для компонента В в каталоге Gaia DR3 наиболее точным является значение  $\pi_{tr} = 25.046 \pm 0.017$  мсд.

Пара ADS 15571 АВ входит в пулковскую астрометрическую программу изучения широких двойных звезд в окрестностях Солнца и наблюдается на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории с 1960 г. (Грошева, 2006, 2007). Существование невидимого спутника у компонента А было заподозрено Е.А. Грошевой (2006, 2007) при анализе ряда фотографических наблюдений, полученных на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории в 1960–2003 гг. После определения орбиты широкой пары ADS 15571 АВ и исключения относительного орбитального движения компонентов в их относительном положении сохранились невязки, имеющие периодический характер. В работах Грошевой (2006, 2007) был определен этот период (23 года), колебания были отнесены к присутствию невидимого спутника у главного компонента А. Была построена орбита этого компонента,

\* Электронный адрес: jenias06@gmail.com

описываемая под действием предполагаемого спутника, (точнее, орбита фотоцентра компонента А и спутника) с большой полуосью  $a_{ph} = 0''.087$ , а также сделана оценка минимальной массы невидимого спутника:  $M_{Ab} = 0.62 M_{\odot}$ .

В каталоге Брандта (2021) содержатся собственные движения и ускорения звезд, полученные из сопоставления каталогов миссий Hipparcos и Gaia. В соответствии с ним, ускорение определено только для компонента А пары ADS 15571, а у компонента В ускорение отсутствует. Это является подтверждением того, что невидимый спутник присутствует у компонента А.

Лучевые скорости измерялись у компонента А. Каталог лучевых скоростей звезд из работы Токовина, Смахова (2002) содержит семь измерений, произведенных в 1994–1997 гг. Изменение лучевой скорости в целом отражает орбитальное движение звезды под действием невидимого спутника.

В работе (Хорч и др., 2011), выполненной по спекл-интерферометрическим наблюдениям, содержится указание на разрешение тесного звездного спутника у компонента В. Приведенные в ней координаты разрешенного спутника ( $\theta = 177^{\circ}.6$ ,  $\rho = 0''.2983$  на момент 2010.4667) заставляют предположить, что на самом деле это измерение относится к компоненту А (см. ниже). Тем более что в заключительной части серии работ по спекл-интерферометрии звезд (Хорч и др., 2015) компонент ADS 15571 В (HIP 108461) числится среди звезд, у которых не обнаружено тесных спутников.

Однако по данным каталога ADS (Эйткен, Дулитл, 1932) компонент В, переменная типа RS CVn, является спектрально-двойной с орбитальным периодом 1.1522 дня. Минимальные массы спектральных компонентов  $0.65 M_{\odot}$  и  $0.61 M_{\odot}$ , два спектра классифицируются как F5s и G6 (Грошева, 2007). Каталог WDS (Мэйссон и др., 2001) приводит оценки блеска компонентов Va ( $7.5^m$ ) и Vb ( $11.0^m$ ). В статьях (Токовинин и др., 2006; Токовинин, 2014) приводится тот же орбитальный период, но отличаются оценки масс компонентов:  $M_{Va} = 0.94 M_{\odot}$ ,  $M_{Vb} = 0.88 M_{\odot}$  и  $M_{Va} = 0.91 M_{\odot}$ ,  $M_{Vb} = 0.87 M_{\odot}$  соответственно. В работе Токовина и др. (2019) в табл. 1 указывается, что компонент В был разрешен: на эпоху 2018.4991 расстояние компаньона составило  $0''.0440$ , позиционный угол  $33^{\circ}.7$ , разность блеска —  $0.9^m$ . Но, по-видимому, это — опечатка, так как одновременно эта звезда присутствует и в табл. 2 этой статьи — в списке неразрешенных звезд. Пара звезд со столь малым периодом обращения является слишком тесной, чтобы ее можно было разрешить с помощью метода спекл-интерферометрии. Это также подтверждает и настоящая работа (см. ниже).

Таким образом, каждый из компонентов пары ADS 15571 АВ также представляет собой двойную систему: тесная спектрально-двойная (компонент В) и звезда с тесным спутником (компонент А). Поэтому эта система относится к актуальным объектам, для которых каждый ряд наблюдений является уникально полезным, а его обработка и анализ должны вносить свой вклад в определение орбит, а также масс звезд — как динамической суммы масс, так индивидуальных масс составляющих системы.

