

УДК 523.4

**В. А. Котов**

Научно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»  
98409 Крым, п. Научный

## О вращении Урана и Нептуна

*Для определения периодов вращения гравитирующих масс планет-гигантов вычислены «резонанс-спектры» частот обращения массивных спутников. Исходя из приливной теории постулируется, что наилучшее общее кратное их сидерических частот близко к частоте вращения центральной планеты. Найден новый «динамический» период Урана,  $16.14 \pm 0.20$  ч (доверительная вероятность 95 %), в пределах ошибки совпадающий с периодом  $16.16 \pm 0.33$  ч, определенным ранее спектроскопическим методом. Наиболее вероятное значение периода Нептуна,  $13.43 \pm 0.16$  ч (99 %), соответствует его динамическому сжатию. Показано, что частоты всех шести быстро вращающихся планет и самых крупных астероидов находятся, в среднем, в квазирезонансе с частотой  $\nu_0 = 103 \pm 2$  мГц. Природа загадочного  $\nu_0$ -резонанса в Солнечной системе неизвестна.*

*ПРО ОБЕРТАННЯ УРАНА І НЕПТУНА, Котов В. А. — Для визначення періодів обертання гравітуючих мас планет-гігантів обчислено «резонанс-спектри» частот обертання масивних супутників. На основі теорії приливів постулюється, що найкраще спільне кратне їхніх сидеричних частот близьке до частоти обертання центральної планети. Знайдено новий «динамічний» період Урана,  $16.14 \pm 0.20$  г (довірча ймовірність 95 %), який у межах похибки збігається з періодом  $16.16 \pm 0.33$  г, визначеним раніше спектроскопічним методом. Найімовірніше значення періоду Нептуна,  $13.43 \pm 0.16$  г (99 %), відповідає його динамічному стисненню. Показано, що частоти усіх шести планет, які швидко обертаються, і найбільших астероїдів перебувають у квазірезонансі з частотою  $\nu_0 = 103 \pm 2$  мГц. Природа загадкового  $\nu_0$ -резонансу в Сонячній системі невідома.*

*ON ROTATION OF URANUS AND NEPTUNE, by Kotov V. A. — The «resonance-spectra» of the revolution frequencies of massive satellites are computed in order to determine the rotation periods of gravitating masses of the giant planets. Based upon the tidal theory, it is supposed that the best common multiple of the satellite sidereal frequencies should be close to the rotation frequency of the central planet. A new «dynamical» period of Uranus,  $16.14 \pm 0.20$  h (95 % C.L.), coincides well, within the error limits, with the*

*period  $16.16 \pm 0.33$  h determined earlier by spectroscopic technique. The most probable Neptune's period,  $13.43 \pm 0.16$  h (99 %), agrees with its dynamical oblateness. It is shown that the frequencies of all six fast-rotating planets and major asteroids occur to be in near-resonance with the frequency  $\nu_0 = 103 \pm 2$   $\mu$ Hz. The nature of the mysterious  $\nu_0$ -resonance in the solar system is unknown.*

## ВВЕДЕНИЕ

Сидерические периоды осевого вращения планет и астероидов заключены в пределах от 0.041 ч (астероид 1999 SF10) до 244.3 сут (Венера); подавляющее же большинство тел Солнечной системы вращаются с периодами 2—48 ч.

Исследователями отмечено различие между вращательными свойствами больших и малых тел. Большие астероиды — с диаметрами более 175 км — в среднем вращаются быстрее, чем малые. Тедеско и Заппала [37] полагают, что размер 150—250 км отделяет быстро вращающиеся первичные тела — носители реликтовых вращательных моментов — от остальных, более мелких тел, которые пострадали из-за соударений или являются их продуктами. С этой точки зрения не удивительно, что шесть планет вращаются быстро, с периодами 10—24 ч [1], исключая Меркурий, Венеру и Плутон, замедлившие вращение из-за приливного трения.

Периоды  $P$  некоторых планет-гигантов сейчас определены по вращению магнитного поля, а точнее — по модуляции радиоэмиссии, связанной с вращением. В ряде случаев, однако, эти периоды могут расходиться с периодами, характеризующими *истинное* вращение планет — вращение их *гравитирующих масс*. И вообще периоды, определенные разными методами, часто существенно различаются. Например, по вращению магнитного поля для Сатурна получен период 10.66 ч, близкий к значениям [1]: 10.23 ч на экваторе и 10.63 ч для среднеширотных зон. Для Нептуна же новые данные противоречивы: от 12 до 19 ч. По радиозатменным данным станции «Вояджер» период на широте  $60^\circ$  равен 14.1 ч, а по радиопотоку от всей планеты — 16.11 ч. Недавний результат [4] ставит под сомнение и известный период Юпитера 9.9 ч, практически совпадающий со значениями [1]. Он установлен по вариациям радиоизлучения и на деле может отражать лишь вращение радиоизлучающей области магнитосферы, тесно связанной, возможно, с Красным Пятном. Заметим, однако, что период пятна более нерегулярный, чем период магнитосферы. Различия периодов, определенных разными методами, указывают, как правило, не на точность работы исследователей, а на то, что значения  $P$  относятся к разным широтным и высотным областям планет.

Наружные слои планет-гигантов вращаются дифференциально, а твердые поверхности или слои, их представляющие, не видны. Поэтому найденные периоды, как правило, можно называть периодами планет лишь условно. Определяются же они пятью способами: по вращению атмосферных образований, по вариациям блеска, по доплеровскому сдвигу спектральных линий, по динамическому сжатию и по вращению магнитного поля, приводящему к переменности радиоизлучения планеты. Но такие периоды не могут приниматься однозначно за периоды основных масс планет, поскольку отражают вращение лишь их мощных атмосфер или магнитосфер, или вращение таких атмосферных образований, как радиоизлучающее Красное Пятно Юпитера. Наиболее адекватно, по-видимому, вращение *всей массы* планеты отражает сжатие, но оно определяется со значительными ошибками.

Новый метод определения истинной «динамической» скорости вращения основной массы планеты-гиганта основан на анализе среднего движения главных, массивных, спутников [4]. Он позволил установить новый период Юпитера,  $10.69 \pm 0.15$  ч, значительно отличающийся от общепринятого 9.9 ч, а также Сатурна:  $10.76 \pm 0.15$  ч, что согласуется с периодом магнитного поля 10.66 ч [43]. (Для более мощной магнитосферы Юпитера соответствие между новым и общепринятым периодами хуже, чем в случае Сатурна. Причиной может быть разная степень «синхронизации» вращения двух гигантов и их магнитосфер с обращением спутниковых систем.)

