

ВЕКОВАЯ ДИНАМИКА РЯДА ПЛАНЕТ ИЗ КАТАЛОГА TESS, ОБНАРУЖЕННЫХ В ДВОЙНЫХ ЗВЕЗДНЫХ СИСТЕМАХ

© 2023 г. А. В. Мельников^{1*}, Ю. Г. Копылова¹

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 18.04.2023 г.

После доработки 08.05.2023 г.; принята к публикации 08.05.2023 г.

Проведено исследование устойчивости орбитальной динамики ряда планет, обнаруженных в двойных звездных системах на основе анализа данных с орбитальной обсерватории TESS. Для 20 циркумзвездных планет получены характерные оценки ляпуновского времени (времени предсказуемой динамики). Вековая орбитальная динамика 18 рассмотренных планет является устойчивой с ляпуновскими временами более 6000 лет. Для планет TOI-905b и TOI-1634b вычисленные ляпуновские времена малы (менее 3000 лет), соответствуют неустойчивой динамике и указывают на возможные неточности в найденных параметрах планет. Детальный анализ устойчивости вековой динамики циркумбинарных планет TOI-1338 и TIC 172900988 показал, что на диаграммах устойчивости планеты расположены в областях с относительно большими ляпуновскими временами (более 7000 лет), что подтверждает достоверность полученных параметров планет.

Ключевые слова: экзопланеты, двойные звезды, обсерватория TESS, устойчивость движения, показатели Ляпунова, TOI-905b, TOI-1634b, TOI-1338, TIC 172900988.

DOI: 10.31857/S0320010823040034, **EDN:** CVBLQE

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большой объем наблюдательных данных о наличии планет у других звезд получают с орбитальной обсерватории TESS (Рикер и др., 2015). Цель миссии TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), представляющей собой космический телескоп, отправленный на орбиту в 2018 г., состоит в поиске методом TTV (Transit Timing Variation, см. подробнее, например, Маров, Шевченко, 2022) планет у ближайших ярких звезд (ближе 200 пк). Согласно информации, приведенной на официальном сайте миссии TESS (<https://tess.mit.edu/>), на апрель 2023 г. каталог TESS (<https://tess.mit.edu/publications/>) включал в себя 6400 потенциально интересных объектов (идентификатор в каталоге — TOI (TESS Objects of Interest)), в число которых входят 329 официально подтвержденных планет. Электронный каталог <http://exoplanet.eu/> содержит достаточно полную информацию об определенных из анализа наблюдений параметрах известных планетных систем и звездах, у которых они обнаружены. Там же можно найти ссылки на исходные статьи, из которых взяты приведенные в каталоге данные. Важным явля-

ется вопрос о достоверности известных параметров планет.

Более 60% всех звезд Солнечного типа в Галактике входят в двойные системы (Дюкеннуа, Мейор, 1991). Поэтому естественно ожидать, что значительная часть планет с пригодными для жизни условиями находится в системах двойных звезд. В настоящее время известно более 200 планет в двойных системах (см. подробнее http://exoplanet.eu/planets_binary/). Статистические исследования планет в двойных звездных системах и их списки можно также найти в работах (Муграуэр, Мишель, 2020, 2021; Лестер и др., 2021; Фонтанив, Бардалес Гальюффи, 2021; Мо, Краттер, 2021; Циглер и др., 2020, 2021). Вопрос о надежности определенных из наблюдений параметров планет у двойных звезд (и в системах большей кратности) можно попытаться решить посредством проведения численных экспериментов по исследованию вековой орбитальной эволюции планетной системы (Маров, Шевченко, 2022). А именно, если для значений параметров, определенных из анализа наблюдательных данных, вековая орбитальная динамика планетной системы является устойчивой, то это свидетельствует о достоверности значений параметров. Хотя нельзя исключать случай, когда неверно определенные

*Электронный адрес: sunny_melnikov@mail.ru

орбитальные элементы задают устойчивый характер движения планеты. Напротив, выявленный неустойчивый характер орбитальной динамики планетной системы указывает на наличие ошибок в принятых для нее значениях параметров, поскольку для наблюдаемых в природе установившихся состояний различных систем присущ (Четаев, 1965) устойчивый характер движения.

Исследование устойчивости планетной системы можно провести путем использования эмпирического критерия устойчивости (Хольман, Вигерт, 1999), посредством численного интегрирования ее орбитальной эволюции на длительном промежутке времени, либо с помощью различных численных методов анализа устойчивости динамических систем (см. подробнее Лихтенберг, Либерман, 1984; Морбиделли, 2014; Мельников, 2018) — вычисления характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ), параметра MEGNO (Mean Exponential Growth factor of Nearby Orbits) и пр. Путем изучения характера устойчивости вековой динамики планетной системы на множестве возможных значений ее параметров можно предсказать их наиболее вероятные значения, либо уточнить их.

В рамках настоящего исследования из каталога TESS были отобраны планетные системы, обнаруженные у двойных звезд. С помощью массового вычисления ХПЛ на множестве возможных значений параметров систем проведено изучение устойчивости их вековой динамики. Цель работы состоит в определении достоверности установленных из анализа наблюдательных данных значений параметров избранных планетных систем и возможном уточнении их величин.

