

ЦИРКУМБИНАРНЫЕ ПЛАНЕТНЫЕ СИСТЕМЫ В СОЛНЕЧНОЙ ОКРЕСТНОСТИ: УСТОЙЧИВОСТЬ И ОБИТАЕМОСТЬ

© 2019 г. И. И. Шевченко^{1*}, А. В. Мельников¹,
Е. А. Попова¹, В. В. Бобылев¹, Г. М. Карелин¹

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

Поступила в редакцию 20.02.2019 г.; после доработки 07.05.2019 г.; принята к публикации 28.05.2019 г.

Для тесных двойных звезд в Солнечной окрестности, имеющих достаточные каталожные данные, вычислены радиусы внутренней и внешней границ циркумбинарной зоны потенциальной обитаемости (ЦЗО) и радиусы циркумбинарной зоны динамического хаоса (ЦЗХ). Впервые выделен подкласс двойных, для которых граница ЦЗХ находится внутри границ ЦЗО (радиус ЦЗХ больше чем внутренний радиус ЦЗО, но меньше чем внешний радиус ЦЗО): M4-V69, HATS551-027, EZ Aqr A–C, 38 Cas, HD 2070, HD 15064, HD 28394, HD 160346 и HD 181602. Поскольку на границе ЦЗХ, согласно современным теоретическим представлениям и наблюдательным данным, высока вероятность нахождения планет, в планетных системах выявленных указанным образом двойных звезд можно ожидать присутствия потенциально обитаемых циркумбинарных планет. Для звезд CM Drg, WTS 19c-3-01405 и LP 661-13 радиус ЦЗХ меньше радиуса внутренней границы ЦЗО, однако у них возможно наличие планет на внешних устойчивых орбитах, резонансных с орбитами планет у границы ЦЗХ. Все впервые выявленные двойные указанных типов представляют поэтому существенный интерес для будущих наблюдений.

Ключевые слова: двойные звезды, Солнечная окрестность, циркумбинарные планеты, обитаемость, динамический хаос.

DOI: 10.1134/S0320010819080096

ВВЕДЕНИЕ

Поиск и исследования планет в системах двойных звезд весьма актуальны хотя бы потому, что более 60% всех звезд Солнечного типа в Галактике входят в двойные системы (Дюкеннуа, Мейор, 1991). Несомненно, особый исследовательский интерес представляют двойные звезды, у которых могут иметься потенциально обитаемые планеты, при этом орбитальная динамика последних является долговременно устойчивой.

Планетные системы двойных звезд подразделяются на два класса: системы S-типа (“satellite-type”), в которых планеты обращаются на орбитах вокруг одиночных звезд — компонентов двойной (циркумзвездные системы), и системы P-типа (“planet-type”), в которых планеты обращаются на орбитах вокруг центральной двойной (циркумбинарные системы). (Данные обозначения введены в работе Дворака (1984).) В каталоге Шварца и др. (2011, 2016) (<http://www.univie.ac.at/adg/schwarz/multiple.html>) содержится информация о 95 известных планетных

системах двойных звезд, среди них 73 являются системами S-типа, а 22 — P-типа.

К настоящему времени разработаны два интерактивных интернет-ресурса, позволяющие оценивать размеры зон устойчивости и обитаемости кратных звезд. Кунтц (2014, 2015) и Кунтц и Брунц (2015) предложили теоретические алгоритмы и разработали систему BinHab (<http://physbinhab.uta.edu>) для вычисления зон обитаемости планетных систем P-типа и S-типа. Первоначально (Кунтц, 2014) ресурс был ограничен случаем круговой орбиты двойной звезды, позднее было представлено (Кунтц, 2015) обобщение на случай эллиптической орбиты. Задав в BinHab орбитальные и физические параметры звездной системы, можно вычислить расположение границ зон обитаемости на основе модели Коппарату и др. (2013, 2014) и границ зон устойчивости на основе эмпирических формул Хольмана и Вигерта (1999).

