

УДК 521.1, 523.4

ВЕКОВАЯ ОРБИТАЛЬНАЯ ДИНАМИКА КАНДИДАТОВ В СПУТНИКИ ЭКЗОПЛАНЕТ

© 2023 г. А. В. Мельников*

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

*e-mail: melnikov@gaoran.ru

Поступила в редакцию 14.11.2022 г.

После доработки 05.12.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

Проведен анализ устойчивости вековой орбитальной динамики ряда потенциально существующих спутников экзопланет. Установлен устойчивый характер вековой динамики возможных спутников (“экзолун”) у планет KOI-268.01, Kepler-1000b и Kepler-1442b. Для указанных систем получены оценки возможных значений орбитальных параметров экзолун. Рассмотрена динамика обнаруженных из анализа наблюдений спутников у планет Kepler-1625b и Kepler-1708b. Установлено, что большая полуось орбиты спутника планеты Kepler-1625b может иметь величину от 5 до 25 радиусов планеты. Показано, что имеющееся для спутника планеты Kepler-1708b решение (Kipping и др., 2022) соответствует устойчивой орбите спутника.

Ключевые слова: спутники планет, экзопланеты, устойчивость движения, Kepler-1625b, Kepler-1708b

DOI: 10.31857/S0320930X23030064, **EDN:** IHLLFC

ВВЕДЕНИЕ

Все планеты Солнечной системы, за исключением Меркурия, обладают спутниками, число которых у планет-гигантов составляет несколько десятков (см. подробнее о спутниках планет монографию Емельянова (2019) и обзор Мельникова и Шевченко (2022)). В последние два десятилетия активно развиваются исследования возможности существования спутников в планетных системах у других звезд (Kipping, 2009; 2011; Kipping и др., 2012; 2022; Heller, 2014; Heller и др., 2014; Sucerquia и др., 2019; 2020; 2022; Teachey, 2021). Поиски “экзолун” проводятся посредством анализа данных наблюдений транзитов экзопланет, в частности, в рамках проекта НЕК (“Hunt for Exomoons with Kepler”), см. работы (Kipping и др., 2012; 2013a; 2013b; 2014; 2015; Teachey и др., 2018). Наличие спутника вносит специфические особенности (см. подробнее Kipping (2009; 2011); Awiphan, Kerins (2013); Heller (2014); Saha, Sengupta (2022)) в форму кривой блеска транзита планеты. Большой интерес к экзолунам обусловлен, прежде всего, высокой актуальностью проблемы обитаемости экзопланетных систем. Планеты часто представляют собой газовые гиганты, находящиеся в области потенциальной обитаемости у родительской звезды (Williams и др., 1997; Heller и др., 2014; Sucerquia и др., 2020), поэтому на спутниках экзопланет могут поддерживаться подходящие для существования жизни условия (Wil-

liams и др., 1997; Kaltenegger, 2010; 2017; Heller, 2012; Heller др., 2014; Martínez-Rodríguez и др., 2019; Tjoa и др., 2020).

В работах (Teachey и др., 2018; Teachey, Kipping, 2018) был представлен первый реальный кандидат в экзолуны. Посредством анализа наблюдений с ИСЗ HST (Hubble Space Telescope) и с использованием метода TTV (Transit Timing Variations) были получены свидетельства существования у планеты Kepler-1625b спутника. Планета Kepler-1625b по своим размерам близка к Юпитеру, а ее спутник — к Нептуну (Heller, 2018). По поводу обоснованности обнаружения спутника планеты Kepler-1625b возникла дискуссия (Heller, 2018; Teachey и др., 2018; 2020; Heller и др., 2019; Martin и др., 2019; Moraes, Vieira Neto, 2020; Rosario-Franco и др., 2020; Moraes и др., 2022; Kipping и др., 2022), подчеркивающая сложность проблемы обнаружения спутников экзопланет. При помощи метода TTV Fox и Wiegert (2021) обнаружили восемь систем, для которых транзиты планет имеют признаки наличия спутников. Kipping (2020) провел дополнительное независимое исследование шести систем, указанных в работе (Fox, Wiegert, 2021), и не выявил в имеющихся наблюдательных данных статистически значимых признаков присутствия экзолун в этих системах. Тем не менее нельзя исключать, что с совершенствованием инструментов и методов наблюдений спутники у этих планет все же будут найдены. Недавно в работе (Kipping

Таблица 1. Принятые при численном моделировании параметры планетных систем и предполагаемых в них спутников, согласно данным Fox и Wiegert (2021)

Планета	M	m_p	a_p , а. е.	a_s , а. е.	e_s	m_s
KOI-268.01	1.18	9.3	0.473	0.0021	0.281	0.817
Kepler-517b (KOI-303.01)	0.87	7.6	0.288	0.0040	0.198	0.499
Kepler-809b (KOI-1302.01)	1.05	11.0	0.307	0.0019	0.113	2.931
Kepler-857b (KOI-1472.01)	0.97	38.0	0.373	0.0031	0.495	1.636
Kepler-1000b (KOI-1888.01)	1.41	20.0	0.532	0.0026	0.027	1.551
Kepler-409b (KOI-1925.01)	0.90	1.0	0.317	0.0029	0.024	0.300
Kepler-1326b (KOI-2728.01)	1.54	24.6	0.272	0.0025	0.130	6.057
Kepler-1442b (KOI-3220.01)	1.30	14.1	0.399	0.0034	0.269	1.586

M — масса звезды в массах Солнца, m_p — масса планеты в массах Земли, a_p — большая полуось орбиты планеты; a_s , e_s — большая полуось и эксцентриситет орбиты спутника, m_s — масса спутника в массах Земли.

