

Об устойчивости орбитальной динамики кандидатов в спутники экзопланет

© А.В. Мельников^{1,2}

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
196140 Санкт-Петербург, Россия

² Институт прикладной астрономии РАН,
191187 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: melnikov@gaoran.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2025 г.

В окончательной редакции 16 июля 2025 г.

Принято к публикации 30 июля 2025 г.

Путем вычисления характеристических показателей Ляпунова для ряда экзопланетных систем, в которых спутники (экзолуны) потенциально существуют или уже выявлены, построены и детально изучены диаграммы устойчивости орбитальной динамики. Получены оценки величин ляпуновских времен (времени предсказуемой динамики) в орбитальной динамике экзолун и возможных значений орбитальных параметров кандидатов в экзолуны.

Ключевые слова: экзопланеты, спутники планет, небесная механика, устойчивость движения, показатели Ляпунова.

DOI: 10.61011/JTF.2025.12.61780.221-25

Все планеты Солнечной системы, за исключением Меркурия и Венеры, обладают спутниками, их число у планет-гигантов составляет от нескольких десятков до двух сотен. В настоящее время открыто более 6000 планет (экзопланет) у других звезд. Несомненно, что в большинстве экзопланетных систем имеются спутниковые подсистемы [1,2]. Значительная часть экзопланет представляет собой газовые гиганты. Ряд из них находится в области потенциальной обитаемости у родительской звезды, поэтому на естественных спутниках экзопланет (экзолунах) могут быть условия, подходящие для существования жизни [2,3]. Поиск и исследование динамики экзолун представляет собой хотя и трудоемкую, но весьма важную и актуальную задачу. Активное развитие в последнее десятилетие методов наблюдений позволило выявить ряд кандидатов в экзолуны. В работе [4] был представлен первый кандидат в экзолуны у планеты Kepler-1625b. Позднее в [5] было указано на восемь планетных систем, в которых имеются наблюдательные признаки наличия спутников. Недавно в работе [6] была отмечена возможность существования спутника у планеты Kepler-1708b. В работах [7,8] рассмотрена возможность существования спутников у планет HD 23079b и HIP 41378f.

Использование численных методов исследования устойчивости движения небесных тел (см. подробнее [9]) позволяет оценить возможность обнаружения экзолун из анализа наблюдений и получить/уточнить информацию об орбитальных и физических параметрах выявленных кандидатов в экзолуны. Долговременная орбитальная динамика для спутника, реально существующего в планетной системе, должна быть устойчивой. Определив для планетной системы на множествах возможных значений параметров и начальных условий для предполагаемой

спутниковой подсистемы границы областей ее устойчивой динамики (построив диаграммы устойчивости), можно оценить возможность обнаружения экзолун при помощи современных наблюдательных средств. Отметив на построенных диаграммах устойчивости положение обнаруженных из анализа наблюдений кандидатов в экзолуны, можно установить достоверность и оценить погрешность принятых для нее значений орбитальных параметров.

Изучение устойчивости динамики ряда из перечисленных выше кандидатов в экзолуны проводилось в работах [10–13]. В настоящей работе исследование устойчивости долговременной орбитальной динамики экзолун проведено посредством вычисления максимальных характеристических показателей Ляпунова (МХПЛ). Данный метод, в отличие от других широко используемых в рассматриваемой задаче [10,12,13] методов анализа устойчивости (вычисление MEGNO, оценка максимальной достижимой в ходе эволюции величины эксцентриситета экзолуны и пр.), позволяет строго оценивать ляпуновские времена [14] и уже успешно использовался нами ранее [11]. Напомним, что ХПЛ представляют собой среднюю скорость экспоненциальной расходимости близких (по начальным условиям) траекторий фазового пространства динамической системы (см. подробнее [9,14]). Гамильтонова система с N степенями свободы имеет $2N$ ХПЛ. Ненулевая величина максимального ХПЛ (L) указывает на хаотический, а нулевая — на устойчивый характер движения. Вывод об устойчивости движения кандидатов в экзолуны, перечисленных в таблице, мы делали на основе результатов численного интегрирования и оценок величин ляпуновского времени (времени предсказуемой динамики системы), для которого принято [15] $T_L = 1/L$. Подробнее о методах

Принятые при численном моделировании параметры планетных систем: M — масса звезды в массах Солнца, M_p — масса планеты в массах Юпитера, a_p , e_p — большая полуось и эксцентриситет орбиты планеты, m_s — масса предполагаемого спутника планеты (экзолуны) в массах Земли. Согласно данным [7,8,13]

Планета	M	M_p	a_p , AU	e_p	m_s
HIP 41378f	1.16	0.038	1.370	0.004	0.15
HD 23079b	1.01	2.41	1.586	0.087	1.0
Kepler-1625b	1.04	11.6	0.863	0.0	10.22
Kepler-1708b	1.09	4.6	1.640	0.40	17.15

получения численных и аналитических оценок МХПЛ в задачах о динамике спутниковых систем и в целом в небесной механике см. [9,14].

