

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

Ю.В. Баркин ([barkin@sai.msu.ru](mailto: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  $\Delta_A$ .

**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 <sub>1</sub>	2.468 млн. км	0.0165		C <sub>3</sub>	Протоплутон	38.375	+++
O <sub>2</sub>	9.126 млн. км	0.0610		C <sub>3/C4</sub>	<b>Плутон+Харон</b>	<b>39.439</b>	<b>39.439</b>
O <sub>3</sub>	15.78 млн. км	0.1055		C <sub>4</sub>	Протохарон	47.987	+++
O <sub>4</sub>	22.44 млн. км	0.150		C <sub>5</sub>	<b>Трансплутон</b>	<b>57.599</b>	<b>55.9 ± 2.0*</b>
O <sub>5</sub>	Протоикар	0.194	+++	C <sub>6</sub>	<b>Компаньоны C<sub>6</sub></b>	<b>67.21</b>	<b>65.9 ± 1.6*</b>
<b>O<sub>5/A1</sub></b>	<b>Меркурий</b>	<b>0.328</b>	<b>0.387</b>	C <sub>7</sub>	<b>Компаньоны C<sub>7</sub></b>	<b>76.82</b>	<b>75.3 ± 2.7*</b>
A <sub>1</sub>	Протомеркурий	0.461	+++	C <sub>8</sub>	<b>Компаньоны C<sub>8</sub></b>	<b>86.44</b>	<b>85.2 ± 1.8*</b>
A <sub>2</sub>	<b>Венера</b>	<b>0.728</b>	<b>0.723</b>	C <sub>9</sub>	<b>Компаньоны C<sub>9</sub></b>	<b>96.05</b>	<b>94.3 ± 2.4*</b>
A <sub>3</sub>	Земля	0.995	+++	C <sub>10</sub>	<b>Компаньоны C<sub>10</sub></b>	<b>105.7</b>	<b>101*</b>
<b>A<sub>3/A4</sub></b>	<b>Земля+Луна</b>	<b>1.000</b>	<b>1.000</b>	D <sub>1</sub>	<b>Компаньоны D<sub>1</sub></b>	<b>115.3</b>	<b>117 ± 2*</b>
A <sub>4</sub>	Протолуна	1.262	+++	D <sub>2</sub>	Компаньоны D <sub>2</sub>	172.9	
A <sub>5</sub>	<b>Марс</b>	<b>1.529</b>	<b>1.524</b>	D <sub>3</sub>	<b>Компаньоны D<sub>3</sub></b>	<b>230.6</b>	<b>221 ± 9*</b>
<b>V<sub>1</sub></b>	<b>Астероиды</b>	<b>3.131</b>	<b>3.3**</b>	D <sub>4</sub>	Компаньоны D <sub>4</sub>	288.3	
V <sub>2</sub>	Протоюпитер II	4.733	+++	D <sub>5</sub>	Компаньоны D <sub>5</sub>	345.5	
<b>V<sub>2/V3</sub></b>	<b>Юпитер</b>	<b>5.203</b>	<b>5.203</b>	D <sub>6</sub>	Компаньоны D <sub>6</sub>	403.2	
V <sub>3</sub>	Протоюпитер I	6.335	+++	D <sub>7</sub>	Компаньоны D <sub>7</sub>	460.8	
V <sub>4</sub>	Прототитан	7.937	+++	D <sub>8</sub>	Компаньоны D <sub>8</sub>	518.5	
<b>V<sub>4/V5</sub></b>	<b>Сатурн+Титан</b>	<b>9.539</b>	<b>9.539</b>	D <sub>9</sub>	<b>Компаньоны D<sub>9</sub></b>	<b>576.2</b>	<b>561*</b>
V <sub>5</sub>	Протосатурн	9.539	+++	D <sub>10</sub>	Компаньоны D <sub>10</sub>	633.9	
C <sub>1</sub>	<b>Уран</b>	<b>19.151</b>	<b>19.184</b>	D <sub>11</sub>	Компаньоны D <sub>11</sub>	691.5	
C <sub>2</sub>	<b>Нептун</b>	<b>28.763</b>	<b>30.058</b>				

**Таблица 2.** Иерархические группы планет P<sub>n</sub> и теоретические значения больших полуосей их орбит ( в а.е.; в скобках указаны значения, полученные из наблюдений).

