

СОЛНЕЧНАЯ И СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ: ПРОИСХОЖДЕНИЕ, ЭВОЛЮЦИЯ, КАТАСТРОФЫ, И ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Ю.В. Баркин (barkin@sai.msu.ru)

(Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга)

Абстракт. В свете последних достижений по изучению тел солнечной системы и новых планетных систем с единых позиций изучаются фундаментальные космогонические проблемы: формирование планетных и спутниковых систем, их эволюция, катастрофические события в жизни Солнечной системы, общие закономерности устройства и эволюции планетных, экзопланетных и спутниковых систем. В основу исследования положена теория происхождения Солнечной системы А.А. Маракушева [8] и малоизвестная теория циклического планетогенеза Л.И. Панкуля [10]. Единение указанных фундаментальных подходов позволяет воссоздать картину основных этапов жизни протопланет и планет солнечной системы, восстановить крупнейшие катастрофы, которые имели место на ранних этапах формирования Солнечной системы. Установлено важное эмпирическое правило поясной иерархической структуры планетных и спутниковых систем, сыгравшее важную роль при историческом анализе эволюции и катастроф в этих системах. В частности указаны орбиты, являющиеся потенциальными для новых объектов в экзопланетных, солнечной и в спутниковых системах.

1. О теориях происхождения Солнечной системы. В последние два года (2000, 2001) одно за другим следуют открытия новых планетных систем у звезд главной последовательности. В настоящее время общий список открытых экзопланет составляет 74 (на октябрь 2001, [6], [7],[14]). Экзопланеты, по своим физическим характеристикам за частую похожие на Юпитер, во многих случаях характеризуются большими эксцентриситетами своих орбит и совершают движение на близких расстояниях от материнской звезды. Присутствие экзопланетных тел на низких орбитах не удается объяснить в рамках «классической» теории многостадийного аккреционного образования планет [11], [13]. Естественно, что открытия экзопланет стимулировало разработки новых теорий происхождения планетных систем, к тому же эта теория и сама испытывала кризис в своем развитии независимо от современных открытий [3], [7]. В данной работе мы не будем рассматривать работы по теории происхождения планетных систем, выполненные в последние годы, а обратимся к сравнительному анализу двух теорий, разработанных А.А. Маракушевым [8] и Л.И. Панкулем [10]. Эти работы были выполнены до эры открытий экзопланет, но отмечены важными предсказаниями устройства планетных систем на ранних и последующих стадиях их развития. Фактически оба автора блестяще предсказали наличие массивных экзопланет-гигантов, подобных современному Юпитеру, в том числе вблизи материнской звезды [8], [9]. Л.И. Панкуль приводит даже оценки массы подобных тел до 10-20 масс Юпитера, что хорошо согласуется с современными данными по экстропланетам [10]. А.А. Маракушев весьма аргументировано показал, что планеты земной группы на ранних стадиях развития также представляли собой планеты-гиганты, а в современную эпоху являются как бы ядрами своих предшественниц. Л.И. Панкуль установил ряд закономерностей в распределении и эволюции орбит планет солнечной системы и фактически разработал эффективный метод реставрации катастрофических событий в Солнечной системе на протяжении всей истории ее существования. В частности он предсказал, что Плутон является двойной планетой за десять лет до открытия Харона [10]. Именно эти положения теории Л.И. Панкуля изучаются, развиваются и дополняются в данной работе. Важный интерес представляет детальный сравнительный анализ теорий А.А. Маракушева и Л.И. Панкуля, которые, не смотря на

некоторые коренные различия, содержат много общих формулировок и выводов, хорошо согласующихся с современными данными. Это мы планируем сделать в следующей более емкой работе, а здесь ограничимся лишь схематическим изложением и сравнением указанных теорий, которые в будущем должны получить усовершенствование и развитие.

А.А. Маракушев и Л.И. Панкуль по разному видят процесс формирования планет солнечной системы, но одинаковым образом интерпретируют процессы формирования спутников планет. По А.А. Маракушеву образование планет-гигантов происходило не в результате аккумуляции железо-каменного (метеоритного) вещества, как предполагалось метеоритными гипотезами, а путем аккреции ледяных, содержащих космическую пыль планетозималей, сходных по физическому состоянию с кометами [9]. Согласно этой концепции стяжение огромных масс ледяного вещества сопровождалось их гравитационным сжатием с подъемом температуры (до 20000 К в Юпитере) и полным плавлением. По Л.И. Панкюлю схема образования планет (в результате отделения сгустков материи при быстром вращении протосолнца и циклически-ступенчатом сокращении его радиуса) по своей сути близка к классической схеме П. Лапласа. Он полагает, что процессы образования планет-гигантов и последующего формирования спутников были совершенно аналогичны [10]. И те и другие происходили при гравитационном сжатии Протосолнца (протопланет) в результате отделения или выбросов материи из верхних слоев материнского тела. По А.А. Маракушеву развитие расплавленной не смесимости приводило к формированию тяжелых ядер планет. Это приводило к вариациям угловой скорости вращения планеты, к развитию неустойчивых областей вблизи ее поверхности и к последующему отрыву и выбросу масс [8], [9].

