

Об орбитальной устойчивости спутников экзопланет

А.В. Мельников¹

¹ГАО РАН

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

Аннотация

Посредством вычисления характеристических показателей Ляпунова проведен анализ устойчивости вековой орбитальной динамики спутников у ряда экзопланет у которых возможно наличие «экзолун». Установлен устойчивый характер вековой динамики возможных спутников у планет KOI-268, Kepler-1000b и Kepler-1442b. Получены оценки возможных значений орбитальных параметров экзолун. Детально рассмотрена динамика уже обнаруженных из анализа наблюдений спутников планет Kepler-1625b и Kepler-1708b. Установлено, что большая полуось орбиты спутника планеты Kepler-1625b может иметь значения от 5 до 25 радиусов планеты. Имеющееся для спутника планеты Kepler-1708b решение (Kipping et al., 2022) соответствует устойчивой спутниковой орбите.

Введение

Все планеты Солнечной системы за исключением Меркурия обладают спутниками. В настоящее время развиваются исследования возможности существования спутников в планетных системах других звезд (Kipping, 2009; Kipping et al., 2012, 2022; Heller, 2014; Heller et al., 2014; Sucerquia et al., 2019, 2020, 2022; Teachey, 2021). Активные поиски «экзолун» проводятся посредством анализа данных транзитных наблюдений экзопланет, в частности, в рамках проекта НЕК (“Hunt for Exomoons with Kepler”), см. Kipping et al. (2012, 2013b,a, 2014, 2015); Teachey et al. (2018). Большой интерес к экзолунам обусловлен прежде всего высокой актуальностью проблемы обитаемости экзопланетных систем. Родительские планеты часто представляют собой газовые гиганты, находящиеся в области потенциальной обитаемости у родительской звезды (Williams et al., 1997; Heller et al., 2014), поэтому на спутниках экзопланет могут поддерживаться подходящие для существования жизни условия (Williams et al., 1997; Kaltenegger, 2010, 2017; Heller, 2012; Heller et al., 2014; Martínez-Rodríguez et al., 2019; Tjoa et al., 2020).

В работах (Teachey et al., 2018; Teachey, Kipping, 2018) был представлен первый реальный кандидат в экзолуны. Посредством анализа наблюдений с HST (Hubble Space Telescope) и 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;

Таблица 1: Параметры планетных систем и предполагаемых в них спутников, согласно данным (Fox, Wiegert, 2021).

Планета	M	m_p	a_p , а.е.	a_s , а.е.	e_s	m_s
КОI-268	1.18	9.3	0.473	0.0021	0.281	0.817
Kepler-517b	0.87	7.6	0.288	0.0040	0.198	0.499
Kepler-809b	1.05	11.0	0.307	0.0019	0.113	2.931
Kepler-857b	0.97	38.0	0.373	0.0031	0.495	1.636
Kepler-1000b	1.41	20.0	0.532	0.0026	0.027	1.551
Kepler-409b	0.90	1.0	0.317	0.0029	0.024	0.300
Kepler-1326b	1.54	24.6	0.272	0.0025	0.130	6.057
Kepler-1442b	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.

Teachey et al., 2018, 2020; Heller et al., 2019; Martin et al., 2019; Moraes, Vieira Neto, 2020; Rosario-Franco et al., 2020; Cassese, Kipping, 2022), подчеркивая сложность проблемы. При помощи метода TTV Fox, Wiegert (2021) обнаружили восемь систем, чьи планеты имеют признаки наличия спутников. Проведенное в работе (Kipping, 2020) дополнительное независимое исследование шести систем из работы (Fox, Wiegert, 2021) не выявило в наблюдательных данных статистически значимых признаков присутствия экзолун в этих системах. Стоит отметить, что, как совершенствование методов и техники наблюдений, алгоритмов обработки наблюдательных данных, так и новые наблюдения, могут подтвердить наличие спутников у планет, указанных в работе (Fox, Wiegert, 2021). Недавно в работе Kipping et al. (2022) было указано на существование экзолуны у планеты Kepler-1708b (см. также Moraes et al. (2022)).

