

ПОТЕРЯ МАССЫ АТМОСФЕРЫ ПЛАНЕТЫ WASP-195 b

И.С.САВАНОВ¹, Е.С.ДМИТРИЕНКО²

Поступила 4 мая 2025

Принята к печати 10 сентября 2025

Представлены результаты оценки величины потери вещества атмосферы планеты WASP-195 b. Звезда WASP-195 спектрального класса F обладает планетой, которая при массе всего 0.104 массы Юпитера имеет сопоставимый с ним радиус. Планета имеет низкую плотность $\rho = 0.16 \pm 0.06 \text{ г/см}^3$. Для оценки величины оттока вещества из атмосферы планеты были использованы два подхода - аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с ограничением по энергии и метод, основанный на использовании интерполяции результатов для сетки гидродинамических моделей верхних атмосфер. Величины потока XUV -фотонов от звезды были установлены по аналитической зависимости, связывающей F_{XUV} и параметр $\log R'_{HK}$. Проведено сопоставление полученных оценок величины оттока вещества $\dot{M}$ из атмосферы планеты в зависимости от вариаций параметра $\log R'_{HK}$ для моделей потери атмосферы с ограничением по энергии и гидродинамической аппроксимации. Расчеты показали, что потеря вещества атмосферы экзопланеты достаточно велика (даже в случае малой хромосферной активности звезды). Максимальная величина параметра $\dot{M}$ может составлять $7.3 \cdot 10^{11} \text{ г/с}$ (модель гидродинамической аппроксимации, высокая активность звезды).

Ключевые слова: *звезды: активность: планетные системы: атмосферы экзопланет*

1. Введение. Газовые планеты - гиганты, обращающиеся около ярких близлежащих звезд, являются важными объектами для понимания механизмов формирования планетных систем и их эволюции. Авторы [1] представили результаты исследования 9 транзитных планет, вращающихся вокруг звезд FGK, которые первоначально были идентифицированы в качестве кандидатов в ходе анализа данных наблюдений обзора WASP (Wide Angle Search for Planets) и для которых были проведены измерения лучевых скоростей и последующие оценки масс. Кроме того, авторами [1] для совместного комплексного анализа свойств экзопланет были использованы фотометрические данные, полученные космической миссией TESS, а также наземные фотометрические и спектроскопические измерения. Среди 9 объектов наше внимание привлекла система WASP-195, планета которой по оценкам [1] характеризуется низкой плотностью (менее 0.2 г/см^3). Ранее в [2] нами уже было выполнено изучение открытой в [3] планеты типа суб-нептун WASP-193 b, обращающейся вокруг F9 V звезды и имеющей массу $M = 0.139 M_{Jup}$

и радиус $R = 1.464 R_{Jup}$, которая также имеет чрезвычайно низкую плотность ($\rho = 0.059 \pm 0.014 \text{ г/см}^3$).

В настоящей работе представлены результаты оценки потери вещества атмосферы планеты WASP-195 b.

2. Звезда планетной системы WASP-195. Звезда WASP-195 известна как TYC 3502-393-1, 2MASS J16301192+4953446, TIC 232567319, TOI-4056, Gaia DR3 1411707818360668416. Данный объект малоизучен, это тот редкий случай, когда в базе данных Simbad содержится лишь одна ссылка на литературный источник, в котором бы приводились сведения о звезде (кроме каталогов GAIA, TESS и публикации [1]). Ниже приводятся сведения о свойствах звезды согласно данным, указанным в табл.5 работы [1].

Согласно [1], эффективная температура звезды равна $6300 \pm 125 \text{ К}$, ускорение силы тяжести $\log g = 4.14 \pm 0.25$, радиус $R/R_{\odot} = 1.578 \pm 0.066$ и масса $M/M_{\odot} = 1.30 \pm 0.08$. Возраст звезды по оценке [1] составляет 0.6 ± 0.2 млрд лет, т.е. звезда является достаточно молодой (вероятно она еще не утратила свою активность).

В архиве TESS для WASP-195 доступны данные четырех сетов наблюдений - 50, 52, 78 и 79. Наша обработка этих измерений была аналогична проводимой ранее для других объектов из архивов космического телескопа Кеплер и миссии TESS (см., например, [4,5]). К сожалению, данные наблюдений не дали возможности для установления периодической модуляции блеска объекта и величины периода вращения звезды.

