

Вековая динамика ряда планетных систем из каталога TESS

А.В. Мельников¹

¹ГАО РАН

* *e-mail*: melnikov@gaoran.ru

Аннотация

Проведено исследование устойчивости орбитальной динамики ряда планет, обнаруженных на основе анализа данных с орбитальной обсерватории TESS. Для одиннадцати циркумзвездных планетных систем получены характерные оценки ляпуновского времени (времени предсказуемой динамики) и на их основе сделаны выводы о характере устойчивости. Вековая орбитальная динамика десяти рассмотренных планетных систем является устойчивой. Для планеты TOI-905 вычисленное ляпуновское время мало (менее 3000 лет), что указывает на возможную неточность в определении параметров этой планетной системы. Проведен детальный анализ устойчивости вековой динамики двух циркумбинарных планет — TOI-1338 и TIC 172900988. Для указанных планетных систем построены и проанализированы диаграммы устойчивости, получены оценки ляпуновских времен. На диаграммах планеты TOI-1338 и TIC 172900988 расположены в областях устойчивой динамики с относительно большими ляпуновскими временами (более 7000 лет), что подтверждает достоверность установленных из анализа наблюдений параметров этих планетных систем.

Введение

В настоящее время большой объем наблюдательных данных о наличии планет у других звезд получают с орбитальной обсерватории TESS (Ricker et al., 2015). Цель миссии TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite), представляющей собой космический телескоп, запущенный на орбиту 18 апреля 2018 г., состоит в поиске посредством применения метода TTV (Transit Timing Variation) планет у ближайших (ближе 200 пк) ярких звезд. Согласно информации, приведенной на сайте миссии TESS (<https://tess.mit.edu/>), на конец августа 2022 г. каталог TESS (<https://tev.mit.edu/data/>) включает в себя 5845 потенциально интересных объекта (идентификатор в каталоге — TIC (TESS Input Catalog)) в число которых входят 234 официально подтвержденных планеты (идентификатор в каталоге — TOI (TESS Objects of Interest)).

Посредством использования различных методов исследования устойчивости (см. подробнее Lichtenberg, Lieberman (1992); Morbidelli (2002)), таких как вычисление и анализ значений характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ), параметра MEGNO и пр.

Таблица 1: Список обнаруженных орбитальной обсерваторией TESS планет в двойных звездных системах и вычисленные для них ляпуновские времена. Указаны только планеты в системах с большой полуосью звездной орбиты $a < 500$ а.е. Данные о параметрах систем взяты с <http://exoplanet.eu/> и (Mugrauer, Michel, 2020; Ziegler et al., 2020; Lester et al., 2021).

Планета	M_1/M_S	M_2/M_S	a , а.е.	a_p , а.е.	e_p	m_p/M_J	T_L , год
TOI-129	0.78	0.30	245	0.0178	0	3.21	7700
TOI-130	1.13	0.30	130	0.24	0.07	0.06	7500
TOI-141	1.07	0.50	23.7	0.057	0	0.062	7800
TOI-172	1.13	0.48	452.9	0.0913	0.38	5.41	9400
TOI-402	0.85	0.12	65.8	0.123	0	0.0276	8200
TOI-564	1.10	0.48	133.4	0.0273	0.072	1.463	9100
TOI-640	1.54	0.77	85.0	0.066	0.05	0.88	7500
TOI-732	0.40	0.14	348	0.077	0.115	0.0267	7300
TOI-905	0.85	0.25	358	0.046	0.024	0.667	1800
TOI-1201	0.51	0.46	316.2	0.0287	0	0.0197	9000
TOI-1634	0.50	0.17	90	0.0154	0.16	0.0154	8600

M_1 , M_2 — массы звезд; a — большая полуось звездной системы; a_p , e_p — большая полуось и эксцентриситет орбиты планеты; m_p — масса планеты; M_S — масса Солнца; M_J — масса Юпитера; T_L — вычисленная величина ляпуновского времени системы.