В настоящей работе посредством использования одного из методов исследования динамической устойчивости движения — вычисления характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ) — определяются области возможных орбитальных параметров экзолун для планетных систем в которых спутники потенциально существуют или уже обнаружены. Нами рассмотрена устойчивость вековой орбитальной динамики потенциально существующих спутников в восьми планетных системах, указанных в работе (Fox, Wiegert, 2021). Также рассмотрена динамика уже обнаруженных из анализа наблюдений, спутников планет Kepler-1625b (Teachey et al., 2018; Teachey, Kipping, 2018) и Kepler-1708b (Kipping et al., 2022).

Устойчивость орбитальной динамики спутников экзопланет

Вековая динамика потенциально существующих экзолун

В своей работе Fox, Wiegert (2021) посредством численного интегрирования долговременной орбитальной динамики планетной системы получили оценки значений орбитальных параметров и масс спутников, потенциально существующих у восьми планет. Список планетных систем, их орбитальные параметры и массы компонент приведены в Табл. 1, согласно данным (Fox, Wiegert, 2021).

Ранее для шести из приведенных в Табл. 1 систем в работе Quarles et al. (2020) по-

средством использования ряда теоретических критериев устойчивости орбитального движения и численного интегрирования долговременной орбитальной динамики планетной системы были определены области возможных орбитальных параметров спутников. Мы рассмотрели устойчивость вековой динамики потенциально существующих спутников для всех указанных в Табл. 1 планетных систем. Путем вычисления характеристических показателей Ляпунова (ХПЛ) на плоскости возможных значений орбитальных параметров (a_s, e_s) спутниковой подсистемы экзопланеты выделялись области с разным характером орбитальной динамики — строились диаграммы устойчивости. Метод исследования устойчивости движения, основанный на вычислении ХПЛ, имеет строгое математическое обоснование (см. подробнее Benettin et al. (1976); Lichtenberg, Lieberman (1992)). Подробно вопрос использования различных методов исследования устойчивости в динамике планетных/спутниковых систем и алгоритм построения диаграмм устойчивости были рассмотрены в работе (Melnikov, 2018). На приведенных далее диаграммах устойчивости указано ляпуновское время (время предсказуемой динамики системы) для которого принято: $T_L = 1/L$, где L — максимальный ХПЛ. Ненулевая величина максимального ХПЛ указывает на хаотический (неустойчивый), а нулевая — на регулярный (устойчивый) характер движения.

Интегрирование уравнений движения при вычислении ХПЛ проводилось на равномерной сетке размером 20×20 на плоскости (a_s, e_s) . Вычисление ХПЛ проводилось при помощи метода HQRV (von Bremen et al., 1997), реализованного в виде программного комплекса на языке ФОРТРАН в работе (Shevchenko, Kourigianov, 2002). Для интегрирования уравнений движения 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.

С теоретической точки зрения орбита экзолуны должна располагаться вне сферы Роша родительской планеты и не далее чем $0.3R_H$ (эмпирический критерий, см. подробнее Holman, Wiegert (1999)) при прямом (проградном) движении спутника, когда направления орбитального движения планеты и спутника совпадают, спутника и ближе $0.5R_H$ (Nicholson et al., 2008) в случае обратного (ретроградного) движения, где R_H — радиус сферы Хилла планеты. В настоящем исследовании мы рассматривали только случай проградных орбит спутников экзопланет. При интегрировании уравнений движения использовались следующие критерия устойчивости спутниковой орбиты: контроль сохранения полной энергии системы позволял фиксировать тесные сближения (столкновения) тел, отслеживался выход спутника планеты из сферы Хилла планеты и приближение орбиты спутника к сфере Роша. При фиксации хотя бы одного из указанных выше событий, интегрирование останавливалось и орбита спутника для принятых начальных значений орбитальных параметров считалась неустойчивой. Во всех численных экспериментах полагалось, что в начальный момент времени спутник и планета располагаются в перицентрах своих орбит, для неизвестных орбитальных элементов планеты и спутника: $i_p = \Omega_p = \omega_p = i_s = \Omega_s = \omega_s = 0$.

