



Уральский
федеральный
университет

Динамическая эволюция внесолнечных планетных систем HD 141399, HD 160691 и HD 39194

А.С. Перминов, Э.Д. Кузнецов

7 – 11 октября

Современная звездная астрономия – 2019

Введение

Для описания динамической эволюции четырехпланетных систем авторами построена численно-аналитическая теория движения второго порядка по массам планет.

Рассмотрим динамическую эволюцию четырехпланетных систем **HD 141399**, **HD 160691** и компактной трехпланетной системы **HD 39194** на длительных интервалах времени.

Все планеты открыты **методом лучевых скоростей**, поэтому нам известны только минимально возможные значения масс планет.

Массы планет и элементы орбит соответствуют базе данных exoplanet.eu. Неизвестные и известные из наблюдений с ошибками элементы орбит варьируются.

В зависимости от начальных условий определяются максимально достижимые на интервале моделирования значения наклонов орбит и их эксцентриситетов. Предположение о стабильности наблюдаемых планетных систем позволяет нам исключить начальные условия приводящие к их экстремальному росту.

HD 39194

Таблица 1 – Массы и элементы орбит планет системы HD 39194

планета	b	c	d
$M \sin I [M_J]$	0.0117 ± 0.001	0.0187 ± 0.00148	0.0162 ± 0.0026
a [а.е.]	0.0519 ± 0.0008	0.0954 ± 0.0016	0.172 ± 0.0029
e	0.2 ± 0.1	0.11 ± 0.006	0.2 ± 0.16
P [сутки]	5.6363 ± 0.0008	14.025 ± 0.0051	33.941 ± 0.0353



HD 141399

Таблица 2 – Массы и элементы орбит планет системы HD 141399

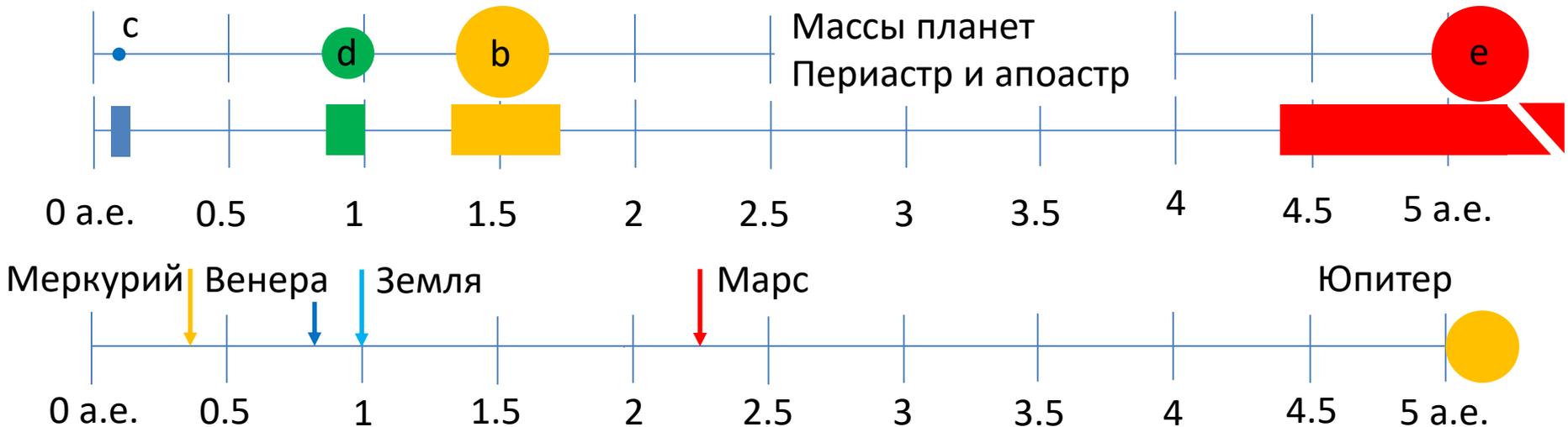
планета	b	c	d	e
$M \sin I [M_J]$	0.451 ± 0.03	1.33 ± 0.08	1.18 ± 0.08	0.66 ± 0.1
a [а.е.]	0.415 ± 0.011	0.689 ± 0.02	2.09 ± 0.06	5 ± 1.5
e	0.04 ± 0.02	0.048 ± 0.009	0.074 ± 0.025	0.26 ± 0.22
ω [°]	270 ± 80	220 ± 40	220 ± 30	350 ± 20
P [сутки]	94.44 ± 0.05	201.99 ± 0.08	1069.8 ± 6.7	5000_{-2000}^{+560}



