



ISSN 1607–2855

Том 5 · № 1–2 · 2004 С. 55–72

УДК 52(02); 52(03); 52(05); 52(07); 52:378

## Проблема существования планетных систем.

## II. Ожидаемые свойства и первые результаты поиска

**В.А. Захожай**

Научно-исследовательский институт астрономии  
Харьковского национального университета им. В.Н.Каразина

*Обсуждаются особенности состава планет, их физические свойства и классификация. Проводится анализ ожидаемых конфигураций планетных систем различного возраста. Показано, что на диаграмме «масса — большая полуось орбиты» планеты разделяются на две принципиальных области, которые можно интерпретировать как сформировавшиеся и «молодые» формирующиеся планетные системы, где допускается миграция планет с зоны образования в ближайшие окрестности звезды. Приведены основные данные об открытых протопланетных и планетных системах Галактики.*

**ПРОБЛЕМА ІСНУВАННЯ ПЛАНЕТНИХ СИСТЕМ. II. ОЧІКУВАНІ ВЛАСТИВОСТІ І ПЕРШІ РЕЗУЛЬТАТИ ПОШУКУ**, Захожай В.А. — Обговорюються особливості складу планет, їх властивості і класифікація. Проводиться аналіз очікуваних конфігурацій планетних систем різного віку. Показано, що на діаграмі «маса — велика піввісь орбіти» планети поділяються на дві принципові області, які можливо інтерпретувати як сформовані і «молоді» планетні системи, що знаходяться у стадії формування. Наведено основні дані про відкриті протопланетні і планетні системи Галактики.

**PROBLEM OF PLANETARY SYSTEMS EXISTENCE. II. EXPECTED PROPERTIES AND THE FIRST RESULTS OF THE SEARCH**, by Zakhozaj V.A. — Specialities of planets composition, their physical properties and classification are discussed. For planetary systems of different ages analysis of coming configurations is carried out. It is shown, that there are two principal vicinities on the diagram «mass — big axes» for the planets. The first vicinity corresponds to formed planets, and the second one — with «young» forming planetary systems, where planets migration from formation zone to nearest environments of star is assumed. The main data on detected protoplanetary and planetary systems of Galaxy are presented.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ открытых и заподозренных различными методами планетных систем у звезд, гигантов и пульсаров и протопланетных образований у звезд и субзвезд формирует определенные представления как о распространенности планет в Галактике, так и о конфигурациях планетных орбит в звездно-субзвездных системах. Вместе с представлениями о формировании планетных систем у звезд и субзвезд эти данные позволяют выделить наиболее характерные признаки проявления планет по наблюдениям звезд, в окрестностях которых они образовались.

Со времени постановки задачи о поиске планетных систем [7, 9, 35], за последние 30 лет предложено и разработано около 20 методов и идей поиска планетных систем [4, 5, 24, 29, 111, 136]. К настоящему времени реализованными оказались: астрометрический, фотометрический (работающий в видимой и ИК-областях), ИК-спекл-интерферометрии, лучевых скоростей и радиоастрономический (основанные на эффекте Доплера), гравитационного микролинзирования. Они работают с разной эффективностью<sup>1</sup>, достоверностью и информативностью. Самым результативным среди них оказался метод измерения доплеровских лучевых скоростей в видимой области [118].

Результатам обнаружения планетных систем и невидимых спутников (в той мере, в которой это относится к рассматриваемой проблеме) у звезд посвящены обзоры Александрова и Захожая

<sup>1</sup>Как видно из табл. 1, внесолнечные планеты с массами  $< 3m_J$  открыты шестью методами

**Таблица 1.** Массы планет и субзвезд, попадающие в пределы  
( $0.0003 \div 80$ ) $m_J$  (на 10.09.2004 г.);  $0.0025m/m_J = 1/400m_J$

№	Имя	$m/m_J^*$	Тип	Метод	№	Имя	$m/m_J^*$	Тип	Метод
<b>1. Планеты с <math>m &gt; 0.0025m/m_J</math></b>									
1.1	Марс	0.0003	Si		1.56	Юпитер	1.0000	H-He	
1.2	PSR B1257+12b	0.0006	Me	ра	1.57	HD 147513 b	1	H-He	с
1.3	Венера	0.0026	Si		1.58	HD 160691 c?	1?	H-He	с
1.4	Земля	0.0031	Si		1.59	HD 150706 b	1.0	H-He	с
1.5	PSR B0329+54b	>0.0063	Ic/H-He	ра	1.60	OGLE-TR-132 b	1.01	H-He	с
1.6	PSR B1257+12d	0.0088	Si/Me	ра	1.61	$\rho$ CrB b	1.04	H-He	с
1.7	PSR B1257+12c	0.0107	Si/Me	ра	1.62	HD 20367 b	1.07	H-He	с
1.8	PSR B1257+12e		H-He/Ic	ра	1.63	HD 130322 b	1.08	H-He	с
1.9	HD 160691d	0.042	H-He	с	1.64	HD 52265 b	1.13	H-He	с
1.10	55 Cnc e	0.045	H-He	с	1.65	$\nu$ And c	1.19	H-He	с
1.11	Уран	0.0456	H-He		1.66	HD 37124 c	1.2	H-He	с
1.12	Нептун	0.0541	H-He		1.67	HD 65216 b	1.21	H-He	с
1.13	GJ 436 b	0.067	H-He	с	1.68	Барнарда b	1.26	H-He	а
1.14	$\varepsilon$ Eri c	0.1 ??	H-He	с	1.69	HD 217107 b	1.28	H-He	с
1.15	HD 49674 b	0.12	H-He	с	1.70	HD 210277 b	1.28	H-He	с
1.16	HD 76700 b	0.197	H-He	с	1.71	HD 27442 b	1.28	H-He	с
1.17	HD 3651 b	0.2	H-He	с	1.72	HD 177830 b	1.28	H-He	с
1.18	55 Cnc c	0.21?	H-He	с	1.73	Gl 777 Ab	1.33	H-He	с
1.19	HD 16141 b	0.23	H-He	с	1.74	OGLE-TR-113 b	1.35	H-He	с
1.20	HD 168746 b	0.23	H-He	с	1.75	HD 142 b	1.36	H-He	с
1.21	HD 46375 b	0.249	H-He	с	1.76	OGLE-TR-56 b	1.45	H-He	с
1.22	HD 88133 b	0.29	H-He	с	1.77	HD 216435 b	1.49	H-He	с
1.23	Сатурн	0.2994	H-He	с	1.78	OGLE-235/MO A-53	1.5-2.5	H-He	с
1.24	61 Cyg Bb	0.31	H-He	а	1.79	HD 12661 c	1.57	H-He	с
1.25	HD 108147 b	0.41	H-He	с	1.80	HD 134987 b	1.58	H-He	с
1.26	HD 83443 b	0.41	H-He	с	1.81	$\gamma$ Cep b	1.59	H-He	с
1.27	HD 752289 b	0.42	H-He	с	1.82	Лаланд 21185 c	1.6	H-He	а+си
2.28	51 Peg b	0.468	H-He	с	1.83	HD 142415 b	1.62	H-He	с
2.29	BD -10 3166 b	0.48	H-He	с	1.84	HD 82943 c	1.63	H-He	с
2.30	HD 6434 b	0.48	H-He	с	1.85	HD 4203 b	1.65	H-He	с
1.31	HD 187123 b	0.52	H-He	с	1.86	HD 108874 b	1.65	H-He	с
1.32	OGLE-TR-111b	0.53	H-He	с	1.87	16 Cyg Bb	1.69	H-He	с
1.33	Gl 876 c	0.56	H-He	с	1.88	HD 160691 b	1.7	H-He	с
1.34	Барнарда d	0.63	H-He	а	1.89	HD 73256 b	1.85	H-He	с
1.35	HD 216770 b	0.65	H-He	с	1.90	HD 74156 b	1.86	H-He	с
1.36	HD 209458 b	0.69	H-He	вф+с	1.91	Проксима b	1.89	H-He	а
1.37	$\nu$ And b	0.69	H-He	с	1.92	HD 68988 b	1.90	H-He	с
1.38	HD 192263 b	0.72	H-He	с	1.93	Gl 876 b	1.98	H-He	с
1.39	HD 37124 b	0.75	H-He	с	1.94	HD 70642 b	2.0	H-He	с
1.40	TrES-1	0.75	H-He	с	1.95	HD 19994 b	2.0	H-He	с
1.41	47 UMa c	0.76	H-He	с	1.96	94-BLG-3	$\sim 2$	H-He	ГМЛ
1.42	HD 330075 b	0.76	H-He	с	1.97	HD 216437 b	2.1	H-He	с
1.43	HD 38529 b	0.78	H-He	с	1.98	HD 8574 b	2.23	H-He	с
1.44	HD 4208 b	0.80	H-He	с	1.99	HR 810 b	2.26	H-He	с
1.45	HD 114729 b	0.82	H-He	с	1.100	HD 12661 b	2.30	H-He	с
1.46	Барнарда c	0.84	H-He	а	1.101	HD 41004 Ab	2.3	H-He	с
1.47	55 Cnc b	0.84	H-He	с	1.102	47 UMa b	2.41	H-He	с
1.48	HD 179949 b	0.84	H-He	с	1.103	HD 72659 b	2.55	H-He	с
1.49	$\varepsilon$ Eri b	0.86	H-He	с	1.104	HD 23079 b	2.61	H-He	с
1.50	HD 82943 b	0.88	H-He	с	1.105	HD 128311 b	2.63	H-He	с