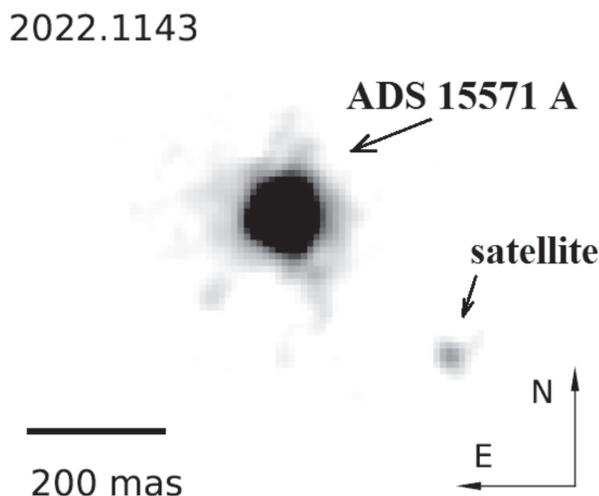
Построение точной относительной орбиты двойной звезды позволяет сделать точную оценку суммы масс компонентов:  $M(M_{\odot}) = a(\text{a.e.})^3/P(\text{г.})^2$ . А сравнение ее с орбитой фотоцентра дает возможность оценить и индивидуальные массы компонентов (см. ниже). Знание точных масс звезд является основой большинства астрофизических и звездно-астрономических исследований.

Для подтверждения существования спутника в 2014 г. были проведены спекл-интерферометрические наблюдения звезды ADS 15571 А на телескопе БТА — изображение спутника было получено. Угловое расстояние между компонентом А и спутником составило  $0''.14$ , разность звездных величин —  $3.5^m$ . Эти наблюдения были продолжены по февраль 2022 г., в результате было получено 28 положений спутника относительно главного компонента (см. табл. 1). К концу ряда угловое расстояние выросло до  $0''.30$ . Дуга наблюдений охватывает около половины видимой орбиты спутника, что позволяет произвести определение его истинной орбиты различными способами.

## ПОЛУЧЕНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ МЕТОДОМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

### *Методика наблюдений и их обработки*

При получении оптических изображений звезд основной вклад в размытие изображения вносит атмосферная турбулентность. Как пример, для 6-м оптического телескопа БТА на длине волны 550 нм дифракционный предел разрешения точечного источника должен быть равен  $0''.02$ , а реальный размер изображения под влиянием атмосферных воздействий составляет  $1-2''$ , т.е. в 100 раз больше. В случае прямых наблюдений двойной звездной системы, подобной ADS 15571 А, мы смогли бы различить лишь самую яркую звезду в системе, возможно, с вытянутым профилем на изображении. Однако применение метода спекл-интерферометрии позволяет наблюдать астрономические объекты через атмосферную турбулентность с пределом углового разрешения, близким к пределу дифракции.



**Рис. 1.** Восстановленное изображение звезды ADS 15571 A со спутником. Наблюдения были проведены 2022-02-11 в фильтре 550/40 нм на телескопе БТА с использованием спекл-интерферометра.

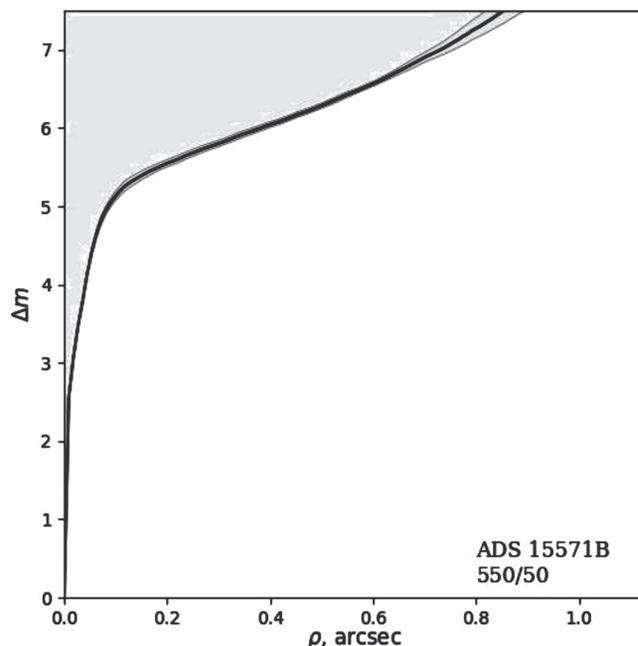
Наблюдения системы ADS 15571 на БТА САО РАН методом спекл-интерферометрии выполнялись с 2014 по 2022 гг. с применением штатного спекл-интерферометра (Максимов и др., 2009) на основе EMCCD-детектора Andor IXon Ultra 897. Изображения записаны сериями по 2000 кадров с экспозицией 20 мс на кадр. Для наблюдений применялись следующие фильтры (центральная длина волны  $\lambda$  / полуширина полосы пропускания  $\Delta\lambda$ ): 550/40 нм и 800/100 нм.

Методы калибровки для спекл-интерферометрических измерений подробно описаны в статье Митрофановой и др. (2020). Позиционные параметры и разность блеска определяются путем анализа спектров мощности и автокорреляционной функции ансамбля спекл-изображений, как описано в статьях (Балега и др., 2002; Плужник, 2005). Восстановление изображения выполнялось методом биспектрального анализа автокорреляционной функции третьего порядка (Ломан и др., 1983).