На Рис. 1 представлены примеры диаграмм устойчивости, построенных посредством вычисления ХПЛ, для некоторых систем из Табл. 1. Большие значения ляпуновских времен ($T_L > 7000$ лет) соответствуют устойчивым орбитам спутниковой подсистемы экзопланеты. Малые ($T_L < 5000$) и промежуточные (в большинстве случаев) значения ляпуновских времен соответствуют неустойчивым орбитам. Критерий для разделения орбит на

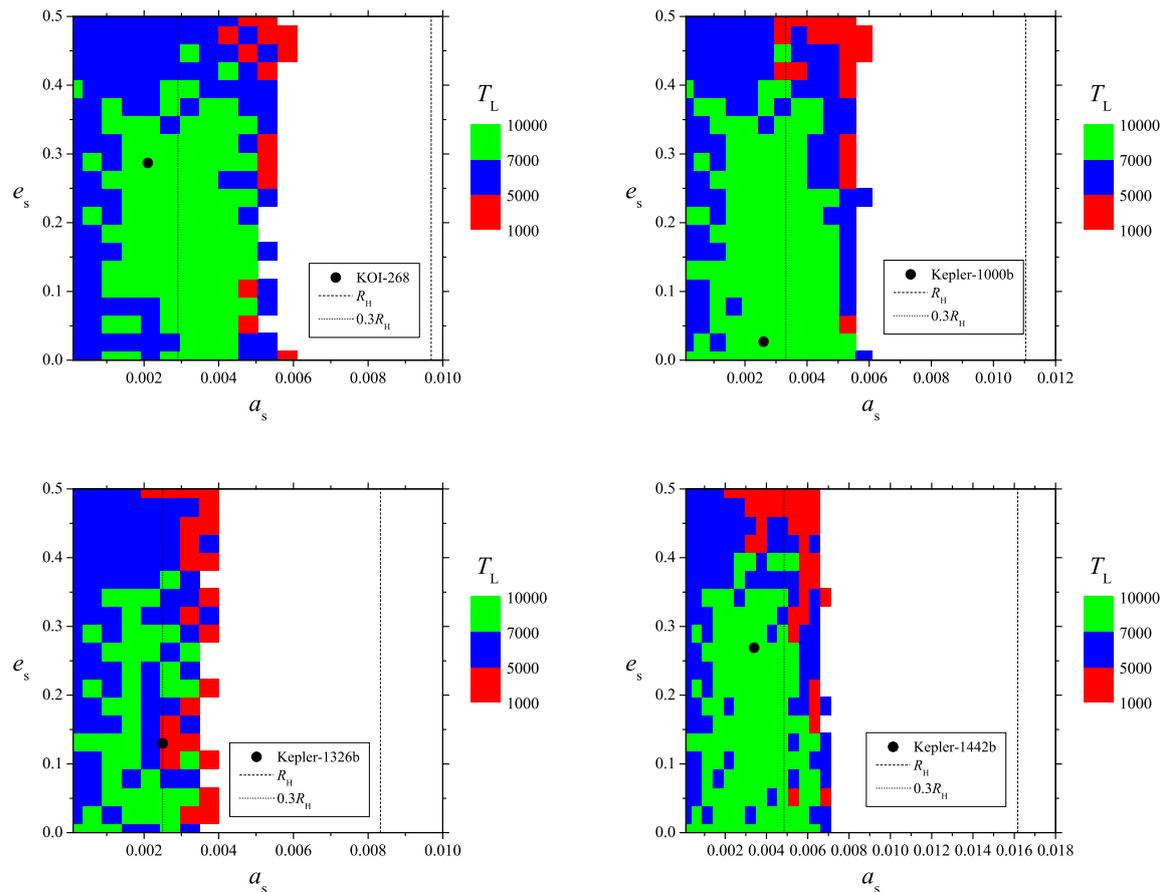


Рис. 1: Примеры диаграмм устойчивости для спутниковых систем экзопланет, построенные посредством вычисления ляпуновского времени системы — T_L (в годах). Белый цвет соответствует неустойчивым спутниковым орбитам. Штриховой вертикальной линией указан радиус сферы Хилла планеты — R_H , вертикальной линией из точек нанесена эмпирическая граница устойчивости — $0.3R_H$ (Holman, Wiegert, 1999). Точками указаны положения экзолун, согласно данным (Fox, Wiegert, 2021).