№	Имя	$m/m_J^*$	Тип	Метод	№	Имя	$m/m_J^*$	Тип	Метод
1.51	HD 121504 b	0.89	H–He	с	1.106	HD 37605 b	2.85	H–He	с
1.52	HD 114783 b	0.9	H–He	с	1.107	HD 169830 b	2.88	H–He	с
1.53	Лаланд 21185 b	0.9	H–He	а+си	1.108	HD 219449 b	2.9	H–He	с
1.54	HD 10647 b	0.91	H–He	с	1.109	HD 196050 b	3.0	H–He	с
1.55	HD 114386 b	0.99	H–He	с	1.110	HD 73526 b	3.0	H–He	с
<b>2. Планеты или субзвезды</b>									
2.1	61 Cyg Bb	3.14	H–He	а	2.18	HD 47536 b	4.96–9.67	H–He	с
2.2	GJ 3021 b	3.21	H–He	с	2.19	HD 190228 b	4.99	H–He	с
2.3	HD 40979 b	3.32	H–He	с	2.20	94-BLG-4	~5	H–He	гмл
2.4	HD 80606 b	3.41	H–He	с	2.21	2M1207 b	~5	H–He	с
2.5	HD 195019 b	3.43	H–He	с	2.22	PSR B1620-26 b	~5	H–He	ра
2.6	94-BLG-35	3.5±1.8	H–He	гмл	2.23	HD 222582 b	5.11	H–He	с
2.7	61 Cyg Ab	3.67	H–He	а	2.24	HD 28185 b	5.6	H–He	с
2.8	$\nu$ And d	3.75	H–He	с	2.25	61 Cyg Ac	5.76	H–He	а
2.9	HD 92788 b	3.8	H–He	с	2.26	DM+59°1915	6	H–He	а
2.10	$\tau$ Boo b	3.87	H–He	с	2.27	HD 10697 b	6.12	H–He	с
2.11	Gl 86 b	4	H–He	с	2.28	HD 74156 c	>6.17	H–He	с
2.12	HD 169830 c	4.04	H–He	с	2.29	HD 178911 Bb	6.292	H–He	с
2.13	55 Cnc d	4.05	H–He	с	2.30	HD 104985 b	6.3	H–He	с
2.14	HD 213240 b	4.5	H–He	с	2.31	HD 59686 b	6.5	H–He	с
2.15	14 Her b	4.74	H–He	с	2.32	HD 111232 b	6.8	H–He	с
2.16	HD 2039 b	4.85	H–He	с	2.33	HD 106252 b	6.81	H–He	с
2.17	HD 50554 b	4.9	H–He	с					
<b>3. Субзвезды</b>									
3.1	HD 23596 b	7.19	H–He	с	3.11	Krü 60 (A/B) b	10	H–He	а
3.2	70 Vir b	7.44	H–He	с	3.12	HD 39091 b	10.35	H–He	с
3.3	HD 168443 b	7.7	H–He	с	3.13	HD 114762 b	11	H–He	с
3.4	HD 89744 b	7.99	H–He	с	3.14	HD 136118 b	11.9	H–He	с
3.5	HIP 75458 b	8.64	H–He	с	3.15	HD 38529 c	12.70	H–He	с
3.6	EV Lac b	9-23	H–He	а	3.16	HD 162020 b	13.75	H–He	с
3.7	HD 30177 b	9.17	H–He	с	3.17	HD 168443 c	16.9	H–He	с
3.8	HD 33636 b	9.28	H–He	с	3.18	G 175-34 b	20	H–He	а
3.9	HD 141937 b	9.7	H–He	с	3.19	LHS 2924	50	H–He	ик
3.10	VB 8	10	H–He	икф	3.20	Gl 623 b	60–80	H–He	а

[4, 5], Захожая [143], Нинкович и Попович [109], Перримана [111], Нидзельски [109], Ксанфомалити [24–26], Шнайдера [119], Марси и др. [104], Удри и Майора [128], Вавруха и Тишко [8].

Цель настоящей работы — охарактеризовать современное состояние проблемы существования в Галактике планетных систем, очертить основные типы гипотетических планет и ожидаемые конфигурации планетных систем различного возраста.

## 2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ ПЛАНЕТ И КЛАССИФИКАЦИЯ ИХ АТМОСФЕР

К планетам относят те космические тела, вещество которых находится в конденсированном твердом либо жидком состоянии, а их эволюция связана с гравитационной дифференциацией [2]. Нижняя граница масс планет зависит от состава их недр: для силикатных планет ( $\bar{\rho} \sim 3 \text{ г/см}^3$ ) она близка к  $10^{23} \text{ г} \approx 10^{-10} m_\odot$  (диаметр более 400 км); для ледяных ( $\bar{\rho} \sim 1 \text{ г/см}^3$ ) — к  $10^{22} \text{ г}$  — к  $\approx 10^{-11} m_\odot$  (диаметр около 300 км) [32]; для водородно-гелиевых планет с солнечным составом минимальная масса определяется возможностью удержания водорода и составляет примерно  $10^{29} \text{ г} \approx 10^{-4} m_\odot$  (порядка массы Урана с диаметром более 60 тыс. км для  $\bar{\rho} \sim 1 \text{ г/см}^3$ ). Не исключено, что верхняя граница массы тел, образующихся в протопланетных дисках, больше минимальных

масс космических тел, образующихся путем самогравитации, на что обращают результаты Доула, полученные более 30 лет назад [65].

В зависимости от физических условий протопланетного облака в зонах формирования планет, при солнечной распространенности химических элементов, Евсюков, Захой и Псарев [67], развивая идеи о классификации планет [1, 12], уточнили классификацию планет и в конечном итоге предложили разделить вещества, входящие в состав планет, на четыре группы. В *группу I* включили летучие элементы ( $H_2$ , He и Ne), которые не могут конденсироваться в протопланетном облаке при температуре выше 10 K. В *группу II* ввели вещества, конденсирующиеся при температуре меньше 200 K ( $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$  и их клатраты, а также  $N_2$  и Ar). *III группу* образовали из силикатов, конденсирующихся при температуре ниже 1700 K (при давлении около 0.1 бар). В *IV группу* веществ ввели сплавы Fe с Ni, Co, Cr. При давлении ниже  $5 \cdot 10^{-5}$  бара железо конденсируется после распространенных силикатов энстатита и форстерита при температуре ниже 1350 K. При более высоком давлении конденсация железа опережает конденсацию силикатов. При давлении 0.1 бар температура конденсации железа ( $\approx 1700$  K) на 80 K выше температуры конденсации форстерита. С ростом давления эта тенденция сохраняется. При температуре ниже 700 K появляется сульфид железа и входит в ядро планеты совместно со сплавами железа.

Молекулярный водород и гелий, находясь в газообразном виде, могут удерживать только планеты с массами более  $\sim 10^{-4} m_\odot$  в зоне температур менее 200 K [13]. Такие планеты являются *водородно-гелиевыми*, исходя из солнечной распространенности химических элементов. В менее массивных планетах низкотемпературной области будут преобладать льды (*ледяные планеты*). В среднетемпературной зоне протопланетного диска, более 200 K, льды не смогут конденсироваться. Они теряются так же, как водород и гелий. При температуре менее 350 K появятся гидратированные силикаты, которые при нагреве выделяют воду и могут сформировать гидросферу, либо криолитосферу. В зоне температур менее  $1500 \div 1700$  K (в зависимости от давления) формируются *силикатные планеты*. В высокотемпературной зоне (до 1900 K) силикатное вещество теряется и есть условия для формирования *металлических планет*.

Зона металлических планет имеет весьма узкий температурный диапазон —  $1700 \div 1900$  K при  $P = 1$  бар и  $1600 \div 1700$  K при  $P = 0.1$  бар. В Солнечной системе эта зона занимает область от 0.1 а.е. до 0.4 а.е. Соответственно, зона силикатных планет ограничена температурой около 200 K и в Солнечной системе простирается примерно до 3 а.е.

Оценки показали [67], что если звезда с солнечной светимостью имеет плотность протопланетного диска в 10 раз больше плотности солнечного, границы зон металлических и силикатных планет уменьшаются примерно втрое:  $0.03 \div 0.1$  а.е. и  $0.1 \div 1$  а.е., соответственно. При повышении светимости в 10 раз (спектр  $\sim A5V$ ) расстояния границ увеличатся в  $\approx 3$  раза: для металлических и силикатных планет —  $0.3 \div 1$  а.е. и  $1 \div 10$  а.е., соответственно.

Температуры водородно-гелиевых планет в диапазоне  $200 \div 1500$  K увеличивают толщину их атмосфер. Это ведет к большому разнообразию оптических свойств их атмосфер. Сударский, Барроуз и Пинто [126] предложили разделить планеты-гиганты на четыре типа — класс «Юпитера» ( $T_{\text{эф}} \sim 150$  K) с аммиачными облаками, «водяной» класс ( $T_{\text{эф}} \sim 250$  K) с преобладанием в облаках конденсированной воды, класс без облаков ( $T_{\text{эф}} \geq 350$  K) и высокотемпературный класс ( $T_{\text{эф}} \geq 900$  K), где преобладает поглощение щелочными металлами и железом. Существует необходимость исследования вопроса о потере водорода планетой, в зависимости от ее химического состава, массы и расстояния до звезды.

Предложенную классификацию атмосфер водородно-гелиевых планет Сударского, Барроуза и Пинто [126], исходя из анализируемых температурных зон, по-видимому, можно распространить на планеты всех четырех выделенных групп [17]. Очевидно, что аммиачный класс атмосфер соответствует водородно-гелиевым планетам, поскольку молекулы метана, аммиака, водорода, азота и воды наиболее характерны для низкотемпературной зоны околозвездного окружения [19]. Высокотемпературный класс должен быть характерным для наиболее близких к звездам планетам —

вероятно, металлическим. Вода и углекислый газ, по-видимому, характерны для атмосфер, температура которых  $\sim 200 - 300$  К, как это наблюдается в Солнечной системе.