и др., 2022) было указано на существование спутника у планеты Kepler-1708b (см. также Moraes и др., 2022; Cassese, Kipping, 2022) и приведены параметры его орбиты.

В настоящей работе посредством использования одного из методов исследования динамической устойчивости движения — вычисления характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ) — определяются области возможных значений орбитальных параметров экзолун для ряда планетных систем, в которых спутники потенциально существуют или уже выявлены. Мы рассмотрим вековую динамику экзолун как в планетных системах из работы (Fox, Wiegert, 2021), так и спутников, обнаруженных у планет Kepler-1625b и Kepler-1708b.

УСТОЙЧИВОСТЬ ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ СПУТНИКОВ ЭКЗОПЛАНЕТ

В своей работе Fox и Wiegert (2021) указали на наличие в транзитах восьми экзопланет признаков существования у них спутников и посредством численного интегрирования долговременной динамики планетных систем получили оценки возможных значений орбитальных параметров и масс потенциально существующих экзолун. Список планетных систем, их орбитальные параметры, массы компонент и данные о предполагаемых в них спутниках приведены в табл. 1, согласно Fox и Wiegert (2021). В работе (Quarles и др., 2020) для шести из приведенных в табл. 1 систем посредством использования ряда теоретических критериев устойчивости орбитального движения и численного интегрирования долговременной орбитальной динамики планетной системы были определены области возможных значений орбитальных параметров спутников. Путем вычисления характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ) мы рассмотрели устойчивость вековой динамики потенциально существующих спутников для всех указанных в табл. 1 планетных систем.

Вычисление ХПЛ проводилось на множестве возможных значений орбитальных параметров (a_s , e_s) спутниковой подсистемы экзопланеты, таким образом, на указанной плоскости выделялись области с разным характером орбитальной динамики — строились диаграммы устойчивости. Орбитальные параметры реально существующих экзолун должны принадлежать на диаграммах областям с устойчивой динамикой. Метод исследования устойчивости движения, основанный на вычислении ХПЛ, имеет строгое математическое обоснование (см. подробнее Benettin и др. (1976, 1980); Лихтенберг, Либерман (1984)). Подробно вопрос использования различных методов исследования устойчивости динамики планетных/спутниковых систем и алгоритм построения диаграмм устойчивости для таких систем были рассмотрены в работе (Мельников, 2018). Далее кратко опишем алгоритм, использовавшийся в настоящем исследовании.

ХПЛ представляют собой среднюю скорость экспоненциальной расходимости близких (по начальным условиям) траекторий фазового пространства динамической системы. Гамильтонова система с N степенями свободы имеет $2N$ показателей Ляпунова: $L_i \geq L_{i+1}$, $i = 1, \dots, 2N-1$, образующих симметричные пары: $L_j = -L_{j+N}$, $j = 1, \dots, N$. Ненулевая величина максимального ХПЛ (L_1) указывает на хаотический (неустойчивый), а нулевая — на регулярный (устойчивый) характер движения. На приведенных далее диаграммах устойчивости указано ляпуновское время (время предсказуемой динамики системы), для которого принято: $T_L = 1/L$, где $L \equiv L_1$ — максимальный ХПЛ. Интегрирование уравнений движения, описывающих динамику трех тел (звезда, планета и спутник планеты), при вычислении ХПЛ проводилось для начальных значений орбитальных параметров спутника, заданных на равномерной сетке размером 20×20 на плоскости (a_s , e_s). Полагалось, что в начальный момент времени: спутник и

планета располагаются в перицентрах своих орбит, для неизвестных орбитальных элементов планеты и спутника было принято: $e_p = i_p = \Omega_p = \omega_p = i_s = \Omega_s = \omega_s = 0$. Вычисление ХПЛ проводилось при помощи метода HQRV (von Bremen и др., 1997), реализованного в виде программного комплекса на языке ФОРТРАН в работе (Shevchenko, Kouprianov, 2002). Для интегрирования уравнений движения использовался интегратор DOP853 (Hairer и др., 1993), реализующий метод Рунге–Кутты 8-го порядка, с автоматически изменяемой величиной шага интегрирования. Интервал времени интегрирования уравнений движения составлял 10^5 лет; максимальный шаг интегрирования был принят равным $\Delta t_{\max} = 10^{-2}$ года, величина локальной (на одном шаге) погрешности интегрирования составляет $\varepsilon = 10^{-12}$. На основе заданного значения ε интегратор DOP853 автоматически подбирает необходимую величину шага интегрирования, не превышающую $\Delta t_{\max}$ (см. подробнее Hairer и др., 1993).

С точки зрения устойчивости орбита спутника должна располагаться вне сферы Роша родительской планеты и не далее, чем $0.3R_H$ (эмпирический критерий, см. подробнее Holman и Wiegert (1999)) при прямом (проградном) движении спутника, когда направления орбитального движения планеты и спутника совпадают, и ближе $0.5R_H$ (Nicholson и др., 2008) в случае для обратного (ретроградного) движения спутника, где $R_H \approx a_p(m_p/3M)^{1/3}$ – радиус сферы Хилла планеты, предполагается $m_p \ll M$, где m_p и M – масса спутника и планеты, соответственно. В настоящем исследовании мы рассматривали только случай проградных орбит спутников экзопланет. При интегрировании уравнений движения нами использовались следующие критерии устойчивости спутниковой орбиты: контроль сохранения полной энергии системы позволял фиксировать тесные сближения (столкновения) тел, отслеживался выход спутника планеты из сферы Хилла планеты и пересечение орбитой спутника сферы Роша планеты. При фиксации хотя бы одного из указанных выше событий, интегрирование и вычисления ХПЛ останавливались, и орбита спутника для заданных начальных значений орбитальных параметров считалась неустойчивой. В случае успешного интегрирования спутниковой орбиты на всем заданном интервале времени ее характер (устойчивая/неустойчивая) определялся на основе анализа вычисленной величины максимального ХПЛ (МХПЛ).