устойчивые/неустойчивые был получен посредством метода, предложенного в (Melnikov, Shevchenko, 1998). Белый цвет на диаграммах соответствует неустойчивым спутниковым орбитам — спутник с указанными начальными значениями орбитальных параметров либо сталкивается с родительской планетой, либо покидает ее сферу Хилла. Отметим, что в последнем случае, как и в случае орбиты с малой величиной ляпуновского времени спутник может перейти на устойчивую орбиту вокруг звезды, т.е. стать планетой.

Анализ построенных нами диаграмм устойчивости показал, что из восьми указанных в Табл. 1 систем в области устойчивой динамики расположены потенциально существующие спутники у трех планет: KOI-268, Kepler-1000b и Kepler-1442b (см. Рис. 1). Из анализа диаграмм можно оценить размеры областей возможных орбитальных параметров спутников у этих планет: $0.001 \leq a_s \leq 0.005$ а.е., $0 \leq e_s \leq 0.4$. На устойчивость вековой орбитальной динамики потенциальных спутников планет KOI-268b и Kepler-1000b ранее было указано Quarles et al. (2020). Мы подтвердили устойчивость динамики этих спутниковых систем посредством использования математически обоснованного критерия — посредством вычисления ХПЛ. Отметим, что на всех построенных нами диаграммах внешняя граница области устойчивости (области с большими ляпуновскими временами) расположена на расстоянии

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

Планета	M	m_p	a_p , а.е.	e_p	a_s , а.е.	e_s	m_s
Kepler-1625b	1.08	11.6	0.88	0.011	0.0021	0.011	19
Kepler-1708b	1.09	4.6	1.64	0.4	0.05	–	37

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

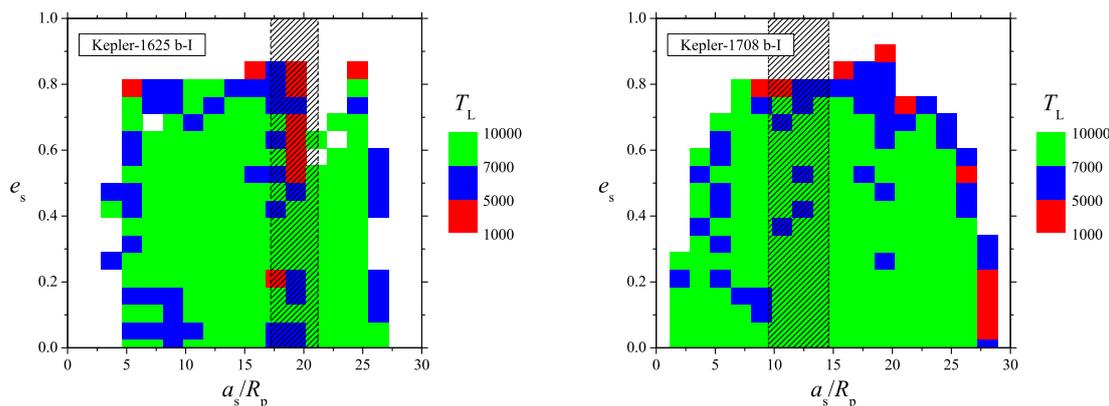


Рис. 2: Диаграммы устойчивости для экзолун у планет Kepler-1625b и Kepler-1708b, построенные посредством вычисления ляпуновского времени системы — T_L (в годах). Белый цвет соответствует неустойчивым спутниковым орбитам. Штриховыми областями отмечены положения экзолун: для Kepler-1625b, согласно Teachey et al. (2018); для Kepler-1708b, согласно Kipping et al. (2022).

около $0.5R_H$; в работе Rosario-Franco et al. (2020) внешняя граница этой области оценивалась в $0.4R_H$.

На Рис. 1 в качестве примера выявленной нами неустойчивой динамики приведена диаграмма устойчивости, построенная для возможного спутника планеты Kepler-1326b. Видно, что спутниковая орбита, с приведенными в Табл. 1 начальными значениями орбитальных параметров, попадает в область с малыми значениями ляпуновских времен ($T_L < 5000$), т.е. является неустойчивой. Отметим, что экзолуна в системе Kepler-1326b расположена возле границы эмпирического критерия устойчивости $a_s \approx 0.3R_H$. Схожий вид имеют диаграммы устойчивости и для четырех оставшихся спутниковых подсистем из Табл. 1, у которых нами был установлен неустойчивый характер вековой орбитальной динамики.

