

Либрации Меркурия в долготе по данным наземных радарных наблюдений

Ю. В. Баркин

Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ).

Россия, 119991, Москва, Университетский пр-т, д. 13.

E-mail: barkin@inbox.ru

Статья поступила 14.09.2010, подписана в печать 04.03.2011

На основе аналитической теории либраций Меркурия (на эллиптической орбите) в долготе и данных по определению значений угловой скорости вращения Меркурия, полученных с помощью высокоточного комплексного метода наземного радиолокационного слежения, определяются амплитуда, фаза и период свободной либрации и амплитуды пяти основных гармоник вынужденных (годовой, полугодовой и третьегодовой, ...) либраций планеты в долготе.

Ключевые слова: Меркурий, вращение, либрации в долготе, радиолокационные наблюдения.

УДК: 523.4. PACS: 96.30.Dz, 96.12.De.

Введение

В 1988 г. И. В. Холин [1] разработал эффективный высокоточный метод определения параметров вращения планет по комплексным радиолокационным наблюдениям на двух радиотелескопах, разнесенных и расположенных определенным образом друг от друга. А именно, им было показано, что скорость вращения Меркурия и наклонение его оси с достаточно высокой точностью могут быть определены из интерферометрических наблюдений посланного с Земли и отраженного от поверхности Меркурия радиосигнала [2]. Исследования, выполненные американскими учеными на телескопах Goldstone в Калифорнии (70-м антенна DSS-1470), Green Bank Telescope (GBT) в Западной Виржинии и радиотелескопе Aresibo в Пуэрто-Рико, подтвердили сказанное. Сигнал на волне 3.5 см излучался 70-м антенной в Goldstone (иногда Aresibo) и принимался на двух телескопах в США. Особенностью эксперимента являлось то, что ориентация базы интерферометра должна была совпасть с направлением перемещения спеклов, эти условия выполнялись лишь на протяжении 20 с в день. Зато при выполнении этих условий открывалась возможность по величине временной задержки, зная ориентацию базы интерферометра и параметры распространения сигнала, определять ориентацию вектора углового момента Меркурия и скорость вращения.

Опираясь на этот метод [1, 2] и при инициативе и непосредственном участии И. В. Холина и при поддержке проф. Стэннон Пилой, американские коллеги реализовали обширную программу наблюдений на больших радиотелескопах в США в течение примерно четырех с небольшим лет. В результате реализации этой программы для указанного периода времени было получено 21 значение угловой скорости вращения Меркурия с небольшими погрешностями, позволившие определить некоторые важнейшие параметры возмущенного вращательного движения этой планеты [3]. Наклонение вектора угловой скорости относительно нормали к плоскости орбиты было определено с высокой точностью: $2.11' \pm 0.1'$. При этом подтвердилось то, что Меркурий находится в первом состоянии Кассини (по терминологии Пила).

На основе этих наблюдательных данных и с помощью численного интегрирования уравнений вращательного движения авторы с высокой точностью определили важнейший динамический параметр в теории либраций Меркурия в долготе $(B - A)/C_m = (2.03 \pm 0.12) \cdot 10^{-4}$ и соответствующую ему амплитуду основного вынужденного колебания в $35.8'' \pm 2.1''$ (с периодом 88.9 сут). Здесь использованы обозначения: $B > A$ — главные моменты инерции относительно соответствующих экваториальных осей инерции, C_m — полярный момент инерции мантии Меркурия. Полученные результаты дали подтверждения и свидетельства в пользу известного предположения Пила о том, что ядро Меркурия или его верхние слои находятся в расплавленном (жидком) состоянии [3, 4].

Авторы также сумели впервые получить на основе данных наблюдений параметры свободного колебаний в долготе, тем самым подтвердив предсказание, сделанное в работе [5], о том, что свободные либрации Меркурия в долготе будут обнаружены из радиолокационных наблюдений в ближайшие годы. На основе указанных наземных радиолокационных наблюдений амплитуда свободных либраций была оценена значением около $300''$ дуги, а период этой либрации, как и ожидалось, составил около 12 лет. Начальная фаза была оценена в 0.07° на эпоху прохождения перигелия MJD 52 381.480 (17 апреля 2002 г.) [3].