2. О механизмах планетогенеза и спутникогенеза. Можно предположить, что именно на этом этапе активно начал проявлять себя механизм относительных поступательных смещений оболочек планет-гигантов с формирующимися железно-силикатными ядрами [2]. Различия в динамических сжатиях ядра и других оболочек (а внешние оболочки были сжаты сильнее) приводили к возникновению гигантских усилий взаимодействия между ними, которые приводили к вариациям напряженного состояния вещества, к вариациям динамического строения и как следствие к значительным вариациям угловой скорости вращения планеты. При относительном радиальном смещении центров масс оболочек одна из полусфер планеты подвергалась интенсивному воздействию (усилению напряженного состояния), а противоположна - его ослаблению. Гипотеза П. Лапласа предполагает циклическое отделение от вращающегося Протосолнца колец материи. Л.И. Панкуль также предлагает механизм ритмичного возникновения скручивающихся и отделяющихся сгустков материи от быстровращающегося гигантского Протосолнца [10]. Предложенный механизм взаимодействия оболочек в принципе может приводит к отделению или взрывному выбросу масс вдоль определенных направлений в теле Протосолнца (преимущественно в плоскости его экватора). Однако, А.А. Маракушев считает, что отделение масс от вращающегося небесного тела происходило только при формировании спутников планет-гигантов, а формирование- аккреция самих планет осуществлялось по особому сценарию. Наряду с указанным механизмом важную роль в формировании планет и спутников могли играть и другие небесно-механические механизмы. На наш взгляд недостаточно изученным является механизм асимметричного прилива, характеризуемый приливным потенциалом первого порядка. Его происхождение связывается с дополнительными членами в классическом выражении приливной силы, вызванными, например, дополнительным ускорением центра масс деформируемого небесного тела из-за его несферичности. Эксцентricность эластичной мантии и эксцентricное положение центров масс ядра и мантии также приводят к дополнительным членам приливной силы указанной структуры [1]. Недостаточно изучена роль других неинерциальных составляющих в решении уравнений теории упругости (кориолисовых и переносных сил инерции). Другими словами целый ряд положений классической теории приливов нуждается в дальнейшем изучении и развитии.

3. Регулярная структура планетных и спутниковых систем.

3.1 Правило иерархии орбит и их поясного группирования. На основных этапах развития планеты (спутники) формировались группами (обозначим их O, A, B, C, D). Группы A, B, C содержат по пять планет и являются основными для Солнечной системы. Планеты-компаньоны в каждой группе обозначим буквами $A_i, B_i, C_i, \dots (i = 1, 2, 3, 4, 5)$. В группу A условимся включать первую полную группу с пятью протопланетами, ближайшую к материнской звезде. Неполная группа O в настоящее время не сохранилась. Весьма вероятно, что на ранних стадиях существовали протопланеты O_1, O_2 . Первая из них (ее мы условно назвали Протоикар) по-видимому погибла в результате сближения с Протомеркурием (см. п. 4). Три основные группы планет A, B, C были заполнены полностью, но, как уже отмечалось, в ряде случаев протопланеты претерпели катастрофические изменения. Более того имеются свидетельства в пользу того, что группа C имеет расширенный характер, а число ее компаньонов может быть значительно больше. На это указывают современные данные об орбитах так называемых малых тел-кентавров с трансеплутоновым расположением афелиев орбит (см. табл. 1, 2).

Согласно установленному правилу расстояния между орбитами соседних компаньонов данной группы являются одинаковыми. Обозначим их через $\Delta_O, \Delta_A, \Delta_B, \Delta_C$ и т.д. Внешняя и внутренняя группы компаньонов могут насчитывать как меньше, так и значительно больше пяти компаньонов, но расстояние между соседними из них - постоянно. Таким образом, в центральной части располагаются основные регулярные группы планет. Панкуль Л.И. [10] указал три таких группы для системы Солнца (15 протопланет). Возможно, что это наиболее распространенная структура и у планетных систем других звезд. Это положение мы используем при моделировании орбит планетных систем пульсаров PSR 1257+12, PSR 1828-11 и звезды Ups And [14]. Тем не менее в спутниковых системах достаточно уверенно выделяются четыре и более полных групп. Вместо группы O для спутников используется расширенная группа кольцевых структур r и малых внутренних спутников r_j (табл. 3-6). В иерархической структуре распределения орбит планет звезды Ups And введена даже вторая внутренняя группа планет o_i (см. табл. 2).

Для аналитического описания указанных закономерностей введем в рассмотрение большие полуоси орбит планет в указанных выше группах компаньонов $a_{oi}, a_{Ai}, a_{Bi}, a_{Cj}, a_{Dj} (i = 1, 2, 3, 4, 5; j = 1, 2, \dots)$. Правило планетных расстояний можно записать в следующем виде:

$$a_{ZI} = a_{Z0} + I \cdot \Delta_Z (I = i, j), \text{ где } Z = o, O, A, B, C, D, \quad (1)$$

а межорбитальные расстояния удовлетворяют фундаментальным соотношениям:

$$36\Delta_o = 6\Delta_O = \Delta_A = \Delta_B / 6 = \Delta_C / 36 = \Delta_D / 216 = 0.267 \text{ a.e.} \quad (2)$$

и для удобства в формуле (1) использованы обозначения:

$$a_{O0} = a_{o5}, a_{A0} = a_{O5}, a_{B0} = a_{A5}, a_{C0} = a_{B5}, a_{D0} = a_{C5}. \quad (3)$$

Из формул (1)-(3) следует, что для установления указанной иерархической структуры планет достаточно указать значение большой полуоси одной, но конкретной планеты (a_{A1} например) и определить лишь один характерный дистанционный параметр, например Δ_A .