Таким образом, следует признать, что пока WASP-195 остается малоизученной звездой и мы не располагаем данными о периоде ее вращения, уровне и циклах активности.

3. Потеря вещества атмосферы WASP-193 b. Как указывалось выше, WASP-195 b является планетой типа газовый гигант с массой порядка $0.104 \pm 0.030 M_{Jup}$ и большой полуосью орбиты $0.063 \pm 0.003 \text{ а.е.}$ Экзопланета такого типа с течением времени может терять свою гелиево-водородную атмосферу. По оценке в [1] найдено, что планета имеет радиус $R = 0.92 \pm 0.05 R_{Jup}$, что приводит к низкой плотности планеты $\rho = 0.16 \pm 0.06 \text{ г/см}^3$ (см. табл.6 в [1]). Эта величина низкой плотности сделала к настоящему времени WASP-195 b третьей по счету среди уникальных планет такого типа. Другие подобные объекты - Kepler 51 d ($\rho = 0.04 \pm 0.01 \text{ г/см}^3$) и WASP-193 b ($\rho = 0.059 \pm 0.014 \text{ г/см}^3$). Классические модели эволюции облучаемых планет-гигантов не способны воспроизвести радиус WASP-195 b. Планета может быть причислена к подгруппе аномально раздутых, сильно облучаемых газовых гигантов. Падающее на экзопланету WASP-195 b излучение (Sp) в 890 ± 127 раз больше, чем аналогичная величина для Земли (см. табл.6 в [1]). Для

объяснения большой величины радиуса экзопланеты (установленного по наблюдениям) часто рассматриваются процессы, которые или задерживают охлаждение (и сжатие) планеты, или связаны с выделением тепла в недрах планеты и последующей потерей массы атмосферы (см., например, обсуждение в [1,3,13]).

Низкая масса WASP-195 b и высокий уровень излучения центральной звезды также могут приводить к тому, что планета теряет свою массу, причем увеличенный наблюдаемый радиус может быть связан с испарением материи и его оттоком от планеты. Как и в случае WASP-193 b, для WASP-195 b еще нет наблюдательных указаний на потерю вещества атмосферы. Для того чтобы оценить, является ли эта потеря у WASP-195 b значительной, можно провести теоретическое моделирование потери массы в случае сильно облучаемых планет.

Принимая во внимание все имеющиеся сведения о планете из [1], мы выполнили приближенную оценку оттока вещества атмосферы WASP-195 b. Первоначально для подсчета такой потери без детального моделирования системы в нашем исследовании использовалась аппроксимационная формула (см., например, [6,7]), называемая в литературе, как модель потери атмосферы с ограничением по энергии (модель с ОЭ). В этой модели предполагается, что поток жесткого УФ-излучения поглощается в тонком слое радиуса R_{XUV} , где оптическая толщина для звездных XUV-фотонов равна единице, и включен учет приливного эффекта:

$$\frac{dM_p}{dt} \approx \frac{\varepsilon_{XUV} \pi F_{XUV} R_p R_{XUV}^2}{GM_p K_{tide}(\xi)}, \quad (1)$$

где ε_{XUV} - параметр эффективности нагрева ($\varepsilon_{XUV} = 0.2 \pm 0.1$ для мининептунов и супер-земель); G - гравитационная постоянная; F_{XUV} - поток XUV-фотонов; R_p - радиус планеты; M_p - масса планеты; R_{XUV} - радиус поглощения XUV-фотонов; $K_{tide}(\xi)$ - приливный параметр. Подробности использования соотношения (1) можно найти во многих литературных источниках, в том числе в [6-9].

Основные данные о планете WASP-195 b были взяты из [1]. Кроме того, для вычислений по формуле (1) требуются оценки величины F_{XUV} (потока XUV-фотонов). Для этой цели нами в предыдущих исследованиях, как правило, были использованы аналитические зависимости, полученные в [10] и связывающие величину F_{XUV} потока и параметр $\log R'_{HK}$ для звезд спектральных классов от F до M.