В последнее десятилетие доказана важнейшая роль резонансов и сопутствующих им диссипативных эффектов в эволюции орбит тел Солнечной системы и вращения планет [23, 38]. Численное интегрирование [26] эволюционных уравнений системы Земля—Луна показало, например, что диссипативные эффекты достаточны, чтобы привести к почти адиабатическому изменению наклона лунной орбиты за время порядка  $5 \cdot 10^9$  лет (главный механизм эволюции — приливы и трение между ядром Земли и мантией). А Иннанен и др. [22] недавно пришли к выводу, что двойной объект Земля—Луна играет ведущую роль в динамике внутренней области планетной системы, стабилизируя орбиты Меркурия и Венеры.

Применяемый здесь метод, конечно, ограничен: рассматриваются только потенциальные резонансы типа  $Z : 1$  ( $Z$  — положительное целое число). Поэтому наша работа — лишь первое приближение: учет более сложных резонансов снижает статистическую значимость результатов и требует отдельного рассмотрения. Заметим также, что аналогичная задача решается, но другими методами, и при рассмотрении движения искусственных спутников Земли. При этом не ставится задача уточнения скорости вращения планеты, а рассматриваются резонансы обращения спутников с вращением гармоник гравитационного поля Земли. В нашей задаче анализируются резонансы типа «планета-спутник» только для главных, массивных спутников Урана и Нептуна: эти спутники вследствие резонансного гравитационного взаимодействия уже могли повлиять на вращение двух планет в течение длительной эволюции Солнечной системы. Наша цель — не уточнение движения спутников, а определение или уточнение скорости вращения самой планеты.

#### МЕТОД: РЕЗОНАНС «ПЛАНЕТА-СПУТНИК»

В основе метода [4] лежит предположение об асимметрии внешнего гравитационного поля планеты и резонансе между средним движением массивных спутников и частотой вращения гармоник этого поля. Пример асимметрии — эллиптическая выпуклость в экваториальной области Земли. Соизмеримость же средних движений спутников давно известна и объяснена приливным взаимодействием [16].

Спутник вызывает приливы на планете, изменяя ее форму и скорость вращения; медленно изменяется и скорость обращения спутника. Резонанс наблюдается, когда периодическое движение спутника находится под воздействием периодической возмущающей силы со стороны планеты. При этом соизмеримость, или резонанс, отвечает состоянию минимума взаимодействия между телами системы (подробнее о физическом обосновании метода и методологии вычислений см. работу [4]).

Для примера напомним, что в 1980-х годах станция «Вояджер-2» открыла 10 новых небольших спутников Урана. Путем численного интегрирования орбит Дункан и Лисойер [13] установили, что спутниковая система сжатой у полюсов планеты более стабильна, чем идентичная система вокруг

сферически-симметричной планеты, какой является Уран. Найдено, что для Урана внутренние спутники менее стабильны, чем классические спутники. Поэтому по крайней мере некоторые из внутренних спутников Урана — сравнительно молодые и недолговечные по геологическим стандартам и по сравнению с возрастом Солнечной системы.

Приливы преобразуют момент вращения планеты в орбитальный момент количества движения спутника или наоборот, в зависимости от соотношения периодов и других параметров системы [5, 16]. Приливное взаимодействие, сопровождаемое диссипацией энергии, приводит к существенному разогреву некоторых спутников и играет, по-видимому, главную роль в их геологической эволюции (в частности, в тепловой активности и вулканизме Ио). Полярное сжатие планеты приводит к вековому движению перигентра и узлов орбиты спутника; иногда следует учитывать и возмущения со стороны Солнца и других планет. Общеизвестно также, что именно приливное трение за время существования Солнечной системы радикально изменило орбиты многих спутников, в результате чего сейчас мы и наблюдаем преобладание квазисоизмеримостей, или квазирезонансов их средних движений.

Изменение большой полуоси  $a$  и полной энергии  $E$  орбитального движения спутника происходит из-за гравитационного взаимодействия между запаздывающим выступом планетного прилива и спутником, а также благодаря приливной диссипации (силы трения при радиальных приливных деформациях обоих тел также приводят к вековому изменению орбиты [17]). Будем предполагать, что в инерциальной системе координат, связанной с барицентром системы, частота вращения планеты  $\nu_p$  больше частоты спутника  $\nu_s$ . Это, по-видимому, справедливо почти для всех главных регулярных спутников. Но такое условие необязательно, и ниже при вычислениях вполне может быть случай  $\nu_p \leq \nu_s$ . Будем также считать, что все спутники имеют прямое обращение, хотя те же резонансные соотношения годятся и для спутников с обратным обращением (случай Нептуна). О разных формулировках и теоретических аспектах понятия резонанса см. работы [2, 16, 30].

Орбита наиболее устойчива, когда итоговое изменение энергии  $\Delta E$  за множество циклов вращения планеты и обращений спутника равно нулю, а это имеет место при квазирезонансе (резонансе):

$$\nu_s \approx \nu_p / Z, \quad (1)$$

где  $Z$  — достаточно малое целое число. В этом случае суммарные результаты возмущающих сил, изменяющих  $a$  и  $E$ , уравниваются за период обращения спутника. Наиболее устойчивое динамическое состояние системы достигается при таких частотах обращения, когда они все в среднем находятся в резонансе с  $\nu_p$ . Картина подобна той, которую встречаем в электродинамике при рассмотрении, например, электродвигателя переменного тока, т. е. при взаимодействии вращающегося магнитного поля ротора с полем обмоток статора.

Допустим, что орбита спутника круговая и расположена вблизи экваториальной плоскости планеты, а возмущениями со стороны других спутников пренебрежем. В системе координат, связанной со спутником, уравнение движения запишется в виде

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = G \frac{mM}{a^2} [\mathbf{W}(t) + \mathbf{f}(t)], \quad (2)$$

где  $G$  — гравитационная постоянная,  $m$  и  $M$  — массы планеты и спутника соответственно,  $\mathbf{v}$  — вектор скорости спутника,  $t$  — время,  $\mathbf{W}(t)$  — главная

составляющая притяжения планеты, обусловленная ньютоновским потенциалом ее гравитационного поля,  $f(t)$  — возмущение, обусловленное приливами и асимметрией планеты и изменяющееся с частотой  $\nu'_s = \nu_p - \nu_s$ . В случае двух спутников S1 и S2 частоты вариаций возмущающих сил со стороны планеты равны соответственно

$$\begin{aligned} \nu'_{S1} &= \nu_p - \nu_{S1}, \\ \nu'_{S2} &= \nu_p - \nu_{S2}. \end{aligned} \quad (3)$$

В результате приливной эволюции частоты спутников становятся квазизоизмеримыми между собой [16], поэтому

$$\frac{\nu_p - \nu_{S1}}{\nu_p - \nu_{S2}} \approx \frac{Z_1}{Z_2}, \quad (4)$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  — достаточно малые целые числа. Отсюда следует, что отношения  $\nu_p/\nu_{S1}$  и  $\nu_p/\nu_{S2}$  также близки к отношению двух малых целых чисел. В случае массивных спутников Юпитера давно получены доказательства устойчивости квазизоизмеримостей их средних движений [16].