### 3. ОЖИДАЕМЫЕ КОНФИГУРАЦИИ ПЛАНЕТНЫХ СИСТЕМ РАЗЛИЧНОГО ВОЗРАСТА

Будем относить к планетным звездно-субзвездные системы, в которых при формировании их компонентов образуются планеты. Системы «планета–планета» (двойные планеты, соответствующие в Солнечной системе системам Земля–Луна, Плутон–Харон); «планета–планеты» (соответствующие в Солнечной системе системам Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна со своими спутниками, масса которых превышает нижнюю границу по массе для планет). Это подразумевает несколько принципиальных фаз формирования и существования планетных систем, каждая из которых ограничена определенным временным интервалом. Исходя из современных космогонических представлений, образование и эволюция планетных систем может характеризоваться тремя принципиальными фазами:

- 1) протопланетного диска;
- 2) формирования структуры планетной системы;
- 3) сформировавшимися космическими телами.

Первая фаза включает первичную фрагментацию молекулярных облаков, фрагментацию протозвездно-субзвездного облака и образование протопланетных дисков, эволюция которых завершается образованием всего разнообразия космических тел, входящих в конкретную систему. Формирование структуры планетной системы связано с первичными распределениями кинематических и астрофизических характеристик, влияющих на устойчивость системы и изменение кинематических параметров орбитальных характеристик всех составляющих членов системы в процессе эволюции. Существование планет на третьей фазе будем характеризовать эволюцией самих космических тел (в общем случае, звезд, субзвезд и планет) «на фоне» эволюции их кинематических параметров.

Процесс фрагментации может и не закончиться формированием протопланетного облака — в случае, если момент количества движения и вязкость вещества фрагментирующего облака не попадут в определенные интервалы [28, 31, 37]. Как показали оценки Степински и Блэка [82, 125], основанные на наблюдаемых орбитальных периодах (1.25–2600 суток) звездно-субзвездных систем и известных планет, угловые моменты субзвезд и планет попадают в один и тот же характерный интервал [38]. Это привело Тутукова к идее о сходимости процессов образования субзвезд и планетных систем [38]: если в процессе аккреции вещества оболочки протозвезды образуется компактное газовое кольцо (диск) около молодой звезды и если вязкость вещества этого кольца мала, то увеличение его массы выше некоторого предела ведет к наступлению гравитационной неустойчивости и образованию субзвезды. Если же вязкость газа достаточно велика, то основная часть вещества оболочки протозвезды будет аккрецирована молодой звездой, а размеры газового диска при этом из-за сохранения углового момента существенно увеличатся до размеров протопланетного пылевого диска. Образование пыли в холодной части протяженного диска и ее последующая столкновительная коагуляция ведет в конечном итоге к образованию планетных систем солнечного типа.

Если компоненты кратных звездно-субзвездных систем достаточно удалены друг от друга, то ожидается, что эволюция образовавшегося протопланетного облака похожа на эволюцию в одиночных системах. Хеппенхеймер [85] получил оценку для критического расстояния между компонентами двойной системы, ближе которого ожидается разрушение протопланетного облака вследствие гравитационного влияния соседнего компонента. Особенностям образования планет в ходе эволюции тесных двойных звезд посвящена работа Тутукова [127].

Эволюция образовавшегося протопланетного диска может не закончиться образованием планет. Этому может помешать недостаточность времени пребывания центральной звезды на стадии главной последовательности (ожидается это для звезд, масса которых больше  $10m_{\odot}$ ), наличие второго близкого массивного звездного или субзвездного компонента, нарушающего устойчивость про-



топланетного диска с последующим его полным или частичным разрушением. Нельзя исключать, что частичное разрушение протопланетного диска не мешает образованию пояса астероидов.

Неустойчивость сформировавшейся планетной системы может существенно ограничить ее время существования по сравнению со временем пребывания центральной звезды на главной последовательности. Открытие планетных систем у звезд стимулировало исследование их устойчивости, эволюции и связей кинематических параметров, проведение численного моделирования отдельных систем и в первую очередь тех, где обнаружено несколько планет. Такие исследования могут прояснить возможность существования в поле тяготения открытых массивных водородно-гелиевых планет — планет земного типа. Так, согласно результатам численного моделирования, проведенного Соколовым [33], значительный эксцентриситет орбиты массивной экзопланеты обычно влечет значительный (того же порядка) эволюционирующий эксцентриситет орбиты малой планеты. При этом существование устойчивых почти круговых орбит типа Земли совсем исключить нельзя, однако они нетипичны и являются редким исключением из правил.

В случае нерегулярного движения, когда эволюция (рост) эксцентриситета приводит к сближениям, изменения орбиты происходят скачкообразно (при сближениях). Имеет место связь эксцентриситета и большой полуоси: перигетрическое расстояние малой планеты все время приблизительно постоянно и близко к большой полуоси массивной планеты. Сравнительно быстро начальная круговая орбита становится похожей на орбиту долгопериодической кометы. Такие параметры, согласно Степински и Блэку [125, рис. 4], характерны для водородно-гелиевых планет с орбитальными периодами 10–100 сут.

Наиболее существенным фактором, влияющим на устойчивость системы, может быть эволюция сформировавшихся планет в гравитационном поле компонентов кратной системы. Например, согласно результатам Лафлина и Адамса [93], система из трех планет  $\nu$  And менее устойчива, чем Солнечная. Почти круговые орбиты планет неустойчивы. «Земля» на соответствующем расстоянии либо выбрасывается из системы, либо падает на звезду.

К завершающей фазе будем причислять планетные системы, находящиеся в гравитационном поле центральных звезд, прошедших стадию гигантов и переход к стадии звездных остатков.

Стадия протопланетных дисков может наблюдаться у планет (при формировании их спутников, как это наблюдается в Солнечной системе), у субзвезд (как это обнаружено у 38 объектов [100]), у звезд [53, 123, 136]. Высказываются гипотезы о возможности формирования планет в аккреционных дисках звездных остатков [111]. Протопланетные диски наблюдаются у звезд типа Т Тау (примерно у 80%) и главной последовательности. В одном только комплексе Ориона обнаружено 153 протопланетных образования [6]. О том, что протопланетные диски могут быть у кратных систем, можно судить из наблюдательных данных: об открытых газо-пылевых дисках у двойных звезд, когда диск окружает тесную двойную BD+31°643 и каждый из компонент UZ Tau [89]; о планетах в сформировавшихся системах 61 Cyg,  $\nu$  And, 55 Cnc, 47 UMa, Gl 876, HD 12661, HD 38529, HD 74156, HD 82943 и др. [10, 11, 109, 118]. Эти же данные могут выступать аргументом о возможности существования устойчивых планетных орбит в двойных системах. Возможность «выживания планет» в процессе образования планетарных туманностей [124] и взрыве сверхновых II типа, демонстрируется примерами наличия планет в системах пульсаров PSR 0329+54, PSR 1257+12, PSR B1620-26 [49, 63, 118, 122, 138, 139, 141].

Таким образом, протопланетные диски, их остатки (как наблюдаемый в Солнечной системе Зодиакальный свет) и сформировавшиеся планеты есть основания искать у планет, субзвезд, звезд (примерно более поздних спектральных классов, чем B5) и их звездных остатков; в кратных звездных, звездно-субзвездных и субзвездных системах. Общие оценки встречаемости планетных систем у звезд дают значения 0.2–0.4 [3, 38, 86] и примерно согласуются с долей молодых звезд поздних спектральных классов, обладающих протяженными пылевыми дисками [74, 81]. На порядок ниже приводит оценки Марси [103], полученные им на основании полученной статистики по открытым планетным системам и инфракрасным карликам к 1999 году: 4% звезд солнечного типа обладают

планетами и у 1% исследованных звезд наблюдаются ИК-карлики. В нашей Солнечной системе с учетом космических тел, открытых в Поясе Койпера [144], в настоящее время к планетным телам следует отнести около 100 объектов. Из этих оценок следует, что число планет в Галактике может оказаться примерно на два порядка больше, чем звезд. Следовательно, феномен планетных систем ожидается довольно распространенным.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА И ДОСТОВЕРНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ

Условия для формирования звезд с протопланетными дисками возникают в протозвездах, момент количества движения (МКД) которых попадает в диапазон [31]:

$$5 \cdot 10^{50} (M/M_{\odot})^{5/3} \leq J \text{ (г} \cdot \text{см}^2/\text{с)} \leq 10^{52} (M/M_{\odot})^{5/3}. \quad (1)$$

У протозвезд с меньшим МКД формируются одиночные звезды, а с большим — кратные системы. Рассмотрим предельный случай для границы образования планетных систем и кратных звездно-субзвездных систем, предполагая, что субзвезды образуются, как и звезды, путем самогравитации из протозвезд с избыточным моментом:

$$J \text{ (г} \cdot \text{см}^2/\text{с)} > 10^{52} (M/M_{\odot})^{5/3}. \quad (2)$$

Формирование планетных систем происходит с потерей МКД. Если долевая составляющая МКД, идущая на образование планет равна  $\eta$ , а  $\alpha$  — возможное значение показателя степени, при трансформации момента, то значение МКД, идущее на формирование планет, можно записать в виде:

$$J \text{ (г} \cdot \text{см}^2/\text{с)} = 3.150 \cdot 10^{-4} \eta M^{\alpha} \text{ (г} \cdot \text{см}^2/\text{с)}. \quad (3)$$

Представим связь масс звезды  $M$  и планеты  $m$  в виде

$$\xi = m/M, \quad (4)$$

тогда МКД планеты, образовавшейся из протопланетного диска, есть

$$J_p = 3.150 \cdot 10^{-4} \eta m^{\alpha} \xi^{-\alpha} \text{ (г} \cdot \text{см}^2/\text{с)}. \quad (5)$$

С другой стороны, МКД сформировавшейся планеты с кеплеровской круговой скоростью  $v$ , с учетом связи (4), есть

$$J_p = 2.583 \cdot 10^{-4} \sqrt{am^3 \frac{(1+\xi)}{\xi}} \text{ (г} \cdot \text{см}^2/\text{с)}. \quad (6)$$