можно оценить достоверность и точность определенных из анализа наблюдений параметров планетных систем. Если установлено, что для известных из наблюдений значений параметров планетной системы ее вековая динамика является устойчивой, то это является косвенным подтверждением их достоверности. Напротив, установленный неустойчивый характер орбитальной динамики системы указывает на наличие ошибок в принятых для нее значениях параметров. Путем исследования устойчивости вековой динамики планетной системы для различных возможных значений ее параметров можно предсказывать их наиболее вероятные значения.

Вековая динамика планетных систем у двойных звезд

В рамках настоящего исследования из каталога TESS были отобраны планетные системы, обнаруженные у двойных звезд, и проведен анализ их вековой динамики. Поскольку чем теснее звездная система (чем меньше расстояние между ее компонентами), тем разнообразнее возможная орбитальная динамика существующих в ней планет, среди выбранных из каталога TESS планет были рассмотрены только планеты, обнаруженные у двойных звезд с большой полуосью звездной орбиты $a < 500$ а.е. Кроме того, при исследовании устойчивости тесных систем можно ограничиться интегрированием уравнений движения на разумных временных интервалах (до 1 млн лет). Список отобранных нами из каталога TESS одиннадцати планет с указанием их масс и известных орбитальных параметров приведен в Табл. 1, там же указаны параметры звездных систем. Данные и дополнительную информацию о двойных звездных системах и планетах, обнаруженных в этих системах в рамках миссии TESS, можно найти в работах (Mugrauer, Michel, 2020; Ziegler et al., 2020; Lester et al., 2021) и по ссылке http://exoplanet.eu/planets_binary_notes/.

Характеристические показатели Ляпунова и ляпуновское время

Исследование устойчивости динамики планетных систем проводилось посредством вычисления и анализа значений характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ). Далее напомним кратко, что собой представляют ХПЛ (см. подробнее Benettin et al. (1976); Chirikov (1979); Lichtenberg, Lieberman (1992); Morbidelli (2002)). 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 (Lichtenberg, Lieberman, 1992):

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

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 — характеристических показателей Ляпунова: $L_i \geq L_{i+1}$, 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 $i = 1, \dots, N$.

Если в формуле (1) взяты начальные условия близких траекторий общего положения, то, как показано, например, в (Lichtenberg, Lieberman, 1992), для почти всех \mathbf{d} 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 при помощи метода HQRВ (Householder QR-Based) (von Bremen et al., 1997), реализованного в виде программного комплекса на языке ФОРТРАН в работе (Shevchenko, Kourigianov, 2002). HQRВ-метод основан на QR-разложении матрицы касательного отображения с использованием преобразования Хаусхолдера (см. подробнее von Bremen et al. (1997)) и позволяет вычислять полный спектр ХПЛ.

Уравнения движения

Рассматривалась вековая эволюция системы, состоящей из трех тел — двух звезд и планеты. Уравнения движения имеют вид

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

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 из трех тел, 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 телами i и j , G — гравитационная постоянная.

При вычислении ляпуновского времени для исследуемых планетных систем проводилось численное интегрирование уравнений движения (2). Для интегрирования использовался интегратор DOP853 (Hairer et al., 1993), реализующий метод Рунге–Кутты 8-го порядка, с автоматически изменяемой величиной шага интегрирования. Интервал времени интегрирования уравнений движения при вычислении ХПЛ составлял 10^5 лет. Максимальный шаг интегрирования был принят равным $\Delta t_{\max} = 0.1$ 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 Δt_{\max} (см. подробнее Hairer et al. (1993)).

При интегрировании использовались 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 величины энергии на текущем шаге интегрирования превышало величину 10^{-5} (величина определена эмпирически). В качестве второго и третьего критериев отслеживалось пересечение планетой сферы Роша и выход планеты из сферы Хилла центральной звезды, соответственно. При возникновении хотя бы одного из указанных выше событий, интегрирование останавливалось и орбита планеты для принятых начальных значений орбитальных параметров считалась неустойчивой.