Поскольку число  $N$  массивных спутников у каждой планеты невелико ( $< 10$ ), ограничимся рассмотрением ситуации  $\nu_p \approx Z^k \cdot \nu_s$ , где  $k = \pm 1$ . Легко показать [4], что основную роль в установлении резонанса играют самые массивные и близкие спутники, а влиянием малых и далеких спутников можно пренебречь. Частоте каждого массивного спутника приписываем статистический вес 1; приводимые неопределенности примерно соответствуют стандартной ошибке  $\pm 1\sigma$ . Приписывать одинаковый вес всем массивным спутникам, конечно, не совсем правильно из-за разного гравитационного воздействия на планету разноудаленных спутников. Пока трудно, однако, оценить количественно эффективность воздействия разных спутников, — в частности, их механические числа  $Q$ , а также длительность отдельного воздействия на вращение планеты. Поэтому в качестве нулевого приближения взяты равные веса

В основе вычислений лежит понятие «резонанс-спектра» (РС)  $F(\nu)$  — аналога периодограммы временной переменной [4]. Но для РС главным аргументом служит не время, а частота  $\nu$ :

$$F(\nu) \equiv F_0(\nu) \times |F_0(\nu)|, \quad (5)$$

где  $F_0(\nu)$  — базовая функция соизмеримости, определенная в [4]. Суть  $F_0(\nu)$  в том, что ее максимум и, соответственно, максимум РС соответствуют наилучшей МНК-аппроксимации отношений  $\nu$  и  $\nu_i$  целыми числами, где  $\nu$  — пробная частота,  $\nu_i$  — частота  $i$ -го объекта, а  $i = 1, 2, \dots, N$  — номер объекта в выборке. Частоту, показавшую максимум  $F(\nu)$ , назовем наилуч-

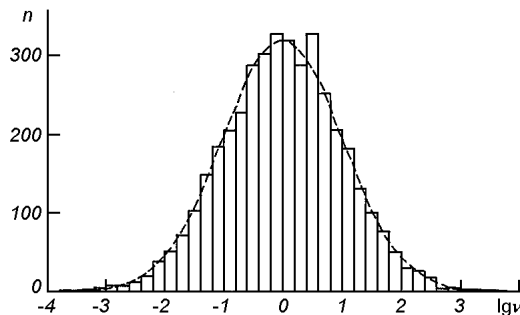


Рис. 1. Распределение 4000 значений  $F_0(\nu)$ , вычисленных для случайных частот (число частот-объектов  $N = 2000$ , число пробных частот 4000). Шкала по горизонтали — в нормирующих единицах  $\sigma_0 = (60N)^{-1/2}$  [4]; пунктирная линия соответствует нормальному распределению со стандартным отклонением  $\sigma_0$

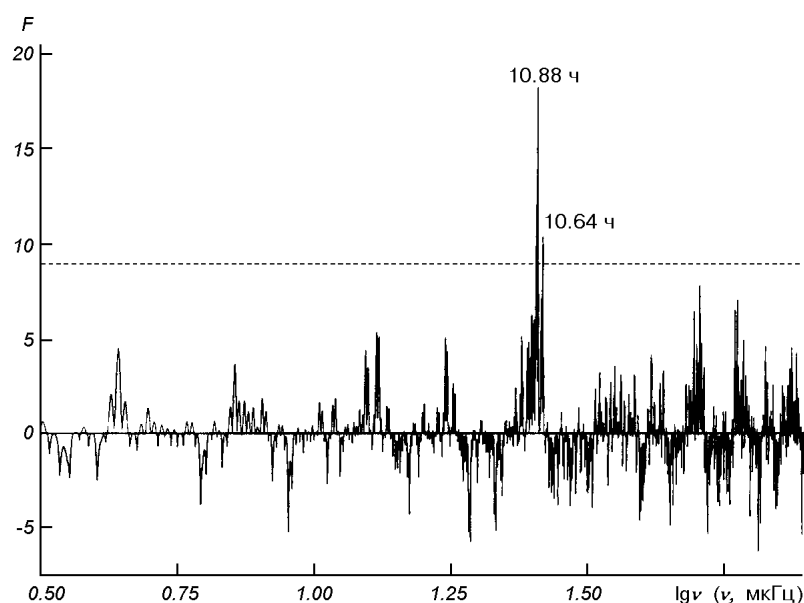


Рис. 2. Спектр  $F(\nu)$ , вычисленный для восьми массивных спутников Сатурна согласно [4]. Пунктирная линия соответствует уровню априорной значимости  $3\sigma$

шей квазисоизмеримой, или резонансной частотой для данной выборки частот спутников.

Нормальный характер распределения  $F_0(\nu)$  следует из теоретического рассмотрения [3]. Но важно проверить это на достаточно большой выборке случайных объектов. С этой целью в диапазоне периодов  $P = 0.01...10$  сут сгенерировано 2000 частот (т. е. «объектов»), затем в диапазоне от  $\lg \nu = 0$  до  $\lg \nu = 4$  (частота  $\nu$  — в мкГц) с шагом  $\Delta \lg \nu = 0.001$  было вычислено 4000 взаимно независимых значений  $F_0(\nu)$ . Полученное распределение показано на рис. 1. Оно подчиняется нормальному закону с нулевым средним и единичным средним квадратичным значением.

Так как  $N$  невелико, спектры  $F(\nu)$  вычисляем вблизи частот, известных из предыдущих исследований; считаем, что резонансные частоты лишь уточняют скорости вращения планет. Для примера на рис. 2 показан РС, вычисленный ранее [4] для восьми массивных спутников Сатурна. Максимальный (двойной) пик показывает, что планета вращается с периодом  $10.76 \pm 0.15$  ч, совпадающим в пределах ошибки с периодом  $10.66$  ч, определенным ранее «Вояджером».

#### ВРАЩЕНИЕ БОЛЬШИХ ПЛАНЕТ

Иногда невозможно утверждать, отражает ли данный период вращение «твёрдого ядра» планеты, состоящего из тяжелого и ледяного компонентов, или вращение атмосферы, «пятен», магнитного поля и/или магнитосферы. Обзор определений периодов, сделанных в XIX и XX вв., см. в работах [6, 21].

