Орбитальная динамика экзолун в системах Kepler-409 и Kepler-809

© Е.А. Попова, Д.А. Бикулова

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
196140 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: m02pea@gmail.com

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 11 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Исследована динамическая устойчивость экзопланетных систем со спутниками Kepler-409 и Kepler-809. Проведено численное интегрирование траекторий движения экзолун на плоскости начальных данных „перицентрическое расстояние–эксцентриситет“ и построены диаграммы устойчивости. В качестве критерия устойчивости орбиты использован максимальный показатель Ляпунова. Интегрирование проводилось на интервалах $10^2 - 10^3$ лет. Для выбранных систем найдены области, где устойчивые конфигурации возможны.

Ключевые слова: экзолуны, динамическая устойчивость, вычислительные методы.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64039.299-26

На сегодняшней день одной из наиболее актуальных задач астрономии является поиск и исследование спутников экзопланет — экзолун. По данным exoplanet.eu на начало 2026 г. известно более 8000 экзопланет. Исходя из аналогии с Солнечной системой, где планеты-гиганты имеют до нескольких сотен спутников, количество экзолун потенциально может быть огромным. Стоит отметить, что если планета-гигант оказывается в области обитаемости звезды, на ее спутниках также возможны условия, благоприятные для существования жизни. Чрезвычайно важным аспектом исследований экзопланетных систем со спутниками является подробное изучение их долговременной динамической устойчивости. Один из распространенных методов таких исследований — построение диаграмм устойчивости, т.е. определение областей, где возможно устойчивое движение, на представительных множествах значений параметров. Данные об устойчивости орбит экзолун являются важным критерием верификации данных, полученных из наблюдений: если экзолуна на диаграмме устойчивости оказывается в области хаоса, то это указывает на некорректное определение ее орбиты. Кроме того, построение диаграмм устойчивости дает информацию о возможном положении орбит гипотетических, еще не обнаруженных экзолун. Самым очевидным подходом в задаче построения диаграмм устойчивости является прямое интегрирование уравнений движения, записанных в той или иной форме, на больших интервалах времени. Главный недостаток такого подхода — чрезмерно большое время счета.

Один из наиболее эффективных подходов заключается в вычислении показателей Ляпунова. Показатели Ляпунова характеризуют скорости экспоненциального расхождения начально близких траекторий в фазовом пространстве. Положительное значение максимального показателя Ляпунова (МПЛ) указывает на хаотический характер движения, а нулевое значение указывает, что движение регулярно, т.е. является квазипериодическим или периодическим. Величина, обратная МПЛ, называется ляпуновским временем и имеет смысл характерного времени предсказуемости динамики системы.

Для разделения орбит на регулярные и хаотические используется статистический метод, предложенный А.В. Мельниковым и И.И. Шевченко (например, [1–3]) и уже применявшейся нами ранее (например, [4,5]). Метод состоит в следующем. Для хаотических траекторий МПЛ стремится к некоторому значению, отличному от нуля, а для регулярных — стремится к нулю с увеличением времени счета. Рассматривается дифференциальное распределение МПЛ, вычисленных на представительном множестве начальных данных. С увеличением времени счета пик, соответствующий регулярным траекториям, смещается в сторону уменьшения величин МПЛ (или увеличения ляпуновского времени), а пик, соответствующий хаотическим траекториям, остается на месте. Анализ состоит из четырех шагов:

(a) на плоскости начальных данных строим дифференциальные распределения орбит по $\log_{10}(L)$ (логарифму МПЛ), соответствующие двум разным интервалам времени интегрирования;

(b) отождествляем пик, испытывающий сдвиг по оси $\log_{10}(L)$ при увеличении времени интегрирования (он соответствует регулярным траекториям);

(c) по относительному расположению пиков на оси $\log_{10}(L)$ определяем пороговую величину МПЛ для разделения траекторий на хаотические и регулярные;

(d) в дальнейшем, поскольку пороговая величина известна, расчеты по разделению траекторий на регулярные и хаотические можно производить на относительно малых интервалах времени с высоким разрешением сетки начальных данных.