HD 160691

Таблица 3 – Массы и элементы орбит планет системы HD 160691

планета	c	d	b	e
$M \sin I [M_J]$	0.03321	0.5219	1.676	1.814
a [a.e.]	0.09094	0.921	1.5 ± 0.02	5.235
e	0.172 ± 0.04	0.0666 ± 0.0122	0.128 ± 0.017	0.0985 ± 0.0627
ω [°]	212.7 ± 13.3	189.6 ± 9.4	22 ± 7	57.6 ± 43.7
P [сутки]	9.6386 ± 0.0015	310.55 ± 0.83	643.25 ± 0.9	4205.8 ± 758.9



Варьирование элементов орбит

В начальный момент времени, без потери общности, положим, что

- **Наклоны** орбит планет **HD 39194 b**, **HD 141399 b** и **HD 160691 e** равны 0° .
- **Долготы восходящих узлов** орбит этих планет равны 0° .

Далее варьируем неизвестные и известные с ошибками элементы орбит.

- **Наклоны** орбит планет принимаются равными друг другу и варьируются в диапазоне от 0° до 45° с шагом 5° .
- **Долготы восходящих узлов** орбит в системах **HD 141399** и **HD 160691** варьируются с шагом 90° .
- **Аргументы перицентров** орбит планет **HD 141399 b** и **c** варьируются с шагом 40° , для **HD 141399 d** – с шагом 30° , **HD 141399 e** – не варьируется.
- **Аргумент перицентра** орбиты **HD 160691 e** принимает минимальное, среднее и максимальное значения, остальные аргументы не варьируются.
- **Аргументы перицентров** и **долготы восходящих узлов** орбит планет в системе **HD 39194** варьируются с шагом 45° .
- **Эксцентриситеты** орбит планет полагаются равными минимальным, средним и максимальным значениям.

Осредненная теория движения

Гамильтониан четырехпланетной задачи записывается в **координатах Якоби**. Строится его разложение в ряд Пуассона до 2-го порядка по малому параметру и по элементам **второй системы Пуанкаре** с точностью до 4-й степени по эксцентрисическим и облическим элементам (Перминов, Кузнецов, 2015).

Осреднение проводится **методом Хори–Депри** (Перминов, Кузнецов, 2016).

Радиусы сходимости (Холшевников, 2001, 2002) разложений, представляющих уравнения движения, определяют максимальные значения эксцентриситетов и наклонов орбит для которых теория движения еще применима.

Таблица 4 – Радиусы сходимости по эксцентриситету $R(e)$ и наклону $R(I)$

система	HD 39194			HD 141399				HD 160691			
планета	b	c	d	b	c	d	e	c	d	b	e
$R(e)$	0.42	0.19	0.34	0.22	0.26	0.15	0.52	0.66	0.15	0.29	0.52
$R(I)$ [°]	49	22	40	26	31	17	63	80	18	34	63

Уравнения движения численно интегрируются **методом Эверхарта** 7-го порядка на интервале времени 1 млн лет с шагом 1000 лет. **Далее рассматриваются только средние элементы орбит в СК Якоби!**

HD 39194 b

Исходя из спектрального класса K0V,
масса звезды принята равной $0.72 M_{\odot}$.