В массовых численных экспериментах по исследованию устойчивости движения необходимо выбрать критерий для разделения устойчивых и неустойчивых траекторий. В работе (Мельников, Шевченко, 1998) был предложен статистический метод для определения такого критерия при исследовании устойчивости путем вычисления

МХПЛ. Суть метода заключается в анализе дифференциального распределения МХПЛ, вычисленных на выборке значений начальных условий (или значений параметров). Регулярным траекториям соответствует “подвижный” пик в распределении вычисленных значений МХПЛ. Если построить график “ $L - F(L)$ ”, где L – величина МХПЛ, $F(L)$ – число попаданий вычисленных значений МХПЛ в интервал $(L, L + \Delta L)$, где $\Delta L > 0$ – длина интервала, то с ростом промежутка времени, на котором вычисляется МХПЛ, пик, соответствующий регулярным траекториям, смещается по оси абсцисс в сторону уменьшения величин показателей (в сторону увеличения ляпуновского времени). Пики, соответствующие хаотическим траекториям (им соответствуют относительно малые ляпуновские времена), остаются на месте. Разделив пики в распределении, получим пороговую величину МХПЛ (пороговую величину ляпуновского времени) для разделения регулярных и хаотических траекторий.

Аналогичным образом, критерий для разделения орбит экзолун на устойчивые (регулярные) и неустойчивые (хаотические) был получен и в настоящей работе. Для системы KOI-268.01 были проведены вычисления ХПЛ на двух интервалах времени ($t = 10^5$ лет и $t = 5 \times 10^5$ лет) для значений параметров, заданных на равномерной сетке размером 10×10 на плоскости (a_s, e_s) , где $0.001 \leq a_s \leq 0.007$ а. е., $0 \leq e_s \leq 0.5$. На рис. 1 представлены распределения вычисленных значений ляпуновских времен T_L для 100 исследованных спутниковых орбит. В распределении значений ляпуновских времен, вычисленных на промежутке $t = 10^5$ лет, было выделено три группы спутниковых орбит: 1) орбиты с $T_L < 5000$ лет – 27 орбит, 2) $5000 < T_L < 7000$ лет – 21 орбита, 3) $T_L > 7000$ лет – 42 орбиты. Для 10 орбит фиксировалось либо столкновение спутника с планетой, либо его выход за пределы сферы Хилла планеты, т.е. для этих орбит был установлен неустойчивый характер. Анализ распределения значений T_L , вычисленных на промежутке $t = 5 \times 10^5$ лет, показал, что для почти всех орбит из третьей группы наблюдалось увеличение ляпуновских времен до значений $T_L = 16000$ – 26000 лет. Лишь для одной из орбит ляпуновское время уменьшилось до $T_L = 5500$ лет. Для 10 орбит из второй группы ляпуновские времена уменьшились, либо остались прежними. Для 11 орбит из второй группы и 16 орбит из первой группы (с $T_L < 5000$ лет) был установлен неустойчивый характер – наблюдалось либо столкновение спутника с планетой, либо выход спутника за пределы сферы Хилла планеты. Для 11 орбит из первой группы ляпуновские времена существенно не изменились и остались меньшими 5000 лет. Стоит ожидать, что при увеличении времени, на котором вычисляется МХПЛ, для всех орбит из пер-

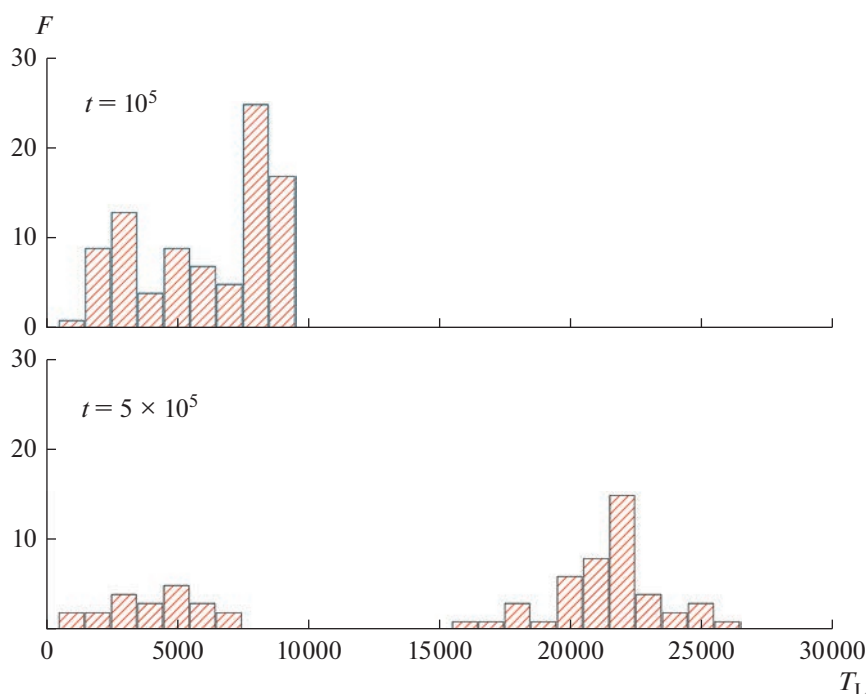


Рис. 1. Дифференциальные распределения значений ляпуновских времен (в годах), вычисленных на промежутках времени интегрирования разной длины: верхний рисунок — $t = 10^5$ лет, нижний — $t = 5 \times 10^5$ лет. Ляпуновские времена вычислялись на выборке значений параметров, определенной в тексте, для спутниковой системы планеты KOI-268.01.