Выражая массу планеты в массах Юпитера  $M_J$ , большую полуось в астрономических единицах  $A$  и приравнивая выражения (5) и (6), получим

$$A = \frac{(2 \cdot 10^{30})^{\alpha-3/2}}{1.5 \cdot 10^{13}} 1.487 \eta^2 \frac{\xi^{1-2\alpha}}{1+\xi} M_J^{\alpha-3.2} \text{ а.е.} \quad (7)$$

Логарифмируя выражение (7), выразив  $\xi$  через  $M_J = m/m_J$  ( $m_J$  — масса Юпитера), окончательно получим

$$\lg A = B - C \lg M_J, \quad (8)$$

где:

$$B = 30.3(\alpha - 3/2) - 13 + 2 \lg \eta + [1 - \lg(\exp) - 2\alpha] \lg \delta, \quad (9)$$

$$C = 1/2 + \lg(\exp) - \alpha, \quad (10)$$

$$\xi = \frac{m}{M} = \frac{m}{m_J} \frac{m_J}{M} = M_J \delta \quad (11)$$

$\delta$  — масса Юпитера, выраженная в массах звезды.  $B$  и  $C$  — постоянные величины, зависящие от механизма трансформации МКД протопланетного облака в планетную систему (характеризуемый значениями  $\alpha$  и  $\eta$ ), а также от масс звезд, у которых образуются планетные системы.

На диаграмме  $\lg M_J - \lg A$  (рис. 1), приведено семейство линейных зависимостей (8) для различной «выработки» вещества протопланетного облака ( $\lg \eta = 0 \div -1.2$ ), при  $\alpha = 5/3$  и для солнцеподобных звезд ( $\lg \delta = -3$ ), чему соответствуют приведенные на диаграмме F, G, K-звезды с

планетными и субзвездными системами. Видно, что положения всех планет в Солнечной системе, пульсаров, звезды Барнарда,  $\epsilon$  Эридана (согласно данным метода лучевых скоростей и оценке по астрометрическому методу о данных спутника) соответствуют полной «выработке» вещества протопланетного облака (они находятся слева прямой, соответствующей  $\lg \eta = 0$ ). Здесь же находится планета 47 Uma b и недалеко от нее планета 47 Uma a (уже справа от границы). Нельзя исключить того, что планета 47 Uma a также находится слева прямой, соответствующей  $\lg \eta = 0$ , однако неопределенность с углом наклона орбиты к наблюдателю привели ее к указанному положению. Справа от этой прямой находятся космические тела, образовавшиеся (или образующиеся) в условиях наличия остатка протозвездного вещества с разными значениями  $\lg \eta < 0$ . Здесь находятся все невидимые астрометрические компоненты (что скорее говорит от низкой точности определения их параметров, включая двойную систему 61 Лебеда, для которой более массивный компонент 61 Cyg A находится слева, а менее массивные 61 Cyg Ab и 61 Cyg Bb — справа, а должно быть наоборот) и подавляющее количество планет и субзвезд, открытых методом лучевых скоростей, включая затменную систему HD 209458. Положение этой планеты справа от прямой  $\lg \eta = 0$  наводит на идею о том, что в этой области находятся планеты вместе с веществом протопланетного облака. Это может вести к потере орбитального МКД планеты (примерно на порядок, как это не сложно показать) и вызывать приближение ее к центральной звезде. Все эти планетные системы, по-видимому, молодые, погруженные в остатки протопланетных дисков. Это может объяснить наблюдаемое распределение металличности звезд с открываемыми планетными системами, большинство звезд которого имеет преимущественно положительные металличности [8, 26] и миграцию планет.

Протопланетные диски легче наблюдать, чем планеты у звезд [53]. Их спектр излучения, согласно закону смещения Вина, находится в ИК-диапазоне между 3 мкм и 1 мм, для типичных температур — от 1000 К до 30 К. Типичный радиус диска,  $\approx 10^3$  а.е. [53, 111], сохраняется от миллиона до 30 млн. лет [111], что не противоречит наблюдаемым более сотни протопланетным дискам вокруг молодых звезд главной последовательности с возрастом  $10^6 \div 10^7$  лет и звезд типа Т Тау в пределах 50 пк от Солнца [90]. Около четырех десятков субзвезд также обнаружены с протопланетными облаками [100].

Орбитальный телескоп ИРАС позволил обнаружить у Веги и  $\beta$  Pic протопланетные образования [116, 123]. Позже с помощью специального затменного коронографа удалось получить изображение протопланетного диска Pic [22, 48], где во внутренней части диска (до  $\sim 30$  а.е.) обнаружена область, лишенная газа и пыли. Нельзя исключать наличия там сформировавшихся планет [123]. В околозвездном диске звезды HD 141569 радиусом 400 а.е. на расстоянии от центра 250 а.е. имеется щель, где ожидается планета с массой  $\approx 1.3 m_J$  [111, 136].

Остатки дисков вокруг звезд, подобных Веге, исследуются с помощью субмиллиметровых интерферометров и коронографов, детектирующих фотоны в оптическом и ближнем ИК-диапазонах. Они позволили обнаружить холодную пыль в структурах звезд, распространяющихся на расстояния от  $\sim 20$  до сотен астрономических единиц. Есть основания полагать, что эти оптически тонкие диски постоянно обогащаются веществом, которое образуется в процессе разрушения комет, при столкновении астероидов, комет и протопланет. Имеются прямые наблюдательные данные о наличии дисковой асимметрии и экзопланет [64]. На разных базовых линиях в К и Н полосах на VLTI в ближней ИК области, начаты исследования остаточных дисков у звезд  $\beta$  Pic,  $\alpha$  PsA (Фомальгаут),  $\epsilon$  Eri и  $\tau$  Cet.

Протопланетные диски наблюдаются также вокруг двойной BD+31°643 [99],  $\epsilon$  Эридана [79], двойной, находящейся на стадии до-главной последовательности НК Тельца [92], HD 98800, очень молодой яркой системы, очень напоминающей зодиакальные пылевые полосы в нашей Солнечной системе [102].

Результаты наших исследований по 107 протопланетным дискам оказались следующими [18]. Газопылевые диски наблюдаются у звезд главной последовательности спектральных классов А, F,



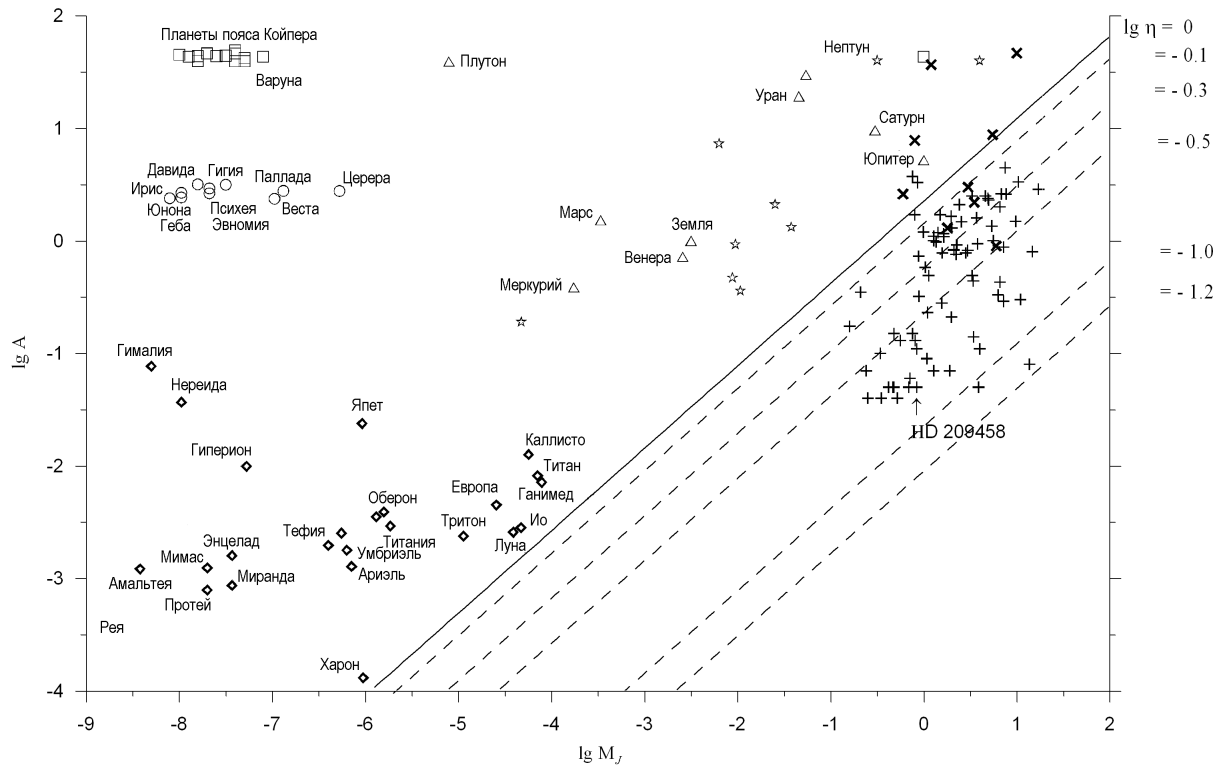
G и K и у звёзд типа  $\tau$  Тельца, спектральных классов K и M. Около 81% протопланетных дисков принадлежат центральным звездам типа  $\tau$  Тельца спектральных классов K7–K9. Остальные относятся к звездам главной последовательности, среди которых преобладают звезды спектрального класса A0. Подавляющая масса дисков находится в интервале  $0.01 - 0.1 m_{\odot}$  (с максимумом распределения —  $0.01 m_{\odot}$ ) с диаметрами менее 800 а.е. У звезд типа  $\tau$  Тельца диски имеют диаметры менее 50 а.е. (с максимумом распределения — 8 а.е.) и эффективной температурой менее 100 K. Качественно плотности вероятности распределения масс протопланетных дисков похожи на экспоненциальный или степенной законы, радиусов — на лог-нормальный закон. На интервале масс  $0.01 - 0.1 m_{\odot}$ , радиусы протопланетных образований от масс имеют зависимость

$$r(\text{а.е.}) = 150(m/m_{\odot})^{0.75}. \quad (12)$$

Явной зависимости светимости дисков от масс центральных звезд или дисков выявить не удалось.