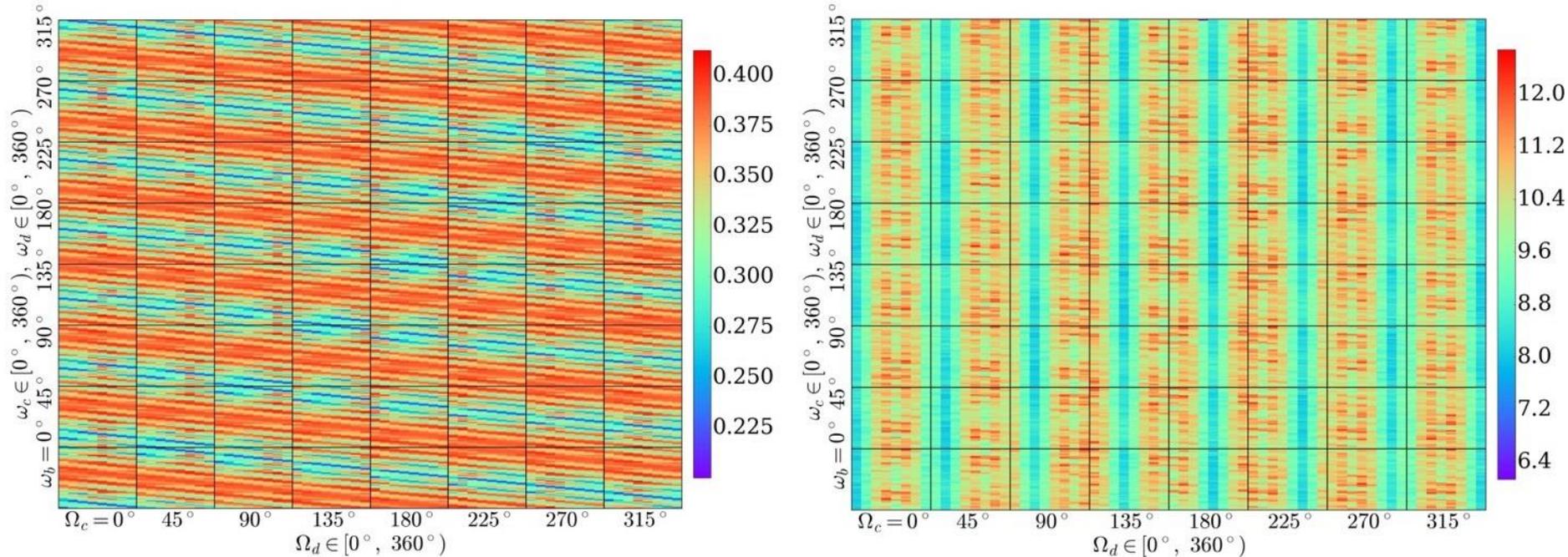


Рис. 1. Карты максимально достижимых значений эксцентриситетов (слева) и наклонов орбит (справа) на интервале времени 1 млн лет. Начальные значения наклонов двух внешних планет $i_0 = 5^\circ$, Начальные значения эксцентриситетов $e_b = 0.2$, $e_c = 0.11$, $e_d = 0.2$. Характер распределения эксцентриситетов подобен показанному для всех начальных значений эксцентриситетов.