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЛЯПУНОВА

Из представленных в каталоге TESS планет были отобраны те, что обнаружены у двойных звезд с большой полуосью звездной орбиты $a < 500$ а.е. Такой выбор обусловлен тем, что при изучении устойчивости динамики планет в относительно тесных звездных системах можно ограничиться интегрированием уравнений движения на разумных временных интервалах (менее 100 тыс. лет), такое исследование обычно не требует существенных вычислительных ресурсов. Кроме того, численные эксперименты показывают (Мельников, 2018), что в пространстве возможных значений параметров планет, находящихся в тесных двойных звездных системах, присутствуют достаточно большие области, в которых планетная динамика является неустойчивой. Нельзя исключать, что определенные из анализа транзитов параметры планетной

системы принадлежат области с неустойчивой динамикой. Поскольку в настоящее время темп обнаружения планет существенно вырос, детальное изучение их орбитальной устойчивости в работах, где представлены вновь открытые планетные системы и определены их параметры, проводится редко.

При исследовании устойчивости мы рассматривали вековую эволюцию системы, состоящей из трех тел — двух звезд и планеты. Уравнения движения имеют вид

$$m_i \frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = -\frac{\partial U}{\partial \mathbf{r}_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где m_i — массы тел, $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ — вектор положения i -го тела в прямоугольной системе координат с началом в центре масс системы, t — время, U — потенциал:

$$U = G \left(\frac{m_1 m_2}{r_{12}} + \frac{m_1 m_3}{r_{13}} + \frac{m_2 m_3}{r_{23}} \right),$$

где $r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$ — расстояние между i -м и j -м телами, G — гравитационная постоянная. При интегрировании было принято $G = 4\pi^2$, массы тел выражены в массах Солнца, все расстояния выражены в астрономических единицах, время — в годах.

Для интегрирования уравнений движения (1) использовался интегратор DOP853 (Хайрер и др., 1993), реализующий метод Рунге–Кутты 8-го порядка, с автоматически изменяемой величиной шага интегрирования. Максимальный шаг интегрирования был принят равным $\Delta t_{\max} = 0.001$ года, величина локальной (на одном шаге) погрешности интегрирования — $\varepsilon = 10^{-12}$. На основе заданного значения ε интегратор DOP853 автоматически подбирает необходимую величину шага интегрирования, не превышающую $\Delta t_{\max}$ (см. подробнее Хайрер и др., 1993).

При интегрировании применялись три критерия устойчивости планетной орбиты. Первый критерий — контроль сохранения полной энергии тройной системы — позволял фиксировать тесные сближения (столкновения) тел. Тесное сближение планеты со звездой фиксировалось, когда относительное изменение текущей величины энергии превышало 10^{-5} (величина определена эмпирически). В качестве второго и третьего критериев отслеживались пересечение планетой сферы Роша и выход планеты из сферы Хилла родительской звезды соответственно. При возникновении хотя бы одного из указанных выше событий интегрирование останавливалось, и орбита планеты для принятых начальных значений параметров считалась неустойчивой. В случае успешного интегрирования планетной орбиты на

всем заданном интервале времени ее характер (устойчивая/неустойчивая) определялся на основе анализа вычисленных величин ХПЛ.

Далее напомним кратко, что собой представляют ХПЛ (см. подробнее Бенеттин и др., 1976, 1980; Оселедец, 1968; Чириков, 1979; Лихтенберг, Либерман, 1984; Морбиделли, 2014). Рассмотрим две близкие по начальным условиям траектории фазового пространства динамической системы. Одну из траекторий будем называть “опорной”, другую — “теневой”. Пусть $d(t_0)$ — длина вектора смещения $\mathbf{d}$, направленного от опорной траектории к теневой, в начальный момент времени t_0 , $d(t)$ — длина этого вектора в произвольный момент времени t . Тогда ХПЛ определяется формулой (Оселедец, 1968; Лихтенберг, Либерман, 1984; Морбиделли, 2014)

$$L = \lim_{\substack{t \rightarrow \infty \\ d(t_0) \rightarrow 0}} \frac{1}{t - t_0} \ln \frac{d(t)}{d(t_0)} \quad (2)$$

и представляет собой среднюю скорость экспоненциальной расходимости близких по начальным условиям траекторий фазового пространства.

Системе с N степенями свободы может быть поставлен в соответствие набор из $2N$ постоянных — ХПЛ: $L_i \geq L_{i+1}$, где $i = 1, \dots, 2N - 1$. В случае автономной (не зависящей от времени) гамильтоновой системы по крайней мере два из $2N$ показателей равны нулю. Ненулевые разбиваются на пары равных по абсолютной величине, но противоположных по знаку показателей $L_i = -L_{i+N}$, где $i = 1, \dots, N$.

Как показано, например, в монографии (Лихтенберг, Либерман, 1984), для почти всех $\mathbf{d}$ в формуле (2) имеем максимальный показатель в спектре $L = L_1$. Ненулевая величина максимального ХПЛ (МХПЛ) указывает на хаотический (неустойчивый), а нулевая — на регулярный (устойчивый) характер движения. Величина, обратная МХПЛ, — ляпуновское время — представляет собой характерное время предсказуемой динамики системы. Именно на основе величины ляпуновского времени мы и делали вывод о характере устойчивости планетной системы. Для величины ляпуновского времени было принято $T_L = 1/L$.

Вычисление ХПЛ проводилось с помощью метода HQRV (Householder QR-Based) (фон Бремени и др., 1997), реализованного в виде программного комплекса на языке ФОРТРАН в работе (Шевченко, Куприянов, 2002). HQRV-метод позволяет вычислять полный спектр ХПЛ, для анализа динамики планетных систем мы использовали только значения МХПЛ.