Ляпуновские времена планетных систем

Посредством использования описанных выше методов, для указанных в Табл. 1 начальных значений орбитальных параметров систем были получены оценки ляпуновских времен орбитальной динамики одиннадцати планет. Все неизвестные орбитальные элементы систем в начальный момент времени были положены равными нулю. Поэтому полученные нами значения ляпуновских времен являются оценочными и могут лишь мотивировать к дальнейшим детальным исследованиям систем у которых выявлена неустойчивая динамика.

Полученные оценки ляпуновского времени для всех рассмотренных планетных систем приведены в Табл. 1. Для десяти планет ляпуновские времена, вычисленные на основе определенных из наблюдений орбитальных и физических параметров систем, относительно велики — $T_L > 7000$ лет и соответствуют устойчивой вековой динамике. Для планеты TOI-905 вычисленное ляпуновское время мало — $T_L < 3000$ лет, что указывает на возможную неточность в определении параметров планетной системы. Необходимо провести дополнительные исследования с целью уточнения приведенных в работе Davis et al. (2020) и каталоге <http://exoplanet.eu/> значений параметров планеты TOI-905. Отметим, что в http://exoplanet.eu/planets_binary_notes/ указано на возможную более высокую иерархию для звездной системы, в которой обнаружена планета TOI-905.

Таблица 2: Физические и орбитальные параметры двойных звезд (M_1 , M_2 , P , e) и обнаруженных у них при помощи орбитальной обсерватории TESS циркумбинарных планет (m_p , R_p , P_p , a_p , e_p). Данные взяты из работ Kostov et al. (2020, 2021).

Параметр	TOI-1338	TIC 172900988
M_1/M_S	1.038	1.238
M_2/M_S	0.297	1.202
P , сут	14.6	19.7
e	0.16	0.45
R_p/R_E	6.9	11.25
m_p/m_E	30.2	823–981
P_p , сут (a_p , а.е.)	95.2 (0.4491)	188–204 (0.8676–0.9136)
e_p	0.09	0.02–0.09

M_1 , M_2 — массы звезд; P , e — орбитальный период и эксцентриситет звездной системы; P_p , a_p , e_p — орбитальный период, большая полуось и эксцентриситет орбиты планеты; R_p , m_p — радиус и масса планеты; M_S — масса Солнца, M_E — масса Земли, R_E — средний радиус Земли.

Циркумбинарные планетные системы

TOI-1338 и TIC 172900988

В предыдущем разделе посредством вычисления ХПЛ нами получены оценки ляпуновского времени планетных систем без учета погрешностей определения их параметров из анализа наблюдательных данных. С помощью построения и анализа диаграмм устойчивости можно оценить правильность определения параметров планетных систем и выявить границы области их возможных значений. Для этого достаточно вычислить ХПЛ на представительном множестве возможных значений параметров планетной системы и провести анализ полученных таким образом диаграмм устойчивости (см. подробнее о данной методике Melnikov (2018)).

В Табл. 1 перечислены только циркумзвездные планеты у двойных звезд (планета обращается вокруг одной из компонент), обнаруженные обсерваторией TESS. К настоящему времени при помощи обсерватории TESS открыты две циркумбинарные планеты (Kostov et al., 2020, 2021): TOI-1338 и TIC 172900988. В циркумбинарных системах планета обращается по орбите, внутри которой расположены обе звезды. Физические и орбитальные параметры двух звездных систем и обнаруженных у них циркумбинарных планет TOI-1338 и TIC 172900988 приведены в Табл. 2.

В работе Georgakarakos (2022) проведено исследование устойчивости планетных систем TOI-1338 и TIC 172900988 как посредством использования теоретического критерия устойчивости планетных систем (Georgakarakos, Eggl, 2015), так посредством численного интегрирования уравнений движения и последующего анализа поведения орбитальных элементов планет (a_p и e_p) на длительном промежутке времени. Согласно Georgakarakos (2022), динамика планетных систем TOI-1338 и TIC 172900988 является устойчивой.