#### Результаты наблюдений ADS 15571 A

Один из результатов проведенных наблюдений ADS 15571 A со спутником, представленный в виде восстановленного изображения на основе множества кадров, показан на рис. 1.

В табл. 1 представлены результаты наблюдений ADS 15571 A. В столбцах указаны: эпоха наблюдения, приведенная в долях бесселева года, фильтр ( $\lambda/\Delta\lambda$ ), позиционный угол ( $\theta$ ), разделение компонентов ( $\rho$ ) и разность блеска компонентов  $\Delta m$  с соответствующими этим измерениям ошибками ( $\sigma$ ).



**Рис. 2.** Возможность обнаружения спутника у звезды ADS 15571 B с помощью спекл-интерферометрии на телескопе БТА в зависимости от разности блеска  $\Delta m$  и расстояния от звезды  $\rho$ . Черная линия — предельные значения для обнаружения спутника. Серые линии отображают ошибки определения пределов. Светло-серая область выше линии — значения, при которых обнаружение невозможно.

#### Результаты наблюдений ADS 15571 B

В течение некоторого времени также проводилась проверка возможности обнаружения спутника у второй яркой звезды системы — ADS 15571 B. На основе всех полученных измерений было надежно установлено отсутствие признаков наличия спутников звездных масс в окрестности данной звезды при разности блеска ниже и на расстояниях выше значений, представленных на рис. 2. Спектральный компонент звезды ADS 15571 B при таких наблюдениях обнаружен быть не может, поскольку при периоде обращения компонентов 1.1522 дня и сумме их масс  $1.26 M_{\odot}$  большая полуось орбиты должна составлять около 0.023 а.е., что соответствует расстоянию между их изображениями примерно  $0''.0006$ . В работе (Хорч и др., 2015) компонент B системы ADS 15571 также находится в списке звезд, у которых не обнаружено тесных спутников.

#### ПОСТРОЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОРБИТЫ СПУТНИКА ADS 15571 A

Предварительно в наблюдательные данные (позиционный угол  $\theta$ ) были внесены поправки за изменение координат вследствие прецессии и собственного движения за 8 лет наблюдений — данные были

**Таблица 1.** Относительные положения спутника ADS 15571 A в полярной системе координат

Дата	Bessel UTC	$\lambda/D\lambda$	$\rho$ (mas)	$\sigma_\rho$	$\theta$ (°)	$\sigma_\theta$	$\Delta m$	$\sigma_{\Delta m}$
2014-04-16	2014.289316	800/100	140.94	0.22	127.89	0.12	2.99	0.01
2014-07-10	2014.524451	550/40	128.15	0.45	119.60	0.27	3.33	0.02
2014-07-10	2014.524462	800/100	131.56	0.28	120.38	0.11	2.95	0.02
2014-120-5	2014.929616	550/40	116.55	0.34	106.41	0.27	3.54	0.03
2015-04-06	2015.262929	550/40	111.35	0.84	89.54	0.37	3.27	0.05
2015-10-29	2015.830209	550/40	100.33	0.40	62.81	0.15	3.60	0.02
2015-12-24	2015.980579	800/100	99.08	0.97	54.02	0.25	2.89	0.03
2016-05-25	2016.402297	800/100	93.63	0.68	29.55	0.17	2.98	0.01
2016-09-17	2016.714	800/100	91.45	0.72	11.84	0.16	2.91	0.02
2016-09-17	2016.714008	550/40	90.23	0.59	10.15	0.25	3.41	0.03
2016-09-19	2016.719993	800/100	91.86	0.74	11.19	0.15	3.29	0.02
2016-11-18	2016.883949	550/40	88.24	0.42	358.48	0.16	3.43	0.03
2016-12-11	2016.946784	800/100	88.32	0.88	354.15	0.20	2.72	0.03
2017-02-07	2017.106411	550/40	87.65	0.49	342.60	0.18	3.45	0.02
2017-02-07	2017.106419	800/100	87.48	0.71	343.64	0.16	2.80	0.02
2017-05-05	2017.344381	550/40	90.93	0.42	325.45	0.14	3.75	0.02
2017-11-30	2017.915901	550/40	? 97.04	1.17	? 289.69	0.28	2.78	0.02
2017-11-30	2017.915908	800/100	107.54	0.84	294.27	0.22	2.69	0.02
2018-01-28	2018.077924	550/40	114.96	0.38	287.89	0.11	3.65	0.02
2018-04-27	2018.321185	550/40	126.79	0.40	279.65	0.14	3.60	0.02
2019-01-07	2019.047616	550/40	167.43	0.36	259.88	0.14	3.72	0.02
2019-02-24	2019.15108	550/40	172.76	0.58	257.71	0.16	3.34	0.02
2019-04-09	2019.271464	550/40	178.30	0.52	257.42	0.14	3.47	0.03
2019-06-01	2019.416653	550/40	186.80	0.44	253.28	0.11	3.33	0.03
2019-11-16	2019.877075	550/40	210.90	0.27	247.45	0.12	3.85	0.02
2020-03-04	2020.175334	550/40	225.81	0.31	244.08	0.11	3.58	0.02
2021-02-02	2021.087500	800/100	266.40	0.31	235.40	0.11	3.06	0.02
2022-02-11	2022.114300	550/40	305.80	0.30	229.27	0.11	4.09	0.04