Двойные звезды, как динамически связанные системы, начали изучать примерно 200 лет назад, с тех пор (1803 г.), как Гершелем впервые удалось отметить орбитальное движение у компонент Кастора. Примерно 40 лет спустя (1846 г.) Бессель впервые обнаружил и интерпретировал возмущения в собственных движениях Сириуса и Прокциона наличием невидимых спутников. В 1862 и в 1896 годах, соответственно, с помощью больших телескопов компоненты Сириуса и Прокциона были зафиксированы как звезды низкой светимости [16].

К 80-м годам прошлого века были открыты несколько десятков невидимых спутников у близких к Солнцу звезд [4, 5, 9, 16, 20, 29, 58, 78, 110, 143].



**Рис. 1.** Диаграмма «масса ( $\lg M_J$ ) — большая полуось орбит планет ( $\lg A$ )». Приведены обозначения для тел Солнечной системы:  $\triangle$  — большие планеты,  $\diamond$  — спутники больших планет,  $\circ$ ,  $\square$  — астероиды Главного Пояса и Пояса Койпера, соответственно. Внесолнечные планеты обозначены в зависимости от метода их открытия:  $+$  — лучевых скоростей,  $\times$  — астрометрическим,  $*$  — у пульсаров. Семейство прямых построено по формуле (8), с учетом выражений (9)–(11): сплошная линия соответствует полной «выработке» вещества ( $\lg \eta = 0$ ), пунктиром показаны примеры для частичной «выработки» вещества ( $0 < \lg \eta < -1.2$ ).

В соответствии с представлениями о планетах, что их массы недостаточно для образования путем самогравитации в фрагментирующем протоскоплении и проведенного соответствующего анализа [17], согласно критерию Рисса [27, 113] и оценки Лоу и Линден-Белла [101], наиболее вероятная граничная масса между субзвездами и планетами принадлежит интервалу  $0.003 \leq m_0/m_\odot \leq 0.007$ . В соответствие с этим, заведомо к планетам будем относить объекты с массами меньше  $0.003m_\odot$ , к субзвездам — с массами больше  $0.007m_\odot$ , к планетам или субзвездам — объекты, попадающие в интервал солнечных масс  $[0.003, 0.007]$ . Оценка Степински и Блэк [125] попадает в этот интервал солнечных масс  $[0.005, 0.007]$ , более низкий критерий получен Сучковым и Щекиновым [34] —  $0.0002 \div 0.002m_\odot$  за счет учета отвода тепла углеродом в фрагментирующем облаке.

В инфракрасном диапазоне методом спекл-интерферометрии было подтверждено существование невидимых спутников только у двух звезд [106]:  $\chi^1$  Ориона невидимый спутник Zkh 79 В имеет звездную массу, нижняя оценка которой  $0.17m_\odot$  [15, 142]. У Лаланд 21185 невидимый спутник имеет субзвездную, а возможно и планетную природу. По результатам Ван де Кампа его масса равна  $m = 0.02m_\odot$  [134]. Высокоточными позиционными наблюдениями, Гейтвуд добился точности лучше  $1''$  [70] и подтвердил наличие невидимого спутника у Лаланд 21185. Кроме того, его результаты не противоречат тому, что у этой звезды могут быть две водородно-гелиевые планеты с массами  $0.9m_J$  и  $1.6m_J$ , периодами  $P_1 = 5.8$  лет и  $P_2 = 30$  лет, удаленные, соответственно, от центральной звезды на 2.4 а.е. и 10 а.е. [71]. Наряду с этими данными, следует упомянуть ряд работ, согласно которым наличие спутников не было подтверждено [41, 52, 120].

Отсутствие детектирования невидимых спутников в видимом и близком ИК-диапазонах наводит на мысль об их низкой светимости, большом возрасте (оценок металличности для этой звезды нет [21]) и низкой эффективной температуре, поскольку она и радиус субзвезд с увеличением возраста, до  $\sim 10^{10}$  лет, существенно уменьшаются [17]. В работах по наблюдениям в ИК-диапазоне отмечали в системе VB 8 субзвездный компонент [107]:  $m \approx 0.01m_\odot$ ,  $R = 0.09R_\odot$ ,  $T_{\text{eff}} = 1360$  К и  $L = 3 \cdot 10^{-5}L_\odot$ . Астрометрические данные для этой системы противоречивы. Методом лучевых скоростей подтверждено наличие невидимого компонента с аналогичной массой,  $M \sin i = 10m_J$  [118]. Объект LHS 2924 оказался одиночной субзвездой (по-видимому, впервые открытой):  $M_V \sim 21^m$ ,  $m \sim 0.05m_\odot$ ,  $T_{\text{eff}} = 2450$  К,  $L \sim 10^{-5}L_\odot$  [112].

Наиболее достоверные данные об астрометрически невидимых спутниках получены из анализа собственного и орбитального движений 10 звезд ближе 10 пк [16]: у Проксимы, звезды Барнарда, двойной 61 Лебеда,  $\varepsilon$  Эридана, DM+59°1915, G 175–34, EV Ящерицы, двойной звезды Крюгер 60, G 202–45.

У Проксимы заподозрен невидимый спутник с орбитальным периодом  $P = 3.5$  года и с планетной массой  $m = 0.0018m_\odot$  на расстоянии 0.85 а.е. [109]. У звезды Барнарда заподозрено до трех планет ( $m_1 = 0.0012m_\odot$ ,  $m_2 = 0.0008m_\odot$ ,  $m_3 = 0.0006m_\odot$ ), вращающихся с орбитальными периодами  $P_1 = 26$  лет,  $P_2 = 12$  лет и  $P_3 = 7$  лет, соответственно, на расстояниях 5 а.е., 3 а.е., 2 а.е. от центральной звезды [135]<sup>2</sup>. У двойной 61 Лебеда (у компонента А два спутника с  $m_1 = 0.0035m_\odot$  и  $m_2 = 0.0055m_\odot$ ,  $P_1 = 6$  лет и  $P_2 = 12$  лет, у компонента В —  $m_3 = 0.003m_\odot$  и  $P_3 = 7$  лет) [10, 11, 109], один из компонентов соответствует планетным, а два — планетным или субзвездным параметрам. У  $\varepsilon$  Эридана астрометрическим методом заподозрена планета или субзвезда с массой  $m = 0.006 \div 0.05m_\odot$ , большой полуосью  $a = 0.019''$  и орбитальным периодом  $P = 25$  лет [97, 133, 134]. Согласно результатам, полученным методом лучевых скоростей, в системе имеется один, а возможно и два спутника с массами ( $M \sin i$ )  $0.86m_J$  и  $0.1m_J$  (?) [84, 118]. Звезда DM+59°1915 имеет невидимый спутник с субзвездными или планетными параметрами:  $m = 0.006m_\odot$ ,  $P = 5$  лет,  $a = 0.010''$  [42]. Субзвезды заподозрены у G 175–34 ( $m = 0.02m_\odot$ ,  $P = 23$  года,  $a = 0.070''$ ) [75, 83], EV Ящерицы ( $m = 0.009 \div 0.023m_\odot$ ,  $P = 28.9$  лет,  $a = 0.03''$  [97, 132, 134], двойной звезды Крюгер 60 ( $m = 0.01m_\odot$ ) [75]. У звезды Gl 623 (G 202–45) астрометрические параметры невидимого спутника соответствуют

<sup>2</sup>Гейтвуд, основываясь на своих наблюдениях на многоканальном компьютеризированном фотометре [69], считает ошибочными заключения Ван де Кампа о реальном существовании планет у звезды Барнарда.

субзвездным:  $m = 0.06 \div 0.08 m_{\odot}$ ,  $P = 3.75$  года,  $a = 0.05''$  [43, 98, 121, 134]. Спутник разрешен с помощью телескопа Хаббла как L-карлик [114], и данные подтверждены визуальными наблюдениями [50], которые согласуются с вышеприведенной оценкой масс.

К 10 сентября 2004 г. методом лучевых скоростей было обнаружено 129 невидимых спутника у 113 звезд (у 10 систем — два, у 2 — три, у 1 — четыре спутника), с массами  $(0.042 \div 16.9) m_J \sin i$  (где  $i$  — наклон плоскости орбиты планеты к картинной плоскости) [118]. Массы невидимых спутников звезд главной последовательности соответствуют водородно-гелиевым планетам-гигантам. Их параметры, включая планету с массой  $\approx 0.69 m_J$ , в системе HD 209458 [59, 60], которая открыта впервые как затменная система, с вычисленной средней плотностью  $0.38 \text{ г/см}^3$ , согласуются с моделями водородно-гелиевых планет, находящихся вблизи звезд.