1. Возможный механизм возбуждения свободных либраций Меркурия

Период резонансного (свободного) колебания Меркурия в долготе был оценен как для модели твердого Меркурия, так и для его модели с твердой несферичной мантией и с жидким эллипсоидальным ядром. Соответствующие значения периода определяются в зависимости от параметра гравитационного потенциала Меркурия C_{22} , от отношения полярных моментов инерции всей планеты и ее мантии C/C_m и от безразмерного момента инерции Меркурия $I = C/(mr^2)$ (m и r — масса и средний радиус Меркурия) характеризуются значениями около 16.0 г. [6, 7] и 11.3 г. [8, 9]. Таким образом, вследствие наличия жидкого ядра период либраций уменьшается примерно на 30%. Амплитуда

и фаза указанных свободных либраций могут быть определены только из наблюдений.

В работе [10] был сделан динамический вывод о том, что амплитуда свободной либрационной моды должна затухать за характерное время порядка 10 000 лет. «Короткие по сравнению с возрастом Солнечной системы времена затухания означают, что должен существовать механизм возбуждения свободных колебаний Меркурия, если такие свободные движения будут подтверждены современными радарными измерениями или измерениями космических аппаратов «Мессенджер» и «Бепи Колombo», которые будут выведены на орбиту Меркурия» [10]. Тем не менее примерно в то же время [11] было высказано противоположное мнение о том, что свободные либрации как в долготе, так и в нутации и в движении полюса Меркурия не являются затухающими, а постоянно возбуждаются в результате общего гравитационного возбуждения системы оболочек Меркурия (в первую очередь его ядра и мантии) внешними небесными телами в условиях эксцентричного положения указанных оболочек [12]. Подобный механизм возбуждения свободных колебаний впервые обсуждался автором при объяснении чандлеровских и наблюдаемых долгопериодических колебаний полюса Земли [13]. Таким образом, резонансные либрации не затухают, а постоянно возбуждаются как динамическое следствие вынужденной раскачки (малых смещений и колебаний) основных и эксцентричных оболочек Меркурия под действием гравитационного притяжения Солнца, планет и вследствие орбитальных возмущений с различными частотами. Имеются действительные признаки того, что в своем положении ядро и мантия Меркурия обнаруживают значительную эксцентricность. Это, в частности, проявляется в наблюдаемом смещении геометрического центра фигуры Меркурия относительно центра масс планеты на расстояние 640 ± 78 м в экваториальной плоскости в направлении географической точки с долготой $319.5^\circ \pm 6.9^\circ$ [14]. Согласно геодинимической концепции вынужденной гравитационной раскачки оболочек Земли и других небесных тел [12] указанному смещению центра масс Меркурия можно сопоставить смещение центра масс ядра относительно центра масс мантии на большее расстояние порядка нескольких километров (порядка 2–5 км) и примерно в том же направлении. А это означает, что система оболочек Меркурия является сильно эксцентричной и подверженной активному возбуждению со стороны внешних небесных тел, в первую очередь со стороны Солнца, особенно в условиях резонансного вращательного движения.

Мощное и дифференциальное гравитационное влияние Солнца на несферичные оболочки Меркурия, занимающие к тому же эксцентричные положения по отношению друг к другу, неизбежно приведет к относительной раскачке последних с определенными малыми амплитудами [12, 15, 16]. В свою очередь вынужденные колебания ядра относительно вязко-упругой мантии приведут (и приводят в современную эпоху) к планетарным деформациям всех слоев планеты и в конечном итоге к вариациям компонент тензора инерции планеты, и как динамическое следствие — к возбуждению свободных либраций в долготе и в наклоне. Меркурий вращается сравнительно медленно с периодом около

59 суток. А это означает, что вариации тензора инерции Меркурия приведут к возбуждению указанных свободных либраций со значительными амплитудами. Эта гипотеза, впервые высказанная автором в докладе на COSPAR-2004 в Париже, получила полное подтверждение в данных наземных радиолокационных наблюдений вращения Меркурия [3]. В частности, на COSPAR-2004 автору этой будущей статьи Марго в дискуссии по докладу было прямо сказано: «Из наземных радиолокационных наблюдений вы через два-три года обнаружите свободные либрации в долготе со значительной амплитудой и периодом около 11 лет». Именно к этому выводу пришли авторы указанной статьи, и гипотеза, в частности опубликованная в «Lunar and Planetary Science» [5], получила полное подтверждение спустя 3 года.