3.2 Природа закономерностей в планетных расстояниях трех групп планет [10]. Согласно гипотезе Л.И. Панкуля Протосолнце ритмически сжималось на ранних стадиях звездной эволюции (до выхода на главную последовательность), производя в согласованном ритме выбросы и отделения планетных (или лучше сказать протопланетных) масс. В результате формировалась планетная система со строго упорядоченной структурой и определенной иерархией расположения орбит, которая в значительной степени сохранилась и в современную эпоху. Закономерности в планетных расстояниях (см. п.3.1) выделенных трех групп планет (с учетом позднейших нарушений в планетной системе) вытекают из прямой пропорциональности современных значений величин $p(M + m)$ исходным

значениям $R_k M_k$ в фазах планетогенеза (здесь p - величина параметра современной орбиты планеты с массой m ; R_k - величина экваториального радиуса Протосолнца в фазах предельно быстрого вращения последнего; M_k - масса Протосолнца в критических фазах). При наличии закономерного порядка в соотношениях величин $R_k M_k$ в последовательно наступающих критических фазах планетогенеза такой же порядок должен наблюдаться и в современных значениях произведения $p(M+m)$ системы планет, сохранивших первичные взаимоотношения орбит. Т.е. исходные структурные связи между орбитами компонентов планетной системы в значительной степени сохранились благодаря пропорциональному изменению параметров орбит планет p в длительной эволюции солнечной системы в соответствии с законом Джинса $p(M+m) = const$. Это соотношение является базисным и дает возможность установить общее направление и особенности эволюции планетной системы за весь период ее существования. Конечно эта гипотеза (и другие возможные объяснения эмпирического правила) нуждаются в глубоких динамических исследованиях.

3.3 Солнечная система. Эффективность сформулированного правила планетных расстояний для тел Солнечной системы весьма четко иллюстрируется результатами, представленными в таблице 1. Здесь приведены значения больших полуосей возможных планет и иных объектов на протопланетной стадии Солнечной системы. Сравнение теоретических и наблюдаемых значений больших полуосей орбит представляет собой важный инструмент реконструкции эволюции, восстановления и анализа возможных катастрофических явлений в жизни Солнечной системы (кратко об этом см. п.4). Были выявлены следующие явления. **I.** Формирование планет (спутников) P_2, P_3 и P_3, P_4 ; P_4, P_5 (в каждом из поясов) на орбитах близких к резонансным с соизмеримостями средних движений вида 3:2 и 4:3. В частности это объясняет природу наблюдаемого резонанса в системе Плутон-Нептун. **II.** Небесно-механическая неустойчивость компаньона P_4 в каждой полной группе. В случае планет это приводит к его захвату планетой P_3 , что хорошо иллюстрируется существующими системами двойных планет Земля-Луна и Плутон-Харон. **III.** Обнаружено явление выметания астероидно-кометных тел из узких областей вблизи орбит Протоюпитеров I и II и Юпитера. **IV.** Явление формирования двух асимметричных «валов», наполненных кометно-астероидными телами, с внутренней («большой вал») и внешней стороны орбиты соответствующей планеты. **V.** Значениям больших полуосей протопланет окраинных поясов E и D, соответствуют средним значениям больших полуосей орбит определенных групп кентавров (табл. 1). Крестиками в табл.1 отмечены прототела, покинувшие свои изначальные орбиты в результате катастроф. Звездочкой отмечены средние значения больших полуосей соответствующих групп компаньонов-кентавров [15]. Согласно теоретические и наблюдаемые значения больших полуосей выделены жирным шрифтом.

3.4 Планетные системы пульсаров PSR 1257+12, PSR 1828-11 и звезды главной последовательности Ups And. В данной работе показано, что сформулированное правило также эффективно описывает распределения больших полуосей орбит экзопланет в трех новых планетных системах PSR 1257+12, PSR 1828-11 и Ups And. Значения больших полуосей соответствующих планет были взяты из энциклопедии [14]. Более того правило п.3.1 позволяет предвычислить значения больших полуосей орбит других возможных компаньонов указанных планетных систем (см. табл. 2). В таблице приведены списки основных групп планет A_i, B_i, C_i, D_i для рассматриваемых звезд (также указаны отдельные планеты двух близзвездных групп o_i, O_i , которые вообще говоря являются не полными). Важной особенностью предложенной упорядоченной структуры каждой планетной системы является то, что все наблюдаемые экзопланеты обнаруживают свои «правильные» положения в определенной иерархической сетке подобно планетам солнечной системы.

Таблица 1. Теоретические (Т) и наблюдаемые (Н) значения больших полуосей орбит планет и малых кометных тел Солнечной системы (в а.е., $\Delta_A = 0.267$).