Критерий для разделения устойчивых и неустойчивых планетных орбит был получен посредством

статистического метода, предложенного в (Мельников, Шевченко, 1998). Метод основан на анализе дифференциального распределения МХПЛ, вычисленных на выборке значений параметров (или начальных условий). Устойчивым орбитам соответствует “подвижный” пик в распределении вычисленных значений МХПЛ. А именно, если построить график “ $L - F(L)$ ”, где $F(L)$ — число попаданий вычисленных значений МХПЛ в интервал $(L, L + \Delta L)$, $\Delta L > 0$ — длина интервала, то с ростом промежутка времени, на котором вычисляется МХПЛ, пик, соответствующий устойчивым орбитам, смещается по оси абсцисс в сторону уменьшения величин показателей (в сторону увеличения ляпуновского времени). Пики, соответствующие неустойчивым орбитам (им соответствуют малые ляпуновские времена), остаются на месте. Разделив пики в распределении, получим пороговую величину МХПЛ (пороговую величину ляпуновского времени) для разделения устойчивых и неустойчивых орбит.

ЦИРКУМЗВЕЗДНЫЕ ПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ

Список отобранных из каталога TESS планет с указанием их масс и орбитальных параметров приведен в табл. 1, там же даны параметры звездных систем, в которых эти планеты обнаружены. Приведенные данные и дополнительную информацию о двойных звездных системах и планетах, обнаруженных в этих системах в рамках миссии TESS, можно найти в работах (Муграуэр, Мишель, 2020, 2021; Циглер и др., 2020, 2021; Лестер и др., 2021) и по ссылке http://exoplanet.eu/planets_binary/. Отметим, что в табл. 1 перечислены только планетные системы S-типа (“satellite-type”), в которых планеты обращаются на орбитах вокруг одиночных звезд — компонентов двойной (циркумзвездные системы). Системы P-типа (“planet-type”), в которых планеты обращаются на орбитах вокруг центральной двойной (циркумбинарные системы), рассматриваются нами в следующем разделе (данные обозначения планет введены в работе Дворак (1984); см. также Маров, Шевченко, 2022). В четырех из рассмотренных нами системах (TOI-141, TOI-402, TOI-732, TOI-1797) обнаружено несколько планет, мы рассматривали их динамику в рамках задачи трех тел, пренебрегая влиянием одной планеты на орбитальную эволюцию другой. Для планеты TOI-1860b в качестве M_2 указана суммарная масса второй и третьей звезд, представляющих собой весьма удаленную от первой звезды, где обнаружена планета, тесную двойную систему (см. Муграуэр, Мишель, 2020).

Таблица 1. Список ряда обнаруженных орбитальной обсерваторией TESS планет в двойных звездных системах

Планета	M_1	M_2	a , а.е.	a_p , а.е.	e_p	i_p , °	m_p	Ист.
TOI-129b	0.78	0.30	245	0.0178 ± 0.0002	0	77.18	3.213 ± 0.078	[1]
TOI-130b	1.13	0.30	130	0.2416 ± 0.0027	0.07	89.27	0.0245 ± 0.0047	[2]
TOI-141b	1.07	0.50	23.7	0.0201 ± 0.0001	0	80.09	0.0278 ± 0.0021	[3]
TOI-141c	1.07	0.50	23.7	0.0568 ± 0.0004	0	—	0.0628 ± 0.0043	[3]
TOI-172b	1.13	0.48	452.9	0.0914 ± 0.0017	0.3806	88.30	5.42 ± 0.22	[4]
TOI-402b	0.85	0.12	65.8	0.052 ± 0.001	0.17	88.36	0.0226 ± 0.0025	[5]
TOI-402c	0.85	0.12	65.8	0.123 ± 0.002	0.19	88.41	0.0276 ± 0.0053	[5]
TOI-564b	1.10	0.48	133.4	0.0273 ± 0.0006	0.072	78.38	1.463 ± 0.1	[6]
TOI-640b	1.54	0.77	85.0	0.0661 ± 0.0011	0.050	82.54	0.88 ± 0.16	[7]
TOI-732b	0.40	0.14	348	0.0121 ± 0.0001	0.064	85.90	0.0082 ± 0.0015	[8]
TOI-732c	0.40	0.14	348	0.0767 ± 0.0008	0.115	89.08	0.0271 ± 0.0050	[8]
TOI-737b	0.60	0.22	254	0.02384 ± 0.00011	0.044	87.90	1.46 ± 0.14	[9]
TOI-905b	0.85	0.25	358	0.0467 ± 0.0011	0.024	85.68	0.667 ± 0.042	[6]
TOI-1201b	0.51	0.46	316.2	0.0287 ± 0.0012	0	88.11	0.0197 ± 0.0028	[10]
TOI-1452b	0.25	0.27	97	0.061 ± 0.003	0	89.77	0.0152 ± 0.0041	[11]
TOI-1634b	0.50	0.17	90	0.0154 ± 0.0001	0.16	88.20	0.0154 ± 0.0022	[12]
TOI-1797b	1.11	0.17	485	0.02085 ± 0.00037	—	86.21	0.024 ± 0.010	[13]
TOI-1797c	1.11	0.17	485	0.04813 ± 0.00085	—	—	0.060 ± 0.014	[13]
TOI-1860b	0.99	0.22	251	0.0204 ± 0.0002	—	—	0.0069 ± 0.0041	[14]
TOI-2152b	1.52	0.50	250	0.05064 ± 0.0011	0.057	86.42	2.83 ± 0.38	[15]