С помощью использования метода MEM (Maximum Eccentricity Method) (см. подробнее о этом методе, например, Melnikov (2018)), основанном на анализе вековой эволюции величины эксцентриситета орбиты планеты, в работах (Kostov et al., 2020, 2021) на плоскости возможных значений (a_p , e_p) были построены диаграммы устойчивости для пла-

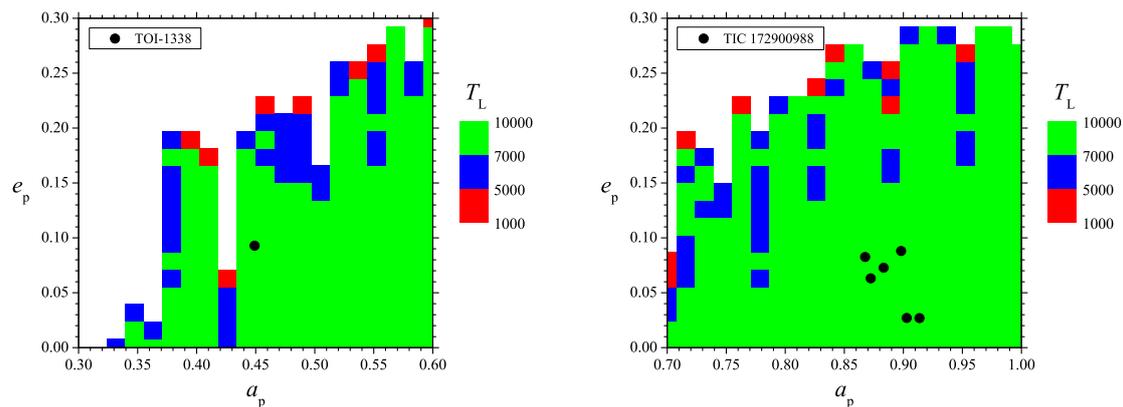


Рис. 1: Диаграммы устойчивости для циркумбиннарных планет TOI-1338 и TIC 172900988, построенные посредством вычисления ляпуновского времени системы — T_L (в годах). Белый цвет соответствует неустойчивым планетным орбитам. Точками указаны возможные местоположения планет, согласно данным (Kostov et al., 2020, 2021). В случае TIC 172900988 указано положение планеты для шести возможных решений, удовлетворяющих имеющимся наблюдательным данным.

нет TOI-1338 и TIC 172900988. Однако, как показано в работе (Melnikov, 2018), использование метода МЕМ позволяет получить лишь грубую оценку границ областей устойчивой/неустойчивой динамики планетной системы. Мы построили диаграммы устойчивости указанных выше планетных систем путем массового вычисления ХПЛ — метода, имеющего строгое математическое обоснование (см. подробнее Benettin et al. (1976); Lichtenberg, Lieberman (1992)). Диаграммы устойчивости строились при помощи разработанных нами ранее программных комплексов (Melnikov, 2018), позволяющих проводить детальный анализ вековой динамики планетных систем.

Построенные нами диаграммы устойчивости для планет TOI-1338 и TIC 172900988 представлены на Рис. 1. На диаграммах указана величина ляпуновского времени планетной системы (как и выше $T_L = 1/L$, где L — максимальный ХПЛ). Вычисление ХПЛ проводилось для начальных значений орбитальных параметров планет, заданных на равномерной сетке размером 20×20 на плоскости (a_p, e_p) . Интервал времени интегрирования уравнений движения при вычислении ХПЛ составлял 10^5 лет, что эквивалентно примерно 4×10^5 и 4×10^4 орбитальным периодам планеты TOI-1338 и TIC 172900988, соответственно.

На диаграммах, представленных на Рис. 1, большие значения ляпуновских времен (в нашем случае $T_L > 7000$ лет) соответствуют устойчивым планетным орбитам. Малые ($T_L < 5000$ лет) и промежуточные (в большинстве случаев) значения ляпуновских времен соответствуют неустойчивым планетным орбитам. Белый цвет на диаграммах соответствует неустойчивым планетным орбитам — планета с указанными начальными значениями орбитальных параметров либо сталкивается с одной из звезд, либо покидает сферу Хилла звездной системы. В последнем случае планета может покинуть двойную звездную систему, т.е. стать «планетой-бродягой». На диаграммах указаны местоположения планет, согласно данным (Kostov et al., 2020, 2021). Отметим, что в случае планеты TIC 172900988 имеется шесть решений (Kostov et al., 2021), удовлетворяющих наблюдательным данным, все они указаны на Рис. 1.