*Планеты у пульсара* PSR B1257+12 [138–141] с массами  $2.8 m_{\oplus}$  и  $3.4 m_{\oplus}$  и большими полуосями орбит  $a = 0.47$  а.е. и  $0.36$  а.е. и периодами 98.22 и 66.54 суток, являются, скорее всего, силикатными или металлическими. Заподозренная третья планета с массой  $0.2 m_{\oplus}$  и периодом 25.34 сут — металлическая<sup>3</sup>. Четвертая планета с периодом  $\sim 170$  лет — водородно-гелиевая или ледяная. У пульсара PSR B0329+54 [63, 122] планета с  $m > 2 m_{\oplus}$ ,  $a = 7.3$  а.е. и  $P = 16.9$  лет, вероятно, ледяная или водородно-гелиевая. Водородно-гелиевая планета или субзвезда с массой  $\sim 5 m_J$ ,  $a \sim 35 - 60$  а.е. и  $P \sim 100$  лет, обнаружена у двойной системы пульсара PSR B1620–26 с белым карликом, находящегося в шаровом скоплении M4 [25, 49]. Среди возможных кандидатов на наличие у них планет фигурируют также пульсары PSR B0329+54 и PSR B1828–11 [25].

Беннетт и др. [54] по кривым блеска программы *MACHO*, обнаружили в системе 94–BLG–4 на расстоянии  $a \sim 1$  а.е. от М-карлика водородно-гелиевую планету или субзвезду с массой  $\sim 5 m_J$  и водородно-гелиевую планету в системе 95–BLG–3 с массой  $\sim 2 m_J$  на расстоянии  $a > 5 - 10$  а.е. В рамках этой же программы Беннетт и др. [55] обнаружили планету или субзвезду с массой  $3.5 \pm 1.8 m_J$ , вращающуюся вокруг двойной звездной системы, состоящей из К и М карликов, расстояние между которыми  $\sim 1.8$  а.е. Планета вращается вокруг них на расстоянии 7 а.е. Олброу и др. [45] оспарили эту интерпретацию и предложили иную, согласованную с данными Беннетт и др. [55], исключающую наличие планеты.

Райе и др. [115] обнаружили сильное усиление объекта 98–BLG–35, в направлении на центр Галактики. Есть основание для наличия в этой системе планеты с массой  $1 m_{\oplus}$  для массы линзы  $0.3 m_{\oplus}$ .

Из 100 событий, отслеженных группой PLANET, более 20 «ощутили» возмущения, приписываемые планетам с массами соизмеримыми с массой Юпитера [73]. На этом основании Гауди и др. сделали выводы, что планеты с массами  $1 m_J$  и  $a = 1.5 - 3$  а.е., а также планеты, массы которых  $3 m_J$  и  $a > 1 - 4$  а.е. встречаются в менее одной трети систем, что также справедливо и для планет с  $3 m_J$  и  $a > 1 - 4$  а.е. [72].

К полученным статистическим результатам следует отнести результаты Оллок и др. по БМО [46], EROS и MACHO, по полученным пределам для темного вещества в гало Галактики [47], Олброу и др., по пилотному проекту PLANET [44].

В заключение упомянем обнаруженные Лекавьер де Этан и др. [95, 96] и Бест и др. [56] изменения блеска, связанные, возможно, с планетами или кометными телами [57]. В частности, Грейди и др. отмечали наблюдения комет в системе HD 100546 [76].

В таблице 1 приведен список звезд (включая Солнце), у которых различными методами открыты спутники, массы которых попадают в интервал, ограниченный снизу массой Марса, соизмеримой с наименьшей массой невидимого спутника, открытого у пульсара PSR B1257+12b, и ограниченный сверху массами, приводимыми в результатах по поиску планет астрометрическим методом, ограниченным максимальными массами субзвезд —  $(0.0003 \div 80) m_J$ . В соответствии с вышеобсуждаемым критерием Рисса и оценками Лоу и Линден-Белла, массы 110 невидимых спутников соответствуют заведомо планетным, меньше  $3 m_J$ , где подавляющее число

<sup>3</sup>Существование этой планеты оспаривается [25].

из них — водородно-гелиевые. Ближайшая планета пульсара PSR B1257+12b, исходя из ее короткого орбитального периода и «перенесшая» стадию сверхновой центрального тела, вероятнее всего является металлической. Венера, Земля и Марс являются типичными силикатными планетами. Местоположение планет у PSR B1257+12d и PSR B1257+12c соответствует их силикатному или силикатно-металлическому, у PSR B0329+54b и PSR B1257+12e — ледяному или водородно-гелиевому составам. Местонахождение планеты 98-BLG-35b в системе не известно: исходя из ее массы, она может быть как металлической, так и силикатной, или даже ледяной. Остальные 102 планеты — водородно-гелиевые. Массы 33 водородно-гелиевых невидимых спутников попадают в интервал  $(3 \div 7)m_J$ , где находится наиболее вероятная граница «планета-субзвезда», 20 — типично субзвездные ( $m > 7m_J$ ).

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Постановка задачи о поиске планет различными методами, прозвучавшая в 70-х годах XX столетия, в значительной мере связана с решением задачи о распространенности планетных систем, подобных Солнечной и проблемы SETI. В первом случае, на конференции в Ницце, в связи с результатами, полученными Ван де Кампом [129–131], об открытых невидимых спутниках с планетными массами у звезды Барнарда, был поставлен вопрос: является ли звезда Барнарда другой солнечной системой? [7, 35]. Эти же результаты Ван де Кампа [129–131] были прорекламированы на конференции в Ереване Голдом [9]. Чтобы ответить на вопрос о распространенности внеземных цивилизаций, необходима оценка вероятности существования планетных систем в Галактике, а к тому времени, достоверно была известна лишь одна планетная система — наша Солнечная. Поэтому уже 10 лет спустя были сформулированы основные идеи поиска планет у звезд и пути их реализации [4, 5, 24, 29], опубликованы кандидаты звезд, у которых могут быть планетные системы [20], и список звезд, у которых открыты невидимые спутники планетных масс [4]. Для координации работ в этом направлении в Советском Союзе в рамках АН СССР была даже создана специальная рабочая группа [14].

Для реального обнаружения неастрометрическими методами понадобилось еще 20 лет, после чего в 1995 году появилось первое сообщение об открытии планеты у звезды 51 Peg [105]. С тех пор прошло еще около 10 лет.

Каков результат более чем 30-летней работы над решением проблемы о распространенности планетных систем в Галактике?

1. Разработка вопроса об определении понятия «планета» [2] привело к пониманию классификации планет [1, 12, 67] и их атмосфер [126].

2. На смену «субъективной вероятности» существования планетных систем [39] пришли оценки вероятности, основанные на наблюдательных данных и разработках сценариев образования планет [3, 36, 86].

3. В последние 20 лет начаты открытия протопланетных образований. Это, как и планетные системы, довольно распространенный феномен, появление которого тесно связано с очагами звездообразования. Причем, стало ясно, что образование протопланетного диска не всегда ведет к последующему образованию из него планет. Большинство звезд с открытыми протопланетными дисками — звезды типа  $\tau$  Тельца и молодые звезды главной последовательности (с частотой встречаемости  $\approx 4:1$ ).

4. Проблема существования планетных систем тесно связана с феноменом субзвезд — промежуточных по массе тел между звездами и планетами [2]. До сих пор нет согласия среди специалистов, и нет достаточных теоретических разработок и наблюдательных данных о граничной массе планета-субзвезда. От выяснения значения этой массы зависят: существенные детали в сценариях формирования не только Солнечной, но и звездных, субзвездных и планетных систем; определения списков субзвезд и планет Галактики, их долевое содержание; масса темной материи Галактики.

5. Начаты работы по учету эффектов селекции астрофизических и кинематических характе-

ристик планетных систем [40], которые проявляются в трансформации функций распределения. Установлено ряд важных статистических связей, зависимостей и эффектов для протопланетных дисков и планетных систем. Наиболее интересные из них, следующие.

- Получено соотношение, позволяющее вычислить вероятность открытия планеты на расстоянии  $r$  от звезды при заданных массах и пороговой величине лучевой скорости, и найдена связь между истинным и наблюдаемым распределениями величины  $r$  [40].

- Прослеживается связь между радиусами протопланетных дисков и их массами на интервале  $0.01 \div 0.1 m_{\odot}$ :  $r(\text{a.e}) = 150(m/m_{\odot})^{0.75}$ .

- У звезд с экзопланетами, открытыми методом лучевых скоростей, проявляется повышенная металличность по сравнению со звездами поля Галактики<sup>4</sup>.

- Для открытых кратных планетных систем, включая Солнечную, находит проявление подобия структуры орбит планет, выражающаяся в подчинении закону Тициуса–Бодэ [8]:  $a_n = a_{n-1} \alpha^{-1}$ , где  $a_{n-1}$ ,  $a_n$  — большие полуоси орбит предыдущей и последующей планет,  $\alpha \approx 0.6$ .

6. Подтверждена гипотеза о возможности существования планет в кратных звездных системах: у компонент широких двойных пар (16 Cyg B, 61 Cyg A, 61 Cyg B, Gl 777 A, HD 41004 A, HD 178911 B) и у устойчивых тройных систем (Проксимы).

7. Неожидаанные свойства планет и планетных систем оказались следующие:

- Наличие протопланетных дисков наблюдается не только у звезд, но и у субзвезд, со статистически значимым долевым содержанием (с наблюдаемой частотой встречаемости  $(3 \div 6) : 1$ ).

- Большинство открытых водородно-гелиевых планет имеют короткопериодические орбиты.

- Наблюдается миграция планет от периферии к центру.

- Близкие к центральным звездам водородно-гелиевые планеты проявляют кометоподобность из-за существенного испарения их атмосфер.

Имеются указания, что поглощение короткопериодических планет на заключительном этапе эволюции звезд — стадии гигантов, не является короткоактовым процессом, а допускает возможность вращения планет вблизи их фотосфер [30].

- В Солнечной системе основная доля (по числу) оказалась ледяными планетами [144] (с наблюдаемой частотой встречаемости  $\sim 1 : 10$ ), которые сосредоточены на периферии планетной системы.

- В пределах 3.4 пк, где находятся 13 ближайших звездных систем, включая Солнце, у 7 запознаны невидимые спутники [143] с планетными или субзвездными массами.