Вековая динамика экзолун планет Kepler-1625b и Kepler-1708b

Как отмечалось выше, анализ наблюдательных данных для планет Kepler-1625b и Kepler-1708b указал на возможное наличие у них спутников (Teachey, Kipping, 2018; Kipping et al., 2022). Мы построили для этих экзолун диаграммы устойчивости (см. Рис. 2) и провели их анализ. Принятые при исследовании устойчивости значения орбитальных параметров планетных систем и существующих в них спутников приведены в Табл. 2.

В случае системы Kepler-1625b, параметры орбиты спутника и его масса определены неоднозначно (Heller, 2018; Teachey et al., 2018; Teachey, Kipping, 2018; Teachey et al., 2020; Heller et al., 2019; Martin et al., 2019; Moraes, Vieira Neto, 2020; Rosario-Franco et al., 2020).

На Рис. 2 нанесено возможное положение спутника (величина a_s/R_p , где R_p — радиус планеты), согласно данным Teachey et al. (2018). Видно, что по этим данным почти половина области возможных значений орбитальных параметров спутника занята начальными данными, соответствующими неустойчивым спутниковым орбитам. Ранее анализ устойчивости орбитальной динамики спутника планеты Kepler-1625b проводился в работах (Rosario-Franco et al., 2020; Moraes et al., 2022). Полученная нами диаграмма устойчивости (Рис. 2) для спутника планеты Kepler-1625b схожа с диаграммой, построенной в работе Rosario-Franco et al. (2020). Как видно из построенной нами диаграммы, спутниковые орбиты с $a_s/R_p > 27$ для планеты Kepler-1625b являются неустойчивыми. Поэтому мы считаем, что предполагаемое Teachey, Kipping (2018) существование у планеты Kepler-1625b спутника с большой полуосью орбиты около $40R_p$ маловероятно. Из Рис. 2 следует, что большая полуось орбиты спутника планеты Kepler-1625b вероятно имеет значения от 5 до 25 радиусов планеты. Согласно построенной нами диаграмме устойчивости для спутника планеты Kepler-1708b, подавляющая часть возможных для него спутниковых орбит является устойчивой, что подтверждает весьма высокую вероятность существования данной экзолуны (см. Kipping et al. (2022)). Отметим, что информация о спутнике планеты Kepler-1708b в настоящее время включена в каталог <http://exoplanet.eu/>.

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, Kepler-1000b и Kepler-1442b. Для этих планет предполагаемые параметры спутниковой подсистемы соответствуют устойчивой орбитальной динамике с ляпуновским временем $T_L > 7000$ лет. Размеры областей возможных орбитальных параметров спутников у этих планет: $0.001 \leq a_s \leq 0.005$ а.е., $0 \leq e_s \leq 0.4$. Детальное исследование устойчивости проведено для двух уже обнаруженных из анализа наблюдений (Teachey, Kipping, 2018; Kipping et al., 2022) экзолун — у планет Kepler-1625b и Kepler-1708b. Установлено, что большая полуось орбиты спутника планеты Kepler-1625b может иметь значения от 5 до 25 радиусов планеты. В случае спутника планеты Kepler-1708b, имеющееся решение (Kipping et al., 2022) соответствует устойчивой спутниковой орбите с $T_L > 7000$ лет.

Полученные в настоящем исследовании результаты позволяют: на основе знания размеров областей возможных значений орбитальных параметров спутника установить возможность идентификации экзолун в планетных системах при помощи современных наблюдательных средств; посредством анализа устойчивости возможных спутниковых орбит уточнить определенные из анализа наблюдательных данных значения орбитальных и физических параметров для обнаруженных кандидатов в экзолуны.