П	Название	Т	Н	П	Название	Т	Н
O ₁	2.468 млн. км	0.0165		C ₃	Протоплутон	38.375	+++
O ₂	9.126 млн. км	0.0610		C ₃ /C ₄	Плутон+Харон	39.439	39.439
O ₃	15.78 млн. км	0.1055		C ₄	Протохарон	47.987	+++
O ₄	22.44 млн. км	0.150		C ₅	Трансплутон	57.599	55.9 ± 2.0*
O ₅	Протоикар	0.194	+++	C ₆	Компаньоны C₆	67.21	65.9 ± 1.6*
O₅/A₁	Меркурий	0.328	0.387	C ₇	Компаньоны C₇	76.82	75.3 ± 2.7*
A ₁	Протомеркурий	0.461	+++	C ₈	Компаньоны C₈	86.44	85.2 ± 1.8*
A ₂	Венера	0.728	0.723	C ₉	Компаньоны C₉	96.05	94.3 ± 2.4*
A ₃	Земля	0.995	+++	C ₁₀	Компаньоны C₁₀	105.7	101*
A₃/A₄	Земля+Луна	1.000	1.000	D ₁	Компаньоны D₁	115.3	117 ± 2*
A ₄	Протолуна	1.262	+++	D ₂	Компаньоны D ₂	172.9	
A ₅	Марс	1.529	1.524	D ₃	Компаньоны D₃	230.6	221 ± 9*
B₁	Астероиды	3.131	3.3**	D ₄	Компаньоны D ₄	288.3	
B ₂	Протоюпитер II	4.733	+++	D ₅	Компаньоны D ₅	345.5	
B₂/B₃	Юпитер	5.203	5.203	D ₆	Компаньоны D ₆	403.2	
B ₃	Протоюпитер I	6.335	+++	D ₇	Компаньоны D ₇	460.8	
B ₄	Прототитан	7.937	+++	D ₈	Компаньоны D ₈	518.5	
B₄/B₅	Сатурн+Титан	9.539	9.539	D ₉	Компаньоны D₉	576.2	561*
B ₅	Протосатурн	9.539	+++	D ₁₀	Компаньоны D ₁₀	633.9	
C ₁	Уран	19.151	19.184	D ₁₁	Компаньоны D ₁₁	691.5	
C ₂	Нептун	28.763	30.058				

Таблица 2. Иерархические группы планет P_n и теоретические значения больших полуосей их орбит (в а.е.; в скобках указаны значения, полученные из наблюдений).

P _n	PSR 1257+12	PSR 1828-11	UPS AND	SUN
o₄			0.053 (0.059)	
O ₄	0.153	0.085	0.343	0.150
O ₅	0.170 (0.19)	0.15	0.413	0.194
A ₁	0.27	0.54	0.830 (0.83)	0.461 Меркурий (0.39; 0.467)
A ₂	0.370 (0.36)	0.93 (0.93)	1.25	0.728 Венера (0.723)
A ₃	0.470 (0.47)	1.32 (1.32)	1.67	0.995 Земля (1.000)
A ₄	0.570	1.71	2.08	1.262 Протолуна (+++)
A ₅	0.670	2.10 (2.10)	2.50 (2.5)	1.529 Марс (1.524)
B ₁	1.27	4.44	5.01	3.131 Астероиды (2.9-3.2)
B ₂	1.87	6.78	7.51	4.733 Юпитер I Юпитер
B ₃	2.47	9.12	10.02	6.335 Юпитер II (5.203)
B ₄	3.07	11.46	12.52	7.937 Прототитан (+++)
B ₅	3.67	13.80	15.03	9.539 Сатурн (9.539)
C ₁	7.27	27.84	30.06	19.15 Уран (19.18)
C ₂	10.87	41.88	45.10	28.76 Нептун (30.03)
C ₃	14.47	55.92	60.13	38.38 Плутон (39.40)
C ₄	18.07	69.96	75.16	47.99 Протохарон (+++)
C ₅	21.67	84.00	90.20	57.60 Кентавры (55 ± 2.0)
D ₁	43.27 (~40)	168.2	180.4	114.9 Кентавры (117 ± 5)
D ₂	64.87	252.5	270.6	172.5 C/2001 Q1 (173.5)
D ₃	86.47	336.7	360.8	230.2 Кентавры (221 ± 9)

Предложенная структура указывает места расположения новых неоткрытых на сегодня экзопланет в рассматриваемых звездных системах.

Фактически эти результаты означают, что другие планетные системы также могут обладать иерархической структурой аналогичной солнечной. Изучение аналогий в устройствах солнечной и иных планетных систем может сыграть ключевую роль для поиска неоткрытых пока планет с условиями пригодными для жизни. Из наших результатов следует, что в новых планетных системах обнаружены лишь отдельные планеты, а многие их компаньоны пока остаются «за кадром» и их выявление - дело будущего. Указанные структуры планетных систем, могут оказаться полезными для поиска внеземных цивилизаций. А сами установленные закономерности позволяют гораздо оптимистичнее смотреть на возможности внеземных контактов. В частности, из наших исследований вытекает, что системы экзопланет должны содержать двойные планеты по аналогии с нашими системами Земля-Луна и Плутон-Харон. На роль двойных планет типа Земля-Луна претендуют, например, экзопланеты A_3 во всех трех новых планетных системах, представленных в табл.2. Важную роль установленные закономерности должны также сыграть для разработки новых сценариев происхождения и эволюции планетных систем.