HD 39194 c

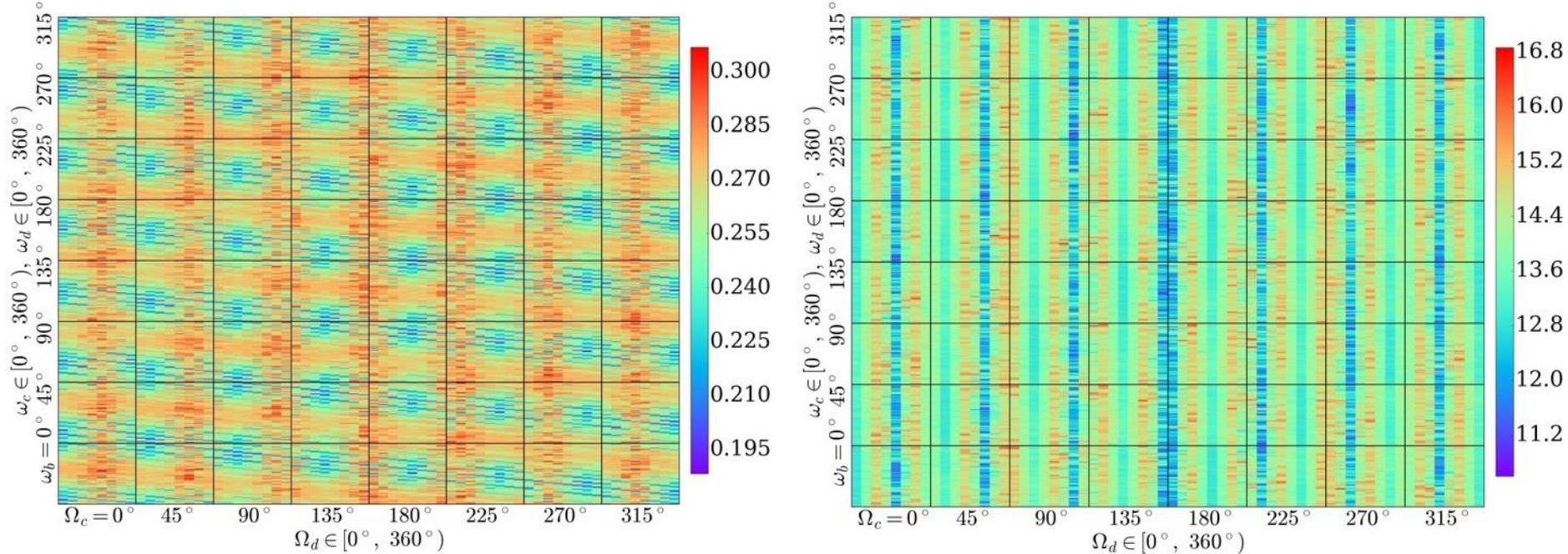


Рис. 2. Тоже самое для второй планеты системы, но теперь начальные значения наклонов орбит двух внешних планет $I_0 = 10^\circ$, Начальные значения эксцентриситетов такие же $e_b = 0.2, e_c = 0.11, e_d = 0.2$.

Характер распределения максимальных значений подобен для всех начальных значений эксцентриситетов.