Мюллер и Хагигипур (2014) представили интерактивную систему (<http://astro.twam.info/hz>) для вычисления границ зон обитаемости и устойчивости как для двойных звездных систем, так и для

*Электронный адрес: iis@gaoran.ru

звездных систем кратности больше двух. Границы зон обитаемости определяются в рамках моделей Кастинга и др. (1993), Селсиса и др. (2007) и Коппарату и др. (2013, 2014). Границы зон устойчивости определяются на основе критериев Хольмана и Вигерта (1999), как и в системе Кунтца и Брунца (2015). Система Мюллера и Хагипура (2014) позволяет представить в удобном графическом виде конфигурацию зон обитаемости и устойчивости двойной звезды.

Джайме и др. (2012) составили и проанализировали выборку двойных звезд (161 объект) в ближайшей (радиусом менее 100 пк) окрестности Солнца. В рамках теории Пичардо и др. (2005, 2009) для этих звездных систем были получены границы областей устойчивости для вероятных планетных систем S- и P-типа. Позднее Джайме и др. (2014) получили оценки размеров зон обитаемости и устойчивости для 64 двойных звезд. Критерием отбора служили принадлежность звезд к главной последовательности и наличие хорошо определенных физических и орбитальных параметров. Границы зон устойчивости в работе Джайме и др. (2014) получены в рамках теории Пичардо и др. (2005, 2009), а зон обитаемости — на основе модели Коппарату и др. (2013).

В работе Поповой и Шевченко (2016), исходя из современных представлений о динамике и архитектуре циркумбинарных планетных систем, наиболее вероятные циркумбинарные планетные орбиты определены как расположенные внутри главных резонансных ячеек на границе области динамического хаоса вокруг родительской двойной звезды, что позволяет предсказать значения больших полуосей орбит. Согласно Поповой и Шевченко (2016), в случае EZ Aqr (одной из ближайших к Солнцу тесных двойных звезд) наиболее вероятная орбита циркумбинарной планеты находится вблизи зоны обитаемости и, с учетом неопределенности границы этой зоны, может ей принадлежать.

Целью настоящей работы является выявление таких двойных звезд в Солнечной окрестности, у которых граница циркумбинарной зоны динамического хаоса (ЦЗХ) находится внутри границ циркумбинарной зоны потенциальной обитаемости (ЦЗО), то есть радиус ЦЗХ больше чем внутренний радиус ЦЗО, но меньше чем внешний радиус ЦЗО. Согласно современным теоретическим представлениям и наблюдательным данным, на границе ЦЗХ высока вероятность нахождения планет, поскольку миграция планет должна останавливаться на границе центральной области хаоса (Пиренс, Нельсон, 2007; Мескиари, 2012; Пардекопер и др., 2012); эта граница может служить также и “ловушкой” для накопления протопланетного материала (Массе и др., 2006; Мескиари, 2014) (см. обзор

и ссылки в статье Шевченко, 2017.) Более того, циркумбинарные скальные планеты двойных звезд определенных классов являются фотоприливными аналогами Земли в системе Солнце—Земля—Луна (имеют схожие с земными амплитудно-временные параметры инсоляции и приливов) и, в общем случае, обладают рядом свойств, благоприятных для потенциальной обитаемости (Шевченко, 2017, 2018). Таким образом, в планетных системах двойных звезд указанного типа можно ожидать присутствия потенциально обитаемых циркумбинарных планет. Выявленные двойные представляют поэтому существенный интерес для будущих наблюдений.

Среди наблюдательных проектов, которые в будущем могут дать материал о подобных системах, следует выделить миссию TESS. Цель миссии TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite, <https://www.nasa.gov/tess>), представляющей собой космический телескоп, успешно запущенный на орбиту 18 апреля 2018 г., состоит в поиске посредством применения транзитного метода планет у ближайших (ближе 200 пк) ярких звезд. Важным отличием TESS от предшествовавшей ей миссии Kepler является то, что поиск планет проводится путем обзора всей небесной сферы, а не определенного ее сектора. Особое внимание миссии TESS уделяется поиску планет у звезд спектральных классов G, K и M. Предполагается, что будут обнаружены около 20 тысяч экзопланет, и среди них будет несколько десятков планет, имеющих массы менее чем две земные и находящихся в зоне обитаемости родительской звезды (Барклай и др., 2018). С TESS планируется открыть в ~10 раз больше циркумбинарных планет, чем было открыто в рамках миссии Kepler; см. Костов (2018).