Для экваториального вращения Сатурна Аллен [1] приводит сидерический период  $10.233$  ч и одновременно  $10.633$  ч для умеренных широтных зон. Но в 1980 г. станция «Вояджер-1» зарегистрировала всплески радиоэмиссии Сатурна, повторяющиеся с сидерическим периодом  $10.657$  ч [43],

Таблица 1. Сводка оценок периода вращения Нептуна

Период, ч	Метод	Литературный источник
22±4	спектроскопия	[21]
15.4±3	спектроскопия	[6]
1.2 <sup>+1.8</sup> <sub>-1.4</sub>	спектроскопия	[24]
18.17±0.05; 19.58±0.05	фотометрия	[11]
18.44±0.01	фотометрия	[33]
18.4	фотометрия	[36]
18.2±0.4	фотометрия	[7]
17.73±0.10	фотометрия	[10]
≈ 18	фотометрия	[12]
14 <sup>+4</sup> <sub>-3</sub>	по сжатию	[6]
12.9 <sup>+4</sup> <sub>-2</sub>	по сжатию	[29]
17.24	радиоданные («Вояджер»)	[42]
16.11	радиоданные («Вояджер»)	[41]
16.96—18.35	по изображениям	[19]
12—19; 17.3	по изображениям	[19]
16—18	по изображениям	[20]

Таблица 2. Сводка оценок периода вращения Урана

Период, ч	Метод	Литературный источник
10.8±0.2	спектроскопия	[24]
23 <sup>+5</sup> <sub>-2</sub>	спектроскопия	[39]
24±3	спектроскопия	[21]
12.9±1.5	спектроскопия	[40]
24.4±4	спектроскопия	[6]
16.16±0.33	спектроскопия	[9]
15.0 <sup>+4.0</sup> <sub>-2.6</sub>	спектроскопия	[25]
17±3	спектроскопия	[18]
23.9	фотометрия	[35]
≈ 24, ≈ 12	фотометрия	[34]
≈ 18	полярное сжатие	[28]
12.8±1.7	полярное сжатие	[14]
12.8 <sup>+2.3</sup> <sub>-1.1</sub>	полярное сжатие	[15]
16.8±0.8	полярное сжатие	[6]
≈ 16	полярное сжатие	[29]
16.2±0.2	вращение деталей	[27]
17.24±0.01	радиоизлучение	[42]
16—18	облака	[20]

и сейчас считается, что этот период отвечает вращению самой планеты, или, скорее, ее глобального магнитного поля.

Для Юпитера значение 10.69 ч [4] нового, «динамического» периода значительно отличается от общепринятого значения 9.9 ч [1], характеризующего, по-видимому, вращение не самой планетной массы, а лишь ее мощной атмосферы и/или радиоизлучающей части магнитосферы.

С 1928 г. считалось, что период Нептуна  $15.8 \pm 1.0$  ч. Однако измерения, сделанные в течение последних 27 лет, дали противоречивые результаты (табл. 1). То же касается периода Урана. Это обусловлено, в частности, значительной динамической нестабильностью их атмосфер от года к году, а для Урана — еще и большим углом наклона экватора к плоскости орбиты ( $98^\circ$ ).

Подробная сводка определений вращения Нептуна приведена в работе [19], и особенно детально — на основе данных станции «Вояджер» и

космического телескопа им. Хаббла. Атмосфера вращается дифференциально, но, в отличие от Юпитера и Сатурна, наиболее медленное вращение — на экваторе ( $P \approx 18.7$  ч), а наиболее быстрое — на высоких широтах (12—13 ч на широте  $-70^\circ$ ). Большие темные пятна, наблюдавшиеся в 1994—1995 гг. на широте  $31^\circ$ , вращались с периодом 17.3 ч. В то же время по радиозатменным данным Вояджера, период 14.1 ч на широте  $60^\circ$ , а по радиоизлучению всей планеты — период 16.1 ч.

Период Урана долгое время считался равным  $10.8 \pm 0.2$  ч согласно спектроскопическим измерениям [24]. Сводка более поздних определений содержится в табл. 2. Отметим, в частности, данные «Вояджера-1»: радиоизлучение изменялось с периодом  $17.24 \pm 0.01$  ч, соответствующим вращению магнитного поля, и следовательно, магнитосферы Урана [42]. Профиль же зональных ветров показывает значительный разброс периодов: от 16 ч на широтах  $\pm 42^\circ$  до 18 ч на экваторе [20].

Оценки периодов Нептуна и Урана подвержены большим изменениям. Это обусловлено удаленностью планет и отсутствием устойчивых ясных деталей на поверхностях, а также — в случае Урана — пекулярной ориентацией оси вращения. Возможно, что большинство оценок периодов (в том числе в табл. 1 и 2) Нептуна и Урана — реальные, но они относятся к различным образованиям и разным зональным системам ветров, на что указывалось выше.

#### ПЕРИОД УРАНА

Система спутников Урана — самая регулярная в Солнечной системе. Спутники движутся в прямом направлении по почти круговым орбитам и имеют практически нулевое, кроме Миранды, наклонение к экваториальной плоскости.

Таблица 3. Главные спутники Урана и Нептуна (большая полуось  $a$  — в радиусах планеты)

Уран			Нептун		
Спутник	$a$	$P$ , сут	Спутник	$a$	$P$ , сут
Миранда	5.078	1.413	Наяда	1.948	0.2944
Ариэль	7.481	2.5204	Таласса	2.022	0.3115
Умбриэль	10.41	4.1442	Деспина	2.121	0.3347
Титания	17.05	8.7059	Галатея	2.502	0.4287
Оберон	22.79	13.4633	Лариса	2.970	0.5547
			Протеус	4.751	1.1223
			Тритон	14.328	5.8769

Данные о пяти главных спутниках содержатся в табл. 3, а спектр  $F(\nu)$  для них показан на рис. 3. Диапазон пробных частот перекрывает область частот возможного вращения Урана согласно предыдущим определениям (согласно табл. 3 ожидаемый период — в пределах 10—25 ч). Самый большой пик, с априорным (т. е. на заданной частоте) доверительным интервалом  $W' = 2.5\sigma$  отвечает периоду  $P_U = 16.14 \pm 0.20$  ч. В пользу его реальности говорят дополнительные обстоятельства:

- в высокочастотной области заметный пик  $P \approx 8.31$  ч почти совпадает с оборотом главного пика  $P_U$ , так как  $16.14/8.31 \approx 2$ ;