Поскольку в литературе отсутствуют данные о величине $\log R'_{HK}$ для WASP-195, мы использовали результаты [11] о распределении величин этого

параметра для звезд спектрального класса F. Согласно [10], это распределение скорее всего имеет два пика (расщепление одного из пиков может быть следствием бинирования данных) с максимумами для величин порядка -4.83 dex у малоактивных звезд и -4.58 dex - у активных.

Не исключено, что рассматриваемая звезда вследствие своего возраста (по оценкам из [1]) обладает величиной параметра $\log R'_{HK}$, характерной для активных звезд. Тем не менее, с учетом вышесказанного, мы выполнили расчеты для двух значений этого параметра по данным обзора [11].

Расчеты по соотношению (1) показали, что потеря вещества атмосферы экзопланеты $\dot{M}$ достаточно велика (даже в случае ее малой хромосферной активности). Диапазон изменений параметра $\dot{M}$ составляет от $9.3 \cdot 10^{10}$ г/с (малоактивный вариант) до $2.8 \cdot 10^{11}$ г/с (высокая активность). В любом случае, следует заключить, что планета интенсивно теряет свою атмосферу. Максимальное значение $\dot{M}$ может достигаться в случае высокой хромосферной активности звезды.

Величина потока XUV -фотонов равна $7.1 \cdot 10^{28}$ эрг/с и $2.1 \cdot 10^{29}$ эрг/с (для двух перечисленных выше случаев, соответственно), а величина приливного параметра $K_{tide}(\xi)$ - 0.65. Сравнительно большая величина потери вещества атмосферы планеты, прежде всего, вероятно, связана со значительным потоком УФ излучения от звезды с эффективной температурой $T_{эфф} = 6300$ К и с тем, что большая полуось орбиты составляет всего 0.063 а.е. Отметим, что использование аппроксимационной формулы, соответствующей модели потери атмосферы с ограничением по энергии, в принципе, дает ответ на вопрос о порядке величины оттока вещества из атмосферы планеты, однако данное приближение может в ряде случаев существенно недооценивать величину темпа потери массы, обсуждение данных вопросов содержится, например, в [7].

Существенный прогресс был достигнут в случае применения подхода (см. [12]), основанного на использовании сетки гидродинамических моделей верхних атмосфер и установлении темпа потери массы методом интерполяции между ячейками сетки. Авторы [12] представили сетку гидродинамических моделей верхних атмосфер, вычисленных для параметров планет в диапазоне 1-39 масс Земли, и описание возможности получения модельных выходных параметров.

Гидродинамическая аппроксимация (ГА) основана на сетке из 7000 одномерных гидродинамических моделей водородной верхней атмосферы для систем со следующими их свойствами: планета массой 1-39 масс Земли, радиусом 1-10 радиусов Земли, равновесной температурой 300-2000 К, родительская звезда массой 0.4-1.3 масс Солнца, радиусом орбиты 0.002 - 1.3 а.е. и светимостью в диапазоне XUV около $10^{26} - 5 \cdot 10^{30}$ эрг/с. Кроме того, существуют допол-

нительные ограничения (см., детали в [12]), например, по величине параметра убегания Джинса ($\Lambda < 80$).

Данная аппроксимация задается выражением:

$$\dot{M} = e^{\beta} F_{XUV}^{\alpha_1} d^{\alpha_2} R^{\alpha_3} \Lambda^{\zeta + \theta \ln d}, \quad (2)$$

где β , α_1 , α_2 , α_3 , ζ и θ - вычисленные в [12] коэффициенты, выбираемые в зависимости от режима истечения оболочки, d - радиус орбиты в астрономических единицах, R - радиус планеты в радиусах Земли, Λ - джинсовский параметр.

В табл.1 представлены результаты расчетов по моделям потери атмосферы с ограничением по энергии (модель с ОЭ) и гидродинамической аппроксимации (ГА) величин потери вещества атмосферы WASP-195 b при различных оценках параметра хромосферной активности $\log R'_{HK}$. Диапазоны изменений параметра $\dot{M}$ лежат в интервалах от $9.3 \cdot 10^{10}$ г/с до $2.8 \cdot 10^{11}$ г/с (модель с ОЭ, малая и высокая активность, соответственно) и от $2.4 \cdot 10^{11}$ г/с до $7.3 \cdot 10^{11}$ г/с (модель ГА, малая и высокая активность, соответственно).