МЕТОДИКА И ВЫБОРКА

Циркумбинарная зона динамического хаоса (ЦЗХ) формируется вокруг гравитирующей двойной из-за перекрытия орбитальных резонансов вида $(p + 1)/1$ (где $p \geq 1$ — целые числа) между циркумбинарной “частицей” и центральной двойной, аккумулирующих при $p \rightarrow \infty$ к параболической сепаратрисе — границе между связанным эллиптическим и несвязанным гиперболическим движением. (Вблизи этой границы резонансы $(p + 1)/1$ скапливаются и при определенном значении p начинают перекрываться, так как их ширина по энергии убывает не так быстро, как расстояние между ними; см. Шевченко, 2015.) ЦЗХ формируется при $\mu = m_2/(m_1 + m_2) \gtrsim 0.05$, где $m_1 > m_2$ — массы компонент двойной (Шевченко, 2015). Радиальный размер ЦЗХ есть критическая величина большой полуоси планеты a_{cr} ,

соответствующая переходу от хаотической динамики к регулярной (при увеличении начального значения большой полуоси a). Далее мы определяем эту величину посредством численно-экспериментального соотношения, полученного Хольманом и Вигертом (1999) для орбит в циркумбинарных системах:

$$\frac{a_{CZ}}{a} = 1.60 + 5.10e - 2.22e^2 + 4.12\mu - 4.27e\mu - 5.09\mu^2 + 4.61e^2\mu^2, \quad (1)$$

где a и e — большая полуось и эксцентриситет двойной системы. Начальный эксцентриситет орбиты планеты полагается равным нулю.

Для вычисления внутреннего и внешнего радиусов ЦЗО мы используем формулы модели Коппарату и др. (2013), адаптированные для случая циркумбинарной иерархической планетной системы (Эггль, 2018):

$$a_{HZ} = \left(\frac{L_1}{S_{\text{эфф},1}} + \frac{L_2}{S_{\text{эфф},2}} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где

$$S_{\text{эфф},i} = S_{\text{эфф}}^{\odot} + aT_{\star,i} + bT_{\star,i}^2 + cT_{\star,i}^3 + dT_{\star,i}^4 \quad (3)$$

$$(i = 1, 2),$$

$T_{\star,i} = T_{\text{эфф},i} - 5780$ К; $T_{\text{эфф},i}$ — эффективная температура i -го компонента двойной, а L_i — его светимость. Все расстояния здесь полагаются заданными в а.е., светимости — в солнечных единицах. Значения констант $S_{\text{эфф}}^{\odot}$, a , b , c , d даны в статье Коппарату и др. (2013). Для внутренней и внешней границ ЦЗО значения констант различны. В случае, когда светимости L_1 и/или L_2 неизвестны, их значения оцениваются нами посредством эмпирического соотношения масса—светимость, приведенного в Экер и др. (2015); Кунтц, Ванг (2018).

Для предварительного грубого отбора потенциально интересных объектов нами использован критерий попадания объектов в *окно потенциальной обитаемости* (рис. 1). На рис. 1 показаны нижний (красная кривая) и верхний (синяя кривая) пределы “окна обитаемости” для значений периодов двойной звезды в зависимости от массы m_1 главного компонента двойной. У двойных, попадающих внутрь полосы, ограниченной красной и синей линиями, граница ЦЗХ находится внутри ЦЗО. Границы полосы, в которой обеспечивается попадание границы ЦЗХ внутрь ЦЗО, найдены численно с помощью формул (1) и (2). Синяя и красная кривые представляют собой гладкую (полиномиальную) аппроксимацию дискретных численных данных, показанных точками.