8. Изучение обсуждаемой проблемы в настоящее время ведется по широкому спектру вопросов. Появилось ряд принципиально новых направлений в исследованиях. Из мало освещенных или неосвещенных в данной работе, отметим следующие. Открытые планетные системы позволяют уже сегодня по наблюдательным данным ставить и решать задачи о:

- долевым числе звезд с открытыми планетами [62];

- шкале времени, необходимой для образования дисков с последующим формированием планет [94];

- структуре планетных орбит [61] и проявляющихся резонансах [80, 145], их упорядоченности [51], устойчивости в одиночных [137] и двойных системах [108], включая орбиты и атмосферы планет конкретных систем [88, 91];

- выживаемости короткопериодических водородно-гелиевых планет и скоростях диссипации их атмосфер [137];

- распределении металличностей и элементов у звезд с экзопланетами [66, 77, 117] и их корреляции с орбитальными периодами экзопланет [87].

9. Наиболее важными задачами, которые требуют решения, видятся следующие:

---

<sup>4</sup>Фишер предложил объяснение этому эффекту за счет падения на звезды планет [68]. Проведенный анализ привел его к выводу, что при отсутствии у этих звезд планет, металличность центральных звезд была бы меньшей. Обнаруженная асимметрия распределения металличностей может быть связана с эффектами селекции наблюдательного материала: спектроскопические измерения наиболее надежны для FGK-карликов. Металличность этих звезд ожидается порядка солнечной и более.

- построение моделей планет различных типов и установление интервалов их основных астрофизических характеристик в зависимости от элементного состава, возраста и расстояния от центральной звезды;

- выяснения соответствия максимальной массы планетных масс минимальным массам субзвезд;

- установление роли и скорости миграции планет в эволюционирующем протопланетном диске и вблизи фотосфер гигантов;

- составление каталогов протопланетных и планетных систем, открытых различными методами поиска;

- создание каталога звезд, субзвезд и планетных систем, содержащихся в радиусе 10 пк с целью определения достоверных оценок долевых содержаний субзвезд и планет в диске Галактики.

Автор считает необходимым выразить благодарность Н.А.Шахт за обсуждение проблемы астрометрических двойных.

1. Александров Ю.В., Евсюков Н.Н. // Вісник Астрон. школи. — 2001. — **2**, № 1. — С. 17.
2. Александров Ю.В., Захожсай В.А. // Астрон. вестник. — 1980. — **14**, № 3. — С. 129.
3. Александров Ю.В., Захожсай В.А. // Астрон. вестн. — 1983. — **17**, № 2. — С. 82.
4. Александров Ю.В., Захожсай В.А. // Астрон. вестн. — 1983 — **17**, № 3. — С. 131.
5. Александров Ю.В., Захожсай В.А. // В кн.: Проблемы поиска жизни во Вселенной. — М.: Наука, 1986. — С. 201.
6. Баранский А. // Вселенная, пространство, время. — 2004. — № 1. — С. 40.
7. Блэк Д., Саффолк Г.К.Д. // В кн.: Происхождение Солнечной системы / под ред. Г.Ривса, пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — С. 496.
8. Ваврух М.В., Тишко Н.Л. // Журн. фіз. досл. — 2002. — **6**, № 4. — С. 414.
9. Голд Т. // В кн. Проблема СЕТИ (Связь с внеземными цивилизациями) / под ред. С.А.Каплана. — М.: Мир, 1975. — С. 15.
10. Дейч А.Н., Орлова О.Н. // Астрон. журн. — 1977. — **54**, вып. 2. — С. 327.
11. Дейч А.Н. // Письма в Астрон. журн. — 1978. — **4**, № 2. — С. 95.
12. Євсюков М.М., Александров Ю.В. Хімія і геологія планет. — Харків: Крок, 2000. — 191 с.
13. Жарков В.Н., Трубицын В.П. Физика планетных недр. — М.: Наука, 1980. — 448 с.
14. Захожсай В.А. // Астрон. вестн. — 1982. — **16**, № 1. — С. 63.
15. Захожсай В.А. // Кинем. и физ. неб. тел. — 1994. — **10**, № 2. — С. 68.
16. Захожсай В.А. // Extension and Connection of Reference Frames using CCD ground-based Technique, Abstracts. — Nikolaev (Ukraine), October 10–13, 2001. — P. 8.
17. Захожсай В.А. // Вісн. Астрон. школи. — 2002. — **3**, № 2. — С. 81.
18. Захожсай В.А. // Наукова конференція “Астрономічна школа молодих вчених”. Програма і тези доповідей. — Біла Церква (Україна), 20–23 травня 2003 р. — С. 15.
19. Захожсай В.А., Котелевський С.И., Педаш Ю.Ф. и др. // Кинем. и физ. неб. тел. — 2001. — **17**, № 1. — С. 3.
20. Захожсай В.А., Рузмайжина Т.В. // Астрон. вестн. — 1986. — **20**, № 2. С. 128.
21. Захожсай В.А., Шапаренко Э.Ф. // Кинем. и физ.неб.тел. — 1996. — **12**, № 2. — С. 20.
22. Изображение с высоким разрешением протопланетного диска, обращающегося вокруг звезды. // В кн.: Физика за рубежом, Серия А. — М.: Мир, 1986. — С. 240.
23. Котелевський С.І., Педаш Ю.Ф., Захожсай В.А., Писаренко, А.І. // Кинем. и физ. неб. тел. — 2004. — **20**, № 2. — С. 118.
24. Ксанфомалити Л.Н. // В кн.: Проблема поиска жизни во Вселенной. — М.: Наука, 1986. — С. 187.



25. Ксанфомалити Л.Н. // Астрон. вестн. — 2000. — **34**, № 6. — С. 529.
26. Ксанфомалити Л.В. // Тезисы докл. Всерос. астрон. конференции ВАК-2004: Горизонты Вселенной. — (МГУ, ГАИШ, 3–10 июня 2004 г.) / Тр. ГАИШ. — 2004. — **LXXV**. — С. 5.
27. Марочник Л.С., Сучков А.А. Галактика. — М.: Наука, 1984. — 392 с.
28. Масевич А.Г., Тутуков А.В. Эволюция звезд: теория и наблюдения — М.: Наука, 1988. — С. 280.
29. Мороз В.И. // В кн.: Проблема поиска внеземных цивилизаций. — М.: Наука, 1981. — С. 171.
30. Рудницкий Г.М. // Тезисы докл. Всерос. астрон. конференции ВАК-2004: Горизонты Вселенной. — (МГУ, ГАИШ, 3–10 июня 2004 г.) / Тр. ГАИШ. — 2004. — **LXXV**. — С. 63.
31. Рузмайкина Т.В. // Письма в Астрон. журн. — 1981. — **7**. — С. 188.
32. Слюта Е.Н., Воробаев С.А. // Астрон. вестник. — 1993. — **27**, № 1. — С. 71.
33. Соколов Л.Л. // Астрон. вестн. — 2002. — **36**, № 5. — С. 435.
34. Сучков А.А., Щекинов Ю.А. // Астрон. журн. — 1975. — **52**. — С. 662.
35. Тер Хаар Д. // В кн. Происхождение Солнечной системы / под ред. Г.Ривса, пер. с англ. — М.: Мир, 1976. — С. 502.
36. Тутуков А.В. // Астрон. журн. — 1991. — **68**. — С. 837.
37. Тутуков А.В. // Астрон. журн. — 1998. — **75**. — С. 119.
38. Тутуков А.В. // Астрон. журн. — 2002. — **79**, № 8. — С. 762.
39. Файн Т. // В кн. Проблема СЕТИ (Связь с внеземными цивилизациями) / под ред. С.А.Каплана. — М.: Мир, 1975. — С. 324.
40. Холшевников К.В., Кузнецов Э.Д. // Астрон. вестн. — 2002. — **36**, № 6. — С. 504.
41. Шахт Н.А. // Астрон. цирк. — 1978. — **736**. — С. 5.
42. Шахт Н.А. // Письма в Астрон. журн. — 1984. — **10**, № 10. — С. 765.
43. Шахт Н.А. Автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Санкт-Петербург: ИПА РАН, 2002. — 32 с.
44. Albrow M.D., Beaulieu J.P., Birch P., et al. // Astrophys. J. — 1998. — **509**. — P. 687.
45. Albrow M.D., Beaulieu J.P., Caldwell J.A.R., et al. // Astrophys. J. — 2000. — **534**. — P. 894.
46. Alcock C., Allsman R. A., Alves D., et al. // Astrophys. J. — 1997. — **486**. — P. 697.
47. Alcock C., Allsman R.A., Alves D., et al. // Astrophys. J. — 1998. — **499**. — L9.
48. Artymowicz P. // Ann. Rev. Earth Planet Sci. — 1997. — **25**. — P. 175.
49. Arzoumanian Z., Joshi K., Rasio F.A., Thorsett S.E. // In Pulsar: Problems and Progress. IAU Colloquium 160. ASP Conf. Series, S.Johnston, M.A.Walker, M.Bailes ed. — San Francisco, 1996. — **105**. — P. 525.
50. Barbieri C., Demarchi G., Nota A., et al. // Astron. Astroph. — 1996. — **315**. — P. 418.
51. Barkin J. // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 74.
52. Bastian T.S., et al. // Astrophys. J. — 2000. — **545**. — P. 1058.
53. Beckwith S.V.W., Sargent A.I. // Nature. — 1996. — **383**, № 6596. — P. 139.
54. Bennett D.P., Alcock C., Allsman R. A., et al. // In D R Soderblom, ed., Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions ASP Conf. Series. — San Francisco, 1997. — **119**. — P. 95.
55. Bennett D.P., Rhie S.H., Becker A.C., et al. // Nature. — 1999. — **402**. — P. 57.
56. Beust H., Lagrange A.M., Crwaford I.A., et al. // Astron. Astrophys. — 1998. — **338**. — P. 1015.
57. Beust H., VidalMadjar A., Ferlet R., LagrangeHenri A.M. // Astrophys. Space Sci. — 1994. — **212**. — P. 147.
58. Black D.C. // Space Science Rev. — 1980. — **25**, № 1. — P. 35.
59. Charbonneau D., et al. // Astrophys. J. — 2000. — **529**. — L45.
60. Charboneu D. // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 76.