В качестве необходимого дополнительного критерия завершения счета и отнесения траектории к типу неустойчивых мы рассматриваем уход экзолуны за пределы сферы Хилла планеты. Заметим, что такие траектории не обязательно оказываются хаотически-

Таблица 1. Параметры планетных систем и их предполагаемых экзолун

Система	M^* ($M_\odot$)	m_p ($M_\oplus$)	a_p (AU)	a_s (AU)	e_s	m_s ($M_\oplus$)
Кеплер-409	0.90	1.0	1.317	0.0029	0.024	0.300
Кеплер-809	1.05	11.0	0.307	0.0019	0.113	2.931

Примечание: M^* — масса центральной звезды в массах Солнца, m_p, m_s — массы планеты и экзолуны в массах Земли, a_p, a_s — большие полуоси планеты и экзолуны в астрономических единицах, e_s — эксцентриситет орбиты экзолуны.

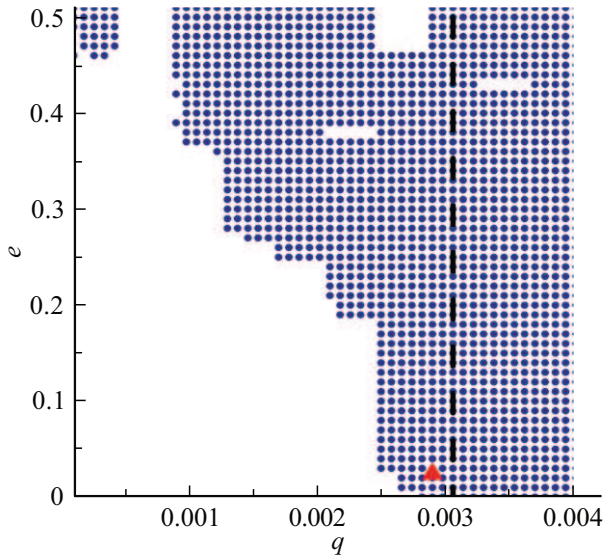


Рис. 1. Диаграмма устойчивости для системы Кеплер-409. Темным фоном отмечены области неустойчивых орбит. Номинальное положение экзолуны отмечено треугольником. Штриховой линией показано положение радиуса сферы Хилла планеты.

ми буквально, поскольку экзолуна может выходить на устойчивую траекторию относительно центральной звезды. В качестве критерия столкновения спутника и планеты мы рассматриваем сближение на расстояние менее радиуса сферы Роша последней.

В настоящей работе мы исследуем динамическую устойчивость экзопланетных систем с потенциально возможными спутниками Кеплер-409 и Кеплер-809. Параметры систем выбраны, согласно [6], и представлены в таблице. Мы рассматриваем только прямые орбиты спутников, т.е. такие, при которых направления орбитального движения планеты и спутника совпадают. В начальный момент времени спутник располагается в перицентре своей орбиты. Так как угловые параметры орбит планеты и экзолуны неизвестны, мы полагаем их равными нулю. Интегрирование проводится на интервалах $10^2 - 10^3$ лет (что составляет более чем $6 \cdot 102/1.25 \cdot 104$ и $6 \cdot 103/7.6 \cdot 104$ номинальных периодов экзопланеты/экзолуны в системах Кеплер-409 и Кеплер-809 соответственно). Поскольку для разделения орбит на регулярные и хаотические по максимальному показателю Ляпунова мы используем статистический метод, таких временных интервалов оказывается достаточно для уверенного построения диаграмм устойчивости.

На рис. 1, 2 представлены полученные диаграммы устойчивости для систем Кеплер-409 и Кеплер-809 соответственно. Темный цвет на диаграммах соответствует неустойчивым орбитальным параметрам предполагаемой экзолуны, треугольником отмечено ее номинальное положение по оценкам, представленным в работе [6].