На верхней панели представлен случай двойных звезд-близнецов ($\mu = 1/2$), а на нижней — случай

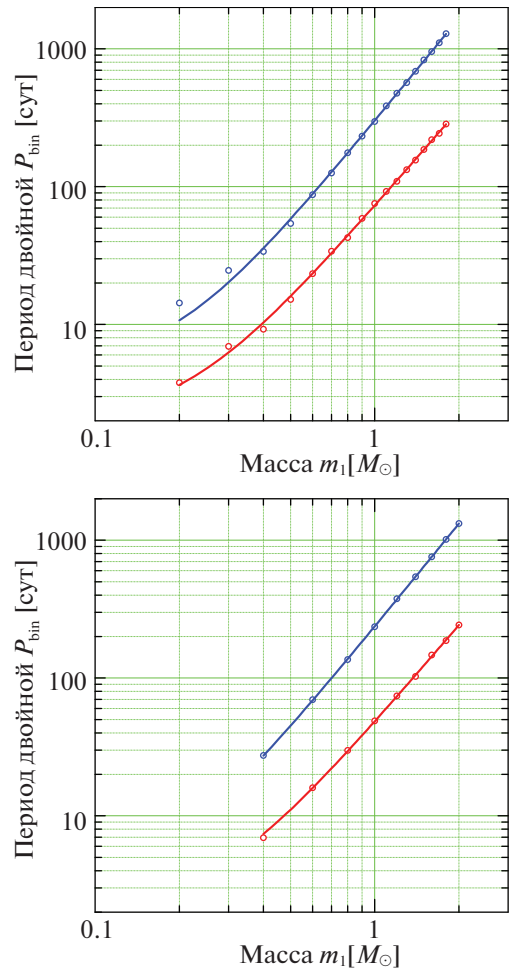


Рис. 1. Окно потенциальной обитаемости: верхний (синяя кривая) и нижний (красная кривая) пределы “окна обитаемости” для значений периодов двойной звезды, в зависимости от массы главного компонента двойной. Внутри полосы, ограниченной синей и красной линиями, обеспечивается попадание границы ЦЗХ внутрь ЦЗО. Верхняя панель: случай двойных близнецов ($\mu = 1/2$). Нижняя панель: случай двойных, чьи компоненты отличаются по массе в два раза ($\mu = 1/3$).

двойных, чьи компоненты отличаются по массе в два раза ($\mu = 1/3$). Предварительно разделив двойные звезды в анализируемой выборке на двойные с компонентами примерно равных масс и на двойные с компонентами сильно неравных масс, можно легко установить, попадают ли они в “окно обитаемости,” и таким образом предварительно отождествить потенциально интересные объекты. Затем уже попадание границы ЦЗХ внутрь ЦЗО верифицируется с помощью приведенных выше соотношений.

При отборе потенциально интересных, с нашей точки зрения, двойных мы опираемся на расширенную базу данных о спектрально-двойных системах, построенную Экером и др. (2014). Ис-

Таблица 1. Системы с потенциально обитаемыми циркумбинарными планетами: орбитальные и физические параметры

Система	HIP	V m	d пк	a а.е.	e	P_{bin} сут	μ	m_1 M_{\odot}	m_2 M_{\odot}	Ист.	L_1 L_{Sun}	L_2 L_{Sun}	T_1 К	T_2 К
M4-V69	—	15.54	1850.0	0.296	0.384	48.19	0.487	0.766	0.728	[1]	0.92062	0.71426	6084	5915
CM Dra	—	10.56	14.8	0.017	0.005	1.27	0.481	0.231	0.214	[1]	0.00550	0.00485	3130	3120
WTS 19c-3-01405	—	17.47	645.0	0.052	0.006	4.94	0.478	0.410	0.376	[1]	0.01702	0.01651	3309	3305
HATS551-027	—	12.74	39.2	0.040	0.000	4.08	0.423	0.244	0.179	[2]	0.00632	0.00340	3190	2990
EZ Aqr AC	—	9.41	3.4	0.029	0.000	3.79	0.440	0.122	0.096	[3]	0.00111	0.00046	2800	2500
LP 661-13	—	11.38	24.9	0.044	0.000	4.70	0.386	0.308	0.194	[4]	0.00978	0.00391	3200	3100
38 Cas	7078	6.05	28.6	0.640	0.310	135.32	0.366	1.210	0.700	[5]	2.27733	0.17331	6303	4287
HD 2070	1955	6.91	35.7	0.540	0.330	114.23	0.298	1.130	0.480	[5]	1.69377	0.02790	6045	3246
HD 15064	11231	6.85	28.6	0.640	0.290	143.85	0.402	1.010	0.680	[5]	1.02242	0.15062	5619	4196
HD 28394	20935	6.65	43.5	0.990	0.240	240.40	0.496	1.130	1.110	[5]	1.69377	1.56779	6045	5980
HD 160346	86400	6.67	11.1	0.390	0.230	84.44	0.351	0.720	0.390	[5]	0.19863	0.01021	4377	2785
HD 181602	95028	7.76	83.3	0.850	0.370	207.66	0.263	1.400	0.500	[5]	4.28128	0.03400	6888	3345
HIP 95110	95110	—	—	0.380	0.000	78.24	0.342	0.790	0.410	[6]	0.31126	0.01301	4687	2889
HIP 109951	109951	—	—	0.483	0.000	111.00	0.189	0.990	0.230	[6]	0.92806	0.00607	5536	3206