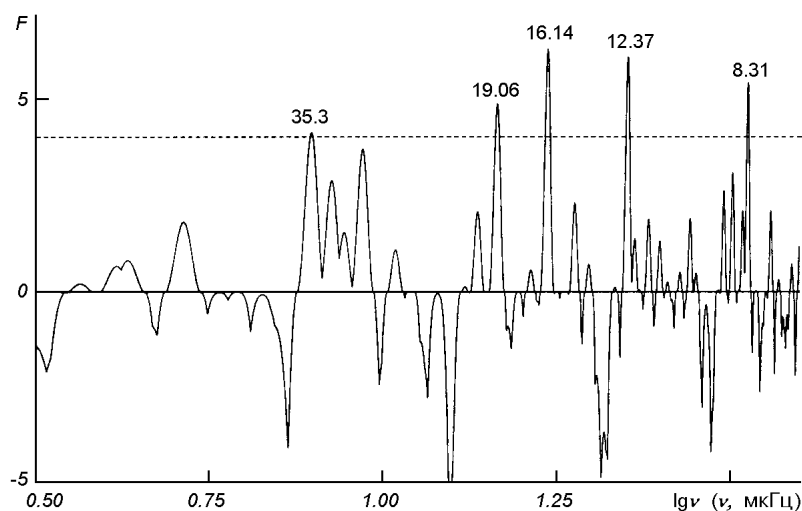


Рис. 3. Спектр  $F(\nu)$  для пяти массивных спутников Урана. Пунктирная линия соответствует уровню априорной значимости  $2\sigma$ ; числами обозначены периоды главных пиков (в часах)

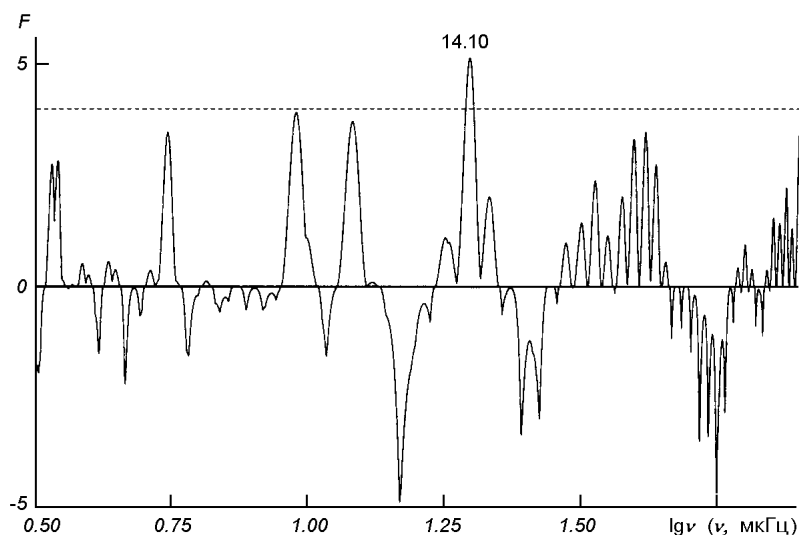


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для семи спутников Нептуна

— в области длинных периодов двойному периоду Урана  $2P_U \approx 32.3$  ч соответствует группа максимумов с центром около 32.3 ч.

#### СИСТЕМА НЕПТУНА

Периоды обращения семи спутников Нептуна приведены в табл. 3. Тритон имеет обратное вращение; исключена Нереида, находящаяся на большом расстоянии (223 радиусов планеты) и имеющая очень большой период (360 сут).

Резонанс-спектр вычислен для широкого диапазона периодов от 3.5 до 88 ч, что перекрывает диапазон табл. 1. Спектр приведен на рис. 4, где

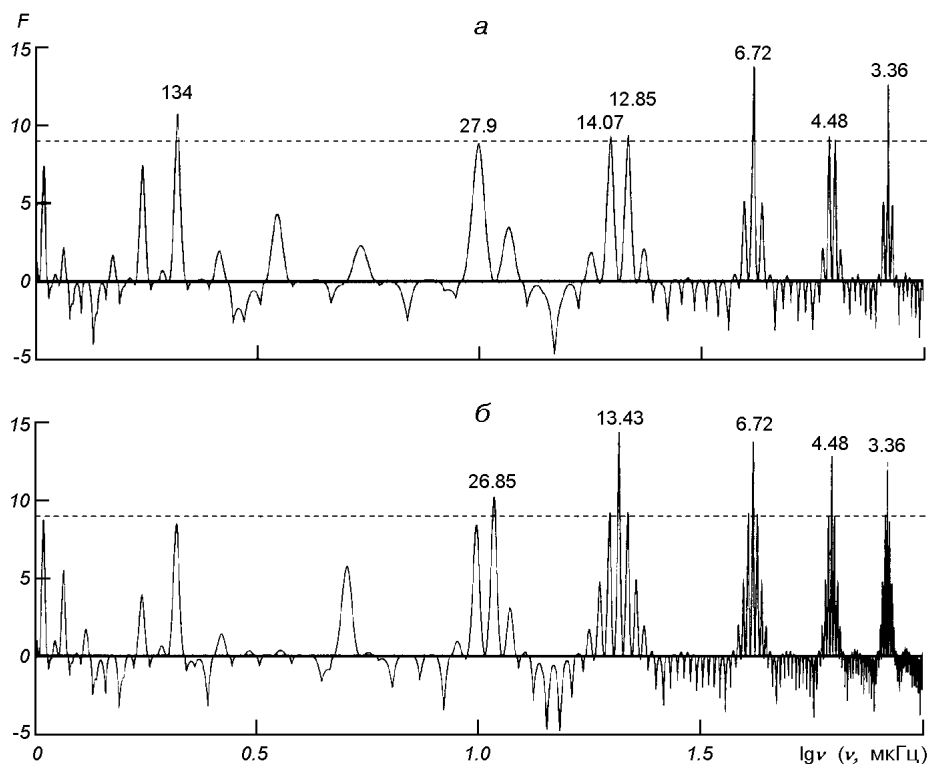


Рис. 5. То же, что на рис. 4: (а) — для трех главных спутников Нептуна (Лариса, Протеус, Тритон); б — для Тритона с удвоенным периодом, Ларисы и Протеуса. Пунктирная линия в обоих случаях отвечает уровню априорной значимости  $3\sigma$

самый большой пик соответствует периоду  $P'_N = 14.1 \pm 0.7$  ч ( $W' = 2.3\sigma$ ; о фактическом доверительном интервале см. ниже).