вой группы и для подавляющего большинства орбит из второй группы будет установлен неустойчивый характер. Далее при анализе диаграмм устойчивости будем считать неустойчивыми спутниковые орбиты, для которых на промежутке интегрирования $t = 10^5$ лет вычисленные ляпуновские времена $T_L < 7000$ лет, а орбиты с $T_L > 7000$ лет будем считать устойчивыми.

Посредством описанного выше метода были построены диаграммы устойчивости для всех систем из табл. 1. На рис. 2 представлены характерные примеры диаграмм устойчивости для четырех спутниковых систем экзопланет. Белый цвет на диаграммах соответствует неустойчивым орбитам, для которых фиксировалось либо столкновение спутника с планетой, либо выход спутника за пределы сферы Хилла планеты. Синим и красным цветами отмечены орбиты, которые мы считаем неустойчивыми на основе малых величин вычисленных для них ляпуновских времен. Зеленым цветом отмечены орбиты с устойчивым характером вековой орбитальной динамики. Анализ диаграмм устойчивости показал, что из восьми указанных в табл. 1 систем в области устойчивой динамики (с $T_L > 7000$ лет) расположены потенциально существующие, согласно данным Fox и Wiegert (2021), спутники у трех планет: KOI-268.01, Kepler-1000b и Kepler-1442b. Из анализа диаграмм (см. рис. 2) можно получить оценки возможных орбитальных параметров для спутни-

ков этих планет: $0.001 \leq a_s \leq 0.005$ а. е., $0 \leq e_s \leq 0.4$. На основе этих данных, характеризующих размер орбиты спутника, можно оценить возможность выявления потенциально существующих спутников посредством анализа наблюдений транзитов планет. Отметим, что на устойчивость вековой орбитальной динамики потенциальных спутников планет KOI-268.01 и Kepler-1000b ранее было указано Quarles и др. (2020). Мы подтвердили устойчивость динамики этих спутниковых систем посредством использования математически обоснованного критерия — посредством вычисления ХПЛ.

На рис. 2 приведена диаграмма устойчивости, построенная для возможного спутника планеты Kepler-1326b. Видно, что на диаграмме преобладают области с малыми значениями ляпуновских времен, а возможная спутниковая орбита попадает в область, где $T_L < 5000$ лет, т.е. является неустойчивой. Схожий вид имеют диаграммы устойчивости, построенные для спутниковых подсистем планет Kepler-517b, Kepler-809b, Kepler-857b и Kepler-409b. Для всех указанных планет возможные спутниковые орбиты (Fox, Wiegert, 2021) расположены в областях с неустойчивой вековой динамикой. На то, что существование спутников в системах Kepler-517b, Kepler-409b, Kepler-1326b маловероятно, ранее указали Quarles и др. (2020).

Анализ всех построенных нами диаграмм показал, что внешняя граница области устойчиво-