«Мы считаем, что резонансные либрации не затухают, а возбуждаются с помощью механизма динамики оболочек (Баркин, 2002). Это означает, что резонансные либрации Меркурия в долготе могут быть определены из современных наблюдений (в том числе с помощью радионаблюдений с земной поверхности) в течение нескольких лет» [5].

Приведем также цитату из работы [3]:

«Для проверки существования долгопериодической либрации, наложенной на вынужденные либрации в долготе с периодом 88 суток, мы провели дополнительные исследования уравнения либрации. Решение динамического уравнения содержит три свободных параметра: амплитуду колебаний, начальный угол либрации g_0 и начальную угловую скорость $(dg/dt)_0$. В качестве начальной эпохи выбирается момент прохождения Меркурием перигелия своей орбиты 17 апреля 2002 г. Модифицированная юлианская дата (MJD): 52 381.480. Наилучшие значения (при $\chi^2_\nu = 0.9$) для объединенных данных ОС и SC: $(B - A)/C_m = (2.03 \pm 0.04) \cdot 10^{-4}$, $g_0 = (0.07 \pm 0.01)^\circ$, $(dg/dt)_0 = (2.10 \pm 0.06)''/\text{сут}$ — соответствуют амплитуде долгопериодических либраций ~ 300 дуговых секунд. Поскольку данные наблюдений охватывают период менее одного цикла свободных колебаний, полученные значения нуждаются в дальнейшем уточнении и проверке. Период свободной либрации оценивается по формуле $P \cdot \{3[(B - A)/(C_m)](7e/2 - 123e^3/16)\}^{-1/2}$, или ≈ 12 лет» [3, с. 712].

Так была открыта свободная либрация Меркурия в долготе. Отметим еще раз значительную амплитуду обнаруженной свободной либрации. Естественно предположить, что свободные колебания полюса Меркурия и вектора его кинетического момента вращательного движения также характеризуются значительными амплитудами (порядка десятков дуговых секунд). Например, исходя из простой аналогии со свободным колебанием полюса Луны (с амплитудой около $7''$). В этом случае можно ожидать, что угол между осью вращения Меркурия и нормалью к его плоскости орбиты, определенный в работе [3], не точно совпадает со значением угла Кассини и последний нуждается в определении независимыми методами. С другой стороны, большую либрацию в долготе можно рассматривать как свидетельство в пользу эффективного действия механизма вынужденной раскачки оболочек Меркурия, что, есте-

ственно, должно получить подтверждение в научных исследованиях, проводимых в рамках космической миссии «Мессенджер» и планируемых исследований в грандиозном космическом проекте «Беппи Колумбо» [17, 18]. Будут обнаружены и изучены планетарные процессы и явления, вариации физических полей этой планеты (гравитационного и магнитного полей, теплового потока и др.), которые подтвердят такие их важнейшие свойства, как цикличность, инверсия, синхронность, асимметрия и др. Согласно геодинамической модели [12], на Меркурии будут обнаружены тектонические и геологические структуры, свидетельствующие о смещениях ядра Меркурия в прошлые геологические периоды, упорядоченные тектонические структуры. Первые открытия и подтверждения указанным и ожидаемым явлениям уже получены в ходе пролетных исследований планеты космическим аппаратом «Мессенджер».

2. Аналитическая теория либраций Меркурия в долготе

Аналитическая теория либраций описывает вынужденные и свободную либрации Меркурия в долготе в рамках задачи о плоских резонансных движениях Меркурия, рассматриваемого как несферичное твердое тело [6, 7] или как система твердой несферичной мантии и жидкого эллипсоидального ядра [8, 9]. В последнем случае полость жидкого ядра представляет собой эллипсоид с полуосями $a > b > c$ ($a > b$ — экваториальные оси, c — полярная ось эллипсоидального ядра). Предполагаем, что Меркурий движется по невозмущенной эллиптической орбите, а его ось вращения ортогональна плоскости этой орбиты. По этой теории вынужденные либрации Меркурия δg и вариации его угловой скорости $\delta\omega$ описываются формулами