3.5 Спутниковые системы. Правило п.3.1 позволило также выявить аналогичные поясные иерархические структуры в расположении орбит спутников и кольцевых образований больших планет. Списки этих объектов представлены в табл. 3-6. В обозначениях групп и компаньонов здесь не используются буквы O_i, o_i . Группа r с большим числом элементов r_i объединяет в основном кольцевые структуры (включает также некоторые промежуточные структуры, обозначаемые как r_{ij} , см. описание к таблицам 3-6). Для спутниковых систем Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна были приняты следующие значения параметра Δ_A : $\Delta_{AJ} = 0.04872$, $\Delta_{AS} = 0.001789$, $\Delta_{AU} = 0.005702$ и $\Delta_{AN} = 0.01264$ (эти величины и значения больших полуосей в таблицах 3-6 даются в млн. км). Таблицы достаточно четко иллюстрируют эффективность сформулированного правила планетных расстояний. Оно объясняет расположение орбит почти всех объектов спутников больших планет и их кольцевых структур, известных в настоящее время. Теоретические (Т) и наблюдаемые (О) значения больших полуосей спутников и кольцевых структур находятся в хорошем согласии (в таблицах соответствующие объекты и значения больших полуосей выделяются жирным шрифтом). Более того правило позволяет выделить новые орбиты для весьма вероятных новых компаньонов в спутниковых системах больших планет. Из таблиц 3-6 в частности видно, что средние орбиты некоторых малых семейств родственных спутников располагаются посередине между орбитами двух соседних протокомпаньонов. Аналогичное явление (возможно, что оно имеет динамическую природу) имеет место и для ряда кольцевых структур (см. ниже краткие описания этих структур в соответствии с монографией[5]). Основные черты иерархического и упорядоченного строения спутниковых систем были приобретены при их формировании на протопланетной стадии. Однако, для широкого ряда спутников и кольцевых структур имел место их динамический выход на иерархические орбиты (или на близкие к ним резонансные орбиты) под действием гравитационных сил планеты и главных компаньонов [5].

Сатурн. Табл. 3. Символы r_{s+1}/r_s обозначают кольцевые структуры Сатурна и их особенности [5]: $r_{38/37}$ - внутренняя граница кольца D; $r_{34/33}$ - внешняя граница кольца C; $r_{32/31}$ - кольцо Титана, узкое кольцо с эксцентриситетом (ширина 25 км); $r_{25/24}$ - узкое кольцо (ширина 60 км) с эксцентриситетом, резонанс с Пандорой 2:1; $r_{24/23}$ - внутренняя граница кольца B; $r_{10/9}$ - промежуточная окружность V_e ; V_e/r_9 - внешняя граница кольца B и щели Кассини; $r_{8/7}$ - спиральная волна плотности (ширина 1000 км); $r_{7/6}$ - внутренняя граница кольца A и щели Кассини; $r_{2/1}$ - изгибаемая спиральная волна (ширина 160 км). Некоторые структурные особенности колец Сатурна определяются границами, отмеченными в таблице 3: r_{25} - узкое кольцо (20 км); r_5 - спиральная волна плотности (ширина 266 км); r_2 - спиральная волна плотности (ширина 175 км), резонанс 5:4 с Янусом; r_1 - спиральная волна плотности (ширина 170 км), резонанс 5:3 с Мимасом; A_2 - изгибаемая спиральная волна (ширина 46 км);

$A_{2/3}$ - внешняя граница кольца А; $C_{4/5}$ - внешняя граница кольца С. Символами $E_{4/5}$, $E_{5/6}$, $E_{6/7}$ и $E_{7/8}$ выделены промежуточные орбиты, к которым тяготеют орбиты ряда наблюдаемых спутников и их групп (см. табл. 3).

Таблица 3. Спутники и кольцевые структуры Сатурна.