61. *Chatterjee T.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 76.
62. *Crether D.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 81.
63. *Demianski M., Proszynski M.* // Nature. — 1979. — **282**, № 5737. — P. 383.
64. *Di Folco E.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 66.
65. *Dole S.* // Icarus. — 1970. — **13**. — P. 500.
66. *Ecu villon A.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 78.
67. *Evsukov N.N., Zakhzhaj V.A., Psaryov V.A.* // Odessa Astron. Publ. — 2001. — **14**. — P. 205.
68. *Fisher D.A.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 67.
69. *Gatewood G., Eichhorn H.* // Astron. J. — 1973. — **78**. — P. 769.
70. *Gatewood G., de Jonge J.K.* // Astrophys. J. — 1995. — **450**. — P. 364.
71. *Gatewood G.* // Bull. American Astron. Soc. — 1996. — **28**. — P. 885.
72. *Gaudi B.S., Albrow M.D., An J.H., et al.* // In J.W.Menzies, P.D.Sackett, eds., Microlensing 2000: A New Era of Microlensing. — Surveys ASP Conf. Series. — San Francisco, 2000.
73. *Gaudi B.S., Sackett P.D.* // Astrophys. J. — 2000. — **528**. — P. 56.
74. *Gimenes A.* // Astron. Astrophys. — 2000. — **356**. — P. 213.
75. *Gliese W.* Catalogue of nearby stars. — Karlsruhe: Braun, 1969. — 118 p.
76. *Grady C.A., Sitko M.L., Bjorkman K.S., et al.* // Astrophys. J. — 1997. — **483**. — P. 449.
77. *Gray R.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 81.
78. *Greenstein J.L., Black D.* // NASA. — 1977. — SP-419. — P. 53.
79. *Greaves J.S., Holland W.S., MoriartySchiven G., et al.* // Astrophys. J. — 1998. — **506**. — L133.
80. *Gusev A.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 81.
81. *Haisch K.E., Lada E.A., Lada C.J.* // astro-ph/0101486. — 2001.
82. *Halbwachs J.I., Aronon F., Mayor M., et al.* // Astron. Astrophys. — 2000. — **355**. — P. 581.
83. *Harrington R.S., Dahn C.C.* // Astron. J. — 1980. — **85**, № 4. — P. 454.
84. *Hatzes A.P., Cochran W.D., McArthur B., et al.* // Astrophys. J. — 2000. — **544**. — L145.
85. *Heppenheimer T.A.* // Icarus. — 1974. — **22**. — P. 436.
86. *Hohlfeld R.G., Terzian Y.* // Icarus. — 1977. — **30**. — P. 598.
87. *Jones H.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 84.
88. *Ji J.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 84.
89. *Kalas P., Jewitt D.* // Nature. — 1997. — **386**. — P. 52.
90. *Kalas P.* // Earth, Moon and Planets. — 1998. — **81**. — P. 27.
91. *Kiseleva-Eggleton L.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 84.
92. *Koresko C.D.* // Astrophys. J. — 1998. — **507**. — L145.
93. *Laughlin G., Adams F.C.* // Astrophys. J. — 1999. — **526**, № 2. — P. 881.
94. *Lawson W.A.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 85.
95. *Lecavelier des Etangs A., Scholl H., Roques F., et al.* // Icarus. — 1996. — **123**. — P. 168.
96. *Lecavelier des Etangs A., VidalMadjar A., Burki G., et al.* // Astron. Astrophys. — 1997. — **328**. — P. 311.
97. *Lippincott S.L.* // Colloque Astronomique Europeen, Coimbra (Portugal). — October, Pino Torinese. -1974. — P. 131.
98. *Lippincott S.L., Borgmann E.R.* // Publ. Astron. SoC. Pacif. — 1978. — **90**, № 534. — P. 226.

99. *Lissauer J.J.* // In C.B. Cosmovici, S. Bowyer, D. Werthimer, eds. — Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe. — IAU Coll. — Editrice Compositori, Italy, 1997. — **161**. — P. 289.
100. *Liu M.C., Najita J., Tokunaga A.T.* // *Astrophys. J.* — 2003. — **585**. — L372.
101. *Low C., Lynden-Bell D.* // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* — 1976. — **176**, №2. — P. 367.
102. *Low F.J., Hines D.C., Schneider G.* // *Astrophys. J.* — 1999. — **520**. — L45.
103. *Marcy G.W., Butler P., Vogt S., et al.* // Bioastronomy 99 Conference. Abstracts. — Hawaii, 2-6 August, 1999. — P.95.
104. *Marcy G.W., Butler R.P., Fisher D., et al.* // <http://exoplanets.org>. — 2002.
105. *Mayor M., Queloz D.A.* // *Nature*. — 1995. — **378**. — P. 355.
106. *McCarthy D.W.* // In: Colloquium №76 IAU, Prepr. Steward Observ. Univ. Arizona. — Tucson, Arizona 85 721. — USA. — 1983, №467. — 6 p.
107. *McCarthy Jr.D.W.* // *Astrophys. J.* — 1985, March 1. — **290**. — L9.
108. *Musiak Z.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 88
109. *Niedzielski A.* // *Urania*. — 2001, **4**. — P. 156.
110. *Ninkovic S., Popović G.M.* // *Bull. Obs. Astron.* — Belgrade. — 1987, No 137. — P. 44.
111. *Perryman M.A.C.* // Preprint Rep. Prog. Phys. — 31 May 2000. — P. 1.
112. *Probst R.G., Liebert J.* // *Astrophys. J.* — 1983. — **274**, №1. — P. 245
113. *Rees M.J.* // *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* — 1976. — **176**, №3. — P. 483.
114. *Reid N.* // *Astrophys. J.* — 1999. — **521**. — P. 613.
115. *Rhie S.H., Bennett D.P., Fragile P.C., et al.* // *Bull. Amer. Astron. Soc.* — 1998. — **193**. — P.10805.
116. *Robinson L.J.* // *Sky and Telescope*. — 1984, January, 4. — P. 4.
117. *Sadakane K.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 91
118. *Schneider J.* // <http://www.obspm.fr/planets>. — 2004, September, 10.
119. *Schneider J.* // *C.R. Acad. Sci. Paris*. — 1999. — **327**. Serie IIb. №6. — P. 621.
120. *Schroder D.J. et al.* // *Astron. J.* — 2002. — **119**. — P. 906.
121. *Shakht N.A.* // *Proc., Symp. IUA* — 1995. — **166**, — P. 359.
122. *Shabanova T.* // *Astrophys. J.* — 1995. — **453**, №2. — P. 779.
123. *Smith B.A., Terrell R.J.* // *Science*. — 1984. — **226**, №4681. — P. 1421.
124. *Soker N.* // *Mon. Not. R. Astr. Soc.* — 1999. — **306**, — P. 806.
125. *Stepinski T.F., Black D.C.* // *Astron. Astrophys.* — 2000. — **356**. — P. 903.
126. *Sudarsky D., Burrows A., Pinto P.* // *Astrophys. J.* — 2000. — **538**. — P. 885.
127. *Tutukov A.V.* // Modern problems of stellar evolution, Ed. D.S.Wiebe. — 1998. — P.16.
128. *Udry S., Mayor M.* // *Lecture notes in physics: Astrobiology*. — Springer Verlag, 2002.
129. *Van de Kamp P.* // *Astron. J.* — 1963. — **68**. — P. 515.
130. *Van de Kamp P.* // *Astron. J.* — 1969. — **74**. — P. 238.
131. *Van de Kamp P.* // *Astron. J.* — 1969. — **74**. — P. 757.
132. *Van de Kamp P., Wortn M.D.* // *Astron. J.* — 1972. — **77**, №9. — P. 762.
133. *Van de Kamp P.* // *Astron. J.* — 1974. — **79**, №4. — P. 491.
134. *Van de Kamp P.* // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 1975. — **13**. — P. 295.
135. *Van de Kamp P.* // *Astron. J.* — 1975. — **80**, №8. — P. 658.
136. *Weinberger A.J., Becklin E.E., Schneider G. et al.* // *Astrophys. J.* — 1999. — **525**. — L53.

137. *Weiss W.W.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 94.
138. *Wolszcan A., Frail D.A.* // Nature. — 1992. — **355**. — P. 145.
139. *Wolszcan A.* // Astrophys. Space Sci. — 1994. — **212**, № 1. — P. 67.
140. *Wolszcan A.* // Science. — 1994. — **264**. — P. 538.
141. *Wolszcan A.* // In: Planets Beyond the Solar System and the Next Generation of Space Missions / D.R.Soderblom ed. — San Francisco, 1997. — ASP Conf. Series. — **119**. — P. 135.
142. *Zakhozaj V.A.* // <http://simbad.u-strasbg.fr/cgi-bin/cdsbib?1979VKha..190...52z>.
143. *Zakhozaj V.A.* Extension and connection of reference frames using ground based CCD technique. — Nikolaev, 2001. — P. 274.
144. *Zakhozaj V.A., Krugly Yu.N., Pisarenko A.I., Psaryov V.A.* // International Conference “Order and Chaos in Stellar and Planetary Systems”, Abstracts. — Saint Petersburg, August 17–24, 2003. — P. 65.
145. *Zhou Ji-lin.* // Abstract book 25th General Assembly IAU. — Sydney, 13–26 July, 2003. — P. 96

Поступила в редакцию 14.10.2004