$$\begin{aligned} \delta g = & -6K \left[(X_4^{-3.2} - X_2^{-3.2}) \sin M + \right. \\ & + \frac{1}{4} (X_5^{-3.2} - X_1^{-3.2}) \sin 2M + \frac{1}{9} X_6^{-3.2} \sin 3M + \\ & + \frac{1}{16} (X_7^{-3.2} - X_{-1}^{-3.2}) \sin 4M + \\ & + \frac{1}{25} (X_8^{-3.2} - X_{-2}^{-3.2}) \sin 5M + \\ & + \frac{1}{36} (X_9^{-3.2} - X_{-3}^{-3.2}) \sin 6M - \frac{1}{49} X_{-4}^{-3.2} \sin 7M - \\ & \left. - \frac{1}{64} X_{-5}^{-3.2} \sin 8M \right], \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta\omega}{n} = & -6K \left[(X_4^{-3.2} - X_2^{-3.2}) \cos M + \right. \\ & + \frac{1}{2} (X_5^{-3.2} - X_1^{-3.2}) \cos 2M + \frac{1}{3} X_6^{-3.2} \cos 3M + \\ & + \frac{1}{4} (X_7^{-3.2} - X_{-1}^{-3.2}) \cos 4M + \\ & + \frac{1}{5} (X_8^{-3.2} - X_{-2}^{-3.2}) \cos 5M + \\ & + \frac{1}{6} (X_9^{-3.2} - X_{-3}^{-3.2}) \cos 6M - \frac{1}{7} X_{-4}^{-3.2} \cos 7M - \\ & \left. - \frac{1}{8} X_{-5}^{-3.2} \cos 8M \right]. \end{aligned}$$

Здесь K — фундаментальный параметр в теории либрации Меркурия, который характеризует динамическое сжатие планеты и зависит от отношения полярных моментов инерции Меркурия и его мантии:

$$K = \frac{C_{22}}{I} \cdot \frac{C}{C - C_c(1 - \varepsilon^2)} \approx \frac{C_{22}}{I} \cdot \frac{C}{C_m}, \quad \varepsilon = \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} \approx \frac{a - b}{a}.$$

Здесь ε — параметр эллиптичности экваториального сечения полости жидкого ядра, $I = C/(mr^2)$ — безразмерный момент инерции Меркурия (m и r — его масса и средний радиус; C — полярный момент инерции), C_c и C_m — полярные моменты инерции ядра и мантии, $n = 2\omega/3$ — среднее орбитальное движение Меркурия, ω — средняя угловая скорость его вращения, $X_{\pm n}^{-3.2}$ — так называемые эксцентриситетные функции — коэффициенты Ганзена. Для этих коэффициентов хорошо известны полиномиальные аппроксимирующие представления, которые позволяют коэффициенты при тригонометрических функциях в возмущениях угла вращения (1) представить в виде следующих функций эксцентриситета [7, 8]:

$$\begin{aligned} \delta g = & K \left\{ 6 \left(1 - 11e^2 + \frac{959}{48}e^4 - \frac{3641}{288}e^6 + \frac{11359}{2880}e^8 \right) \sin M - \right. \\ & - \frac{3}{4}e \left(1 + \frac{421}{12}e^2 - \frac{32515}{384}e^4 + \frac{2186863}{32256}e^6 - \right. \\ & - \left. \frac{428399713}{15482880}e^8 \right) \sin 2M - \frac{1}{24}e^4 \left(533 - \frac{13827}{10}e^2 + \right. \\ & + \left. \frac{728889}{560}e^4 \right) \sin 3M + \frac{1}{128}e^3 \left(1 - \frac{57073}{20}e^2 + \right. \\ & + \left. \frac{7678157}{960}e^4 - \frac{298080597}{34560}e^6 \right) \sin 4M + \\ & \left. + \frac{1}{100}e^4 \left(1 - \frac{36674}{25}e^2 + \frac{37237647}{5040}e^4 \right) \sin 5M + \dots \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

В (1), (2) приведены лишь слагаемые, характеризующие вынужденные либрации Меркурия. Дополним их слагаемым, описывающим свободную либрацию. При этом сохраним пять тригонометрических членов для вынужденной либрации. В результате для основных возмущений угла вращения Меркурия δg и его угловой скорости $\delta\omega/n$ получим следующие компактные формулы [19, 20]:

$$\begin{aligned} \delta g = & K(E_1 \sin M + E_2 \sin 2M + E_3 \sin 3M + \\ & + E_4 \sin 4M + E_5 \sin 5M) + K_0 \sin(E\sqrt{K}M - \varphi), \\ \frac{\delta\omega}{n} = & K(E_1 \cos M + 2E_2 \cos 2M + 3E_3 \cos 3M + \\ & + 4E_4 \cos 4M + 5E_5 \cos 5M) + \\ & + E\sqrt{K}K_0 \cos(E\sqrt{K}M - \varphi). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $M = n(t - t_0)$ — средняя аномалия Меркурия; $n = 4.092339765^\circ/\text{сут}$ — его среднее орбитальное движение; $T = 2\pi/n = 87.969257$ сут — период орбитального движения; t_0 — момент прохождения перигелия орбиты Меркурия, для которого мы примем юлианскую дату $t_0 = 52381.480$ MJD, следуя работе [3]; K_0 и φ — амплитуда и фаза свободной либрации в долготе.

Эти характеристики могут быть определены только на основе наблюдений. $E\sqrt{K} \cdot n$ и $T_g = T/(E\sqrt{K})$ — соответственно частота и период свободной либрации. Здесь введены коэффициенты E и E_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$):

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{12X_2^{(-3.2)}}, \\ E_1 &= 6 \left(1 - 11e^2 + \frac{959}{48}e^4 - \frac{3641}{288}e^6 + \frac{11359}{2880}e^8 \right), \\ E_2 &= -\frac{3}{4}e \left(1 + \frac{421}{12}e^2 - \frac{32515}{384}e^4 + \frac{2186863}{32256}e^6 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{428399713}{15482880}e^8 \right), \\ E_3 &= -\frac{1}{24}e^4 \left(533 - \frac{13827}{10}e^2 + \frac{728889}{560}e^4 \right), \\ E_4 &= \frac{1}{128}e^3 \left(1 - \frac{57073}{20}e^2 + \frac{7678157}{960}e^4 - \right. \\ &\quad \left. - \frac{298080597}{34560}e^6 \right), \\ E_5 &= \frac{1}{100}e^4 \left(1 - \frac{36674}{25}e^2 + \frac{37237647}{5040}e^4 \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Для невозмущенного значения эксцентриситета орбиты Меркурия $e = 0.2056$ их численные значения составляют

$$\begin{aligned} E &= 2.8020, & E_1 &= 3.4179, & E_2 &= -0.3604, \\ E_3 &= -0.0355, & E_4 &= -0.0072, & E_5 &= -0.0016. \end{aligned} \quad (5)$$

В случае модели Меркурия в виде несферичного твердого тела динамический параметр $K = C_{22}/I$. Именно такое выражение параметра было принято в указанной работе [19], в которой Меркурий рассматривался как несферичное твердое тело. При пренебрежимо малых сжатиях полости жидкого ядра приближенно имеем $K = C_{22}CI^{-1}C_m^{-1}$.

В результате основные формулы для плоских либраций Меркурия в долготе (3)–(5) могут быть с необходимой точностью представлены в виде

$$\begin{aligned} \delta g &= K_0 \sin(E\sqrt{K}M - \varphi) + \\ &+ \frac{C_{22}}{I} \frac{C}{C_m} \{ 3.4179 \cdot \sin M - 0.3604 \cdot \sin 2M - \\ &- 0.0355 \cdot \sin 3M - 0.0072 \cdot \sin 4M - \\ &- 0.0016 \cdot \sin 5M \}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta \omega}{\omega} &= E\sqrt{K}K_0 \cos(E\sqrt{K}M - \varphi) + \\ &+ \frac{C_{22}}{I} \frac{C}{C_m} \{ 2.2786 \cos M - 0.4806 \cos 2M - \\ &- 0.0711 \cos 3M - 0.0192 \cos 4M - 0.0053 \cos 5M \}. \end{aligned}$$

3. Полуэмпирическая теория либраций Меркурия в долготе

Первые оценки амплитуд периодических возмущений во вращении Меркурия были сделаны для твердой модели Меркурия [19]. В этой же работе впервые получил аналитическое описание эффект невозмущаемости вращения Меркурия при прохождении окрестности

перигелла (в течение примерно 20 дней). В указанный период невозмущаемости («период сна Меркурия» [7, 8]) угловая скорость вращения Меркурия остается почти постоянной. Для численных оценок амплитуд вынужденных либраций использовалось теоретическое значение коэффициента гравитационного потенциала $C_{22} = 0.33 \cdot 10^{-5}$, полученное из условия Пуанкаре существования плоских периодических движений Меркурия [21]. Период либрации был оценен в 16–19 лет и уже в те годы были высказаны предположения, что либрация Меркурия может характеризоваться значительной амплитудой [6].