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 (Georgakarakos, 2022; Kostov et al., 2020, 2021). Мы подтвердили устойчивый характер вековой динамики планетных систем TOI-1338 и TIC 172900988 посредством использования математически обоснованного критерия — посредством вычисления ХПЛ. Проведенный нами анализ устойчивости вековой орбитальной динамики циркумбинарных планет TOI-1338 и TIC 172900988 указывает на достоверность их орбитальных параметров, определенных из наблюдений.

Выводы

Итак, нами проведено исследование устойчивости орбитальной динамики обнаруженных на основе анализа данных с орбитальной обсерватории TESS планет у кратных звезд. Получены оценки ляпуновского времени (времени предсказуемой динамики) для одиннадцати циркумзвездных планет у двойных звезд. Для десяти планет ляпуновские времена, вычисленные на основе определенных из наблюдений орбитальных и физических параметров, относительно велики — $T_L > 7000$ лет и соответствуют устойчивой вековой динамике планетной системы. Для планеты TOI-905 вычисленное ляпуновское время мало — $T_L < 3000$ лет, что указывает на возможные неточности в определении параметров этой планетной системы. Для двух обнаруженных к настоящему времени обсерваторией TESS циркумбинарных 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 $T_L > 7000$ лет, что подтверждает достоверность определенных из наблюдений орбитальных параметров планет.

Благодарности

Работа выполнена в рамках плановой темы ГАО РАН № 1021032422663-6 «ЭВОЛЮЦИЯ».

Список литературы

- Benettin Giancarlo, Galgani Luigi, Strelcyn Jean-Marie.* Kolmogorov entropy and numerical experiments // Phys. Rev. A. 1976. 14, 6. 2338–2345.
- Chirikov Boris V.* A universal instability of many-dimensional oscillator systems // Phys. Rep.. 1979. 52, 5. 263–379.
- Davis Allen B., Wang Songhu, Jones Matias, Eastman Jason D., Günther Maximilian N., Stassun Keivan G., Addison Brett C., Collins Karen A., Quinn Samuel N., Latham David W., Trifonov Trifon, Shahaf Sahar, Mazeh Tsevi, Kane Stephen R., Narita Norio, Wang Xian-Yu, Tan Thiam-Guan, Ciardi David R., Tokovinin Andrei, Ziegler Carl, Tronsgaard René, Millholland Sarah, Cruz Bryndis, Berlind Perry, Calkins Michael L., Esquerdo Gilbert A., Collins Kevin I., Conti Dennis M., Murgas Felipe, Evans Phil, Lewin Pablo, Radford Don J., Paredes Leonardo A., Henry Todd J., Hodari-Sadiki James, Lund Michael B., Christiansen*

Jessie L., Law Nicholas M., Mann Andrew W., Briceño César, Parviainen Hannu, Palle Enric, Watanabe Noriharu, Ricker George R., Vanderspek Roland, Seager Sara, Winn Joshua N., Jenkins Jon M., Krishnamurthy Akshata, Batalha Natalie M., Burt Jennifer, Colón Knicole D., Dynes Scott, Caldwell Douglas A., Morris Robert, Henze Christopher E., Fischer Debra A. TOI 564 b and TOI 905 b: Grazing and Fully Transiting Hot Jupiters Discovered by TESS // *AJ.* 2020. 160, 5. 229.

Georgakarakos Nikolaos. Dynamics and habitability of the TESS circumbinary systems TOI-1338 and TIC-172900988 // *MNRAS.* 2022. 511, 3. 4396–4403.

Georgakarakos Nikolaos, Eggl Siegfried. Analytic Orbit Propagation for Transiting Circumbinary Planets // *ApJ.* IV 2015. 802, 2. 94.

Hairer E., Norsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems. 1993.