Среди семи спутников четыре наименьших (радиусы  $R_S$  от 29 до 79 км) вращаются быстрее планеты, если для нее принять период  $P'_N$ . Их движение, по-видимому, возмущается в существенной степени как планетой, так и внешними, более массивными спутниками. Представляет интерес, как в случае Юпитера [4], получить РС отдельно для трех самых массивных спутников, обращающихся к тому же медленнее, чем вращается планета. Эти три спутника суть Лариса ( $R_S = 96$  км), Протеус (209 км) и Тритон (1353 км). Спектр  $F(\nu)$  для них показан на рис. 5, а, где отмечены пики, превышающие  $W' \approx 3\sigma$ . Прежний пик  $P \approx 14.1$  ч представляет собой дублет с частотами  $(14.07 \text{ ч})^{-1}$  и  $(12.85 \text{ ч})^{-1}$ ; его центр отвечает периоду  $P''_N = 13.43 \pm 0.70$  ч. Интересно отметить, что все другие доминирующие пики, отмеченные на рис. 5, а, квазисоизмеримы с  $P''_N$ . Их периоды находятся с последним в следующих соотношениях, строго выполняющихся в пределах ошибок: 10:1, 2:1, 1:2, 1:3 и 1:4. Это повышает достоверность дублета с центром  $P''_N = 13.43$  ч.

Отметим интересный факт, что обе составляющие дублета, 14.07 и 12.85 ч, целочисленно *соизмеримы* с периодом Тритона 5.8769 сут (отношения около 10.02 и 10.98), а центральный период 13.43 ч, наоборот,

целочисленно несоизмерим с периодом Тритона: отношение 10.50. Если период планеты 13.43 ч, то получается такой вид резонанса: за два обращения Тритона Нептун совершает 21 оборот вокруг своей оси. Это в принципе уточняет период планеты: по-видимому, он близок к 13.433 ч.

Принимая во внимание вид спектра всей спутниковой системы на рис. 5, а, наиболее вероятным периодом Нептуна следует считать  $P_N = 13.43 \pm 0.70$  ч при априорном доверительном интервале  $W' = 3\sigma$ .

#### ТРИ ГЛАВНЫХ СПУТНИКА НЕПТУНА

Тритон имеет обратное обращение, и его период  $P_T$ , в отличие от периодов Ларисы и Протеуса, целочисленно несоизмерим с  $P_N$ . При обратном обращении взаимодействие спутника с приливными выступами трех спутников усложняется. Не вдаваясь в теоретическое рассмотрение, ограничимся случаем, когда Тритон находится в удвоенном резонансе с планетой:  $2P_T \approx Z \cdot P_N$ , Лариса же и Протеус — в обычном резонансе.

Соответствующий РС представлен на рис. 5, б, где самый высокий пик ( $W' = 3.8\sigma$ ) отвечает периоду  $P_N = 13.43 \pm 0.16$  ч. Периоды остальных наиболее заметных пиков: 26.85 (двойной пик), 6.72, 4.48 и 3.36 ч находятся почти в строгом целочисленном отношении к  $P_N$ : 2:1, 1:2, 1:3 и 1:4.

С учетом значимости  $P_N$ -пика в разных спектрах следует считать, что наиболее достоверный период Нептуна  $P_N = 13.43 \pm 0.16$  ч ( $W' \approx 3\sigma$ ).

#### СТРАННЫЙ РЕЗОНАНС ОСЕВЫХ ВРАЩЕНИЙ

Во второй графе табл. 4 приведены общепринятые сидерические периоды вращения шести быстро вращающихся планет, а в третьем — новые динамические периоды четырех планет-гигантов; в конце таблицы даются также периоды всех известных крупнейших астероидов (см. ниже).

Обращает на себя внимание близость друг к другу двух пар периодов: Земля—Марс и Юпитер—Сатурн. Случайна она или нет? Интересно применить тот же метод — вычисление РС, — но не для спутников, а для вращения самих планет. Есть ли между частотами вращения нечто общее, например резонанс на какой-либо частоте (не утруждаясь пока поисками разумной физической причины)?

Таблица 4. Периоды вращения шести планет и восьми крупных астероидов

Планета (астероид)	P, ч [1]	P, ч [4]	Достоверность, %
Земля	23.934		
Марс	24.623		
Юпитер	9.84, 9.93	10.69±0.15	99
Сатурн	10.23, 10.63, 10.66	10.76±0.15	99.99
Уран	10.82, 17.24	16.14±0.20	95
Нептун	15.80, 14.1, 16.11	13.43±0.16	99
1 Церера	9.075		
2 Паллада	7.811		
4 Веста	5.342		
10 Гигия	27.623		
52 Европа	5.633		
511 Давида	5.129		
704 Ингермания	8.727		
(20000) Варуна	3.179		

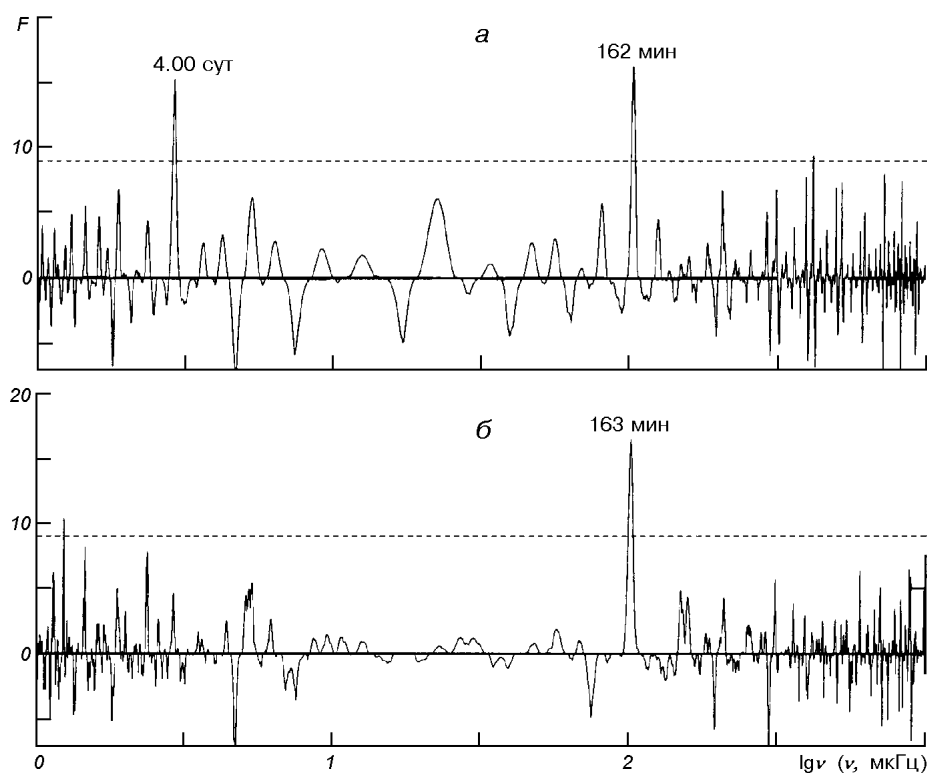


Рис. 6. Резонанс-спектр для частот вращения (а) шести быстро вращающихся планет и (б) шести планет и восьми самых крупных астероидов. Пунктирными линиями показаны уровни априорной значимости  $3\sigma$ ; самые высокие пики обеих спектров соответствуют периоду 2.7 ч