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

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  $\Delta_A$ :  $\Delta_{AJ} = 0.04872$ ,  $\Delta_{AS} = 0.001789$ ,  $\Delta_{AU} = 0.005702$  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.**

$P_n$		$T$	$O$	$P_n$		$T$	$O$
$\Gamma_{39}$		0.0643		$r_5$	RS	<b>0.1251</b>	<b>0.1253</b>
$\Gamma_{38}$		0.0661		$r_4$		0.1269	
$r_{38/37}$	RS	<b>0.0670</b>	<b>0.0670</b>	$r_3$		0.1287	
$\Gamma_{37}$		0.0679		$r_2$	RS	<b>0.1305</b>	<b>0.1307</b>
$\Gamma_{36}$		0.0697		$r_{2/1}$	RS	<b>0.1314</b>	<b>0.1319</b>
$\Gamma_{35}$		0.0715		$r_1$	RS	<b>0.1323</b>	<b>0.1323</b>
$\Gamma_{34}$		0.0732		$A_1$	Пан	<b>0.1341</b>	<b>0.1336</b>
$r_{34/33}$	RS	<b>0.0741</b>	<b>0.0745</b>	$A_2$	RS	<b>0.1359</b>	<b>0.1358</b>
$\Gamma_{33}$		0.0750		$A_{2/3}$	RS	<b>0.1368</b>	<b>0.1368</b>
$\Gamma_{32}$		0.0768		$A_3$	Атлас	<b>0.1376</b>	<b>0.1376</b>
$r_{32/31}$	RS	<b>0.0777</b>	<b>0.0777</b>	$A_4$	Прометей	<b>0.1394</b>	<b>0.1394</b>
$\Gamma_{31}$		0.0786		$A_5$	Пандора	<b>0.1412</b>	<b>0.1417</b>
$\Gamma_{30}$		0.0804		$B_1$	Эпиметей, Янус	<b>0.1520</b>	<b>0.1515</b>
$\Gamma_{29}$		0.0822		$B_2$		0.1627	
$\Gamma_{28}$		0.0840		$B_3$		0.1734	
$\Gamma_{27}$		0.0858		$B_4$	Мимас	<b>0.1842</b>	<b>0.1855</b>
$r_{26}$	RS	<b>0.0876</b>	<b>0.0875</b>	$B_5$		0.1949	
$r_{25}$	RS	<b>0.0893</b>	<b>0.0887</b>	$C_1$	Энцелад	<b>0.2593</b>	<b>0.2380</b>
$r_{25/24}$	RS	<b>0.0902</b>	<b>0.0902</b>	$C_2$	Тетфия, Телесто, Калипсо	<b>0.3237</b>	<b>0.2947</b>
$\Gamma_{24}$		0.0911		$C_3$	Диона, Елена	<b>0.3881</b>	<b>0.3774</b>
$r_{24/23}$	RS	<b>0.0920</b>	<b>0.0920</b>	$C_4$		0.4525	
$\Gamma_{23}$		0.9292		$C_{5/4}$	RS	<b>0.4847</b>	<b>0.4830</b>
$\Gamma_{22}$		0.0947		$C_5$	Рея	<b>0.5169</b>	<b>0.5270</b>
$r_{21}$	RS	<b>0.0965</b>	<b>0.0963</b>	$D_1$		0.9033	
$\Gamma_{20}$		0.0983		$D_2$	Титан	<b>1.2897</b>	<b>1.2219</b>
$\Gamma_{19}$		0.1001		$D_3$	Гиперион	<b>1.6761</b>	<b>1.4810</b>
$\Gamma_{18}$		0.1019		$D_4$		2.0625	
$\Gamma_{17}$		0.1037		$D_5$		2.4489	
$\Gamma_{16}$		0.1054		$E_1$	Япет	<b>4.7673</b>	<b>3.5613</b>
$\Gamma_{15}$		0.1072		$E_2$		7.0857	
$\Gamma_{14}$		0.1090		$E_3$		9.4041	
$\Gamma_{13}$		0.1108		$E_4$	S/2000: S5, 6	<b>11.723</b>	<b>11.324</b>
$\Gamma_{12}$		0.1126		$E_{5/4}$	Феба	<b>12.882</b>	<b>12.952</b>
$\Gamma_{11}$		0.1144		$E_5$		14.041	14.553
$\Gamma_{10}$		0.1162		$E_{6/5}$	S/2000: S 2,8	<b>15.200</b>	<b>15.354</b>
$\Gamma_{10/9}$	$B_e$	0.1171		$E_6$	S/2000 S3	<b>16.359</b>	<b>16.496</b>
$r_{B/9}$	RS	<b>0.1175</b>	<b>0.1176</b>	$E_{7/6}$	S/2000:S11,12,4	<b>17.519</b>	<b>17.798</b>
$r_9$	RS	<b>0.1180</b>	<b>0.1178</b>	$E_7$	S/2000: S10, 9	<b>18.678</b>	<b>18.356</b>
$\Gamma_8$		0.1198		$E_{8/7}$	S/2000 S7	<b>19.837</b>	<b>19.752</b>
$r_{8/7}$	RS	<b>0.1207</b>	<b>0.1210</b>	$E_8$		20.996	
$\Gamma_7$		0.1215		$E_9$	S/2000 S1	<b>23.315</b>	<b>22.832</b>
$r_{7/6}$	RS	<b>0.1224</b>	<b>0.1222</b>	$E_{10}$		25.633	
$\Gamma_6$		0.1233					