Kostov Veselin B., Orosz Jerome A., Feinstein Adina D., Welsh William F., Cukier Wolf, Haghhighipour Nader, Quarles Billy, Martin David V., Montet Benjamin T., Torres Guillermo, Triaud Amaury H. M. J., Barclay Thomas, Boyd Patricia, Briceno Cesar, Cameron Andrew Collier, Correia Alexandre C. M., Gilbert Emily A., Gill Samuel, Gillon Michaël, Haqq-Misra Jacob, Hellier Coel, Dressing Courtney, Fabrycky Daniel C., Furesz Gabor, Jenkins Jon M., Kane Stephen R., Kopparapu Ravi, Hodžić Vedad Kunovac, Latham David W., Law Nicholas, Levine Alan M., Li Gongjie, Lintott Chris, Lissauer Jack J., Mann Andrew W., Mazeh Tsevi, Mardling Rosemary, Maxted Pierre F. L., Eisner Nora, Pepe Francesco, Pepper Joshua, Pollacco Don, Quinn Samuel N., Quintana Elisa V., Rowe Jason F., Ricker George, Rose Mark E., Seager S., Santerne Alexandre, Ségransan Damien, Short Donald R., Smith Jeffrey C., Standing Matthew R., Tokovinin Andrei, Trifonov Trifon, Turner Oliver, Twicken Joseph D., Udry Stéphane, Vanderspek Roland, Winn Joshua N., Wolf Eric T., Ziegler Carl, Ansgore Peter, Barnet Frank, Bergeron Joel, Hutten Marc, Pappa Giuseppe, van der Straeten Timo. TOI-1338: TESS' First Transiting Circumbinary Planet // *AJ.* 2020. 159, 6. 253.

Kostov Veselin B., Powell Brian P., Orosz Jerome A., Welsh William F., Cochran William, Collins Karen A., Endl Michael, Hellier Coel, Latham David W., MacQueen Phillip, Pepper Joshua, Quarles Billy, Sairam Lalitha, Torres Guillermo, Wilson Robert F., Bergeron Serge, Boyce Pat, Bieryla Allyson, Buchheim Robert, Ben Christiansen Caleb, Ciardi David R., Collins Kevin I., Conti Dennis M., Dixon Scott, Guerra Pere, Haghhighipour Nader, Herman Jeffrey, Hintz Eric G., Howard Ward S., Jensen Eric L. N., Kielkopf John F., Kruse Ethan, Law Nicholas M., Martin David, Maxted Pierre F. L., Montet Benjamin T., Murgas Felipe, Nelson Matt, Olmschenk Greg, Otero Sebastian, Quimby Robert, Richmond Michael, Schwarz Richard P., Shporer Avi, Stassun Keivan G., Stephens Denise C., Triaud Amaury H. M. J., Ulowetz Joe, Walter Bradley S., Wiley Edward, Wood David, Yenawine Mitchell, Agol Eric, Barclay Thomas, Beatty Thomas G., Boisse Isabelle, Caldwell Douglas A., Christiansen Jessie, Colón Knicole D., Deleuil Magali, Doyle Laurance, Fausnaugh Michael, Fűrész Gábor, Gilbert Emily A., Hébrard Guillaume, James David J., Jenkins Jon, Kane Stephen R., Kidwell Jr. Richard C., Kopparapu Ravi, Li Gongjie, Lissauer Jack J., Lund Michael B., Majewski Steve R., Mazeh Tsevi, Quinn Samuel N., Quintana Elisa, Ricker