В последние годы к проблеме вращения Меркурия возник широкий интерес в особенности в связи с космическими проектами «Мессенджер» и «Беппи Колombo». В результате теория получила развитие для моделей Меркурия с жидким ядром и твердой (или эластичной) мантией [8, 9]. Теоретические исследования подстегивались проведением высокоточных наземных радиолокационных измерений угловой скорости Меркурия [1–3].

Либрации Меркурия в долготу были изучены на основе плоской задачи о движении несферичного небесного тела с жидким эллипсоидальным ядром в центральном гравитационном поле [22]. Для принятых моделей Меркурия были получены оценки амплитуд периодических вариаций его угловой скорости, которые являются значительными и составляют около 0.03% величины самой угловой скорости.

В работе [3] авторы говорят лишь об одной гармонике — основной гармонике вынужденной либрации в долготу, а именно с периодом 88.9 сут. Однако еще в 1979 г. было показано, что наряду с этой основной гармоникой значительными амплитудами обладают также гармоники с кратными периодами в 43.99 и 29.33 сут [19]. Особенно это важно для вариаций угловой скорости, которые анализируются по наблюдаемым значениям угловой скорости вращения Меркурия [3]. Поэтому в работе [20] были определены неизвестные параметры аналитической теории плоских либраций Меркурия (вынужденных и свободной) с использованием 21 значения угловой скорости из работы [3].

В работе [20] параметры K , K_0 и фаза φ в формулах (3) определялись методом наименьших квадратов по 21 значению угловой скорости вращения Меркурия из работы [3]. Из этих параметров только K_0 входит в выражения (3) линейно, относительно двух других эти выражения являются нелинейными. В качестве номинальных значений параметров были приняты $\bar{K} = 0.508 \cdot 10^{-4}$, $\bar{K}_0 = 285''$, $\bar{\varphi} = -62.2^\circ$ и по методу наименьших квадратов последовательными итерациями определялись поправки к указанным трем основным параметрам теории либрации Меркурия. В результате были получены их уточненные значения:

$$\begin{aligned} K &= (0.511 \pm 0.018) \cdot 10^{-4}, & K_0 &= 291'' \pm 40'', \\ \varphi &= -65.2^\circ \pm 12.0^\circ. \end{aligned} \quad (7)$$

В итоге в работе [20] (для периода радиолокационных наблюдений в 4.5 года) из работы [3] были определены амплитуды первых пяти гармоник вынужденных либраций с периодами: 87.97 сут, 43.99 сут, 29.33 сут,

21.99 сут и 17.59 сут: $34.05'' \pm 1.27''$, $3.59'' \pm 0.13''$, $0.354'' \pm 0.013''$, $0.072'' \pm 0.003''$ и $0.016'' \pm 0.001''$. Амплитуда и период свободной либрации Меркурия в долготе также были определены: $290.9'' \pm 67.0''$ и 12.37 ± 0.23 г. соответственно. Фаза свободной либрации составила $-75.9^\circ \pm 14.2^\circ$ [20]. Полученное значение хорошо согласуется с другими оценками этого периода: $T_g = 11.3$ г. [5], $T_g \approx 12$ лет [3], $T_g = 12.2 \pm 0.3$ г. [8, 9].

4. Новая полуэмпирическая теория либраций Меркурия в долготе

В настоящей работе строится аналогичная полуэмпирическая теория плоских либраций Меркурия в долготе. В отличие от [20] здесь не используется метод наименьших квадратов и другие статистические методы. Эта модель опирается на аналитическое описание вынужденных и свободной либраций Меркурия в долготе (3), (6) и на три характеристических параметра движения Меркурия, определенных в статье [3].

Два из этих параметров — это значения угла либрации и угловой скорости в момент прохождения перигелия орбиты Меркурием на дату 17 апреля 2002 г. (соответствующая юлианская дата $t_0 = 52\,381.480$ МJD): $(\delta g)_0 = 0.07^\circ \pm 0.01^\circ$, $(\delta\omega/\omega)_0 = (2.10 \pm 0.06)/\omega/\text{сут}$. Третий параметр, также определенный в работе [3], динамический коэффициент $K = (B - A)/(4C_m) = (5.08 \pm 0.30) \cdot 10^{-5}$, который входит множителем в выражение амплитуды основной вынужденной либрации Меркурия. Здесь $B > A$ — главные моменты инерции, соответствующие главным экваториальным осям инерции Меркурия; C_m — полярный момент инерции мантии Меркурия.