**Юпитер.** Символом  $\Gamma_{s+1/s}$  в табл. 4 обозначена окружность с радиусом равным полу сумме радиусов орбит  $\Gamma_{s+1}$  и  $\Gamma_s$ . 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 паутинного и главного кольца, внешняя граница слабого кольца и гало;  $\Gamma_{8/7}$  - внутренняя граница главного кольца;  $\Gamma_1/A_1$  - внешняя граница паутинного 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.
$\Gamma_{15}$		0.0683		$A_5$	Ио	<b>0.4256</b>	<b>0.4216</b>
$r_{15/14}$	RS	<b>0.0724</b>	<b>0.0714</b>	$B_1$		0.7179	
$\Gamma_{14}$		0.0764		$B_2$		1.0102	
$\Gamma_{13}$		0.0845		$B_3$		1.3025	
$\Gamma_{12}$		0.0927		$B_4$		1.5949	
$\Gamma_{11}$		0.1008		$B_5$		1.8872	
$\Gamma_{10}$		0.1089		$C_1$		3.6411	
$\Gamma_9$		0.1170		$C_2$		5.3950	
$r_{9/8}$	RS	<b>0.1211</b>	<b>0.1230</b>	$C_3$	S/2000J1	<b>7.1489</b>	<b>7.3871</b>
$\Gamma_8$		0.1251		$C_4$		8.9029	
$r_{8/7}$	Метида, Адрастея, RS	<b>0.1292</b>	<b>0.1292</b>	$C_5$		10.657	
$\Gamma_7$		0.1333		$C_{6/5}$	Леда, Гималия, Лиситея, Элара	<b>11.534</b>	<b>11.508</b>
$\Gamma_6$		0.1414		$C_6$	S/2000J11	<b>12.411</b>	<b>12.623</b>
$\Gamma_5$		0.1495		$C_7$		14.165	
$\Gamma_4$		0.1576		$C_8$		15.919	
$\Gamma_3$		0.1657		$C_9$		17.673	
$\Gamma_2$		0.1739		$C_{10}$		19.426	
$r_1$	Амальтея	<b>0.1820</b>	<b>0.1813</b>	$C_{11}$	S/2000J10	<b>20.303</b>	<b>20.300</b>
$r_1/A_1$	RS	<b>0.2063</b>	<b>0.2100</b>	$C_{11}$	S/2000: J3, J5, J7, J9, J4; Ананке	<b>21.180</b>	<b>21.233</b>
$A_1$	Теба	<b>0.2307</b>	<b>0.2219</b>	$C_{12}$	Карме, S/2000 J6	<b>22.934</b>	<b>22.702</b>
$A_2$		0.2794		$C_{13/12}$	S/2000 J8, Пасифе, Синопе	<b>23.811</b>	<b>23.546</b>
$A_3$		0.3281		$C_{13}$	S/2000: J2, J1	<b>24.688</b>	<b>24.156</b>
$A_4$		0.3769		$C_{14}$		26.442	
$A_5$	Ио	<b>0.4256</b>	<b>0.4216</b>	$C_{15}$		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 В<sub>4</sub> попала примерно в те же условия, что и Протолуна (А<sub>4</sub>) и Протохарон (С<sub>4</sub>). 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.