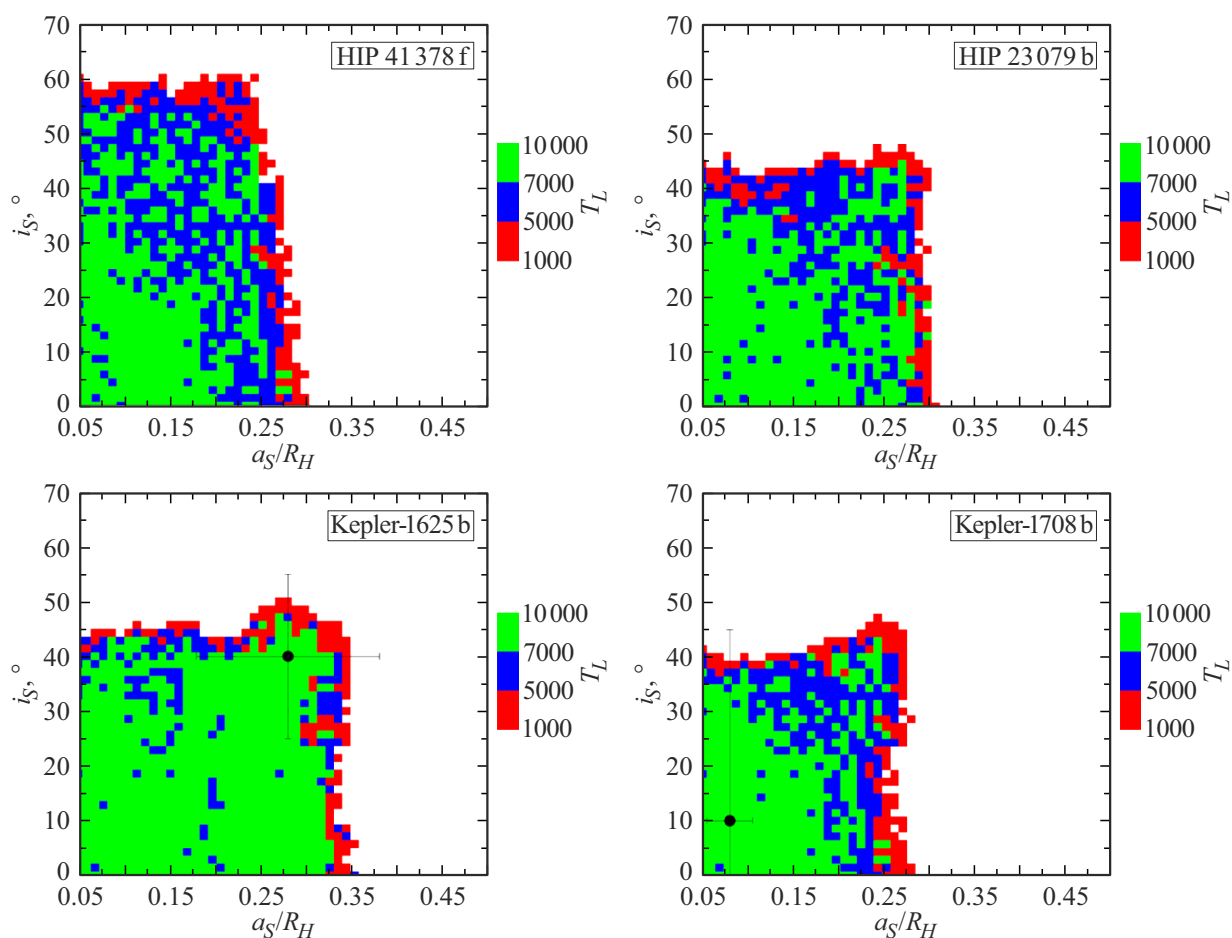
Интегрирование уравнений движения, описывающих динамику трех тел (звезда, планета и экзолуна), проводилось на множестве начальных значений орбитальных параметров экзолуны, заданных в узлах равномерной сетки размером 50×50 на плоскости (a_s, i_s) , где a_s и i_s — большая полуось и наклонение орбиты экзолуны к плоскости орбиты планеты. Рассматривались три значения эксцентриситета орбиты экзолуны: $e_s = 0, 0.05$ и 0.1 , было принято: $0.05 \leq a_s/R_H \leq 0.5$ и $0^\circ \leq i_s \leq 70^\circ$, где радиус сферы Хилла планеты R_H определялся равенством $R_H = a_p((M_p + m_s)/(3M))^{1/3}$. Принятые величины для параметров планетных систем даны в таблице. Полагалось, что в начальный момент времени экзолуна и планета располагаются в перигентрах своих орбит, для неизвестных орбитальных элементов (аргументы перигентров и долготы восходящих узлов) были приняты нулевые значения (см. также [7,8]). Численное интегрирование проводилось на промежутке времени 10^5 лет. Использовались числа двойной точности. При интегрировании применялся интегратор DOP853 [16], реализующий явный метод Рунге–Кутты 8-го порядка с автоматически изменяемой величиной шага интегрирования. Максимальный шаг интегрирования был принят равным $\Delta t_{\max} = 10^{-2}$ года, величина локальной (на одном шаге) погрешности была положена $\varepsilon = 10^{-12}$. На основе значения ε интегратор DOP853 автоматически подбирает необходимую величину шага интегрирования, не превышающую $\Delta t_{\max}$ (см. подробнее [16]).