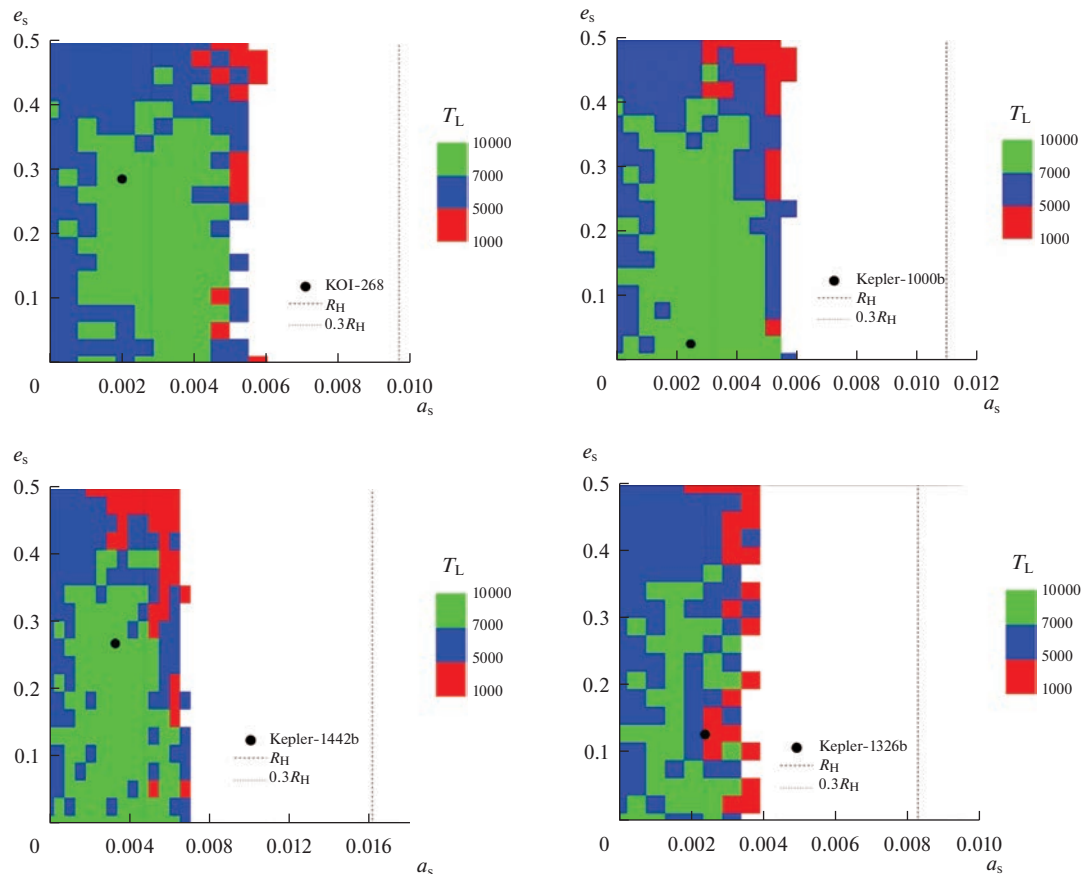


Рис. 2. Примеры диаграмм устойчивости для спутниковых систем экзопланет, построенные посредством вычисления ляпуновского времени системы — T_L (в годах). Белый цвет соответствует неустойчивым спутниковым орбитам. Штриховой вертикальной линией указан радиус сферы Хилла планеты — R_H , вертикальной линией из точек нанесена эмпирическая граница устойчивости — $0.3R_H$ (Holman, Wiegert, 1999). Точками указаны положения экзолун, согласно данным (Fox, Wiegert, 2021).

сти (граница области с относительно большими ляпуновскими временами) для проградных спутников расположена на расстоянии около $0.5R_H$, что согласуется с выводами работы (Domingos и др., 2006); в работе Rosario-Franco и др. (2020) внешняя граница этой области оценивалась в $0.4R_H$. Обсуждение местоположения границы области устойчивости орбитальной динамики экзолун см. в работе Quarles и др. (2021). Отметим, что, согласно рис. 2, вероятный спутник планеты Kepler-1326b расположен возле границы эмпирического критерия устойчивости $a_s \approx 0.3R_H$. Напротив, согласно данным Fox и Wiegert (2021), потенциально существующие спутники планет KOI-268.01, Kepler-1000b и Kepler-1442b на построенных нами диаграммах (см. рис. 2) расположены глубоко внутри области устойчивой динамики и их орбиты имеют $a_s < 0.3R_H$. Новые наблюдательные данные и тщательный анализ имеющихся транзитов, возможно, смогут подтвердить существование этих экзолун.

ВЕКОВАЯ ДИНАМИКА СПУТНИКОВ У ПЛАНЕТ KEPLER-1625b И KEPLER-1708b

Как отмечалось выше, анализ данных наблюдений транзитов планет Kepler-1625b (Teachey, Kipping, 2018) и Kepler-1708b (Kipping и др., 2022) указал на наличие у них спутников. Используя методы, описанные в предыдущем разделе, мы построили для экзолун Kepler-1625b-I и Kepler-1708b-I диаграммы устойчивости (см. рис. 3) и провели их анализ. Принятые при исследовании устойчивости значения физических и орбитальных параметров планетных систем и существующих в них спутников приведены в табл. 2.

Из представленной на рис. 3 диаграммы устойчивости следует, что большая полуось орбиты спутника планеты Kepler-1625b может иметь значения от $5R_p$ до $25R_p$, где R_p — радиус планеты. Параметры орбиты спутника Kepler-1625b-I и его масса определены неоднозначно (Heller, 2018; Teachey и др., 2018; 2020; Teachey, Kipping, 2018; Heller и др., 2019; Martin и др., 2019; Moraes, Vieira

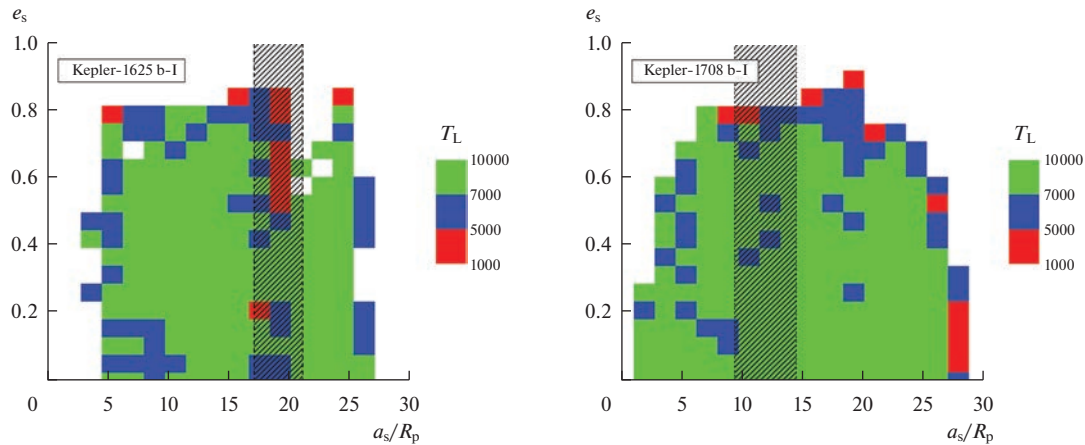


Рис. 3. Диаграммы устойчивости для спутников у планет Kepler-1625b и Kepler-1708b, построенные посредством вычисления ляпуновского времени системы – T_L (в годах). Белый цвет соответствует неустойчивым спутниковым орбитам. Штриховыми областями отмечены положения экзолуна: для Kepler-1625b, согласно Teachey и др. (2018); для Kepler-1708b, согласно Kipping и др. (2022).