Примечание. Указаны только циркумзвездные планеты в двойных системах с большой полуосью орбиты $a < 500$ а.е. Данные о параметрах звездных систем взяты из работ (Муграуэр, Мишель, 2020, 2021; Циглер и др., 2020, 2021; Лестер и др., 2021) и электронного каталога <http://exoplanet.eu/>. В последнем столбце указаны источники данных о параметрах планет. M_1 , M_2 — массы звезд, выраженные в массах Солнца; a — большая полуось звездной системы; a_p , e_p — большая полуось и эксцентриситет орбиты планеты; i_p — наклон орбиты планеты к картинной плоскости; m_p — масса планеты, выраженная в массах Юпитера. Источники данных о параметрах планет: [1] — Нильсен и др., 2020; [2] — Соцетти и др., 2021; [3] — Эспиноза и др., 2020; [4] — Родригес и др., 2019; [5] — Дюмюск и др., 2019; [6] — Дэвис и др., 2020; [7] — Родригес и др., 2021; [8] — Клотье и др., 2020; [9] — Джордан и др., 2022; [10] — Косаковский и др., 2021; [11] — Кадье и др., 2022; [12] — Клотье и др., 2021; [13] — Серрано и др., 2022; [14] — Джакалоне и др., 2022; [15] — Родригес и др., 2023.

Посредством вычисления ХПЛ мы оценили величину ляпуновского времени для всех планет, перечисленных в табл. 1. Для каждой планеты ХПЛ вычислялись на множестве значений параметров (a_p , m_p), заданном путем наложения равномерной сетки 10×10 на область, ограниченную ошибками

значений указанных параметров (см. табл. 1). ХПЛ вычислялись для значений параметров, соответствующих узлам данной сетки. Выбор для исследования устойчивости плоскости (a_p , m_p) обусловлен тем, что указанные величины определены для всех рассмотренных планетных систем. Интервал вре-

Таблица 2. Ляпуновские времена циркумзвездных планетных систем

Планета	T_L , год
TOI-129b	6533–8707
TOI-130b	6850–8944
TOI-141b	6490–8130
TOI-141c	6230–7745
TOI-172b	6937–7860
TOI-402b	7340–8832
TOI-402c	6810–8614
TOI-564b	7295–8860
TOI-640b	6532–8410
TOI-732b	7438–8190
TOI-732c	7163–8330
TOI-737b	6556–7828
TOI-905b	1550–2524
TOI-1201b	6820–8834
TOI-1452b	7830–8737
TOI-1634b	1965–2936
TOI-1797b	7210–8456
TOI-1797c	6942–7774
TOI-1860b	6790–8910
TOI-2152b	6145–7633

мени интегрирования уравнений движения (1) при вычислении ХПЛ составлял 10^5 лет. Вычисление ХПЛ на указанном интервале позволяло уверенно разделять устойчивые и неустойчивые орбиты с помощью метода, предложенного Мельниковым и Шевченко (1998) (см. предыдущий раздел). Было установлено, что орбиты с $T_L > 6000$ лет являются устойчивыми, неустойчивым орбитам соответствуют ляпуновские времена $T_L < 3000$ лет. Все неуказанные в табл. 1 и неопределенные (им соответствуют прочерки в таблице) орбитальные элементы

систем в начальный момент времени были положены равными нулю. Для подавляющего большинства рассмотренных звездных систем неизвестна ориентация звездной орбиты относительно картинной плоскости. При численном интегрировании мы считали, что движения всех тел происходят в одной плоскости, полагая $\dot{i} = \dot{i}_p = 0$. Поэтому полученные нами значения ляпуновских времен являются оценочными и мотивируют к дальнейшим детальным исследованиям планетных систем, у которых выявлена неустойчивая орбитальная динамика.

Вычисленные значения ляпуновских времен приведены в табл. 2. В таблице указаны минимальное и максимальное значения ляпуновского времени, найденные на определенном выше множестве значений параметров. Для 18 планет все ляпуновские времена относительно велики — $T_L > 6000$ лет, и соответствуют устойчивой вековой орбитальной динамике. Неустойчивые орбиты были обнаружены только в динамике планет TOI-905b и TOI-1634b. Для ряда значений параметров наблюдалось тесное сближение этих планет с родительскими звездами, либо пересечение сферы Роша (столкновение планеты со звездой). В таких случаях интегрирование заканчивалось до достижения заданного интервала в 10^5 лет. Вычисленные ляпуновские времена для планет TOI-905b и TOI-1634b весьма малы — $T_L < 3000$ лет, что указывает на наличие существенных ошибок в определенных из анализа наблюдательных данных параметрах планет.

На рис. 1 приведены примеры диаграмм устойчивости для планет TOI-130b, TOI-640b, TOI-905b и TOI-1634b, построенных на основе вычисленных значений ляпуновских времен. Видно, что планеты TOI-130b и TOI-640b расположены в областях с большими ляпуновскими временами — орбитальная динамика указанных планет является устойчивой. Планеты TOI-905b и TOI-1634b расположены в областях с малыми ляпуновскими временами, ряду значений параметров соответствуют неустойчивые орбиты, они выделены белым цветом на рис. 1. Сопоставление ХПЛ, вычисленных для планет TOI-905b и TOI-1634b на интервалах времени $t = 5 \times 10^4$ лет и 10^5 лет, показало, что они существенно не изменяются при увеличении времени интегрирования. Поэтому все указанные на рис. 1 значения параметров TOI-905b и TOI-1634b соответствуют неустойчивым орбитам с ляпуновскими временами $T_L < 3000$ лет. Необходимо провести дополнительные исследования по уточнению орбитальных параметров этих двух систем. Отметим, что на ресурсе http://exoplanet.eu/planets_binary_notes/ указывается на возможность более высокой иерархии у звездной системы (тройная система?), где обнаружена планета TOI-905b. Планета TOI-1634b