Данные табл.1 позволяют проводить сопоставления полученных оценок $\dot{M}$ в зависимости от вариаций параметра $\log R'_{HK}$. В таблице также приводятся величины отношений $\dot{M}$ результатов расчетов по моделям с ОЭ и ГА и величины параметра Джинса Λ . Видно, что расчеты с моделью ОЭ приводят к заниженным оценкам параметра $\dot{M}$. Тем не менее, величина оценки отношения лежит в интервале значений, сопоставимых с полученными в [12] (см., например, рис.3).

Таблица 1

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПО МОДЕЛЯМ ПОТЕРИ АТМОСФЕРЫ

$\log R'_{HK}$	$\dot{M}$ модель с ОЭ г/с	$\dot{M}$ модель с ГА, г/с	Ratio	Λ
-4.83	$9.3 \cdot 10^{10}$	$2.4 \cdot 10^{11}$	0.38	31
-4.58	$2.8 \cdot 10^{11}$	$7.3 \cdot 10^{11}$	0.38	31

4. Заключение. В статье представлены результаты анализа проявлений активности звезды WASP-195 спектрального класса F с планетой, которая при массе всего 0.104 массы Юпитера имеет сопоставимый с ним радиус. Планета имеет низкую плотность $\rho = 0.16 \pm 0.06$ г/см³ (аналогичными ей объектами являются, например, WASP-193 b и Kepler 51 d). Равновесная температура атмосферы планеты высока - $T_{eq} = 1522 \pm 71$ K.

В данном исследовании для оценки величины оттока вещества из атмосферы планеты были рассмотрены два подхода - были применены аппроксимационная формула, соответствующая модели потери атмосферы с

ограничением по энергии, и метод, основанный на интерполяции результатов для сетки гидродинамических моделей верхних атмосфер. Для вычислений величины F_{XUV} (потока XUV -фотонов) были использованы аналитические зависимости, связывающие F_{XUV} и параметр $\log R'_{HK}$ для звезд спектральных классов F - M. В табл.1 приводятся данные, позволяющие сопоставить полученные оценки $\dot{M}$ в зависимости от вариаций параметра $\log R'_{HK}$ для моделей потери атмосферы с ограничением по энергии и гидродинамической аппроксимации. Расчеты показали, что потеря вещества атмосферы экзопланеты достаточно велика (даже в случае ее малой хромосферной активности). Максимальная величина параметра $\dot{M}$ может составлять $7.3 \cdot 10^{11}$ г/с (модель ГА, высокая активность звезды).

Согласно [1], WASP-195 является молодой звездой (0.75 ± 0.55 млрд лет), которая вероятно все еще охлаждается и сжимается после своего образования. Возможная продолжительность этого процесса может составлять порядка 1 млрд лет (см. в [1]). Наблюдения планетных систем, аналогичных WASP-195 и имеющих разный возраст, могли бы подтвердить связь между возрастом и инфляцией оболочки планеты, проявляющуюся в том, что более массивные планеты с малой массой, но радиусом порядка R_{Jup} , как правило, находятся вокруг молодых звезд, тогда как более плотные планеты обращаются вокруг старых звезд. Авторы [13] смоделировали две аналогичные раздутые субнептуновые планеты, вращающиеся вокруг молодой (≈ 0.5 млрд лет) звезды Кеплер-51 и обнаружили, что планеты, вероятно, еще сжимаются и теряют массу, при этом прогнозируемая конечная плотность приближается к величинам, которые в большей степени соответствуют популяции субнептуновых планет. Дальнейшее моделирование эволюции атмосферы WASP-195 b может предоставить доказательства подобной эволюции. В дополнение к сжатию, миграция также может играть определенную роль в раздувании атмосферы планеты. Предполагается, что если планеты типа Юпитера, сформировались за линией льда системы, то быстрое охлаждение оболочки могло позволить ядрам даже с малой массой сформировать большие H/He атмосферы. По мере того, как планеты мигрируют ближе к звезде, они подвергаются повышенному воздействию звездного излучения, что еще больше раздувает атмосферу. В будущем спектральные наблюдения WASP-195 b в сочетании с моделированием внутреннего строения планеты помогут определить ограничения на соотношение масс ядра и атмосферы, что позволит получить представление о возможных сценариях формирования планеты.