- George, Rodriguez Joseph E., Rowe Jason, Santerne Alexander, Schlieder Joshua, Seager Sara, Standing Matthew R., Stevens Daniel J., Ting Eric B., Vanderspek Roland, Winn Joshua N.* TIC 172900988: A Transiting Circumbinary Planet Detected in One Sector of TESS Data // *AJ*. 2021. 162, 6. 234.
- Lester Kathryn V., Matson Rachel A., Howell Steve B., Furlan Elise, Gnilka Crystal L., Scott Nicholas J., Ciardi David R., Everett Mark E., Hartman Zachary D., Hirsch Lea A.* Speckle Observations of TESS Exoplanet Host Stars. II. Stellar Companions at 1-1000 au and Implications for Small Planet Detection // *AJ*. VIII 2021. 162, 2. 75.
- Lichtenberg A., Lieberman M.* Regular and Chaotic Dynamics. 1992.
- Melnikov A. V.* Numerical Instruments for the Analysis of Secular Dynamics of Exoplanetary Systems // *Solar System Research*. 2018. 52, 5. 417–425.
- Morbidelli Alessandro.* Modern celestial mechanics : aspects of solar system dynamics. 2002.
- Mugrauer Markus, Michel Kai-Uwe.* Gaia search for stellar companions of TESS Objects of Interest // *Astronomische Nachrichten*. 2020. 341, 10. 996–1030.
- Ricker George R., Winn Joshua N., Vanderspek Roland, Latham David W., Bakos Gáspár Á., Bean Jacob L., Berta-Thompson Zachory K., Brown Timothy M., Buchhave Lars, Butler Nathaniel R., Butler R. Paul, Chaplin William J., Charbonneau David, Christensen-Dalsgaard Jørgen, Clampin Mark, Deming Drake, Doty John, De Lee Nathan, Dressing Courtney, Dunham Edward W., Endl Michael, Fressin Francois, Ge Jian, Henning Thomas, Holman Matthew J., Howard Andrew W., Ida Shigeru, Jenkins Jon M., Jernigan Garrett, Johnson John Asher, Kaltenegger Lisa, Kawai Nobuyuki, Kjeldsen Hans, Laughlin Gregory, Levine Alan M., Lin Douglas, Lissauer Jack J., MacQueen Phillip, Marcy Geoffrey, McCullough Peter R., Morton Timothy D., Narita Norio, Paegert Martin, Palle Enric, Pepe Francesco, Pepper Joshua, Quirrenbach Andreas, Rinehart Stephen A., Sasselov Dimitar, Sato Bun'ei, Seager Sara, Sozzetti Alessandro, Stassun Keivan G., Sullivan Peter, Szentgyorgyi Andrew, Torres Guillermo, Udry Stephane, Villaseñor Joel.* Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) // *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*. 2015. 1. 014003.
- Shevchenko I. I., Kouprianov V. V.* On the chaotic rotation of planetary satellites: The Lyapunov spectra and the maximum Lyapunov exponents // *A&A*. 2002. 394. 663–674.
- Ziegler Carl, Tokovinin Andrei, Briceño César, Mang James, Law Nicholas, Mann Andrew W.* SOAR TESS Survey. I. Sculpting of TESS Planetary Systems by Stellar Companions // *AJ*. 2020. 159, 1. 19.
- von Bremen Hubertus F., Udvardi Firdaus E., Proskurowski Wlodek.* An efficient QR based method for the computation of Lyapunov exponents // *Physica D Nonlinear Phenomena*. 1997. 101, 1-2. 1–16.

Secular dynamics of a number of planetary systems from the TESS catalog

A.V. Melnikov¹

¹Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo

* *e-mail*: melnikov@gaoran.ru

Abstract

A study was made of the stability of the orbital dynamics of a number of planets discovered based on data analysis from the TESS orbital observatory. For eleven circumstellar planetary systems, characteristic estimates of the Lyapunov time (the time of the predictable dynamics) are obtained and, based on them, conclusions about the character of stability are drawn. The secular orbital dynamics of the ten considered planetary systems is stable. For planet TOI-905 the calculated Lyapunov time is small (less than 3000 years), which indicates a possible inaccuracy in determining the parameters of this planetary system. A detailed analysis of the stability of the secular dynamics of two circumbinary planets — TOI-1338 and TIC 172900988, was carried out. For these planetary systems, stability diagrams are constructed and analyzed, and estimates of the Lyapunov times are obtained. On the stability diagrams of the planet TOI-1338 and TIC 172900988 are located in regions of stable dynamics with large Lyapunov times (more than 7000 years), which confirms the reliability of the parameters of these planetary systems established from the analysis of observations.