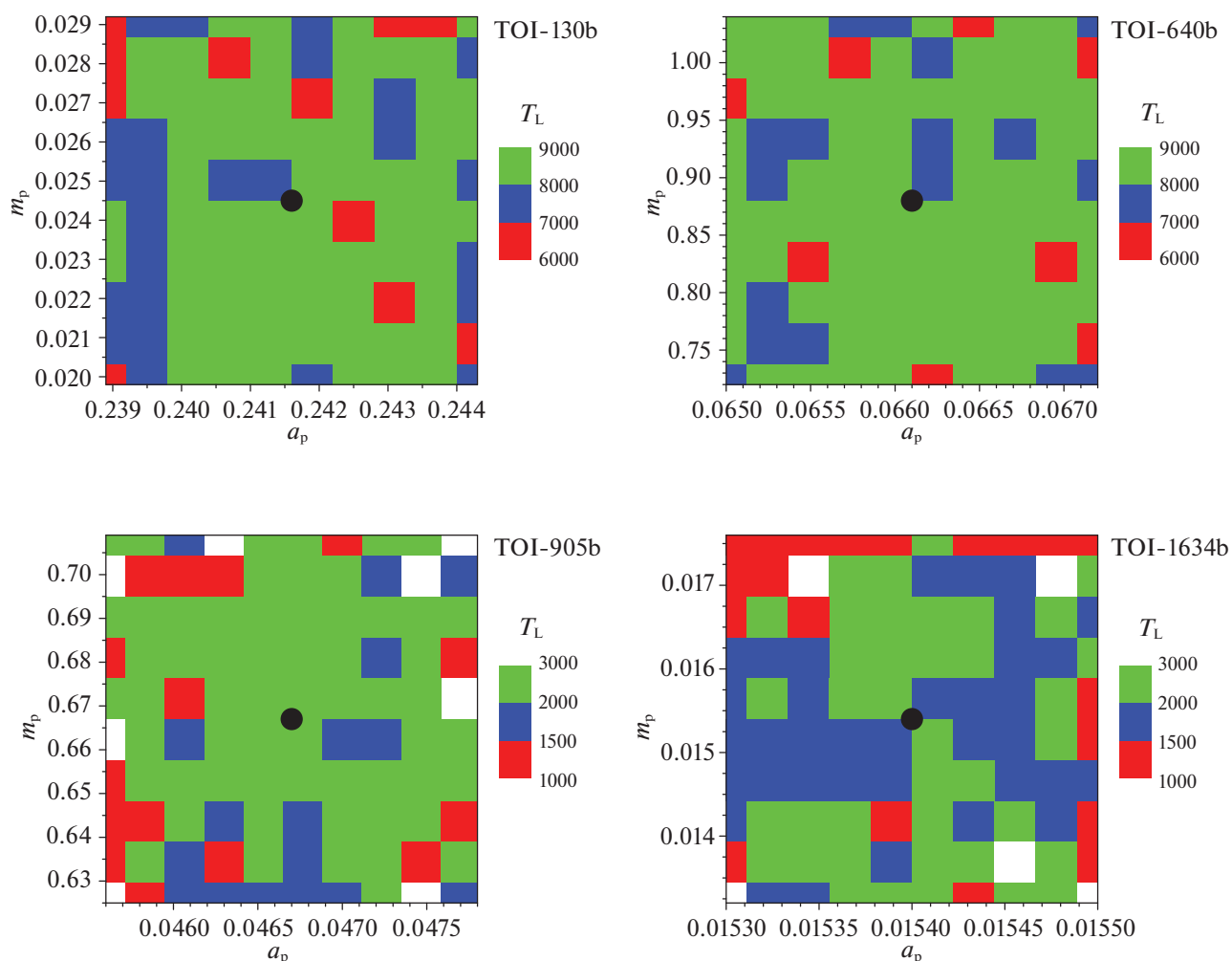


Рис. 1. Ляпуновские времена (в годах), вычисленные на множестве возможных значений параметров планет TOI-130b, TOI-640b, TOI-905b и TOI-1634b. Белый цвет соответствует неустойчивым планетным орбитам. Черные кружки указывают местоположения планет, согласно данн. табл. 1. Масштаб рисунков задан величинами ошибок определения значений параметров планетных систем (табл. 1). Большая полуось орбиты планеты a_p дана в а.е., масса планеты m_p — в массах Юпитера.

обладает весьма малым орбитальным периодом (менее суток, см. Клотье и др., 2021), поэтому ее динамика вероятно весьма сложна и требует дополнительного детального изучения.

ЦИРКУМБИНАРНЫЕ ПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ

К настоящему времени с помощью обсерватории TESS открыты (Костов и др., 2020, 2021) две планетные системы Р-типа, в которых планеты обращаются на орбитах вокруг центральной двойной (циркумбинарные системы) — TOI-1338 и TIC 172900988 (указан идентификатор в TESS Input Catalog (TIC)). Физические и орбитальные параметры указанных циркумбинарных планет и звездных систем, в которых они находятся, приведены в табл. 3.

С помощью метода MEM (Maximum Eccentricity Method) (см. подробнее об этом методе, например, Мельников, 2018), основанного на анализе вековой эволюции орбитального эксцентриситета планеты, в работах (Костов и др., 2020, 2021) на плоскости (a_p , e_p) были построены диаграммы устойчивости для планет TOI-1338 и TIC 172900988. Определенные из анализа транзитов параметры планет соответствуют на диаграммах областям устойчивой динамики. Однако, как показано в работе Мельникова (2018), применение метода MEM позволяет получить лишь грубую оценку границ областей устойчивой/неустойчивой динамики планетной системы.