Следует заключить, что планета WASP-195 b, вероятно, интенсивно теряет свою атмосферу. Эту планету можно рассматривать в качестве высоко-приоритетного кандидата для наблюдений с помощью космического телескопа

JWST (метрика трансмиссионной спектроскопии TSM для объекта составляет около 150 [1]), а также она заслуживает в дальнейшем включения в научную программу космической обсерватории Спектр-УФ [14].

¹ Учреждение Российской академии наук Институт астрономии РАН, Москва, Россия, e-mail: igs231@mail.ru

² Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Москва, Россия, e-mail: issesd@rambler.ru

MASS LOSS OF THE PLANET WASP-195 b ATMOSPHERE

I.S.SAVANOV¹, E.S.DMITRIENKO²

The results of the estimations of mass loss from the atmosphere of the planet WASP-195 b are presented. The F type star WASP-195 has a planet with a mass of only 0.104 Jupiter masses, but with a radius comparable to R_{Jup} . The planet has a low density of $\rho = 0.16 \pm 0.06 \text{ g/cm}^3$. To estimate the amount of outflow of matter from the planet's atmosphere, two approaches were used - an approximation formula corresponding to an energy-limited atmospheric loss model and a method based on the use of interpolation of the results for a grid of hydrodynamic models of the upper atmospheres. The values of the flux of XUV photons from the star were determined by an analytical dependence linking F_{XUV} and the $\log R'_{HK}$ parameter. The obtained estimates of mass loss from the planet's atmosphere for models of atmospheric loss with energy limitation and hydrodynamic approximation are compared depending on variations of the $\log R'_{HK}$ parameter. Calculations have shown that the mass loss of the planet's atmosphere is quite large (even in the case of low stellar chromospheric activity). The maximum value of the parameter $\dot{M}$ can be $7.3 \cdot 10^{11} \text{ g/s}$ (hydrodynamic approximation model, high star activity).

Keywords: *stars: activity: spots: photometry: variability: planetary systems: exoplanet atmospheres*

ЛИТЕРАТУРА

1. *N.Schanche, G.Hebrard, K.G.Stassun et al.*, arXiv:2504.08091, 2025. doi:10.48550/arXiv.2504.08091.
2. *I.S.Savanov*, *Astrophysics*, **66**, 463, 2023. doi:10.1007/s10511-024-09803-8.
3. *K.Barkaoui, F.J.Pozuelos, C.Hellier et al.*, *Nature Astron.*, **8**, 909, 2024. doi:10.1038/s41550-024-02259-y.
4. *I.S.Savanov, E.S.Dmitrienko*, *Astron. Lett.*, **46**, 177, 2020.
5. *I.S.Savanov*, *Astrophys. Bull.*, **76**, 157, 2021. doi:10.1134/S1990341321020097.
6. *L.Fossati, N.V.Erkaev, H.Lammer et al.*, *Astron. Astrophys.*, **598**, A90, 2017.
7. *T.T.Koskinen, P.Lavvas, M.Huang et al.*, *Astrophys. J.*, **929**, 52, 2022.
8. *N.V.Erkaev, Yu.N.Kulikov, H.Lammer et al.*, *Astron. Astrophys.* **472**, 329, 2007.
9. *E.S.Kalinicheva, V.I.Shematovich, I.S.Savanov*, *Astron. Rep.*, **66**, 1319, 2022.
10. *A.G.Sreejith, L.Fossati, A.Youngblood et al.*, *Astron. Astrophys.*, **644**, A67, 2020.
11. *J. Gomes da Silva, N.C.Santos, V.Adibekyan et al.*, *Astron. Astrophys.*, **646**, A77, 2021.
12. *D.Kubyshkina, L.Fossati, N.V.Erkaev et al.*, *Astrophys. J.*, **866**, L18, 2018. doi:10.3847/2041-8213/aae586.
13. *J.E.Libby-Roberts, Z.K.Berta-Thompson, J.-M.Desert et al.*, *Astron. J.*, **159**, 57, 2020. doi:10.3847/1538-3881/ab5d36.
14. *B.Shustov, A.I.Gomez de Castro, M.Sachkov et al.*, *Astrophys. Space Sci.*, **363**, 62, 2018. doi:10.1007/s10509-018-3280-7.