**Примечание.**  $\rho$  — расстояние,  $\theta$  — позиционный угол (на эпоху и равноденствие наблюдений, без внесения поправок),  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$  — соответствующие погрешности определения координат,  $\Delta m$  и  $\sigma_{\Delta m}$  — измеренная разность блеска и ее погрешность. Знаком вопроса отмечено наблюдение от 2017-11-30, исключенное из ряда по причине его большого отклонения от построенных орбит.

приведены к эпохе и равноденствию 2000.0. Величины поправок получились незначительными:  $0^\circ 33' - 0^\circ 51'$ . В табл. 1 приведены данные наблюдений — полярные координаты ( $\rho$ ,  $\theta$ ) спутника относительно главной компоненты. При этом точка, полученная в момент 2017.915901, наиболее далеко уклоняющаяся от общего ряда, не использовалась при построениях и расчетах.

Для построения орбиты на основе полученных наблюдательных данных применялись следующие

методы: метод параметров видимого движения, прямой геометрический метод и метод, основанный на вычислении элементов Тиле–Иннеса.

**Метод параметров видимого движения (ПВД)** позволяет строить орбиту по короткой дуге наблюдений (Киселёв, 1989). Для надежного определения орбиты требуется, чтобы дуга была обрисована точными однородными и часто расположенными наблюдательными точками, а длина дуги была такой, чтобы радиус кривизны был приблизительно

одинаков на всем ее протяжении. Тогда на середину (средний момент) этой дуги, аппроксимируемой участком параболы, можно определить пять параметров видимого движения: две координаты, их производные (скорости) и радиус кривизны дуги. Далее для построения орбиты требуется знание трех дополнительных величин: расстояния до системы (параллакса), суммы масс компонентов и относительной лучевой скорости компонентов на средний момент используемой дуги наблюдений.

Для построения орбиты методом ПВД среди наблюдательных данных были выбраны четыре отрезка по 5–7 точек, определяющих короткие дуги. По каждой из дуг строилась орбита и среди построенных орбит была выбрана лучшая с точки зрения величины среднеквадратической невязки. Параллакс звезды ADS 15571 A известен с высокой точностью из наблюдений GAIA (EDR3):  $\pi_{\text{tr}} = 0''.0249343 \pm 0''.0006501$  (Арено и др., 2023). Предварительная оценка масс компонентов была сделана по их светимости. Данных по лучевой скорости обнаруженного тусклого спутника пока не имеется. При построении орбиты значения этого параметра приходилось подбирать. Метод ПВД позволяет уточнять значения ненадежно известных входных параметров с помощью их варьирования и сравнения эфемерид, строящихся по получаемым орбитам, с наблюдательными точками. Применение такого варьирования при точно известном параллаксе к значению суммы масс системы и относительной лучевой скорости на средний момент дуги показало, что лучшие орбиты получаются при значении суммы масс  $1.7 M_{\odot}$  и разности лучевых скоростей 4.5 км/с. Среднеквадратичное значение  $O-C$  для этой орбиты, посчитанное по 26 наблюдательным точкам, равно  $0''.009$ . Такая недостаточно высокая точность полученной орбиты вызвана малым количеством (6) наблюдательных точек, обрисовывающих используемую дугу. По всей видимости, этот метод плохо подходит к имеющемуся набору (распределению) наблюдательных данных.

**Прямой геометрический метод (ПГМ)** (Киселёв, 1997) для определения орбиты использует видимый орбитальный эллипс, который является проекцией истинного эллипса на картинную плоскость и строится по имеющимся наблюдениям. При этом подбираются пять параметров: величины большой  $a$  и малой  $b$  полуосей эллипса, полярные координаты  $(X, Y)$  центра эллипса относительно положения главного компонента и позиционный угол большой оси  $\alpha$ . Для надежного построения видимого эллипса нужно, чтобы наблюдаемые положения спутника целиком обрисовывали этот эллипс.

В нашем случае наблюдения охватывают геометрически около половины видимого эллипса, а динамически — около трети периода (наблюдённая дуга приходится на область перицентра орбиты), что снижает надежность определяемой орбиты.