В работе Георгакаракоса (2022) были определены зоны устойчивости и обитаемости планетных систем TOI-1338 и TIC 172900988 как посредством применения теоретического критерия устой-

Таблица 3. Физические и орбитальные параметры двойных звезд и обнаруженных у них с помощью орбитальной обсерватории TESS циркумбинарных планет

Параметр	TOI-1338	TIC 172900988
M_1	1.038	1.238
M_2	0.297	1.202
a , а.е.	0.1289	0.1919
e	0.1560	0.4478
i , °	89.66	89.42
a_p , а.е.	0.449133	0.86762–0.91359
e_p	0.09283	0.0269–0.0826
i_p , °	89.22	87.91–89.31
m_p	0.095	2.592–3.088

Примечание. Данные взяты из работ (Костов и др., 2020, 2021). M_1 , M_2 — массы звезд, выраженные в массах Солнца; a , e , i — большая полуось, эксцентриситет и наклонение к картинной плоскости орбиты звездной системы; a_p , e_p , i_p — большая полуось, эксцентриситет и наклонение к картинной плоскости орбиты планеты; m_p — масса планеты, выраженная в массах Юпитера. Для планеты в системе TIC 172900988 указан диапазон значений из шести имеющихся решений (см. Костов и др., 2021).

чивости (Георгакаракос, Эггл, 2015), так и путем численного интегрирования уравнений движения с последующим анализом поведения орбитальных элементов планет. В численных экспериментах изучалась динамика дополнительной гипотетической планеты земной массы, помещенной в область обитаемости исследуемых систем. Согласно Георгакаракосу (2022), для планеты земной массы практически все орбиты из области обитаемости для рассмотренных систем являются устойчивыми. Недавно Гакис и Гургульятос (2023) посредством численного интегрирования в рамках задачи N-тел установили устойчивость орбитальной динамики планетных систем TOI-1338 и TIC 172900988 для принятых значений их параметров (Костов и др., 2020, 2021).

Мы построили диаграммы устойчивости для TOI-1338 и TIC 172900988 путем массового вычисления ХПЛ — метода, имеющего, в отличие от метода МЕМ, применявшегося Костовым и др. (2020, 2021), строгое математическое обоснование (см. Оселедец, 1968; Бенеттин и др., 1976, 1980; Лихтенберг, Либерман, 1984). Вычисление

ХПЛ проводилось для начальных значений орбитальных параметров планет, заданных в узлах равномерной сетки размером 20×20 , наложенной на плоскость (a_p , e_p). Интервал времени интегрирования уравнений движения (1) при вычислении ХПЛ составлял 10^5 лет, что эквивалентно примерно 4×10^5 и 2×10^5 орбитальным периодам планеты TOI-1338 и TIC 172900988 соответственно.

Диаграммы устойчивости для планет TOI-1338 и TIC 172900988 представлены на рис. 2. На диаграммах указана величина ляпуновского времени планетной системы (как и ранее, $T_L = 1/L$, где L — максимальный ХПЛ) и отмечены местоположения планет, согласно данным Костова и др. (2020, 2021). Отметим, что в случае планеты TIC 172900988 имеется шесть решений (Костов и др., 2021), удовлетворяющих имеющимся наблюдательным данным, все решения указаны на рис. 2. Как и на рис. 1, на рис. 2 значения ляпуновских времен $T_L > 6000$ лет соответствуют устойчивым планетным орбитам. Малые ($T_L < 3000$ лет) значения ляпуновских времен соответствуют неустойчивым конфигурациям. Белый цвет на диаграммах также соответствует неустойчивым планетным орбитам — планета с указанными начальными значениями орбитальных параметров либо сталкивается с одной из звезд, либо покидает сферу Хилла звездной системы. Промежуточные ($3000 < T_L < 6000$ лет) значения ляпуновских времен в большинстве соответствуют неустойчивым орбитам, как показывают численные эксперименты по вычислению для них ХПЛ на интервале времени большем, чем использовался нами при построении диаграмм (рис. 2).

Анализ построенных нами диаграмм устойчивости показал, что определенные из наблюдений значения орбитальных параметров, соответствующих планете TOI-1338, и все шесть возможных вариантов значений параметров в случае планеты TIC 172900988 расположены в области устойчивой динамики с ляпуновским временем $T_L > 7000$ лет. На устойчивость вековой орбитальной динамики рассмотренных циркумбинарных планетных систем ранее было указано в работах (Костов и др., 2020, 2021; Гакис, Гургульятос, 2023). Мы подтвердили устойчивый характер вековой динамики планетных систем TOI-1338 и TIC 172900988 с помощью математически обоснованного критерия — посредством вычисления ХПЛ. Таким образом, проведенный нами анализ устойчивости вековой орбитальной динамики циркумбинарных планет TOI-1338 и TIC 172900988 указывает на достоверность определенных из наблюдений их орбитальных параметров.