<b>P<sub>n</sub></b>	<b>Название</b>	<b>T</b>	<b>H</b>	<b>P<sub>n</sub></b>	<b>Название</b>	<b>T</b>	<b>H</b>
Г <sub>22</sub>		0.0291		<b>r<sub>1</sub></b>	Кольцо	<b>0.0754</b>	<b>0.0750</b>
Г <sub>21</sub>		0.0333		A <sub>1</sub>		0.0880	
Г <sub>20</sub>		0.0354		A <sub>2</sub>		0.1007	
Г <sub>19</sub>		0.0375		A <sub>3</sub>	Протей	<b>0.1133</b>	<b>0.1176</b>
Г <sub>18</sub>		0.0396		A <sub>4</sub>		0.1259	
<b>r<sub>18/17</sub></b>	<b>RS</b>	<b>0.0406</b>	<b>0.0411</b>	A <sub>5</sub>		0.1386	
<b>r<sub>17</sub></b>	Кольцо 1989 N3R	<b>0.0417</b>	<b>0.0418</b>	B <sub>1</sub>		0.2144	
<b>r<sub>17/16</sub></b>	<b>RS</b>	<b>0.0427</b>	<b>0.0428</b>	B <sub>2</sub>		0.2902	
Г <sub>16</sub>		0.0438		<b>B<sub>3</sub></b>	Тритон	<b>0.3660</b>	<b>0.3548</b>
Г <sub>15</sub>		0.0459		B <sub>4</sub>		0.4418	
<b>r<sub>14</sub></b>	Наяда	<b>0.0480</b>	<b>0.0480</b>	B <sub>5</sub>		0.5176	
<b>r<sub>13</sub></b>	Таласса	<b>0.0501</b>	<b>0.0500</b>	C <sub>1</sub>		0.9725	
<b>r<sub>12</sub></b>	Деспина	<b>0.0522</b>	<b>0.0525</b>	C <sub>2</sub>		1.4274	
<b>r<sub>12/11</sub></b>	<b>RS</b>	<b>0.0533</b>	<b>0.0535</b>	C <sub>3</sub>		1.8822	
<b>r<sub>11</sub></b>	Кольца (15, 9.1, 2.5 км)	<b>0.0543</b>	<b>0.0542</b>	C <sub>4</sub>		2.3371	
Г <sub>10</sub>		0.0564		C <sub>5</sub>		2.7920	
<b>r<sub>9</sub></b>	Кольцо	<b>0.0585</b>	<b>0.0589</b>	<b>D<sub>1</sub></b>	Нереида	<b>5.5212</b>	<b>5.5100</b>
<b>r<sub>9/8</sub></b>	<b>RS</b>	<b>0.0596</b>	<b>0.0590</b>	D <sub>2</sub>		8.2504	
<b>r<sub>8</sub></b>	Кольцо, 80 км	<b>0.0606</b>	<b>0.0600</b>	D <sub>3</sub>		10.980	
<b>r<sub>7</sub></b>	Галатей, RS	<b>0.0627</b>	<b>0.0625</b>	D <sub>4</sub>		13.709	
<b>r<sub>6</sub></b>	Кольцо, 8 км	<b>0.0649</b>	<b>0.0642</b>	D <sub>5</sub>		16.438	
<b>r<sub>5</sub></b>	Кольцо, 15 км	<b>0.0670</b>	<b>0.0675</b>	D <sub>6</sub>		19.167	
Г <sub>4</sub>		0.0691		D <sub>7</sub>		21.897	
<b>r<sub>4/3</sub></b>	Кольца (9.0;5.1;5.3 км)	<b>0.0701</b>	<b>0.0700</b>	D <sub>8</sub>		24.626	
Г <sub>3</sub>		0.0712		D <sub>9</sub>		27.355	
<b>r<sub>2</sub></b>	Ларисса	<b>0.0733</b>	<b>0.0736</b>	D <sub>10</sub>		30.084	
<b>r<sub>2/1</sub></b>	Кольцо 17 км	<b>0.0743</b>	<b>0.0740</b>				

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