HD 39194 d

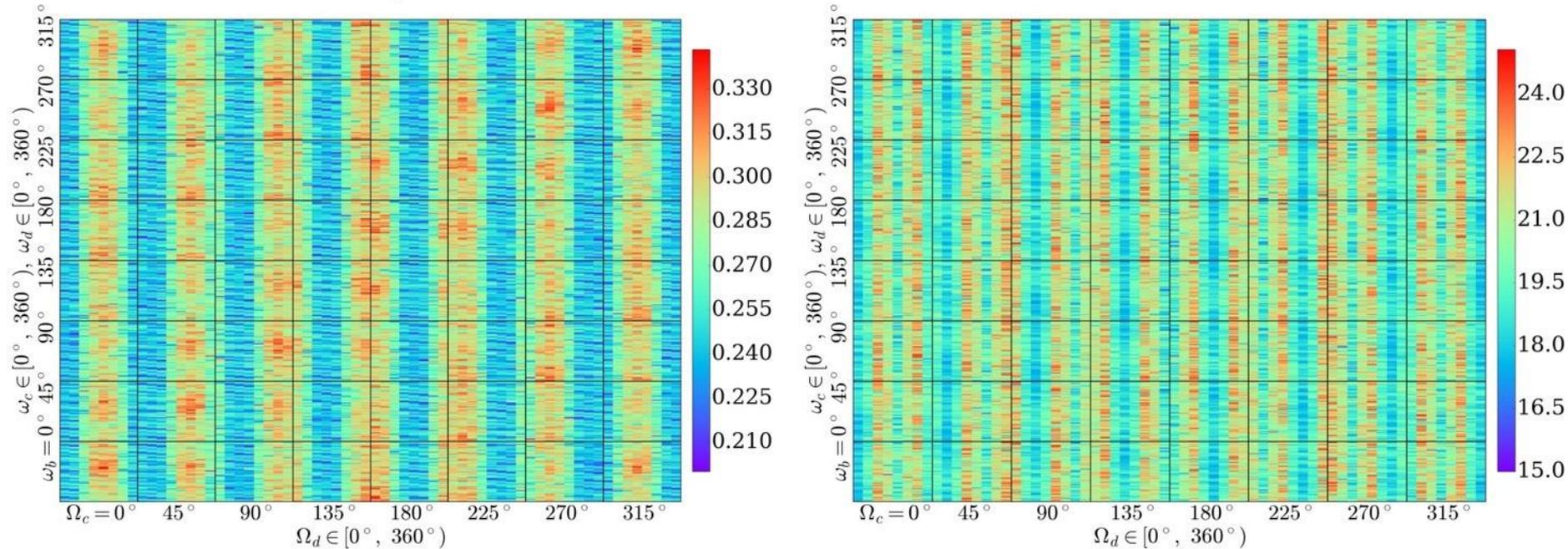
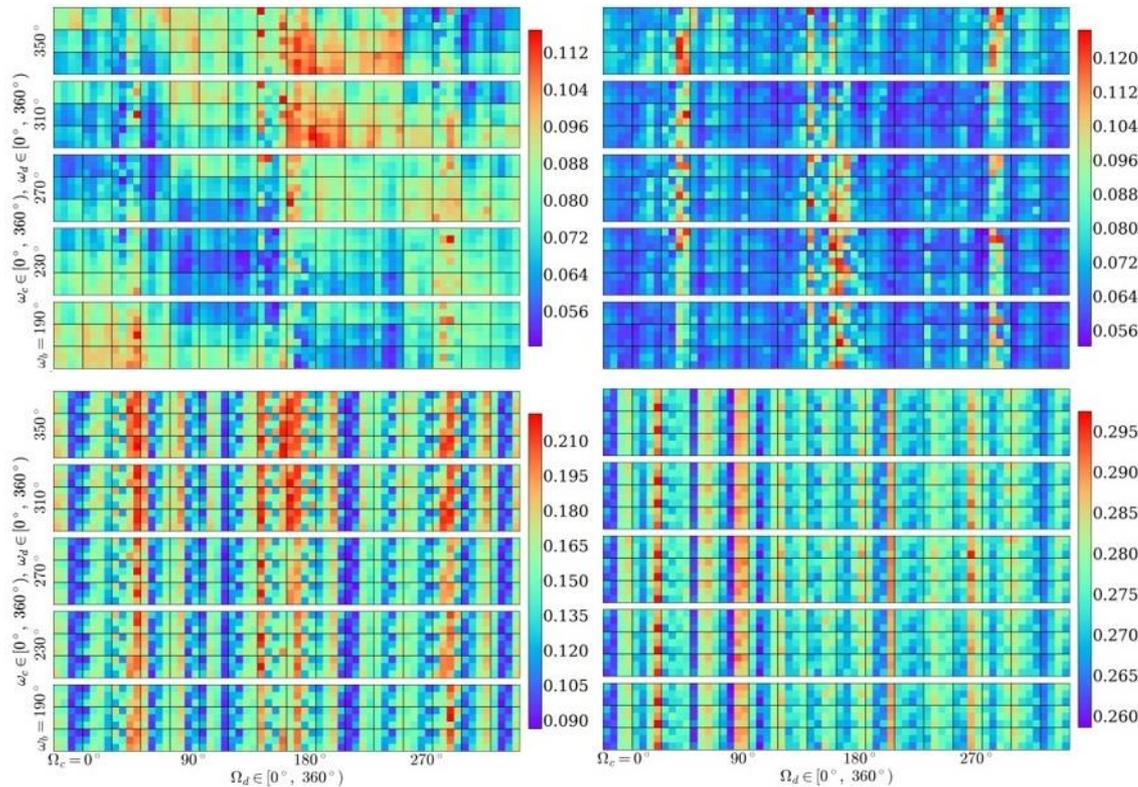


Рис. 3. Начальные значения наклонов орбит двух внешних планет $I_0 = 15^\circ$, начальные значения эксцентриситетов орбит остаются теми же. Области минимального роста эксцентриситетов орбит находятся возле близких друг к другу значений долгот восходящих узлов планет **c** и **d** ($\Omega_c \approx \Omega_d$). Если I_0 возрастает, то эти области уменьшаются и полностью исчезают при $I_0 = 30^\circ$.