P_n		T	O	P_n		T	O
Γ_{39}		0.0643		r_5	RS	0.1251	0.1253
Γ_{38}		0.0661		r_4		0.1269	
$r_{38/37}$	RS	0.0670	0.0670	r_3		0.1287	
Γ_{37}		0.0679		r_2	RS	0.1305	0.1307
Γ_{36}		0.0697		$r_{2/1}$	RS	0.1314	0.1319
Γ_{35}		0.0715		r_1	RS	0.1323	0.1323
Γ_{34}		0.0732		A_1	Пан	0.1341	0.1336
$r_{34/33}$	RS	0.0741	0.0745	A_2	RS	0.1359	0.1358
Γ_{33}		0.0750		$A_{2/3}$	RS	0.1368	0.1368
Γ_{32}		0.0768		A_3	Атлас	0.1376	0.1376
$r_{32/31}$	RS	0.0777	0.0777	A_4	Прометей	0.1394	0.1394
Γ_{31}		0.0786		A_5	Пандора	0.1412	0.1417
Γ_{30}		0.0804		B_1	Эпиметей, Янус	0.1520	0.1515
Γ_{29}		0.0822		B_2		0.1627	
Γ_{28}		0.0840		B_3		0.1734	
Γ_{27}		0.0858		B_4	Мимас	0.1842	0.1855
r_{26}	RS	0.0876	0.0875	B_5		0.1949	
r_{25}	RS	0.0893	0.0887	C_1	Энцелад	0.2593	0.2380
$r_{25/24}$	RS	0.0902	0.0902	C_2	Тетфия, Телесто, Калипсо	0.3237	0.2947
Γ_{24}		0.0911		C_3	Диона, Елена	0.3881	0.3774
$r_{24/23}$	RS	0.0920	0.0920	C_4		0.4525	
Γ_{23}		0.9292		$C_{5/4}$	RS	0.4847	0.4830
Γ_{22}		0.0947		C_5	Рея	0.5169	0.5270
r_{21}	RS	0.0965	0.0963	D_1		0.9033	
Γ_{20}		0.0983		D_2	Титан	1.2897	1.2219
Γ_{19}		0.1001		D_3	Гиперион	1.6761	1.4810
Γ_{18}		0.1019		D_4		2.0625	
Γ_{17}		0.1037		D_5		2.4489	
Γ_{16}		0.1054		E_1	Япет	4.7673	3.5613
Γ_{15}		0.1072		E_2		7.0857	
Γ_{14}		0.1090		E_3		9.4041	
Γ_{13}		0.1108		E_4	S/2000: S5, 6	11.723	11.324
Γ_{12}		0.1126		$E_{5/4}$	Феба	12.882	12.952
Γ_{11}		0.1144		E_5		14.041	14.553
Γ_{10}		0.1162		$E_{6/5}$	S/2000: S 2,8	15.200	15.354
$\Gamma_{10/9}$	B_e	0.1171		E_6	S/2000 S3	16.359	16.496
$r_{B/9}$	RS	0.1175	0.1176	$E_{7/6}$	S/2000:S11,12,4	17.519	17.798
r_9	RS	0.1180	0.1178	E_7	S/2000: S10, 9	18.678	18.356
Γ_8		0.1198		$E_{8/7}$	S/2000 S7	19.837	19.752
$r_{8/7}$	RS	0.1207	0.1210	E_8		20.996	
Γ_7		0.1215		E_9	S/2000 S1	23.315	22.832
$r_{7/6}$	RS	0.1224	0.1222	E_{10}		25.633	
Γ_6		0.1233					

Юпитер. Символом $\Gamma_{s+1/s}$ в табл. 4 обозначена окружность с радиусом равным полу сумме радиусов орбит Γ_{s+1} и Γ_s . Буквы RS в таблицах означают кольцевые структуры и образования. В случае Юпитера: $\Gamma_{15/14}$ - внутренняя граница слабого кольца и гало; $\Gamma_{9/8}$ - внутренняя граница паутинового и главного кольца, внешняя граница слабого кольца и гало; $\Gamma_{8/7}$ - внутренняя граница главного кольца; Γ_1/A_1 - внешняя граница паутинового кольца. Вблизи промежуточных орбит $C_{6/5}$ и $C_{13/12}$ спутники концентрируются малыми группами.

Таблица 4. Система Юпитера.

P_n	Названия	Теор.	Набл.	P_n	Названия	Теор.	Набл.
Γ_{15}		0.0683		A_5	Ио	0.4256	0.4216
$r_{15/14}$	RS	0.0724	0.0714	B_1		0.7179	
Γ_{14}		0.0764		B_2		1.0102	
Γ_{13}		0.0845		B_3		1.3025	
Γ_{12}		0.0927		B_4		1.5949	
Γ_{11}		0.1008		B_5		1.8872	
Γ_{10}		0.1089		C_1		3.6411	
Γ_9		0.1170		C_2		5.3950	
$r_{9/8}$	RS	0.1211	0.1230	C_3	S/2000J1	7.1489	7.3871
Γ_8		0.1251		C_4		8.9029	
$r_{8/7}$	Метида, Адрастея, RS	0.1292	0.1292	C_5		10.657	
Γ_7		0.1333		$C_{6/5}$	Леда, Гималия, Лиситея, Элара	11.534	11.508
Γ_6		0.1414		C_6	S/2000J11	12.411	12.623
Γ_5		0.1495		C_7		14.165	
Γ_4		0.1576		C_8		15.919	
Γ_3		0.1657		C_9		17.673	
Γ_2		0.1739		C_{10}		19.426	
r_1	Амальтея	0.1820	0.1813	C_{11}	S/2000J10	20.303	20.300
r_1/A_1	RS	0.2063	0.2100	C_{11}	S/2000: J3, J5, J7, J9, J4; Ананке	21.180	21.233
A_1	Теба	0.2307	0.2219	C_{12}	Карме, S/2000 J6	22.934	22.702
A_2		0.2794		$C_{13/12}$	S/2000 J8, Пасифе, Синопе	23.811	23.546
A_3		0.3281		C_{13}	S/2000: J2, J1	24.688	24.156
A_4		0.3769		C_{14}		26.442	
A_5	Ио	0.4256	0.4216	C_{15}		28.196	

Нептун. В табл. 5 $r_{18/17}$ - нижняя граница кольца 1989 N3R; $r_{17/16}$ - верхняя граница кольца 1989 N3R; $r_{12/11}$ - нижняя граница кольца 1989 N4R, кольцо (ширина - 9.1 км); $r_{9/8}$ - верхняя граница кольца 1989 N 4R; r_{11} - кольцо (15 км), кольцо (9.1 км), кольцо (25 км); r_7 - Галатея, 1989 N1R, (15-50); (8). **Уран.** Названия спутников и кольцевых структур этой планеты указаны непосредственно в табл.6.