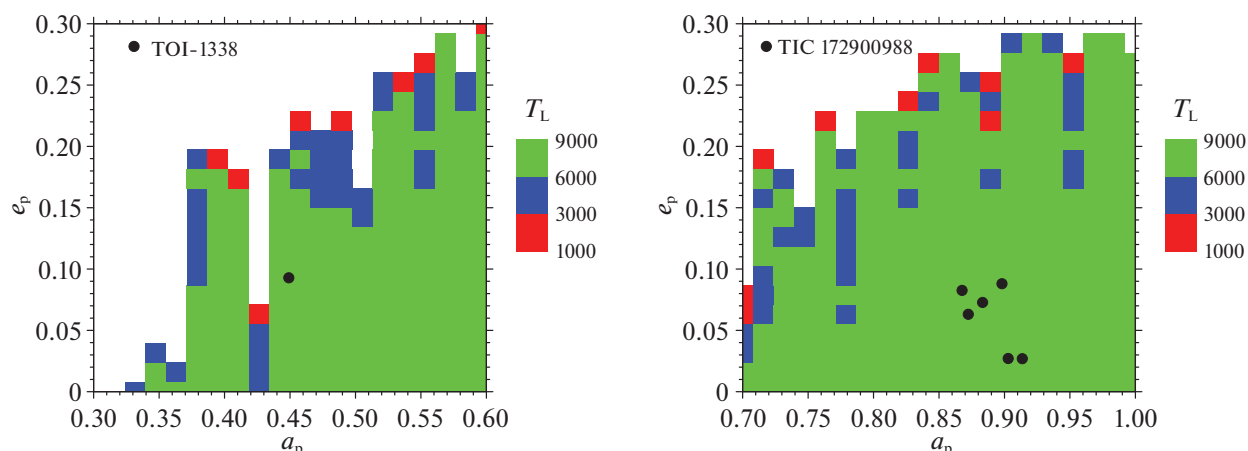


Рис. 2. Ляпуновские времена (в годах), вычисленные на множестве возможных значений параметров циркумбинных планет TOI-1338 и TIC 172900988. Белый цвет соответствует неустойчивым планетным орбитам. Точками указаны местоположения планет, согласно данным (Костов и др., 2020, 2021). В случае TIC 172900988 указано положение планеты для шести решений, удовлетворяющих имеющимся наблюдательным данным. Большая полуось орбиты планеты a_p дана в а.е.

ВЫВОДЫ

Итак, нами проведено исследование устойчивости орбитальной динамики планетных систем, обнаруженных у двойных звезд на основе анализа данных с орбитальной обсерватории TESS. Методом вычисления характеристических показателей Ляпунова получены оценки ляпуновского времени (времени предсказуемой динамики) для 20 циркумзвездных планет. Для 18 планет ляпуновские времена, вычисленные для определенных из анализа транзитов орбитальных и физических параметров планетной системы, велики — $T_L > 6000$ лет, и соответствуют устойчивой вековой динамике. Для планет TOI-905b и TOI-1634b вычисленные ляпуновские времена малы — $T_L < 3000$ лет, орбитальная динамика этих планет является неустойчивой, что указывает на возможные неточности в определении (Дэвис и др., 2020; Клотье и др., 2021) параметров данных планетных систем.

Для двух обнаруженных обсерваторией TESS к настоящему времени циркумбинных планет TOI-1338 и TIC 172900988 построены и проанализированы диаграммы устойчивости. На диаграммах устойчивости планеты TOI-1338 и TIC 172900988 расположены в областях устойчивой динамики с ляпуновскими временами $T_L > 7000$ лет, что подтверждает надежность найденных (Костов и др., 2020, 2021) орбитальных параметров планет.

Отметим, что детальное исследование устойчивости вековой орбитальной динамики планетной системы посредством вычисления характеристических показателей Ляпунова позволяет определить достоверность полученных из анализа наблюдательных данных параметров системы, предсказать их наиболее вероятные значения, либо уточнить их.

Авторы благодарят рецензента за весьма ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бенеттин и др. (G. Benettin, L. Galgani, and J.-M. Strelcyn), *Phys. Rev. A* **14**, 2338 (1976).
2. Бенеттин и др. (G. Benettin, L. Galgani, A. Giorgilli, and J.-M. Strelcyn), *Meccanica* **15**, 9 (1980).
3. фон Бремен и др. (H.F. von Bremen, F.E. Udwardia, and W. Proskurowski), *Physica D* **101**, 1 (1997).
4. Гакис, Гургульятос (D. Gakis and K.N. Gourgouliatos), *MNRAS* **519**, 3832 (2023).
5. Георакаракос (N. Georgakarakos), *MNRAS* **511**, 4396 (2022).
6. Георакаракос, Эггл (N. Georgakarakos and S. Eggl), *Astrophys. J.* **802**, id.94 (2015).
7. Дворак (R. Dvorak), *Cel. Mech.* **34**, 369 (1984).
8. Джакалоне и др. (S. Giacalone, C.D. Dressing, C. Hedges, V.B. Kostov, K.A. Collins, E.L.N. Jensen, D.A. Yahalomi, et al.), *Astron. J.* **163**, 99 (2022).
9. Джордан и др. (A. Jordán, J.D. Hartman, D. Bayliss, G.Á. Bakos, R. Brahm, E.M. Bryant, Z. Csubry, et al.), *Astron. J.* **163**, 125 (2022).
10. Дэвис и др. (A.B. Davis, S. Wang, M. Jones, J.D. Eastman, M.N. Günther, K.G. Stassun, B.C. Addison, K.A. Collins, et al.), *Astron. J.* **160**, 229 (2020).
11. Дюмюск и др. (X. Dumusque, O. Turner, C. Dorn, J.D. Eastman, R. Allart, V. Adibekyan, S. Sousa, et al.), *Astron. Astrophys.* **627**, A43 (2019).
12. Дюкеннуа, Мейор (A. Duquennoy and M. Mayor), *Astron. Astrophys.* **248**, 485 (1991).
13. Лихтенберг А., Либерман М., *Регулярная и стохастическая динамика* (М: Мир, 1984).
14. Лестер и др. (K.V. Lester, R.A. Matson, S.B. Howell, E. Furlan, C.L. Gnillka, N.J. Scott, D.R. Ciardi, M.E. Everett, et al.), *Astron. J.* **162**, 75 (2021).