Таблица 5 – максимально достижимые значения средних эксцентриситетов и наклонов орбит планет в системе HD 39194 на интервале времени 1 млн лет

i_0 [°]	b			c			d		
	e_0	e_{\max}	i_{\max} [°]	e_0	e_{\max}	i_{\max} [°]	e_0	e_{\max}	i_{\max} [°]
0	0.1	0.12 – 0.18	0	0.104	0.104 – 0.11	0	0.04	0.04 – 0.12	0
	0.2	0.20 – 0.39	0	0.110	0.18 – 0.27	0	0.20	0.20 – 0.22	0
	0.3	0.39 – 0.62	0	0.116	0.28 – 0.44	0	0.36	0.36 – 0.41	0
5	0.1	0.11 – 0.20	11	0.104	0.104 – 0.14	7	0.04	0.04 – 0.12	7
	0.2	0.20 – 0.41	13	0.110	0.18 – 0.28	8	0.20	0.20 – 0.26	7
	0.3	0.39 – 0.64	17	0.116	0.28 – 0.45	9	0.36	0.36 – 0.42	7
10	0.1	0.11 – 0.26	22	0.104	0.104 – 0.17	15	0.04	0.04 – 0.15	13
	0.2	0.21 – 0.47	27	0.110	0.19 – 0.31	17	0.20	0.20 – 0.28	16
	0.3	0.39 – 0.68	43	0.116	0.28 – 0.47	23	0.36	0.36 – 0.43	23
15	0.1	0.13 – 0.49	34	0.104	0.104 – 0.29	23	0.04	0.05 – 0.26	21
	0.2	0.20 – 0.59	40	0.110	0.19 – 0.38	27	0.20	0.20 – 0.34	25
	0.3	0.40 – 0.79	53	0.116	0.29 – 0.50	35	0.36	0.36 – 0.47	32
20	0.1	0.15 – 0.66	45	0.104	0.104 – 0.41	30	0.04	0.06 – 0.36	28
	0.2	0.20 – 0.75	51	0.110	0.19 – 0.47	34	0.20	0.20 – 0.41	31
	0.3	0.40 – 0.95	69	0.116	0.31 – 0.58	40	0.36	0.36 – 0.53	36
25	0.1	0.20 – 0.87	61	0.104	0.11 – 0.54	38	0.04	0.08 – 0.49	34
	0.2	0.30 – 0.96	71	0.110	0.21 – 0.60	40	0.20	0.20 – 0.51	37
	0.3	0.50 – 1	> 90	0.116	0.30 – 0.83	51	0.36	0.36 – 0.80	44
30	0.1	0.42 – 1	> 90	0.104	0.23 – 0.80	47	0.04	0.16 – 0.78	42
	0.2	0.38 – 1	> 90	0.110	0.25 – 0.83	55	0.20	0.20 – 0.77	50
	0.3	0.52 – 1	> 90	0.116	0.34 – 0.84	61	0.36	0.36 – 0.83	53

HD 141399



$I_0 \leq 15^\circ$ – эксцентриситеты малы или умеренные.
 $I_0 = 20^\circ$ – большинство Н.У. приводят к экстремальному росту эксцентриситетов, возможны флипы орбиты планеты b.
 $I_0 \leq 20^\circ$ – области минимального роста наклонов соответствуют Условию $\Omega_c \approx \Omega_d$.
 $I_0 \geq 25^\circ$ – эти области полностью исчезают.

Рис. 4. Карты максимальных эксцентриситетов орбит планеты HD 141399 **b** (вверху слева), **c** (вверху справа), **d** (внизу слева) and **e** (внизу справа). Начальные значения наклонов трех внешних планет $I_0 = 15^\circ$. Начальные значения эксцентриситетов $e_b = 0.04$, $e_c = 0.048$, $e_d = 0.074$, $e_e = 0.26$.

Таблица 6 – максимально достижимые значения средних эксцентриситетов и наклонов орбит планет в системе HD 141399 на интервале времени 1 млн лет