Neto, 2020; Rosario-Franco и др., 2020; Moraes и др., 2022; Kipping и др., 2022). На рис. 3 нанесено возможное положение спутника Kepler-1625b-I согласно данным Teachey и др. (2018): $a_s/R_p = (17.2–21.2)$, величина e_s неизвестна. Видно, что почти половина области, определенной указанными значениями орбитальных параметров, соответствует неустойчивым спутниковым орбитам. Поэтому стоит ожидать, что для Kepler-1625b-I большая полуось орбиты будет принадлежать либо области $5R_p < a_s < 16R_p$, либо области, где $21R_p < a_s < 25R_p$. Ранее анализ устойчивости орбитальной динамики спутника планеты Kepler-1625b проводился в работах (Rosario-Franco и др., 2020; Moraes, Vieira Neto, 2020). Полученная нами диаграмма устойчивости (рис. 3) для спутника Kepler-1625b-I схожа с диаграммами, приведенными в работах (Moraes, Vieira Neto, 2020). Как видно из представленной на рис. 3 диаграммы, все спутниковые орбиты с $a_s/R_p > 27$ для планеты Kepler-1625b являются неустойчивыми. Как и в работе (Moraes, Vieira Neto, 2020), мы проводили исследование устойчивости динамики Kepler-1625b-I для орбит с $10R_p < a_s < 50R_p$, однако не выявили

устойчивых орбит с $a_s > 30R_p$. Поэтому, предполагаемое в (Teachey, Kipping, 2018; Martin и др., 2019; Moraes, Vieira Neto, 2020) существование у планеты Kepler-1625b спутника с большой полуосью, около $40R_p$, маловероятно. В работе (Tokadjian, Piro, 2022) была рассмотрена приливная орбитальная эволюция спутника Kepler-1625b-I, а также было указано, что для него величина $a_s/R_p > 19$ с точки зрения приливной эволюции нереалистична. В работе (Moraes и др., 2022) был проведен анализ устойчивости динамики еще одного возможного спутника (массой порядка Земли) у планеты Kepler-1625b, предполагая для Kepler-1625b-I $a_s = 40R_p$. Стоит отметить, что полученная нами диаграмма устойчивости для одного спутника планеты Kepler-1625b схожа с диаграммой, построенной в (Moraes и др., 2022) для случая динамики планеты и двух спутников.

Согласно построенной диаграмме устойчивости (см. рис. 3) для спутника планеты Kepler-1708b, подавляющая часть возможных для него спутниковых орбит, задаваемых решением из работы (Kipping и др., 2022), является устойчивой, что подтверждает весьма высокую вероятность

Таблица 2. Параметры планетных систем и обнаруженных в них спутников, согласно данным (Heller, 2018; Teachey и др., 2020; Kipping и др., 2022; Tokadjian, Piro, 2022)

Планета	M	m_p	a_p , а. е.	e_p	a_s , а. е.	m_s
Kepler-1625b (KOI-5084.01)	1.08	11.6	0.88	0.011	0.0021	19
Kepler-1708b (KIC-7906827.01)	1.09	4.6	1.64	0.4	0.05	37

M – масса звезды в массах Солнца, m_p – масса планеты в массах Юпитера, a_p , e_p – большая полуось и эксцентриситет орбиты планеты; a_s – большая полуось орбиты спутника, m_s – масса спутника в массах Земли.

существования данной экзолуны. Информация о спутнике Kepler-1708b-I и его параметрах в настоящее время включена в каталог <http://exoplanet.eu/>. Также отметим, что, согласно диаграммам устойчивости, построенным для спутников планет Kepler-1625b и Kepler-1708b (см. рис. 3), область возможных значений эксцентриситетов спутниковых орбит в 1.5–2 раза больше, чем для возможных спутников планет из работы (Fox, Wiegert, 2021), рассмотренных в предыдущем разделе (см. рис. 2).

ВЫВОДЫ

Итак, из восьми рассмотренных экзопланетных систем, в которых, возможно, существуют спутники планет, проведенное нами исследование динамической устойчивости орбитального движения посредством вычисления ХПЛ выявило три системы с устойчивой динамикой: KOI-268.01, Kepler-1000b и Kepler-1442b. Для этих планет предполагаемые параметры (Fox, Wiegert, 2021) спутниковой подсистемы соответствуют устойчивой вековой орбитальной динамике с ляпуновским временем $T_L > 7000$ лет. Приблизительные размеры областей устойчивой орбитальной динамики возможных спутников: $0.001 \leq a_s \leq 0.005$ а. е., $0 \leq e_s \leq 0.4$. Исследование устойчивости проведено и для двух уже обнаруженных из анализа наблюдений экзолун — у планет Kepler-1625b и Kepler-1708b. Установлено, что большая полуось орбиты спутника планеты Kepler-1625b может иметь величину от 5 до 25 радиусов планеты. Величина большой полуоси спутника в 40 радиусов планеты, как утверждают (Teachey, Kipping, 2018; Martin и др., 2019; Moraes, Vieira Neto, 2020), маловероятна. В случае спутника планеты Kepler-1708b, имеющее решение (Kipping и др., 2022) соответствует устойчивой спутниковой орбите с ляпуновским временем $T_L > 7000$ лет, что указывает на правильность определения параметров спутниковой подсистемы на основе анализа наблюдений.