Благодарности

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

- Benettin Giancarlo, Galgani Luigi, Strelcyn Jean-Marie.* Kolmogorov entropy and numerical experiments // *Phys. Rev. A.* 1976. 14, 6. 2338–2345.
- Cassese Ben, Kipping David.* Kepler-1708 b-i is likely undetectable with HST // *MNRAS.* 2022. 516, 3. 3701–3708.
- Fox Chris, Wiegert Paul.* Exomoon candidates from transit timing variations: eight Kepler systems with TTVs explainable by photometrically unseen exomoons // *MNRAS.* 2021. 501, 2. 2378–2393.
- Hairer E., Norsett S.P., Wanner G.* Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems. 1993.
- Heller R.* Exomoon habitability constrained by energy flux and orbital stability // *A&A.* 2012. 545. L8.
- Heller René.* Detecting Extrasolar Moons Akin to Solar System Satellites with an Orbital Sampling Effect // *ApJ.* 2014. 787, 1. 14.
- Heller René.* The nature of the giant exomoon candidate Kepler-1625 b-i // *A&A.* 2018. 610. A39.
- Heller René, Rodenbeck Kai, Bruno Giovanni.* An alternative interpretation of the exomoon candidate signal in the combined Kepler and Hubble data of Kepler-1625 // *A&A.* 2019. 624. A95.
- Heller René, Williams Darren, Kipping David, Limbach Mary Anne, Turner Edwin, Greenberg Richard, Sasaki Takanori, Bolmont Émeline, Grasset Olivier, Lewis Karen, Barnes Rory, Zuluaga Jorge I.* Formation, Habitability, and Detection of Extrasolar Moons // *Astrobiology.* IX 2014. 14, 9. 798–835.
- Holman Matthew J., Wiegert Paul A.* Long-Term Stability of Planets in Binary Systems // *AJ.* 1999. 117, 1. 621–628.
- Kaltenegger L.* Characterizing Habitable Exomoons // *ApJ.* 2010. 712, 2. L125–L130.
- Kaltenegger Lisa.* How to Characterize Habitable Worlds and Signs of Life // *ARA&A.* 2017. 55, 1. 433–485.
- Kipping D. M., Bakos G. Á., Buchhave L., Nesvorný D., Schmitt A.* The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). I. Description of a New Observational project // *ApJ.* 2012. 750, 2. 115.
- Kipping D. M., Forgan D., Hartman J., Nesvorný D., Bakos G. Á., Schmitt A., Buchhave L.* The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). III. The First Search for an Exomoon around a Habitable-zone Planet // *ApJ.* 2013a. 777, 2. 134.
- Kipping D. M., Hartman J., Buchhave L. A., Schmitt A. R., Bakos G. Á., Nesvorný D.* The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK). II. Analysis of Seven Viable Satellite-hosting Planet Candidates // *ApJ.* 2013b. 770, 2. 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 // *ApJ*. 2014. 784, 1. 28.
- Kipping D. M., Schmitt A. R., Huang X., Torres G., Nesvorný D., Buchhave L. A., Hartman J., Bakos G. Á.* The Hunt for Exomoons with Kepler (HEK): V. A Survey of 41 Planetary Candidates for Exomoons // *ApJ*. 2015. 813, 1. 14.
- Kipping David.* An Independent Analysis of the Six Recently Claimed Exomoon Candidates // *ApJ*. 2020. 900, 2. L44.
- Kipping David, Bryson Steve, Burke Chris, Christiansen Jessie, Hardegree-Ullman Kevin, Quarles Billy, Hansen Brad, Szulágyi Judit, Teachey Alex.* An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i // *Nature Astronomy*. 2022. 6. 367–380.
- Kipping David M.* Transit timing effects due to an exomoon // *MNRAS*. 2009. 392, 1. 181–189.
- Lichtenberg A., Lieberman M.* Regular and Chaotic Dynamics. 1992.
- Martin David V., Fabrycky Daniel C., Montet Benjamin T.* Transits of Inclined Exomoons—Hide and Seek and an Application to Kepler-1625 // *ApJ*. 2019. 875, 2. L25.
- Martínez-Rodríguez Héctor, Caballero José Antonio, Cifuentes Carlos, Piro Anthony L., Barnes Rory.* Exomoons in the Habitable Zones of M Dwarfs // *ApJ*. 2019. 887, 2. 261.
- Melnikov A. V.* Numerical Instruments for the Analysis of Secular Dynamics of Exoplanetary Systems // *Solar System Research*. 2018. 52, 5. 417–425.
- Melnikov A. V., Shevchenko I. I.* The Stability of the Rotational Motion of Nonspherical Natural Satellites with Respect to Tilting the Axis of Rotation // *Solar System Research*. 1998. 32. 480.
- Moraes R. A., Borderes-Motta G., Winter O. C., Monteiro J.* On the stability of additional moons orbiting Kepler-1625 b // *MNRAS*. 2022. 510, 2. 2583–2596.
- Moraes R. A., Vieira Neto E.* Exploring formation scenarios for the exomoon candidate Kepler 1625b I // *MNRAS*. 2020. 495, 4. 3763–3776.
- Nicholson P. D., Cuk M., Sheppard S. S., Nesvorny D., Johnson T. V.* Irregular Satellites of the Giant Planets // *The Solar System Beyond Neptune*. 2008. 411.
- Quarles Billy, Li Gongjie, Rosario-Franco Marialis.* Application of Orbital Stability and Tidal Migration Constraints for Exomoon Candidates // *ApJ*. 2020. 902, 1. L20.
- Rosario-Franco Marialis, Quarles Billy, Musielak Zdzislaw E., Cuntz Manfred.* Orbital Stability of Exomoons and Submoons with Applications to Kepler 1625b-I // *AJ*. 2020. 159, 6. 260.
- Shevchenko I. I., Koupryanov V. V.* On the chaotic rotation of planetary satellites: The Lyapunov spectra and the maximum Lyapunov exponents // *A&A*. 2002. 394. 663–674.