4. Основные катастрофы в Солнечной системе.

В этом разделе кратко обсуждаются главные катастрофические события, которые вероятно имели место в солнечной системе и в спутниковых системах больших планет. Для краткости мы исключили из рассмотрения аналитические выкладки и расчеты по указанным явлениям.

1. Эллиптичность орбиты Меркурия. Наблюдаемая эллиптичность и размеры орбиты Меркурия служат указанием на существование в прошлом одной или двух протопланет между Солнцем и Меркурием. В предложенной иерархии планет это объекты O_4 , O_5 . Последний из них назовем Протоикар. Орбита Меркурия получила существенное изменение в результате сближения, а возможно, и катастрофического столкновения с существовавшей на ранних стадиях жизни солнечной системы планеты Протоикар.

2. Природа ядра Меркурия. Катастрофическими последствиями сближения или столкновения Протоикара и Протомеркурия мог быть срыв мощной первичной газовой оболочки и даже части мантии Протомеркурия со значительным уменьшением его массы, а также изменение орбитального режима движения. Это объясняет наличие у Меркурия большого металлического ядра и свидетельствует также о том, что планета Протоикар, по-видимому была достаточно массивной.

3. Разрушение Протолуны. Возможный импакт Протолуны. Гравитационное взаимодействие Протолуны и Протоземли также носило катастрофический характер. По модели импакта Протоземля подверглась касательному удару небесного тела с массой порядка 1-2 масс Марса. В соответствии с излагаемой концепцией удар мог быть нанесен Протолуной, обладающей аналогичной массой.

4. Образование Луны. Возможное

разрушение Луны на пределе Роша. Центральным моментом этого взаимодействия, по-видимому, послужило сближение Протолуны до предела Роша с последующим развалом Протолуны на тяжелые фрагменты, выпавшие на Землю, и образованием современной Луны с ее характерным химическим составом и распределением плотностей [12]. **5. Пояс астероидов. 6. Формирование Юпитера.** Эксцентриситеты орбит и вековая эволюция эксцентриситетов орбит Протоюпитеров I и II привела к их столкновению и слиянию на ранней стадии планетогенеза [10]. **7. Захват Прототитана.** Эта неустойчивая планета В₄ попала примерно в те же условия, что и Протолуна (А₄) и Протохарон (С₄). Она была обречена покинуть свое отведенное ей место и примкнуть, как это было в только что отмеченных случаях, к внутренней планете-соседке. Но через определенное время планеты-соседки не стало вообще. Она объединилась с другой более внутренней планетой. В конечном итоге Прототитан - довольно солидная протопланета (по-видимому, со своей собственной спутниковой системой) была подхвачена весьма массивным и изящным по своей красоте Сатурном. **9. Захват Протохарона Протоплутоном.**

Таблица 5. Система Нептуна.

P_n	Название	T	H	P_n	Название	T	H
Г ₂₂		0.0291		r₁	Кольцо	0.0754	0.0750
Г ₂₁		0.0333		A ₁		0.0880	
Г ₂₀		0.0354		A ₂		0.1007	
Г ₁₉		0.0375		A ₃	Протей	0.1133	0.1176
Г ₁₈		0.0396		A ₄		0.1259	
r_{18/17}	RS	0.0406	0.0411	A ₅		0.1386	
r₁₇	Кольцо 1989 N3R	0.0417	0.0418	B ₁		0.2144	
r_{17/16}	RS	0.0427	0.0428	B ₂		0.2902	
Г ₁₆		0.0438		B₃	Тритон	0.3660	0.3548
Г ₁₅		0.0459		B ₄		0.4418	
r₁₄	Наяда	0.0480	0.0480	B ₅		0.5176	
r₁₃	Таласса	0.0501	0.0500	C ₁		0.9725	
r₁₂	Деспина	0.0522	0.0525	C ₂		1.4274	
r_{12/11}	RS	0.0533	0.0535	C ₃		1.8822	
r₁₁	Кольца (15, 9.1, 2.5 км)	0.0543	0.0542	C ₄		2.3371	
Г ₁₀		0.0564		C ₅		2.7920	
r₉	Кольцо	0.0585	0.0589	D₁	Нереида	5.5212	5.5100
r_{9/8}	RS	0.0596	0.0590	D ₂		8.2504	
r₈	Кольцо, 80 км	0.0606	0.0600	D ₃		10.980	
r₇	Галатей, RS	0.0627	0.0625	D ₄		13.709	
r₆	Кольцо, 8 км	0.0649	0.0642	D ₅		16.438	
r₅	Кольцо, 15 км	0.0670	0.0675	D ₆		19.167	
Г ₄		0.0691		D ₇		21.897	
r_{4/3}	Кольца (9.0;5.1;5.3 км)	0.0701	0.0700	D ₈		24.626	
Г ₃		0.0712		D ₉		27.355	
r₂	Ларисса	0.0733	0.0736	D ₁₀		30.084	
r_{2/1}	Кольцо 17 км	0.0743	0.0740				