l_0 [°]	b		c		d		e	
	e_{\max}	l_{\max} [°]						
Начальные значения эксцентриситетов: $e_b = 0.02$, $e_c = 0.039$, $e_d = 0.049$, $e_e = 0.04$								
0	0.02 – 0.09	0	0.04 – 0.06	0	0.05 – 0.07	0	0.04 – 0.07	0
5	0.02 – 0.09	13	0.04 – 0.06	10	0.05 – 0.07	8	0.04 – 0.07	8
10	0.02 – 0.09	26	0.04 – 0.06	19	0.05 – 0.07	15	0.04 – 0.07	16
15	0.02 – 0.09	38	0.04 – 0.08	29	0.05 – 0.08	23	0.04 – 0.07	24
20	0.02 – 0.90	73	0.05 – 0.58	39	0.06 – 0.46	31	0.04 – 0.47	33
25	0.53 – 1	> 90	0.33 – 0.71	49	0.22 – 0.59	38	0.08 – 0.61	41
Начальные значения эксцентриситетов: $e_b = 0.04$, $e_c = 0.048$, $e_d = 0.074$, $e_e = 0.26$								
0	0.04 – 0.11	0	0.06 – 0.09	0	0.08 – 0.18	0	0.26 – 0.28	0
5	0.04 – 0.11	13	0.06 – 0.09	10	0.08 – 0.18	8	0.26 – 0.28	8
10	0.04 – 0.11	25	0.06 – 0.09	19	0.08 – 0.19	15	0.26 – 0.28	16
15	0.04 – 0.12	38	0.05 – 0.15	29	0.09 – 0.24	23	0.26 – 0.30	25
20	0.04 – 0.94	82	0.06 – 0.63	41	0.09 – 0.51	33	0.26 – 0.53	36
25	0.56 – 1	> 90	0.34 – 0.74	51	0.22 – 0.62	41	0.26 – 0.65	44
Начальные значения эксцентриситетов: $e_b = 0.06$, $e_c = 0.057$, $e_d = 0.099$, $e_e = 0.48$								
0	0.05 – 0.15	0	0.07 – 0.12	0	0.19 – 0.35	0	0.48 – 0.50	0
5	0.05 – 0.14	13	0.08 – 0.13	9	0.19 – 0.35	8	0.48 – 0.50	9
10	0.05 – 0.14	25	0.08 – 0.13	19	0.18 – 0.39	16	0.48 – 0.50	17
15	0.05 – 0.18	39	0.08 – 0.23	29	0.17 – 0.43	24	0.48 – 0.51	28
20	0.07 – 1	> 90	0.09 – 0.74	50	0.21 – 0.63	39	0.48 – 0.63	42
25	0.55 – 1	> 90	0.35 – 0.85	60	0.30 – 0.69	44	0.48 – 0.70	50

Таблица 7 – максимально достижимые значения средних эксцентриситетов и наклонов орбит планет в системе HD 160691 на интервале времени 1 млн лет

i_0 [°]	c		d		b		e	
	e_{\max}	i_{\max} [°]						
Initial values of eccentricities: $e_c = 0.132$, $e_d = 0.0544$, $e_b = 0.111$, $e_e = 0.0358$								
0	0.02 – 0.28	0	0.11 – 0.25	0	0.11 – 0.13	0	0.04 – 0.05	0
5	0.02 – 0.28	15	0.11 – 0.25	11	0.11 – 0.13	6	0.04 – 0.05	4
15	0.03 – 0.78	82	0.06 – 0.46	37	0.11 – 0.23	17	0.04 – 0.11	11
25	0.14 – 1	> 90	0.13 – 0.81	59	0.11 – 0.41	28	0.04 – 0.25	19
35	0.70 – 1	> 90	0.14 – 0.96	85	0.12 – 0.56	39	0.04 – 0.35	26
45	0.06 – 1	> 90	0.15 – 1	> 90	0.11 – 0.68	50	0.04 – 0.31	34
Initial values of eccentricities: $e_c = 0.172$, $e_d = 0.0666$, $e_b = 0.128$, $e_e = 0.0985$								
0	0.05 – 0.33	0	0.13 – 0.29	0	0.13 – 0.17	0	0.10 – 0.11	0
5	0.05 – 0.33	15	0.13 – 0.29	11	0.13 – 0.17	6	0.10 – 0.11	4
15	0.06 – 0.83	85	0.06 – 0.51	39	0.13 – 0.24	19	0.10 – 0.15	11
25	0.18 – 1	> 90	0.16 – 0.84	61	0.13 – 0.44	29	0.10 – 0.24	19
35	0.74 – 1	> 90	0.16 – 0.95	86	0.14 – 0.56	39	0.10 – 0.39	27
45	0.12 – 1	> 90	0.19 – 1	> 90	0.13 – 0.73	51	0.10 – 0.46	34
Initial values of eccentricities: $e_c = 0.212$, $e_d = 0.0788$, $e_b = 0.145$, $e_e = 0.1612$								
0	0.08 – 0.37	0	0.15 – 0.33	0	0.15 – 0.18	0	0.16 – 0.18	0
5	0.08 – 0.37	15	0.14 – 0.33	11	0.15 – 0.18	6	0.16 – 0.18	4
15	0.10 – 0.84	87	0.10 – 0.60	43	0.15 – 0.31	21	0.16 – 0.20	12
25	0.41 – 1	> 90	0.18 – 0.86	64	0.15 – 0.46	31	0.16 – 0.29	19
35	0.75 – 1	> 90	0.19 – 0.98	87	0.15 – 0.60	41	0.17 – 0.41	27
45	0.20 – 1	> 90	0.22 – 1	> 90	0.14 – 0.74	51	0.16 – 0.44	34