Как видно из диаграмм, обе предполагаемые экзолуны находятся в областях неустойчивости, однако, учитывая погрешности наблюдений, в действительности могут находиться и на регулярных орбитах. В случае системы Кеплер-409 спутник расположен вблизи максимально допустимой границы — в непосредственной близости к радиусу сферы Хилла своей планеты (на диаграмме отмечен штриховой линией). Тем не менее, как можно видеть, устойчивые конфигурации на малых эксцентриситетах возможны для больших полуосей ~ 0.0025 AU, что сравнительно близко к оценочному номинальному значению. В случае системы Кеплер-809 экзолуна,

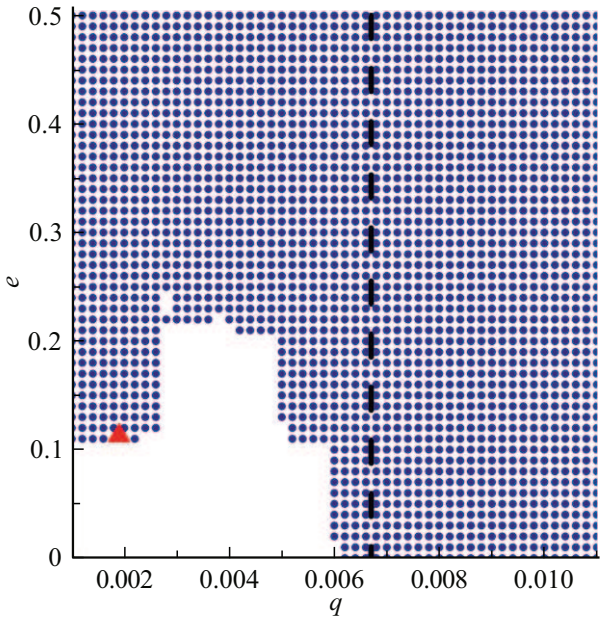


Рис. 2. Диаграмма устойчивости для системы Кеплер-809. Темным фоном отмечены области неустойчивых орбит. Номинальное положение экзолуны отмечено треугольником. Штриховой линией показано положение радиуса сферы Хилла планеты.

напротив, оказывается слишком близко к планете. На диаграмме устойчивости видно, что устойчивые конфигурации требуют несколько меньшего эксцентриситета или несколько большей полуоси орбиты спутника. В работе Мельникова [7] в качестве иллюстрации неустойчивой конфигурации представлена диаграмма устойчивости для системы с экзолуной Kepler-1326, где спутник, аналогично системе Кеплер-409, оказывается слишком близко к радиусу сферы Хилла планеты. Таким образом, построение диаграмм устойчивости позволяет не только верифицировать оценки параметров систем с экзолунами, но и определять области допустимых значений параметров их орбит.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] А.В. Мельников, И.И. Шевченко. Астрон. вестник, **32**, 548 (1998). [A.V. Mel'nikov, I.I. Shevchenko. Sol. Sys. Res., **32**, 480 (1998).]
[2] I.I. Shevchenko. *Asteroids, Comets, Meteors*, ed. B. Warmbein (ESA, Berlin, 2002), p. 367.
[3] И.И. Шевченко, А.В. Мельников. Письма в ЖЭТФ, **77**, 772 (2003). [I.I. Shevchenko, A.V. Mel'nikov. JETP Lett., **77**, 642 (2003).]
[4] E.A. Popova, I.I. Shevchenko. Astrophys. J., **769**, 152 (2013). DOI: 10.1088/0004-637X/769/2/15
[5] Е.А. Попова, И.И. Шевченко. Письма в астрон. журн., **42**, 4 (2016). [E.A. Popova, I.I. Shevchenko. Astronomy Lett., **42**, 260 (2016). DOI: 10.1134/S106377371604006X]
[6] C. Fox, P. Wiegert. MNRAS, **501**, 2 (2021). DOI: 10.1093/mnras/staa3743
[7] А.В. Мельников. Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове, **227**, 113 (2022). DOI: 10.31725/0367-7966-2022-227-8