Орбита экзолуны считалась неустойчивой, и численное интегрирование останавливалось, если происходило тесное сближение/столкновение с планетой, либо экзолуна покидала сферу Хилла планеты. Факт тесного сближения/столкновения экзолуны с планетой фиксировался при уменьшении a_s до величины, равной радиусу планеты, либо при изменении относительной энергии системы „планета–спутник“ $\Delta E \geq 10^{-7}$ (см. обсуждение в [11]). Отметим, что в случае устойчивой динамики при интегрировании на промежутке времени 10^5 лет

изменение энергии $\Delta E \leq 10^{-12}$. Если интегрирование успешно завершалось при достижении заданного промежутка времени, то вывод об устойчивости орбитальной динамики экзолуны делался на основе определенной для нее величины ляпуновского времени T_L . Считалось, что орбиты экзолун с $T_L \geq 5000$ лет являются устойчивыми (см. подробнее [11]). Далее на плоскости (a_s, i_s) определялись границы области устойчивости, рассматривалось положение на ней кандидатов в экзолуны (если оно известно) и оценивалась относительная доля траекторий, занятая ими на построенной двумерной диаграмме.

На рисунке представлены примеры полученных при $e_s = 0$ диаграмм устойчивости для кандидатов в экзолуны в планетных системах, перечисленных в таблице. Во всех случаях относительная доля устойчивых траекторий на построенной диаграмме составляла около 25–40 %, что согласуется с результатами [8,11,13]. С увеличением e_s доля устойчивых орбит экзолун сокращалась и не превышала 15–25 % при $e_s = 0.1$. При $a_s/R_H > 0.4$ – 0.5 и $i_s > 60^\circ$ устойчивых орбит на построенных нами диаграммах не выявлено (см. обсуждение в [10,13]). Это можно объяснить тем, что при больших наклонениях орбиты экзолуны в ее динамике существенную роль начинает играть резонанс Лидова–Козаи, приводящий к неустойчивому движению. Если сравнивать размеры представленных на рисунке областей устойчивости с оценками, полученными в [10,13], то следует отметить (см. также [11]), что при использовании критерия устойчивости, основанного на величине МХПЛ, верхняя граница по величине a_s меньше для всех рассмотренных экзолун. Из представленных на рисунке диаграмм видно, что в системе Kepler-1625b кандидат в экзолуны расположен в области устойчивого движения вблизи границы устойчивости, а в системе Kepler-1708b экзолуна находится достаточно далеко от областей с неустойчивой динамикой. В системах HIP 41378f и HD 23079b экзолуны пока не выявлены, но из построенных диаграмм видно, что области устойчивости на плоскости (a_s, i_s) достаточно большие (особенно по i_s в случае HIP 41378f), и в данных планетных системах могут существовать спутники с рассмотренными параметрами (массами m_s).