Для указанного начального момента времени, соответствующего прохождению перицентра на 17 апреля 2002 г., $M = 0$, и из формул (1) следуют простые соотношения

$$K_0 \sin \varphi = -(\delta g)_0, \quad (8)$$

$$K_0 \cos \varphi = \frac{(\delta\omega)_0}{nE\sqrt{K}} - \sqrt{K} \frac{E_1 + 2E_2 + 3E_3 + 4E_4 + 5E_5}{E}.$$

В результате решения уравнений (8) были получены следующие оценки для амплитуды и фазы долгопериодической либрации (близкие к (7)): $K_0 = 274'' \pm 77''$, $\varphi = -66.7^\circ \pm 24.4^\circ$. Момент τ максимальной угловой скорости долгопериодической либрации в долготе определяется условием $E\sqrt{K}n(\tau - t_0) - \varphi = 0$ и приходится на временной интервал $\tau = 51\,620.3 \pm 326.9$ МJD. Подставляя найденные значения параметров в формулы (6), получим окончательные представления для возмущений первого порядка угла либрации Меркурия и вариаций его угловой скорости:

$$\delta g = (35.81'' \pm 2.12'') \sin M - (3.78'' \pm 0.22'') \sin 2M - (0.372'' \pm 0.022'') \sin 3M - (0.076'' \pm 0.005'') \sin 4M - (0.017'' \pm 0.001'') \cos 5M + (274'' \pm 77'') \times \cos \left[(1.946 \pm 0.030) \cdot 10^{-2}M + 66.7^\circ \pm 24.4^\circ \right], \quad (9)$$

$$\frac{\delta\omega}{\omega} \cdot 10^5 = (11.58 \pm 0.68) \cos M - (2.44 \pm 0.14) \cos 2M - (0.361 \pm 0.021) \cos 3M - (0.098 \pm 0.006) \cos 4M - (0.027 \pm 0.002) \cos 5M + (1.771 \pm 0.498) \times \cos \left[(1.996 \pm 0.030) \cdot 10^{-2}M + 66.7^\circ \pm 24.4^\circ \right]. \quad (10)$$

5. О значении угла наклона оси вращения Меркурия в современную эпоху

Имеющиеся модели вращения Меркурия позволяют дать теоретические оценки угла наклона ρ_G его оси вращения относительно нормали к плоскости орбиты по известным значениям коэффициентов гравитационного поля Меркурия (его второй гармоники) C_{20} , C_{22} и по значению безразмерного момента инерции $I = C/(mr^2)$. В результате спутниковых наблюдений космического аппарата «Мессенджер» при его близ экваториальных пролетах в последние годы были получены значения коэффициентов второй гармоники гравитационного поля Меркурия J_2 и C_{22} (Gravity model HgM001 Messenger) [23]:

$$J_2 = (1.92 \pm 0.65) \cdot 10^{-5}, \quad C_{22} = (0.81 \pm 0.08) \cdot 10^{-5}. \quad (11)$$

Принимая обсуждаемое в литературе значение безразмерного момента инерции Меркурия $I = 0.35$, по значениям (12) на основе динамического уравнения для угла Кассини [6–8] получаем следующее теоретическое значение угла наклона вектора кинетического момента вращательного движения Меркурия с нормалью к подвижной плоскости орбиты $\rho_G = 4.1' \pm 1.1'$.

При вычислениях мы учли тот факт, что восходящий узел плоскости экватора Меркурия (и промежуточной плоскости ортогональной вектору кинетического момента \mathbf{G}) на эклиптике эпохи 2000.0 не совпадает с восходящим узлом плоскости орбиты Меркурия на той же плоскости, а отстает от него на угол 23.4° . Этот эффект связан с вековым изменением наклонности плоскости орбиты Меркурия по отношению к эклиптике стандартной эпохи [24]. Существенное различие в значениях угла наблюдаемого наклона вектора угловой скорости $\rho_\omega = 2.1' \pm 0.1'$, возможно, свидетельствует о значительном по амплитуде свободном движении полюса оси вращения Меркурия (с амплитудой около $2'-3'$), как это предсказывалось в работе [5].