Однако мы все-таки построили такой эллипс по нашим наблюдениям, и далее по видимому эллипсу с помощью ПГМ была построена орбита спутника относительно главного компонента — получены ее геометрические элементы. Для периода и момента прохождения перицентра в качестве начального приближения были взяты значения из работ Грошевой (2006, 2007). Однако точность построенной орбиты оказалась недостаточна: эфемериды, вычисленные по ней, плохо совпадали с наблюдаемыми положениями. Вероятно, это связано с неточным построением видимого эллипса, что вызвано недостаточным охватом его наблюдений. Для уточнения орбиты было применено варьирование (“фитинг”) четырех элементов: наклона, долготы восходящего узла, периода и момента прохождения перицентра. При этом применялся итерационный подход: по уточненной орбите строился видимый эллипс, его параметры уточнялись с целью лучшего соответствия наблюдаемым точкам, и по нему вновь определялась орбита. В результате нескольких таких итераций удалось получить орбиту со среднеквадратичным отклонением от наблюдаемых точек  $0''.003$ , что значительно лучше, чем удалось получить методом ПВД. Построенная с помощью ПГМ сумма масс системы должна быть также около  $1.7 M_{\odot}$ .

**Метод на основе вычисления постоянных Тиле–Иннеса (Т–И).** В данном методе первоначально испытываются несколько тысяч наборов, сгенерированных случайным образом, трех динамических элементов — эксцентриситета  $e$ , периода  $P$  и времени прохождения периастра  $T$ . Заметим, что если известны эти три элемента, то в методе Тиле–Иннеса остальные четыре элемента орбиты легко вычисляются с помощью линейного метода наименьших квадратов. Далее из первоначальных нескольких тысяч отбираются 10 наборов  $e, P, T$ , которые дают орбиту, наилучшим образом соответствующую наблюдениям. На последнем этапе производится улучшение отобранных 10 орбит, и из них выбирается лучшая. Ошибки элементов орбиты и ошибка суммы масс вычисляются путем варьирования начальных данных следующим образом. К эфемеридным позиционным координатам, полученным из определенной орбиты, добавляется модельный шум, и вновь вычисляются орбитальные элементы. Данный процесс повторяется несколько сотен раз. Из полученного набора орбит и вычисляются ошибки. Для оценки ошибки суммы масс такой подход позволяет легко учесть корреляцию между периодом и большой полуосью. Более подробно этот метод описан в работе Измайлова (2019).

Точность орбиты (среднеквадратическая невязка эфемеридных и наблюдаемых положений спутника), построенной этим методом, получилась наилучшей ( $0''.0014$ ) по сравнению с орбитами,

Таблица 2. Элементы орбит в системе ADS 15571 A

Элемент	Метод Тиле–Иннеса	Орбита фотоцентра <sup>a</sup>
Предполагаемая сумма масс, $M$	$1.686 \pm 0.014$	1.9
Большая полуось, мсд, а.е.	$251.4 \pm 1.7$ $10.04 \pm 0.07$	$87 \pm 11$ $3.49 \pm 0.44$
Период, лет	$24.49 \pm 0.25$	23
Эксцентриситет	$0.624 \pm 0.003$	$0.4 \pm 0.2$
Наклонение, °	$138.54 \pm 0.31$	$52 \pm 11$
Аргумент перигелия, °	$11.42 \pm 0.50$	$16 \pm 22$
Позиционный угол восходящего узла, °	$32.03 \pm 0.46$	$31 \pm 7$
Момент прохождения периастро, г.	$2016.512 \pm 0.006$	1993.5 (2016.5)

<sup>a</sup> Из работ (Арено и др., 2023; каталог данных Vizier, 2022).

рассчитанными другими методами. Наблюдение 2010 г., которое в работе (Хорч и др., 2011) отнесено к компоненту ADS 15571 B, но в отношении которого можно предположить, что оно относится к компоненту A, хорошо легло на орбиту, построенную по однородному ряду наших наблюдений, что подтверждает это предположение. Орбита была построена нами заново с учетом этой точки. Значения элементов орбиты изменились незначительно, оценки погрешностей элементов получились существенно меньше, чем погрешности элементов, определенных без учета точки 2010 г. (Однако общая точность орбиты незначительно ухудшилась —  $0''.0020$ .) Именно элементы этой орбиты, построенной с учетом наблюдения 2010 г., мы считаем результатом настоящей работы и приводим в табл. 2.