Автор признателен проф. В.Л. Пантелееву, акад. РАЕН О.Г. Сорохтину, рекомендовавшим автору заняться проблемами происхождения системы Земля-Луна. Автор также благодарен участникам международной конференции «Астро-Казань 2001» Л.В. Ксанфомалити, И. Шнайдеру, А. Боссу и др. за привлекательное обсуждение современных проблем экстропланет и в особенности И.Н. Китиашвили и А.В. Гусеву за внимание и предоставленные отписки своих работ.

Таблица 6. Система Урана.

P_n	Название	T	H	P_n	Название	T	H
r_{20}		0.0353		B_2		0.152	
r_{19}		0.0363		B_3	Ариэль	0.186	0.191
r_{18}	1986U2R	0.0373	0.0370	B_4		0.221	
r_{17}	1986U2R	0.0382	0.0384	B_5	Умбриэль	0.256	0.266
r_{16}	1986U2R	0.0392	0.0395	C_1	Титания	0.463	0.436
r_{15}		0.0401		C_2	Оберон	0.671	0.584
r_{14}		0.0411		C_3		0.879	
r_{13}	Кольцо б	0.0421	0.0419	C_4		1.087	
r_{12}	Кольца 5,4	0.0430	0.0424	C_5		1.294	
r_{11}		0.0440		D_1		2.541	
r_{10}	Кольцо α	0.0449	0.0447	D_2		3.787	
r_9	Кольцо β	0.0459	0.0457	D_3		5.033	
r_8	Кольцо η	0.0469	0.0472	D_4		6.280	
r_7	Кольцо γ	0.0478	0.0476	D_5	Калибан, Стефано	7.526	7.556
r_6	Кольцо δ	0.0488	0.0483	E_1		8.772	
r_5	Корделия	0.0498	0.0498	E_2		10.02	
r_4		0.0507		E_3		11.27	
r_3		0.0517		E_4	Сикоракса	12.51	12.21
r_2		0.0526		E_5		13.76	
r_1	Офелия	0.0536	0.0538	E_6		15.00	
A_1	Бианка	0.0594	0.0592	E_7	Просперо	16.25	16.11
A_2	Крессиде Дездемона Джюльета Портия	0.0651	0.0638	E_8		17.50	
A_3	Розалинда	0.0709	0.0699	E_9	Сетевос	18.74	18.21
A_4	Белинда S/1986 U10	0.0767	0.0759	E_{10}		19.99	
A_5	Пак	0.0825	0.0860	E_{11}		21.24	
B_1	Миранда	0.117	0.130	E_{12}		22.48	

Работа поддержана грантом РФФИ 99-05-64889.

Литература.

- Баркин Ю.В., Феррандиш Х.М. Асимметричный прилив небесных тел. Тезисы конф. «Новые результаты аналитической и качественной небесной механики» (Москва, 5-6 декабря 2000). М. 2000, p. 17-18.
- Баркин Ю.В. (Barkin Yu.V.) Dynamics of the Earth's shells and fundamental problems of celestial mechanics, astronomy, gravimetry and geodynamics. Proc. of internat. conf. «AstroKazan-2001». Publ. «DAS», 2001, p.59-65.
- Босс (Boss A.). Giant planet formation by gravitational instability. Science, 1997. V.276. p. 1836.
- Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С. Планеты земной группы. - М.: Наука, 1990.
- Горькавый Н.Н., Фридман А.М. Физика планетных колец. М.: Наука, 1994. 348 с.
- Китиашвили И.Н., Гусев А.В. (Irina Kitiashvili and Alexandr Gusev. Exoplanets: Status and Outlook. P.26-30.
- Ксанфомалити Л.В. (2000) Внесолнечные планетные системы. Астрон. вестн., 2000, том 34, №6, с.529-544.
- Маракушев А.А. Происхождение и эволюция Земли и других планет солнечной системы. Наука, М., 1992.
- Маракушев А.А. Происхождение Земли и Луны в свете новейших достижений астрономии. Изв. секц. наук о Земле РАН, 2000, N5, с.53-62.
- Панкуль Л.И. (1968) Фазы и циклы планетогенеза. Изд-во «Наука» Казах. ССР, Алма-Ата.
- Сафронов В.С. Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.:Наука, 1969. 244 с.
- Сорохтин О.Г. Ранние стадии развития системы Земля-Луна. Изв. секц. наук о Земле РАН, 1999, N2, с.141.
- Хаяши и др. (Hayashi C. et. al). Formation of the Solar system. Protostars and planets. II. Tuscon. P. 1100-1151.
- Шнайдер (Schneider J.). Extrasolar Planets Encyclopedia. <http://www.obspm.fr/planets>. 1996.
- List of Centaurs and scattered-disk objects. Web-site: <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Centaurs/html>.