HD 160691

$$e_c = 0.172, e_d = 0.0666, e_b = 0.128, e_e = 0.0985$$

Таблица 8 – Максимальные эксцентриситеты и наклоны для различных масс планет

i_0 [°]	i [°]	HD 160691 c		HD 160691 d		HD 160691 b		HD 160691 e	
		e_{\max}	i_{\max} [°]						
0	15	0.17 – 0.79	43	0.20 – 0.52	25	0.15 – 0.23	12	0.11 – 0.13	8
	5	0.05 – 0.50	22	0.12 – 0.37	23	0.13 – 0.18	11	0.10 – 0.12	8
	10	0.04 – 0.37	28	0.10 – 0.30	23	0.13 – 0.17	11	0.10 – 0.12	8
15	15	0.18 – 0.95	> 90	0.23 – 0.52	39	0.15 – 0.27	19	0.11 – 0.17	11
	30	0.06 – 1	> 90	0.12 – 0.53	40	0.13 – 0.25	19	0.10 – 0.17	11
	60	0.06 – 0.80	81	0.07 – 0.52	39	0.13 – 0.27	18	0.10 – 0.16	11
20	15	0.19 – 1	> 90	0.23 – 0.64	52	0.15 – 0.29	26	0.11 – 0.17	16
	30	0.08 – 1	> 90	0.12 – 0.69	50	0.13 – 0.34	24	0.10 – 0.20	15
	60	0.06 – 1	> 90	0.15 – 0.66	49	0.13 – 0.27	24	0.10 – 0.23	15
25	15	0.26 – 1	> 90	0.23 – 0.79	61	0.15 – 0.42	30	0.11 – 0.25	19
	30	0.21 – 1	> 90	0.12 – 0.82	60	0.13 – 0.43	29	0.10 – 0.27	19
	60	0.31 – 1	> 90	0.15 – 0.83	60	0.13 – 0.42	29	0.10 – 0.27	19
30	15	0.47 – 1	> 90	0.23 – 0.91	74	0.15 – 0.49	35	0.11 – 0.33	23
	30	0.31 – 1	> 90	0.12 – 0.82	74	0.13 – 0.51	34	0.10 – 0.34	23
	60	0.52 – 1	> 90	0.15 – 0.93	72	0.13 – 0.50	34	0.10 – 0.32	23

- $M_c = 0.038, M_d = 0.603, M_b = 1.935, M_e = 2.095$ для $i = 60^\circ$;
- $M_c = 0.066, M_d = 1.044, M_b = 3.352, M_e = 3.628$ для $i = 30^\circ$;
- $M_c = 0.128, M_d = 2.016, M_b = 6.476, M_e = 7.009$ для $i = 15^\circ$.

Все в массах

Юпитера

Выводы

1. Диапазоны изменения элементов орбит планет зависят от начальных условий численного моделирования динамической эволюции. Предположение о стабильности наблюдаемых планетных систем позволяет исключить начальные условия, приводящие к экстремальному росту эксцентриситетов и наклонов орбит.
2. Показан способ поиска начальных условий, при которых элементы орбит остаются малыми или умеренными на всем интервале моделирования. Становится возможным ограничить возможные значения неизвестных и известных с ошибками элементов орбит и определить их наиболее вероятные, с точки зрения стабильности, значения.

Работа выполнена при поддержке
Российского Фонда Фундаментальных Исследований,
грант № 18-32-00283 mol_a.

Спасибо за внимание!