Полученные в настоящем исследовании результаты позволяют на основе знания размеров области устойчивой орбитальной спутниковой динамики на плоскости (a_s, e_s) установить возможность идентификации экзолун в планетных системах при помощи современных наблюдательных средств. Построив диаграммы устойчивости и отметив на них местоположение обнаруженных экзолун, на основе определенных из анализа наблюдательных данных значений орбитальных параметров можно установить достоверность этих параметров и уточнить размеры установленных для них погрешностей.

Автор благодарен рецензенту за полезные замечания.

Работа поддержана грантом 075-15-2020-780 «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных

планетных систем и характеристик экзопланет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Емельянов Н.В. Динамика естественных спутников планет на основе наблюдений. Фрязино: Век 2, 2019. 575 с.
- Лихтенберг А., Либерман М. Регулярная и стохастическая динамика. М.: Мир, 1984. 528 с.
- Мельников А.В. Численные инструменты для анализа вековой динамики экзопланетных систем // Астрон. вестн. 2018. Т. 52. № 5. С. 427–436. (Melnikov A.V. Numerical instruments for the analysis of secular dynamics of exoplanetary systems // Sol. Syst. Res. 2018. V. 52. № 5. P. 417–425.) <https://doi.org/10.1134/S0038094618050064.10.1134/S0320930X18050067>
- Мельников А.В., Шевченко И.И. Об устойчивости вращательного движения несферических естественных спутников относительно наклона оси вращения // Астрон. вестн. 1998. Т. 32. № 6. С. 548–559. (Melnikov A.V., Shevchenko I.I. The stability of the rotational motion of nonspherical natural satellites with respect to tilting the axis of rotation // Sol. Syst. Res. 1998. V. 32. № 6. P. 480–490.)
- Мельников А.В., Шевченко И.И. Вращательная динамика и эволюция спутников планет Солнечной и экзопланетных систем // Астрон. вестн. 2022. Т. 56. № 1. С. 3–26. (Melnikov A.V., Shevchenko I.I. Rotational dynamics and evolution of planetary satellites in the Solar and exoplanetary systems // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 1. P. 1–22.) <https://doi.org/10.31857/S0320930X22010042>. <https://doi.org/10.31857/10.1134/S003809462201004X>
- Awiphan S., Kerins E. The detectability of habitable exomoons with Kepler // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2013. V. 432. P. 2549–2561.
- Benettin G., Galgani L., Strelcyn J.-M. Kolmogorov entropy and numerical experiments // Phys. Rev. A. 1976. V. 14. № 6. P. 2338–2345.
- Benettin G., Galgani L., Giorgilli A., Strelcyn J.-M. Lyapunov characteristic exponents for smooth dynamical systems and for Hamiltonian systems — A method for computing all of them. I — Theory. II — Numerical application // Meccanica. 1980. V. 15. P. 9–30.
- von Bremen H.F., Udvardi F.E., Proskurowski W. An efficient QR based method for the computation of Lyapunov exponents // Physica D. 1997. V. 101. P. 1–16.
- Cassese B., Kipping D. Kepler-1708 b-i is likely undetectable with HST // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2022. V. 516. P. 3701–3708.
- Domingos R.C., Winter O.C., Yokoyama T. Stable satellites around extrasolar giant planets // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2006. V. 373. P. 1227–1234.
- Fox C., Wiegert P. Exomoon candidates from transit timing variations: Eight Kepler systems with TTVs explainable by photometrically unseen exomoons // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2021. V. 501. P. 2378–2393.
- Hairer E., Nørsett S.P., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations. I. Nonstiff Problems. Berlin: Springer-Verlag, 1993. 528 p.
- Heller R. Exomoon habitability constrained by energy flux and orbital stability // Astron. and Astrophys. 2012. V. 545. id. L8.