Сумма масс компонентов, определяемая по полученным значениям большой полуоси и периода, должна составлять  $1.686 \pm 0.014 M_{\odot}$ . При ее вычислении использовался параллакс компонента B ( $25.046 \pm 0.017$  мсд) как наиболее точно определенный. Неизвестное расстояние между A и B по лучу зрения здесь можно не учитывать, поскольку по сравнению с расстоянием до системы оно пренебрежимо мало. Очень малая неопределенность использованного значения параллакса ( $0.017$  мсд) вносит незначительный вклад в ошибки суммы масс и большой полуоси, полученные

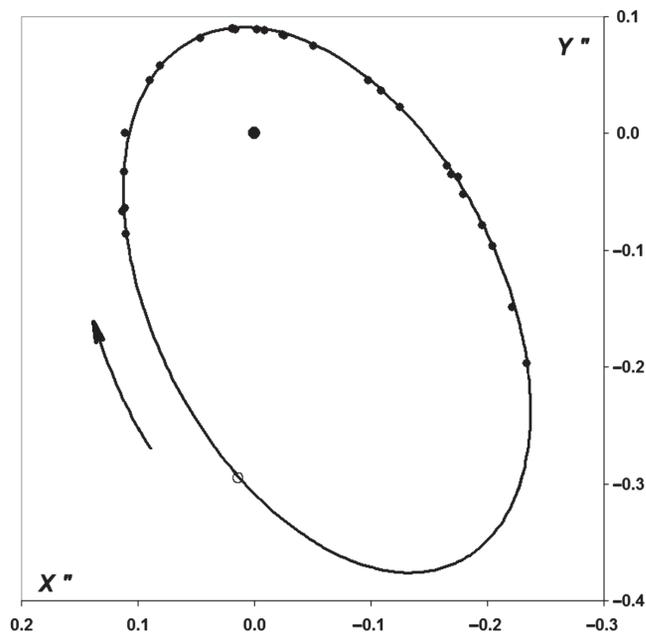


Рис. 3. Орбита спутника ADS 15571 Ab относительно главной звезды Aa. Маленькие черные кружки — наблюдательные точки. Открытый кружок — предполагаемое положение спутника в 2010 г. по наблюдениям, приведенным в работе (Хорч и др., 2011).

варьированием начальных данных:  $0.0004 M_{\odot}$  и  $0.003$  а.е. соответственно.

В табл. 2 приведены вычисленные элементы орбиты с оценкой их ошибок. Для сравнения также указаны элементы орбиты фотоцентра, полученные в работах Грошевой (2006, 2007). На рис. 3 приведено сравнение орбиты, построенной методом Тиле–Иннеса, с наблюдательными данными.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ТИПОВ КОМПОНЕНТОВ

Одним из важных результатов спекл-интерферометрических наблюдений на БТА является определение разности блеска спутника и главного компонента ADS 15571A. В полосе пропускания 550/40, по положению близкой к полосе V, среднее значение разности  $\Delta m$  составило  $3.51^m \pm 0.25^m$ . Это значение было принято для дальнейших расчетов. (Следует отметить, что в более длинноволновой полосе 800/100 значения разности блеска систематически ниже: среднее  $\Delta m = 2.93^m \pm 0.17^m$ .)

Суммарный блеск компонента A и его спутника равен  $6.98^m$ . Из этого получаем блеск компонента A —  $7.02^m$  и его спутника —  $10.5^m$ . С учетом параллакса их абсолютные звездные величины составляют  $4.007^m$  и  $7.487^m$ . Воспользовавшись табл. 5 параметров звезд главной последовательности из работы Пеко и др. (2013), можно оценить спектральные классы обеих звезд: компонент A — F8V, его спутник — K5V–K5.5V.

## СРАВНЕНИЕ ПОСТРОЕННОЙ ОРБИТЫ СПУТНИКА С ОРБИТОЙ ФОТОЦЕНТРА

На основе полученных в настоящей работе спекл-интерферометрических наблюдений была построена относительная орбита тусклого компонента звезды ADS 15571 A и определена сумма масс компонентов. Но для этой звезды известна также орбита фотоцентра, которая была определена Грошевой (2006, 2007) по астрометрическим наблюдениям (см. табл. 2). Это дает возможность оценить отношение масс компонентов путем сравнения размеров этих двух орбит и тем самым оценить индивидуальные массы компонентов.

Как видно из табл. 2, ориентация орбиты фотоцентра, близка к ориентации относительной орбиты тесного спутника. Исключение составляет только наклонение  $i$ . Скорее всего, это связано с тем, что пулковский прямой геометрический метод, которым пользовалась Е.А. Грошева, использует систему отсчета углов, отличную от общепринятой, и в качестве значения наклонения орбиты ею приведена величина  $180^\circ - i$ . В этом случае правильным значением наклонения является значение  $180^\circ - 52^\circ = 128^\circ$ , что в пределах заявленной погрешности ( $\pm 11^\circ$ ) вполне соответствует значению наклонения нашей орбиты ( $139^\circ$ ).

Орбита фотоцентра отражает орбиту главного компонента вокруг центра масс двойной системы, но имеет несколько меньший размер из-за смещения фотоцентра от главного компонента в сторону вторичного. Величина смещения зависит от разности блеска компонентов. Ее среднее значение по спекл-интерферометрическим наблюдениям ADS 15571 A составило  $\Delta m = 3.51^m$ , что соответствует отношению потоков света в 25.4 раза. При столь большой разнице в блеске спутника и главного компонента и столь малом угловом расстоянии между ними ( $a \sim 0''.3$ ) их фотоцентр почти совпадает с главным компонентом. Расстояние фотоцентра от главного компонента в единицах расстояния между компонентами равно величине

$$\beta = \frac{1}{1 + 10^{0.4\Delta m}}$$

(см. статью Ван де Кампа, 1967). При  $\Delta m = 3.51^m$ ,  $\beta = 0.038$ .