Примечание. Источники данных (столбец “Ист.”): [1] — Экер и др. (2014), [2] — Жу и др. (2015), [3] — Дельфосс и др. (1999), [4] — Диттманн и др. (2017), [5] — Джайме и др. (2014), [6] — Токовинин (2018).

ходя из оценок фотометрического расстояния, мы отобрали звезды, расположенные не далее 600 пк от Солнца, согласно этой базе данных. Кроме того, мы провели отождествление с каталогом Gaia DR1 (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr1>). Данный каталог построен из комбинации данных первого года наблюдений космического телескопа Gaia с положениями звезд Tycho-2; он обозначается TGAS (Tycho–Gaia Astrometric Solution; Браун и др., 2016; Линдегрэн и др., 2016) и содержит тригонометрические параллаксы и собственные движения около 2 млн звезд.

Исходя из имеющихся в литературе данных о выборочных наблюдениях двойных звезд, в нашу выборку дополнительно включены пять потенциально интересных двойных, чьи компоненты имеют массы $\leq 0.5 M_{\odot}$: HATS551-027A (Жу и др., 2015), WTS 19b-2-01387, 19c-3-01405, 19e-3-08413 (Биркби и др., 2012) и LP 661-13 (Диттманн и др., 2017). Ряд двойных взят из работы Джайме (2014).

Выбор перечисленных источников мотивирован тем, что они содержат все необходимые для наших

вычислений параметры звезд. Суммарная выборка включает в итоге 274 двойные звезды. Вычисления проведены для всех 274 звезд. Результаты расчетов представлены только для тех из них, которые удовлетворяют предложенному нами критерию отбора, поскольку иначе объем статьи был бы слишком велик; кроме того, в рамках поставленной нами задачи результаты для остальных звезд представляют лишь ограниченный интерес.

Данные об отобранных системах даны в табл. 1. В ней приведены: названия системы (в том числе по классификации HIP, если они есть), V — наблюдаемая звездная величина, d — расстояние от Солнца в пк, a — большая полуось орбиты двойной в а.е., e — ее эксцентриситет, P_{bin} — орбитальный период в сутках, m_1 , m_2 — массы звезд в солнечных единицах M_{\odot} , $\mu = m_2/(m_1 + m_2)$, L_1 , L_2 — светимости звезд в солнечных единицах L_{\odot} , T_1 , T_2 — эффективные температуры звезд. Для каждой системы дана ссылка на источник данных. Хотя в целом мы отбирали звезды, расположенные не далее 600 пк от Солнца, в табл. 1 включены также две звезды, расположенные на большем