15. Кадье и др. (C. Cadieux, R. Doyon, M. Plotnykov, G. Hébrard, F. Jahandar, É. Artigau, D. Valencia, et al.), *Astron. J.* **164**, 96 (2022).
16. Клотье и др. (R. Cloutier, J.D. Eastman, J.E. Rodriguez, N. Astudillo-Defru, X. Bonfils, A. Mortier, C.A. Watson, et al.), *Astron. J.* **160**, 3 (2020).
17. Клотье и др. (R. Cloutier, D. Charbonneau, K.G. Stassun, F. Murgas, A. Mortier, R. Massey, J.J. Lissauer, et al.), *Astron. J.* **162**, 79 (2021).
18. Косаковский и др. (D. Kossakowski, J. Kemmer, P. Bluhm, S. Stock, J.A. Caballero, V.J.S. Béjar, C.C. Guillén, et al.), *Astron. Astrophys.* **656**, A124 (2021).
19. Костов и др. (V.B. Kostov, J.A. Orosz, A.D. Feinstein, W.F. Welsh, W. Cukier, N. Haghighipour, B. Quarles, et al.), *Astron. J.* **159**, 253 (2020).
20. Костов и др. (V.B. Kostov, B.P. Powell, J.A. Orosz, W.F. Welsh, W. Cochran, K.A. Collins, M. Endl, et al.), *Astron. J.* **162**, 234 (2021).
21. Маров М.Я., Шевченко И.И., *Экзопланеты. Физика, динамика, космогония* (М: Физматлит, 2022).
22. Мельников А.В., *Астрон. вестн.* **52**, 427 (2018) [A.V. Mel'nikov, *Solar System Res.* **52**, 417 (2018)].
23. Мельников А.В., Шевченко И.И., *Астрон. Вестн.* **32**, 548 (1998) [A.V. Mel'nikov, I.I. Shevchenko, *Solar System Res.* **32**, 480 (1998)].
24. Мо, Краттер (M. Moe and K.M. Kratter), *MNRAS* **507**, 3593 (2021).
25. Морбиделли А., *Современная небесная механика. Аспекты динамики Солнечной системы* (М.ТАУИжевск: Ин-т компьют. исслед., 2014).
26. Муграуэр, Мишель (M. Mugrauer and K.-U. Michel), *Astron. Nachr.* **341**, 996 (2020).
27. Муграуэр, Мишель (M. Mugrauer and K.-U. Michel), *Frontiers in Astron. and Space Sci.* **8**, 14 (2021).
28. Нильсен и др. (L.D. Nielsen, R. Brahm, F. Bouchy, N. Espinoza, O. Turner, S. Rappaport, L. Pearce, et al.), *Astron. Astrophys.* **639**, A76 (2020).
29. Оселедец В.И., *Тр. Моск. Матем. общества* **19**, 179 (1968).
30. Рикер и др. (G.R. Ricker, J.N. Winn, R. Vanderspek, D.W. Latham, G.A. Bakos, J.L. Bean, Z.K. Berta-Thompson, T.M. Brown, et al.), *J. of Astron. Telescopes, Instruments, and Systems* **1**, 014003 (2015).
31. Родригес и др. (J.E. Rodriguez, S.N. Quinn, C.X. Huang, A. Vanderburg, K. Penev, R. Brahm, A. Jordán, et al.), *Astron. J.* **157**, 191 (2019).
32. Родригес и др. (J.E. Rodriguez, S.N. Quinn, G. Zhou, A. Vanderburg, L.D. Nielsen, R.A. Wittenmyer, R. Brahm, et al.), *Astron. J.* **161**, 194 (2021).
33. Родригес и др. (J.E. Rodriguez, S.N. Quinn, A. Vanderburg, G. Zhou, J.D. Eastman, E. Thygesen, B. Cale, et al.), *MNRAS* **521**, 2765 (2023).
34. Серрано и др. (L.M. Serrano, D. Gandolfi, S. Hoyer, A. Brandeker, M.J. Hooton, S. Sousa, F. Murgas, et al.), *Astron. Astrophys.* **667**, A1 (2022).
35. Соццетти и др. (A. Sozzetti, M. Damasso, A.S. Bonomo, Y. Alibert, S.G. Sousa, V. Adibekyan, M.R. Zapatero Osorio, et al.), *Astron. Astrophys.* **648**, A75 (2021).
36. Фонтанив, Бардалес Гальюффи (C. Fontanive and D. Bardalez Gagliuffi), *Frontiers in Astron. and Space Sci.* **8**, 16 (2021).
37. Хайпер и др. (E. Hairer, S.P. Nørsett, and G. Wanner), *Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems* (Berlin: Springer-Verlag, 1993).
38. Хольман, Вигерт (M.J. Holman and P.A. Wiegert), *Astron. J.* **117**, 621 (1999).
39. Циглер и др. (C. Ziegler, A. Tokovinin, C. Briceño, J. Mang, N. Law, and A.W. Mann), *Astrophys. J.* **159**, 19 (2020).
40. Циглер и др. (C. Ziegler, A. Tokovinin, M. Latiolais, C. Briceño, N. Law, and A.W. Mann), *Astrophys. J.* **162**, 192 (2021).
41. Четаев Н.Г., *Устойчивость движения* (М.: Наука, 1965).
42. Чириков (B.V. Chirikov), *Phys. Rep.* **52**, 263 (1979).
43. Шевченко, Куприянов (I.I. Shevchenko and V.V. Kouprianov), *Astron. Astrophys.* **394**, 663 (2002).
44. Эспиноза и др. (N. Espinoza, R. Brahm, T. Henning, A. Jordán, C. Dorn, F. Rojas, P. Sarkis, et al.), *MNRAS* **491**, 2982 (2020).