Итак, в настоящей работе развит предложенный в работе [11] метод для построения диаграмм устойчивости спутниковых подсистем экзопланет путем вычисления ХПЛ. Для ряда планетных систем (HIP 41378f, HD 23079b, Kepler-1625b, Kepler-1708b), в которых спутники потенциально существуют или уже выявлены, построены диаграммы устойчивости с существенно (в несколько раз) более высоким разрешением, чем в [11], и проведен их анализ. Показано, что динамика кандидатов в экзолуны в планетных системах Kepler-1625b и Kepler-1708b является устойчивой. Подтверждена возможность существования в системах HIP 41378f и HD 23079b экзолун и получены оценки их возможных орбитальных параметров.



Ляпуновские времена (в годах) для орбитальной динамики рассмотренных экзопланет (см. таблицу), вычисленные на множестве возможных для них значений большой полуоси a_S (в радиусах сферы Хилла R_H родительской планеты) и наклонения орбиты i_S . Белый цвет соответствует неустойчивым орбитам. Черными точками с барирами ошибок, согласно [13], отмечено положение кандидатов в экзопланеты.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.M. Kipping. Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **392** (1), 181 (2009). DOI: 10.1111/j.1365-2966.2008.13999.x
- [2] R. Heller, D. Williams, D. Kipping, M.A. Limbach, E. Turner, R. Greenberg, T. Sasaki, É. Bolmont, O. Grasset, K. Lewis, R. Barnes, J.I. Zuluaga. Astrobiology, **14** (9), 798 (2014). DOI: 10.1089/ast.2014.1147
- [3] D.M. Williams, J.F. Kasting, R.A. Wade. Nature, **385** (6613), 234 (1997). DOI: 10.1038/385234a0
- [4] A. Teachey, D.M. Kipping. Sci. Adv., **4** (10), Eaav1784 (2018). DOI: 10.1126/sciadv.aav1784
- [5] C. Fox, P. Wiegert. Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **501** (2), 2378 (2021). DOI: 10.1093/mnras/staa3743
- [6] D. Kipping, S. Bryson, Ch. Burke, J. Christiansen, K. Hardegree-Ullman, B. Quarles, B. Hansen, J. Szulágyi, A. Teachey. Nature Astron., **6**, 367 (2022). DOI: 10.1038/s41550-021-01539-1
- [7] O. Jagtap, B. Quarles, M. Cuntz. Publ. Astron. Soc. Aust., **38**, e059 (2021). DOI: 10.1017/pasa.2021.52
- [8] C.K. Harada, C.D. Dressing, M.K. Alam, J. Kirk, M. López-Morales, K. Ohno, B. Akincanmi, S.C.C. Barros, L.A. Buchhave, A.C. Cameron, I.J.M. Crossfield, F. Dai, P. Gao, S. Giacalone, S. Grouffal, J. Lillo-Box, A.W. Mayo, A. Mortier, A. Santerne, N.C. Santos, S.G. Sousa, E.V. Turtelboom, A. Vanderburg, P.J. Wheatley. Astron. J., **166** (5), 208 (2023). DOI: 10.3847/1538-3881/ad011c
- [9] А. Морбиделли. Современная небесная механика. Аспекты динамики Солнечной системы (Ин-т компьютерных исследований, М.-Ижевск, 2014), с. 99–118. [A. Morbidelli. Modern celestial mechanics: aspects of solar system dynamics (Taylor & Francis, London, 2002), p. 89–106.
- [10] B. Quarles, G. Li, M. Rosario-Franco. Astrophys. J. Lett., **902** (1), L20 (2020). DOI: 10.3847/2041-8213/abba36
- [11] А.В. Мельников. Астрон. вестн., **57** (4), 365 (2023). DOI: 10.31857/S0320930X23030064 [A.V. Melnikov. Sol. Syst. Res., **57** (4), 380 (2023). DOI: 10.1134/S0038094623030061]
- [12] R.A. Moraes, G. Borderes-Motta, O.C. Winter, D.C. Mourao. Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., **520** (2), 2163 (2023). DOI: 10.1093/mnras/stad314

- [13] S.D. Patel, B. Quarles, M. Cuntz. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **537** (3), 2291 (2025). DOI: 10.1093/mnras/staf131
- [14] I.I. Shevchenko. *Dynamical Chaos in Planetary Systems* (Springer Nature, 2020), p. 35–51.
DOI: 10.1007/978-3-030-52144-8
- [15] I.I. Shevchenko. *JETP Lett.*, **120** (8), 622 (2024).
DOI: 10.1134/S0021364024602872
- [16] E. Hairer, S.P. Nørsett, G. Wanner. *Solving Ordinary Differential Equations I: Nonstiff Problems* (Springer-Verlag, 1993), p. 481.