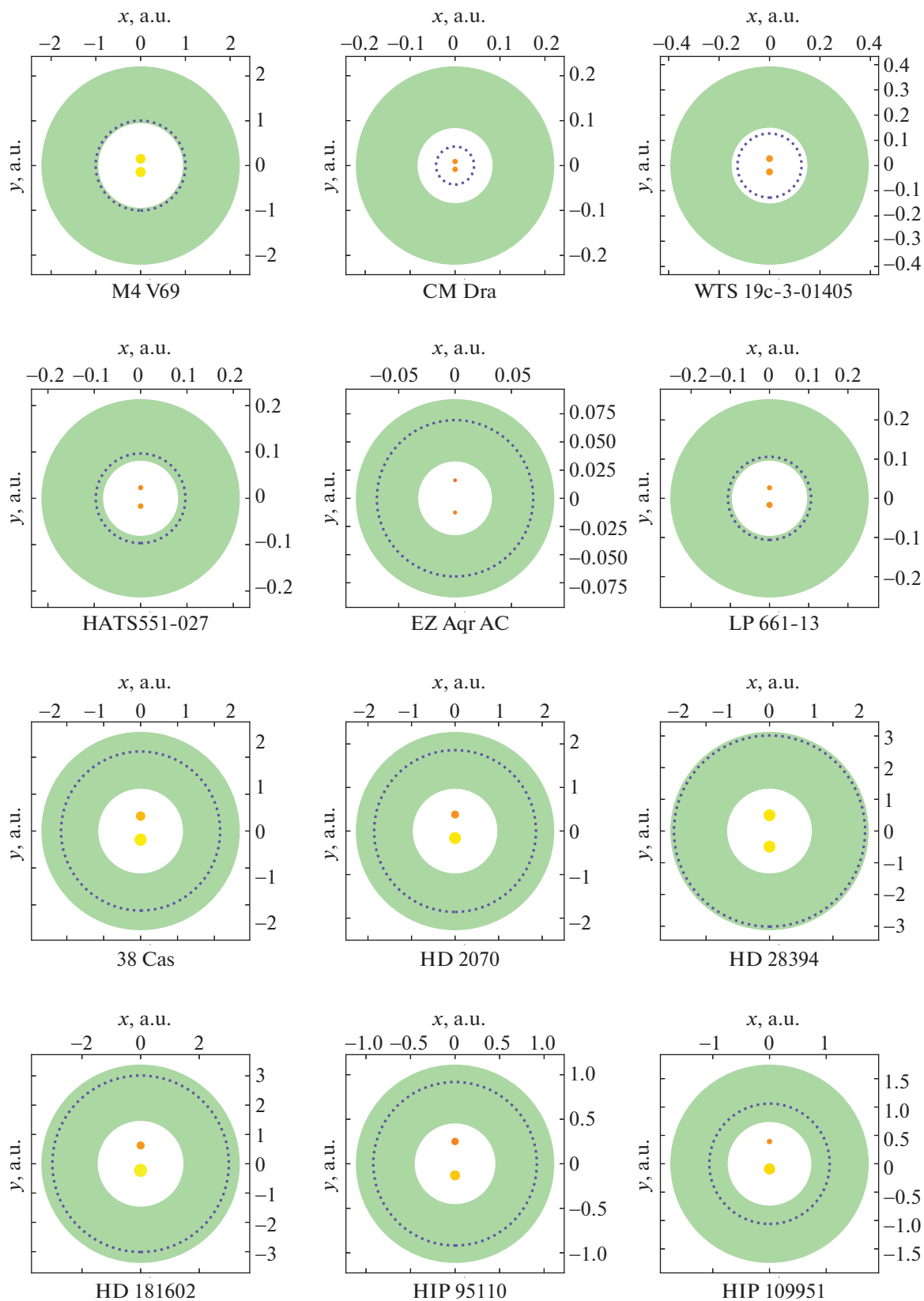


Рис. 2. ЦЗХ и ЦЗО двойных звездных систем из табл. 1 и 2. Граница ЦЗХ нанесена синей штриховой линией, ЦЗО выделена зеленым цветом. В каждом случае двойная звезда и ее ЦЗХ и ЦЗО показаны в едином масштабе.

Таблица 2. Системы с потенциально обитаемыми циркумбинарными планетами: границы ЦЗО и ЦЗХ

Система	HIP	a_{CZ} a.e.	$a_{HZ,in}$ a.e.	$a_{HZ,ext}$ a.e.
M4-V69	—	1.005	0.946	2.217
CM Dra	—	0.042	0.084	0.221
WTS 19c-3-01405	—	0.127	0.150	0.393
HATS551-027	—	0.097	0.081	0.214
EZ Aqr AC	—	0.069	0.033	0.088
LP 661-13	—	0.106	0.096	0.253
38 Cas	7078	2.156	1.147	2.688
HD 2070	1955	1.858	0.971	2.278
HD 15064	11231	2.106	0.828	1.976
HD 28394	20935	3.015	1.336	3.130
HD 160346	86400	1.232	0.367	0.917
HD 181602	95028	3.011	1.463	3.385
HIP 95110	95110	0.918	0.453	1.114
HIP 109951	109951	1.061	0.736	1.748

расстоянии, поскольку они представляют интерес для сопоставления с другими звездами из списка.