На рис. 6, а показан результат вычислений для всех шести планет (для планет-гигантов приняты периоды, определенные здесь и в [4]). Спектр вычислен для большого диапазона частот, от 1 до  $10^3$  мкГц, или по периоду от 0.3 ч до 11.57 сут. Доминирующий пик с априорным доверительным уровнем  $W' = 4\sigma$  соответствует периоду  $P_0 = 2.69 \pm 0.08$  ч. Второй по высоте пик отвечает периоду  $4.00 \pm 0.12$  сут, квазисоизмеримому с периодами всех шести планет (см. табл. 4); остальные пики статистически незначимы.

Но вспомним, что период  $P_0 \approx 2.667$  ч хорошо известен в физике Солнца: именно он (примерно  $1/9$  земных среднесолнечных суток) был более полувека тому назад постулирован Савэнном [32] как «инфразвук» Солнца, или как некая его «вибрация», определяющая структуру Солнечной системы. А позднее колебания фотосферы Солнца, и именно с этим периодом, действительно были обнаружены [8, 31], но до сих пор не объяснены. Заметим, что «второй» период рис. 6, а, равный 4.00 сут, находится в квазисоизмеримости 36:1 с периодом пульсаций Солнца  $P_0$ . Если считать период  $P_0$  априорно заданным, то фактический доверительный уровень  $P_0$ -эффекта на рис. 6, а составляет  $4\sigma$  (99.99 %).

Теперь к шести планетам добавим все самые крупные астероиды с диаметрами  $D \geq 300$  км — таких объектов восемь (см. табл. 4) и вычислим РС для этих крупнейших тел Солнечной системы (в анализ не включены только три медленных ротатора — Меркурий, Венера и Плутон, а также Солнце). Полученный РС для 14 объектов показан на рис. 6, б, где

максимальный пик отвечает периоду  $163 \pm 5$  мин при фактическом доверительном уровне  $W = 4\sigma$ . По сравнению с рис. 6, а пик  $P_0$  теперь сильнее выделяется на фоне понизившихся шумов. Это наводит на интересные размышления о роли  $P_0$ -периодичности — или процесса, за ней скрывающегося, — для вращения планет, а также для понимания происхождения и эволюции самой Солнечной системы.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резонанс-спектр  $F(\nu)$  для набора частот по существу эквивалентен периодограмме (или спектру мощности), получаемой дискретным преобразованием Фурье, но с той разницей, что для РС аргументом является не время, а частота. Метод позволяет более или менее надежно оценить статистическую значимость результата, т. е. максимума РС на частоте найденного резонанса (см. табл. 4).

В случае Сатурна наша оценка периода  $10.76 \pm 0.15$  ч близка к общепринятому значению [1], а также, в пределах ошибки, она согласуется с данными [4] и значением 10.66 ч, определенным «Вояджером-1» [43]. Поэтому фактическая доверительная вероятность периода  $W$  практически совпадает с априорной вероятностью  $W' = 4\sigma$  (99.99 %).

Для Нептуна конечный результат основан на анализе вращения трех главных его спутников (рис. 5):  $P_N = 13.43 \pm 0.16$  ч ( $W' = 3.8\sigma$ ). После учета числа независимых частот, отвечающих диапазону ожидаемых периодов (табл. 1), для уровня достоверности получаем  $W \approx 2.5\sigma$  (99 %). Динамический период  $P_N$  находится в согласии с одним из периодов, определенных ранее по оптическому и динамическому сжатию планеты: около 13 или 14 ч (см. табл. 1).

Труднее с периодом Урана, для которого (точнее, для пиков в спектре спутников) априорное значение  $W' = 2.5\sigma$ . Если учесть число независимых пробных частот в спектре (рис. 3), то для фактической достоверности получаем 75 %. Однако, если считать определенные ранее периоды Урана (табл. 2) как априорные, — они группируются около 11—13, 16—17 и 24 ч, — то для фактической достоверности  $P_U$  получаем  $W = 2\sigma$  (95 %).

Не очень высокий уровень достоверности для Урана не понижает ценности анализа. Заметим, что в большинстве случаев (см. табл. 1 и 2) о значимости периодов говорить трудно или вообще не приходится в силу известных причин, а также потому, что периоды могут относиться к вращению различных образований на этих планетах. Тем более, что скорости вращения образований могут изменяться со временем и относиться к разным широтам и глубинам в атмосферах, а также отличаться существенно от скоростей вращения «твердых ядер» планет.

Динамический период Урана,  $16.14 \pm 0.20$  ч, в пределах ошибок наиболее хорошо согласуется с периодом  $16.16 \pm 0.33$  ч, определенным Брауном и Гуди [9] по наклону спектральных линий. Такой период согласуется как с оптическим сжатием планеты, так и с квадрупольным гравитационным моментом  $J_2$ . Наша оценка периода, кроме того, хорошо согласуется и со значением  $16.31 \pm 0.27$  ч, признанным Р. М. Гуди наиболее надежным [27].

Найденные периоды вращения планет-гигантов, не претендуя на 100 %-ю достоверность, послужат уточнению истории образования планет, их внутреннего строения и состава. Из рис. 6 следует, например, что взаимная близость периодов вращения пар планет Земля — Марс и Юпитер — Сатурн не случайна. Особый интерес вызывает и тенденция периодов быстро вращающихся планет и крупных астероидов к целочисленной

соизмеримости с периодом глобальной пульсации Солнца  $P_0 = 160$  мин. Однако мы еще далеки от понимания физической природы и роли загадочного  $P_0$ -резонанса в Солнечной системе.

Мы благодарны С. Кучми за предоставление некоторых данных и полезные дискуссии, Ф. М. Санчесу за обсуждение проблемы вращения планет-гигантов и «когерентной космической осцилляции», а также рецензентов за ряд полезных замечаний.

Работа частично поддержана грантом ИНТАС (N 2000—840).