Однако Ван де Камп (1967) отмечает, что в случае фотографических наблюдений при разности блеска компонент более  $2^m$  и расстоянии между ними менее 0.12 мм зависимость  $\beta$  от  $\Delta m$  отличается от этой формулы: фотоцентр, измеряемый на фотопластинке, располагается ближе к яркому компоненту, чем истинный фотоцентр. Он приводит график этой зависимости, построенный Холлом по экспериментам в Йоркской обсерватории. При размере большой полуоси видимой

относительной орбиты спутника, равном  $0''.24$ , и масштабе 26-дюймового рефрактора Пулковской обсерватории, равном  $19.82''/\text{мм}$  (Горшанов, 2004), максимальное расстояние между изображениями компонентов ADS 15571 Aa и Ab в фокальной плоскости должно составлять 0.012 мм, что в десять раз меньше вышеуказанного предельного значения. Следовательно, для определения значения  $\beta$  нужно воспользоваться графиком Холла, который для  $\Delta m = 3.51^m$  дает значение  $\beta \approx 0.012$ .

Таким образом, орбита движения главного компонента вокруг центра масс почти совпадает с орбитой фотоцентра, но все-таки отличается от нее

по размеру в  $\frac{1}{1-\beta} = 1.012$  раз. Большая полуось орбиты фотоцентра, определенная в работах Грошевой (2006, 2007), составляет 87 а.е., следовательно, размер полуоси истинной орбиты главного компонента равен  $a_a = (87 \pm 11) \times 1.012 = (88 \pm 11)$  а.е.

Размер относительной орбиты вторичного компонента Ab вокруг главного Aa соответствует сумме их масс  $M_{Aa} + M_{Ab} = 1.69 M_\odot$ , определенной по орбите спутника, построенной в настоящей работе. Размеры орбит компонентов относительно барицентра обратно пропорциональны их массам, поэтому размер орбиты главного компонента соответствует массе спутника. Далее, зная из наблюдений полуось  $a_a$  орбиты главного компонента относительно барицентра и полуось  $a_{ab}$  орбиты спутника относительно главного компонента, можно определить отношение массы спутника к сумме масс компонентов:

$$B = \frac{M_b}{M_a + M_b} = \frac{a_a}{a_{ab}}.$$

Отсюда масса спутника

$$M_{Ab} = \frac{a_a}{a_{ab}} (M_a + M_b) = (88 \pm 11) / (251 \pm 2) \times (1.69 \pm 0.01) = (0.59 \pm 0.07) M_\odot$$

и масса главного компонента

$$M_{Aa} = (1.69 \pm 0.01) - (0.59 \pm 0.07) = (1.10 \pm 0.07) M_\odot.$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе по определению параметров истинной орбиты спутника звезды ADS 15571 A, входящей в состав двойной системы ADS 15571 (WDS 21582+8252), были проведены спекл-интерферометрические наблюдения на 6-м телескопе БТА. В результате проведенных наблюдений мы смогли построить видимую орбиту спутника, а также определить разность блеска яркого компонента и его спутника. Благодаря полученной разности блеска в полосе 550 нм, которая близка к

фильтру  $V$ , были определены спектральные классы обоих компонентов.

С целью сравнения результатов построения орбиты по полученным наблюдениям мы воспользовались тремя разными по своему подходу к вычислению орбиты методами — методом параметров видимого движения, прямым геометрическим методом и методом Тиле—Иннеса. На основе этих трех методов были вычислены основные параметры орбиты спутника ADS 15571 A. В работе было проведено сравнение этих трех методов по величине среднеквадратической невязки эфемеридных и наблюдаемых положений спутника. Наилучшее совпадение с наблюдательными данными были получены методом Тиле—Иннеса. В результате были определены основные параметры относительной орбиты спутника ADS 15571 A и вычислена сумма масс компонентов.

Из сравнения относительной орбиты спутника с орбитой фотоцентра из работ (Грошева, 2006, 2007; каталог данных VizieR, 2022) было оценено отношение масс компонентов и вычислены индивидуальные массы компонентов.

Спекл-интерферометрические наблюдения спутника ADS 15571 A, а также спутников иных подобных двойных и кратных систем необходимо продолжать, чтобы улучшить наши знания об орбитах компонентов и, возможно, выявить систематические вариации в движении спутников, которые, в свою очередь, могут указывать на существование менее массивных тел в системе, таких как экзопланеты или бурые карлики.

Спекл-интерферометрические наблюдения компонента ADS 15571 B, выполненные в настоящей работе, показали отсутствие у него разрешенных спутников.