В табл. 2 приведены результаты расчетов границ зон устойчивости и обитаемости. На рис. 2 зоны устойчивости и обитаемости для идентифицированных систем представлены графически.

Согласно табл. 2 и рис. 2, для двойных звезд M4-V69, HATS551-027, EZ Aqr A-C, 38 Cas, HD 2070, HD 15064, HD 28394, HD 160346 и HD 181602 граница ЦЗХ находится внутри границ ЦЗО (радиус ЦЗХ больше, чем внутренний радиус ЦЗО, но меньше, чем внешний радиус ЦЗО). Для системы EZ Aqr A-C данный факт был ранее установлен в работе Поповой и Шевченко (2016). Для систем CM Dra, WTS 19c-3-01405 и LP 661-13 радиус ЦЗХ несколько меньше радиуса внутренней границы ЦЗО.

В случае системы HD 28394 внешний радиус ЦЗО лишь ненамного больше радиуса границы ЦЗХ. Однако эта система, на наш взгляд, все же потенциально интересна, поскольку определяемые границы ЦЗО в сильной степени модельно-зависимы. Например, в модели Селсиса и др. (2007) внешний радиус ЦЗО для этой системы больше, чем в использовавшейся здесь модели Коппарату и др. (2013).

Отметим, что первые четыре системы в табл. 1, 2 и на рис. 1 являются затменными двойными, остальные — либо спектрально-двойными, либо визуально-двойными. Соответственно, первые четыре системы являются перспективными для наблюдений методом транзитов; остальные — для наблюдений другими методами, если выяснится, что их ориентация не позволяет использовать транзитный метод.

ВЫВОДЫ

Таким образом, для тесных двойных звезд в Солнечной окрестности, имеющих достаточные каталожные данные, нами вычислены радиусы внутренней и внешней границ циркумбинарной зоны потенциальной обитаемости (ЦЗО) и радиусы циркумбинарной зоны динамического хаоса (ЦЗХ). Нами установлено, что для двойных звезд M4-V69, HATS551-027, EZ Aqr A-C, 38 Cas, HD 2070, HD 15064, HD 28394, HD 160346 и HD 181602 граница ЦЗХ находится внутри границ ЦЗО (радиус ЦЗХ больше, чем внутренний радиус ЦЗО, но меньше, чем внешний радиус ЦЗО).

Для систем CM Dra, WTS 19c-3-01405 и LP 661-13 радиус ЦЗХ несколько меньше радиуса внутренней границы ЦЗО; однако данные системы все же представляют интерес, так как они могут обладать планетами на внешних устойчивых орбитах, резонансных с орбитами планет у границы ЦЗХ (в том числе так называемыми *twotino tatooinies*, см. Шевченко, 2017).

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания. Работа И.И. Шевченко и А.В. Мельникова частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 17-02-00028) и в рамках Программы фундаментальных исследований РАН КП19-270 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований”. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барклай и др. (T. Barclay, J. Pepper, and E.V. Quintana), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **239**, 2 (2018).
2. Биркби и др. (J. Birkby, B. Nefs, S. Hodgkin, et al.), *MNRAS* **426**, 1507 (2012).
3. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. de Bruijne, F. Mignard, R. Drimmel, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 2 (2016).
4. Дворак (R. Dvorak), *Celest. Mech.* **34**, 369 (1984).
5. Дельфосс и др. (X. Delfosse, T. Forveille, S. Udry, et al.), *Astron. Astrophys.* **350**, 39 (1999).
6. Джайме и др. (L.G. Jaime, B. Pichardo, and L. Aguilar), *MNRAS* **427**, 2723 (2012).