- Heller R. Detecting extrasolar moons akin to Solar System satellites with an orbital sampling effect // *Astrophys. J.* 2014. V. 787. id. 14.
- Heller R. The nature of the giant exomoon candidate Kepler-1625 b-i2018 // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 610. id. A39.
- Heller R., Rodenbeck K., Bruno G. An alternative interpretation of the exomoon candidate signal in the combined Kepler and Hubble data of Kepler-1625 // *Astron. and Astrophys.* 2019. V. 624. id. A95.
- Heller R., Williams D., Kipping D., Limbach M.A., Turner E., Greenberg R., Sasaki T., Bolmont É., Grasset O., Lewis K., Barnes R., Zuluaga J.I. Formation, habitability, and detection of extrasolar moons // *Astrobiology.* 2014. V. 14. № 9. P. 798–835.
- Holman M., Wiegert P. Long-term stability of planets in binary systems // *Astron. J.* 1999. V. 117. № 1. P. 621–628.
- Kaltenegger L. Characterizing habitable exomoons // *Astrophys. J.* 2010. V. 712. № 2. P. L125–L130.
- Kaltenegger L. How to characterize habitable worlds and signs of life // *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 2017. V. 55. № 1. P. 433–485.
- Kipping D.M. Transit timing effects due to an exomoon // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2009. V. 392. № 1. P. 181–189.
- Kipping D.M. LUNA: an algorithm for generating dynamic planet-moon transits // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2011. V. 416. P. 689–709.
- Kipping D.M. An independent analysis of the six recently claimed exomoon candidates // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 900. № 2. id. L44.
- Kipping D.M., Bakos G.Á., Buchhave L.A., Nesvorný D., Schmitt A. The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). I. Description of a new observational project // *Astrophys. J.* 2012. V. 750. id. 115.
- Kipping D., Bryson S., Burke C., Christiansen J., Hardegree-Ullman K., Quarles B., Hansen B., Szulágyi J., Teachey A. An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i // *Nature Astronomy.* 2022. V. 6. P. 367–380.
- Kipping D.M., Forgan D., Hartman J., Nesvorný D., Bakos G.A., Schmitt A., Buchhave L. The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). III. The first search for an exomoon around a habitable-zone planet // *Astrophys. J.* 2013a. V. 777. № 2. id. 134.
- Kipping D.M., Hartman J., Buchhave L.A., Schmitt A.R., Bakos G.A., Nesvorný D. The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). II. Analysis of seven viable satellite-hosting planet candidates // *Astrophys. J.* 2013b. V. 770. № 2. id. 101.
- Kipping D.M., Nesvorný D., Buchhave L.A., Hartman J., Bakos G.Á., Schmitt A.R. The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). IV. A search for moons around eight M dwarfs // *Astrophys. J.* 2014. V. 784. № 1. id. 28.
- Kipping D.M., Schmitt A.R., Huang X., Torres G., Nesvorný D., Buchhave L.A., Hartman J., Bakos G.A. The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). V. A survey of 41 planetary candidates for exomoons // *Astrophys. J.* 2015. V. 813. № 1. id. 14.
- Martin D.V., Fabrycky D.C., Montet B.T. Transits of in lined exomoons – hide and seek and an application to Kepler-1625 // *Astrophys. J.* 2019. V. 875. № 2. id. L25.
- Martínez-Rodríguez H., Caballero J.A., Cifuentes C., Piro A.L., Barnes R. Exomoons in the habitable zones of M dwarfs // *Astrophys. J.* 2019. V. 887. № 2. id. 261.
- Moraes R.A., Borderes-Motta G., Winter O.C., Monteiro J. On the stability of additional moons orbiting Kepler-1625 b // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2022. V. 510. № 2. P. 2583–2596.
- Moraes R.A., Vieira Neto E. Exploring formation scenarios for the exomoon candidate Kepler-1625b I // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2020. V. 495. № 4. P. 3763–3776.
- Nicholson P.D., Čuk M., Sheppard S.S., Nesvorný D., Johnson T.V. Irregular satellites of the giant planets // *The Solar System beyond Neptune* / Eds Barucci M.A., Boehnhardt H., Cruikshank D.P., Morbidelli A. Tucson: Univ. Arizona Press, 2008. P. 411–424.
- Quarles B., Li G., Rosario-Franco M. Application of orbital stability and tidal migration constraints for exomoon candidates // *Astrophys. J. Lett.* 2020. V. 902. № 1. id. L20.
- Quarles B., Eggl S., Rosario-Franco M., Li G. Exomoons in systems with a strong perturber: Applications to α Cen AB // *Astron. J.* 2021. V. 162. id. 58.
- Rosario-Franco M., Quarles B., Musielak Z.E., Cuntz M. Orbital stability of exomoons and submoons with applications to Kepler 1625b-I // *Astron. J.* 2020. V. 159. № 6. id. 260.
- Saha S., Sengupta S. Transit light curves for exomoons: analytical formalism // *Astrophys. J.* 2022. V. 936. № 1. id. 2.
- Shevchenko I.I., Kouprianov V.V. On the chaotic rotation of planetary satellites: The Lyapunov spectra and the maximum Lyapunov exponents // *Astron. and Astrophys.* 2002. V. 394. P. 663–674.
- Sucerquia M., Alvarado-Montes J.A., Zuluaga J.I., Cuello N., Giuppone C. Ploonets: formation, evolution, and detectability of tidally detached exomoons // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2019. V. 489. P. 2313–2322.
- Sucerquia M., Alvarado-Montes J.A., Bayo A., Cuadra J., Cuello N., Giuppone C.A., Montesinos M., Olofsson J., Schwab C., Spitler L., Zuluaga J.I. Cronomoons: origin, dynamics, and light-curve features of ringed exomoons // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2022. V. 512. № 1. P. 1032–1044.
- Sucerquia M., Ramírez V., Alvarado-Montes J.A., Zuluaga J.I. Can lose-in giant exoplanets preserve detectable moons? // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2020. V. 492. № 3. P. 3499–3508.
- Teachey A. The exomoon corridor for multiple moon systems // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021. V. 506. № 2. P. 2104–2121.
- Teachey A., Kipping D.M. Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b // *Sci. Adv.* 2018. V. 4. № 10. id. Eaav1784.
- Teachey A., Kipping D., Burke C.J., Angus R., Howard A.W. Loose ends for the exomoon candidate host Kepler-1625b // *Astron. J.* 2020. V. 159. № 4. id. 142.
- Teachey A., Kipping D.M., Schmitt A.R. HEK. VI. On the dearth of Galilean analogs in Kepler, and the exomoon candidate Kepler-1625b I // *Astron. J.* 2018. V. 155. № 1. id. 36.
- Tjoa J.N.K.Y., Mueller M., van der Tak F.F.S. The subsurface habitability of small, icy exomoons // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 636. id. A50.
- Tokadjian A., Piro A.L. Probing planets with exomoons: The cases of Kepler-1708 b and Kepler-1625 b // *Astrophys. J. Lett.* 2022. V. 929. № 1. id. L2.
- Williams D.M., Kasting J.F., Wade R.A. Habitable moons around extrasolar giant planets // *Nature.* 1997. V. 385. № 6613. P. 234–236.