- Sucerquia Mario, Alvarado-Montes Jaime A., Bayo Amelia, Cuadra Jorge, Cuello Nicolás, Giuppone Cristian A., Montesinos Matías, Olofsson J., Schwab Christian, Spitler Lee, Zuluaga Jorge I.* Cronomoons: origin, dynamics, and light-curve features of ringed exomoons // MNRAS. 2022. 512, 1. 1032–1044.
- Sucerquia Mario, Alvarado-Montes Jaime A., Zuluaga Jorge I., Cuello Nicolás, Giuppone Cristian.* Ploonets: formation, evolution, and detectability of tidally detached exomoons // MNRAS. 2019. 489, 2. 2313–2322.
- Sucerquia Mario, Ramírez Vanesa, Alvarado-Montes Jaime A., Zuluaga Jorge I.* Can close-in giant exoplanets preserve detectable moons? // MNRAS. 2020. 492, 3. 3499–3508.
- 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 // AJ. 2018. 155, 1. 36.
- Teachey Alex.* The exomoon corridor for multiple moon systems // MNRAS. IX 2021. 506, 2. 2104–2121.
- Teachey Alex, Kipping David, Burke Christopher J., Angus Ruth, Howard Andrew W.* Loose Ends for the Exomoon Candidate Host Kepler-1625b // AJ. 2020. 159, 4. 142.
- Teachey Alex, Kipping David M.* Evidence for a large exomoon orbiting Kepler-1625b // Science Advances. 2018. 4, 10. eaav1784.
- Tjoa J. N. K. Y., Mueller M., van der Tak F. F. S.* The subsurface habitability of small, icy exomoons // A&A. 2020. 636. A50.
- Tokadjian Armen, Piro Anthony L.* Probing Planets with Exomoons: The Cases of Kepler-1708 b and Kepler-1625 b // ApJ. 2022. 929, 1. L2.
- Williams Darren M., Kasting James F., Wade Richard A.* Habitable moons around extrasolar giant planets // Nature. 1997. 385, 6613. 234–236.
- 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.

On the orbital stability of exoplanet satellites

A.V. Melnikov¹

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

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

Abstract

By calculating the Lyapunov characteristic exponents, an analysis was made of the stability of the secular orbital dynamics of satellites for a number of exoplanets in which the presence of an exomoon is possible. The stable character of the secular dynamics has been established possible satellites of the planets KOI-268, Kepler-1000b and Kepler-1442b. Estimates of the possible values of the exomoon orbital parameters are obtained. The dynamics of the satellites of the planets Kepler-1625b and Kepler-1708b already discovered from the analysis of observations is considered in detail. It is established that the semi-major axis of the orbit of the planet's satellite Kepler-1625b probably has values from 5 up to 25 the planet radius. The solution available for the satellite of the planet Kepler-1708b (Kipping et al., 2022) corresponds to a stable satellite orbit.