Авторы выражают благодарность рецензенту настоящей статьи, который внимательно изучил представленную работу, обнаружил многочисленные ошибки и неточности, дал полезные рекомендации, а также указал на существование нескольких работ, в которых приведены данные о компонентах исследуемой двойной звезды.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 075-15-2020-780.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арено и др. (F. Arenou, C. Babusiaux, M.A. Barstow, S. Faigler, A. Jorissen, P. Kervella, T. Mazeh, N. Mowlavi, et al.: Gaia Collaboration), *Astron. Astrophys.* **674**, A34 (2023).
2. Балега и др. (I.I. Balega, Y.Y. Balega, K.-H. Hofmann, A.F. Maksimov, E.A. Pluzhnik, D. Schertl, Z.U. Shkhagosheva, and G. Weigelt), *Astron. Astrophys.* **385**, 87 (2002).
3. Брандт (T.D. Brandt), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **254**, 42 (2021).
4. Ван де Камп П., *Методы астрономии* (М.: Мир, 1967), С. 412–453.
5. Горшанов Д.Л., *Изв. ГАО РАН* **217**, 485 (2004).
6. Грошева (E.A. Grosheva), *Astrophysics* **49**, 397 (2006).
7. Грошева (E.A. Grosheva), *Binary Stars as Critical Tools and Tests in Contemporary Astrophysics IAU Symp. 240 (22-25 August, 2006 in Prague, Czech Republic, August 2007)*, S240, 119.
8. Измайлов И.С., *Письма в Астрон. журн.* **45**, 35 (2019) [I.S. Izmailov, *Astron. Lett.* **45**, 30 (2019)].
9. Киселёв А.А., *Теоретические основания фотографической астрометрии* (М.: Наука, 1989).
10. Киселёв (A.A. Kiselev), *A direct geometrical method for determination of the elliptic orbit of a binary star using its projection on the celestial sphere (Visual Double Stars: Formation, Dynamics and Evolutionary Tracks, Ed. J.A. Docobo et al. Dordrecht, Kluwer Academic, 1997)*, p. 357.
11. Ломан и др. (A.W. Lohmann, G. Weigelt, and B. Wirtzner), *Appl. Optic.* **22**, 4028 (1983).
12. Максимов А.Ф., Балега Ю.Ю., Дьяченко В.В. и др., *Астрофиз. Бюлл.* **64**, 308 (2009).
13. Митрофанова и др. (A. Mitrofanova, V. Dyachenko, A. Beskakotov, Yu. Balega, A. Maksimov, D. Rastegaev, and S. Komarinsky), *Astron. J.* **159**, 266 (2020).
14. Мэйсон и др. (B.D. Mason, G.L. Wycoff, W.I. Hartkopf, G.G. Douglass, and Ch.E. Worley), *Astron. J.* **122**, 3466 (2001).
15. Пеко и др. (M.J. Pecaut and E.E. Mamajek), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **208**, 9 (2013).
16. Плужник (E.A. Pluzhnik), *Astron. Astrophys.* **431**, 587 (2005).
17. Сотрудничество Гайя: он-лайн каталог данных VizieR (Gaia Collaboration VizieR Online Data Catalog: Gaia DR3 Part 3. Non-single stars (Gaia Collaboration, 2022)) <https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR?-source=I/357>.
18. Токовинин (A. Tokovinin), *Astron. J.* **147**, 86 (2014) <http://vizier.nao.ac.jp/viz-bin/VizieR?-source=J/AJ/147/86>.
19. Токовинин, Смехов (A.A. Tokovinin and M.G. Smekhov), *Astron. Astrophys.* **382**, 118 (2002).
20. Токовинин и др. (A. Tokovinin, S. Thomas, M. Sterzik, and S. Udry), *Astron. Astrophys.* **450**, 681 (2006) <http://vizier.china-vo.org/viz-bin/VizieR?-source=J/A+A/450/681>.
21. Токовинин и др. (A. Tokovinin, M.E. Everett, E.P. Horch, G. Torres, and D.W. Latham), *Astron. J.*

- 158**, 167 (2019) <https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR?-source=J/AJ/158/167>.
22. Хорч и др. (E.P. Horch, Sh.C. Gomez, W.H. Sherry, S.B. Howell, D.R. Ciardi, L.M. Anderson, and W.F. van Altena), *Astron. J.* **141**, 45 (2011) <https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR-3?-source=J/AJ/141/45>.
23. Хорч и др. (E.P. Horch, G.T. van Belle, J.W. Davidson, Jr., L.A. Ciastko, M.E. Everett, and K.S. Bjorkman), *Astron. J.* **150**, 151 (2015).
24. Эйткен, Дулитл (R.G. Aitken and E. Doolittle), *New General Catalogue of Double Stars within 1200 of the North Pole* (Washington: Carnegie Inst., 1932).