1. Аллен К. У. *Астрофизические величины*. — М.: Мир, 1977.—448 с.
2. Гребеников Е. А., Рябов Ю. А. *Резонансы и малые знаменатели в небесной механике*. — М.: Наука, 1978.—128 с.
3. Котов В. А. *Осцилляции Солнца и вращение тесных двойных систем в Галактике: период 160 минут // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1986.—74.—С. 69—84.*
4. Котова И. В., Котов В. А. *О вращении Юпитера и Сатурна // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 2.—С. 157—165.*
5. Макдональд Г. Дж. Ф. *Приливное трение / В кн. Приливы и резонансы в Солнечной системе*. — М.: Мир, 1975.—С. 9—96.
6. Belton M. J. S., Wallace L., Hayes S. H., Price M. J. *Neptune's rotation period: a correction and a speculation on the difference between photometric and spectroscopic results // Icarus.—1980.—42, N 1.—P. 71—78.*
7. Belton M. J. S., Wallace L., Howard S. *The periods of Neptune: evidence for atmospheric motions // Icarus.—1981.—46, N 2.—P. 263—274.*
8. Brookes J. R., Isaak G. R., van der Raay H. B. *Observation of free oscillations of the Sun // Nature.—1976.—259, N 5539.—P. 92—95.*
9. Brown R. A., Goody R. M. *The rotation of Uranus. II // Astrophys. J.—1980.—235, N 3.—P. 1066—1070.*
10. Brown R. H., Cruikshank D. P., Tokunaga A. T. *The rotation period of Neptune's upper atmosphere // Icarus.—1981.—47, N 2.—P. 159—165.*
11. Cruikshank D. P. *On the rotation period of Neptune // Astrophys. J.—1978.—220, N 2.—P. L57—L59.*
12. Cruikshank D. P. *Variability of Neptune // Icarus.—1985.—64, N 1.—P. 107—111.*
13. Duncan M. J., Lissauer J. J. *Orbital stability of the Uranian satellite system // Icarus.—1997.—125, N 1.—P. 1—12.*
14. Dunham E., Elliot J. L. *The rotation period of Uranus // Bull. Amer. Astron. Soc.—1979.—11, N 3.—P. 568.*
15. Elliot J. L., Dunham E., Mink D. *The radius and ellipticity of Uranus from its occultation of SAO 158687 // Bull. Amer. Astron. Soc.—1979.—11, N 3.—P. 568.*
16. Goldreich P. *An explanation of the frequent occurrence of commensurable mean motions in the Solar system // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.—1965.—130, N 2—3.—P. 159—181.*
17. Goldreich P., Peale S. J. *The dynamics of planetary rotations // Ann. Rev. Astron. Astrophys.—1968.—6.—P. 287—320.*
18. Griffin R. F., Gunn J. E. *A naïve determination of the rotation period of Uranus // The Observatory.—1985.—105, N 1068.—P. 203—206.*
19. Hammel H. B., Lockwood G. W. *Atmospheric structure of Neptune in 1994, 1995, and 1996: HST imaging at multiple wavelengths // Icarus.—1997.—129, N 2.—P. 466—481.*
20. Hammel H. B., Rages K., Lockwood G. W., et al. *New measurements of the winds of Uranus // Icarus.—2001.—153, N 2.—P. 229—235.*
21. Hayes S. H., Belton M. J. S. *The rotational periods of Uranus and Neptune // Icarus.—1977.—32, N 4.—P. 383—401.*
22. Innanen K., Mikkola S., Wiegert P. *The Earth—Moon system and the dynamical stability of the inner Solar system // Astron. J.—1998.—116, N 4.—P. 2055—2057.*
23. Laskar J. *Large scale chaos and the spacing of the inner planets // Astron. and Astrophys.—1997.—317, N 2.—P. L75—L78.*
24. Moore J. H., Menzel D. H. *The rotation of Uranus // Publ. Astron. Soc. Pacif.—1930.—42, N 250.—P. 330—335.*
25. Münch G., Hippelein H. *The effects of seeing on the reflected spectrum of Uranus and Neptune // Astron. and Astrophys.—1980.—81, N 1—2.—P. 189—197.*
26. Néron de Surgy O., Laskar J. *On the long term evolution of the spin of the Earth // Astron. and Astrophys.—1997.—318, N 3.—P. 975—989.*
27. O'Meara S. J. *A visual history of Uranus // Sky and Telescope.—1985.—70, N 5.—P. 411—414.*

28. *Podolak M.* Methane rich models of Uranus // *Icarus*.—1976.—27, N 4.—P. 473—477.
29. *Podolak M., Reynolds R. T.* On the structure and composition of Uranus and Neptune // *Icarus*.—1981.—46, N 1.—P. 40—50.
30. *Roy A. E., Ovenden M. W.* On the occurrence of commensurable mean motions in the Solar system. II. The mirror theorem // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1955.—115, N 3.—P. 296—309.
31. *Severny A. B., Kotov V. A., Tsap T. T.* Observations of solar pulsations // *Nature*.—1976.—259, N 5539.—P. 87—89.
32. *Sevin É.* Sur la structure du système solaire. (Prévision d'une nouvelle planète) // *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris*.—1946.—222.—P. 220—221.
33. *Slavsky D., Smith H. J.* The rotation period of Neptune // *Astrophys. J.*—1978.—226, N 1.—P. L49—L52.
34. *Slavsky D. B., Smith H. J.* The rotational period of Uranus // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1980.—12, N 3.—P. 704.
35. *Smith H. J., Slavsky D. B.* Rotation period of Uranus // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1979.—11, N 3.—P. 568.
36. *Smith H. J., Slavsky D. B.* Further evidence for the longer rotation period of Neptune // *Bull. Amer. Astron. Soc.*—1980.—12, N 3.—P. 704.
37. *Tedesco E. F., Zappala V.* Rotational properties of asteroids: correlations and selection effects // *Icarus*.—1980.—43, N 1.—P. 33—50.
38. *Touma J., Wisdom J.* Resonances in the early evolution of the Earth—Moon system // *Astron. J.*—1998.—115, N 4.—P. 1653—1663.
39. *Trafton L.* Uranus' rotational period // *Icarus*.—1977.—32, N 4.—P. 402—412.
40. *Trauger J. T., Roesler F. L., Münch G.* A redetermination of the Uranus rotation period // *Astrophys. J.*—1978.—219, N 2.—P. 1079—1083.
41. *Warwick J. W., Evans D. R., Peltzer G. R., et al.* Voyager planetary radio astronomy at Neptune // *Science*.—1989.—246, N 4936.—P. 1498—1501.
42. *Warwick J. W., Evans D. R., Romig J. H., et al.* Voyager 2 radio observations of Uranus // *Science*.—1986.—233, N 4759.—P. 102—106.
43. *Warwick J. W., Pearce J. B., Evans D. R., et al.* Planetary radio astronomy observations from Voyager 1 near Saturn // *Science*.—1981.—212, N 4491.—P. 239—243.

Поступила в редакцию 05.05.03