7. Джайме и др. (L.G. Jaime, L. Aguilar, and V. Pichardo), *MNRAS* **443**, 260 (2014).
8. Диттманн и др. (J.A. Dittmann, J.M. Irwin, D. Carbonneau, et al.), *Astrophys. J.* **836**, 124 (2017).
9. Дюкеннуа, Мейор (A. Duquennoy and M. Mayor), *Astron. Astrophys.* **248**, 485 (1991).
10. Жу и др. (G. Zhou, D. Bayliss, J.D. Hartman, et al.), *MNRAS* **451**, 2263 (2015).
11. Кастинг и др. (J.F. Kasting, D.P. Whitmire, and R.T. Reynolds), *Icarus* **101**, 108 (1993).
12. Коппарату и др. (R.K. Kopparapu, R. Ramirez, J.F. Kasting, et al.), *Astrophys. J.* **765**, 131 (2013).
13. Коппарату и др. (R.K. Kopparapu, R. Ramirez, J. SchottelKotte, et al.), *Astrophys. J. Lett.* **787**, L29 (2014).
14. Костов (V. Kostov) "Discovering Circumbinary Planets with TESS." 30th IAU GA, Vienna (2018), abstracts: <https://astronomy2018.univie.ac.at/division-days/ddf/>
15. Кунтц (M. Cuntz), *Astrophys. J.* **780**, A14 (2014).
16. Кунтц (M. Cuntz), *Astrophys. J.* **798**, 101 (2015).
17. Кунтц, Брунц (M. Cuntz and R. Bruntz), *Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun: 18th Cambridge Workshop* (Ed. G. van Belle & H. Harris, Flagstaff: Proc. Lowell Observatory, 2014), p. 845.
18. Кунц, Ванг (M. Cuntz and Z. Wang), *Res. Not. Amer. Astron. Soc.* **2**, 19 (2018).
19. Линдегрэн и др. (L. Lindgren, U. Lammers, U. Bastian, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 4 (2016).
20. Массе и др. (F.S. Masset, A. Morbidelli, A. Crida, and J. Ferreira), *Astrophys. J.* **642**, 478 (2006).
21. Мескиари (S. Meschiari), *Astrophys. J.* **752**, 71 (2012).
22. Мескиари (S. Meschiari), *Astrophys. J.* **790**, 41 (2014).
23. Мюллер, Хагигипур (T.W.A. Müller and N. Haghighipour), *Astrophys. J.* **782**, 26 (2014).
24. Пардекопер и др. (S.-J. Paardekooper, Z.M. Leinhardt, T. Thébault, and C. Baruteau), *Astrophys. J.* **754**, L16 (2012).
25. Пиренс, Нельсон (A. Pierens and R. P. Nelson), *Astron. Astrophys.* **472**, 993 (2007).
26. Пичардо и др. (B. Pichardo, L.S. Sparke, and L.A. Aguilar), *MNRAS* **359**, 521 (2005).
27. Пичардо и др. (B. Pichardo, L.S. Sparke, and L.A. Aguilar), *MNRAS* **391**, 815 (2008).
28. Попова Е.А., Шевченко И.И., Письма в Астрон. журн. **42**, 294 (2016). [E.A. Popova and I.I. Shevchenko, *Astron. Lett.* **42**, 260 (2016)].
29. Селсис и др. (F. Selsis, J.F. Kasting, B. Levrard, et al.), *Astron. Astrophys.* **476**, 1373 (2007).
30. Токовинин (A. Tokovinin), *Astrophys. J.* **156**, 2 (2018).
31. Хольман, Вигерт (M.J. Holman and P.A. Wiegert), *Astron. J.* **117**, 621 (1999).
32. Шварц и др. (R. Schwarz, N. Haghighipour, S. Eggl, et al.), *MNRAS* **414**, 2763 (2011).
33. Шварц и др. (R. Schwarz, B. Funk, R. Zechner, et al.), *MNRAS* **460**, 3598 (2016).
34. Шевченко (I.I. Shevchenko), *Astrophys. J.* **799**, 8 (2015).
35. Шевченко (I.I. Shevchenko), *Astron. J.* **153**, 273 (2017).
36. Шевченко (I.I. Shevchenko), *Astron. J.* **156**, 52 (2018).
37. Эггль (S. Eggl), *Handbook of Exoplanets* (Ed. by H.J. Deeg and J.A. Belmonte, Springer International Publishing, 2018), p. 1.
38. Экер и др. (Z. Eker, S. Bilir, F. Soydugan, et al.), *Publ. Astron. Soc. Australia* **31**, e024 (2014).
39. Экер и др. (Z. Eker, F. Soydugan, E. Soydugan, et al.), *Astron. J.* **149**, 131 (2015).