В работе [5] было высказано предположение о существовании значительных по амплитуде свободных либраций Меркурия в долготе с периодом около 12 лет. В качестве основного механизма возбуждения свободных колебаний был предложен механизм вынужденных относительных колебаний ядра и мантии планеты (являющихся несферичными телами и занимающими эксцентричные положения по отношению друг к другу) под действием гравитационного притяжения Солнца и планет и вследствие возмущений орбитального движения. Естественно, этот же механизм является ответственным за возбуждение свободных движений полюса и свободных колебаний вектора кинетического момента в пространстве. Результаты данной работы можно рассматривать как подтверждение существованию свободного долгопериодического колебания оси вращения Меркурия с амплитудой порядка $2'-3'$. И если предсказание о свободной либрации в долготе [5] уже

получило подтверждение [3], то для подтверждения свободных колебаний полюса оси вращения в теле Меркурия и свободного колебания вектора кинетического момента в пространстве следует получить новые и более точные данные о гравитационном поле Меркурия и либрациях планеты. Решению этого вопроса должны способствовать исследования космического аппарата «Мессенджер» на меркурианской орбите (выход на полярную орбиту вокруг Меркурия в марте 2011 г.). Действие механизма вынужденной раскачки ядра и мантии Меркурия (как и других тел Солнечной системы) в геологической шкале времени должно привести к активному формированию геологических структур с асимметричным расположением по отношению к северному и южному полушариям планеты и, особенно, ярко выраженным в полярных регионах. Первое положение получило четкие подтверждения в асимметричном расположении скарпов и горных хребтов Меркурия. Второе предположение, по нашему мнению, получит подтверждение при исследованиях полярных регионов космическим аппаратом «Мессенджер» в марте–апреле 2011 г.

Заключение

Построенная аналитическая теория плоских либраций Меркурия содержит вынужденные возмущения (пять тригонометрических слагаемых с основным периодом в 88.9 дней и с кратными ему периодами) и свободную либрацию с периодом около 12 лет. Эта теория (формулы (10), (11)) может использоваться для прогноза осевого вращательного движения планеты и с целью выявления новых возмущений и особенностей вращения Меркурия, в том числе на основе радиолокационных наземных наблюдений и с использованием высокоточных орбитальных наблюдений в космических миссиях «Мессенджер» и «Бепи Коломбо» в ближайшие годы и в близкой перспективе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-02-00367 и 09-02-92113-ЯФ).

Список литературы

1. Холин И.В. // Радиофизика. 1988. **31**, № 5. С. 515.
2. Холин И.В. // Астрон. Вестн. 2004. **38**, № 6. С. 513 (Solar System Research. 2004. **38**, Iss. 6. P. 449; doi: 10.1007/s11208-005-0015-4).
3. Margot J.L., Peale S.J., Jurgens R.F. et al. // Science. 2007. **316**. P. 710; doi: 10.1126/science.1140514.

4. Peale S.J. // Nature. 1976. **262**. P. 765.
5. Barkin Yu.V., Ferrandiz J.M. // Lunar and Planetary Science. 2005. **XXXVI**.
6. Баркин Ю.В. // Труды V Объединенных научных чтений (Москва, 2–6 февраля 1981 г.). М., 1981. С. 115.
7. Barkin Yu.V. // Astron. Astroph. Trans. 2004. **23**, N 5. P. 481.
8. Barkin Yu.V., Ferrandiz J.M. // Astron. Astroph. Trans. 2005. **24**, N 1. P. 61.
9. Barkin Yu.V., Ferrandiz J.M. // Lunar and Planetary Science. 2008. **XXXIX**. P. 1206.
10. Peale S.J. // Icarus. 2005. **178**, N 1. P. 4.
11. Barkin Yu.V., Ferrandiz J.M. // 35th COSPAR Scientific Assembly. Held 18–25 July 2004, Paris, France. 2004. P. 3464; Abstracts of 35th COSPAR Scientific Assembly (Paris, France, 18–25 July 2004). Compact disk. Programme. P. 65; B0.1/D3.6-0009-04. The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System.
12. Баркин Ю.В. // Изв. секции наук о Земле. 2002. № 9. С. 45.
13. Barkin Yu.V. // Polar Motion: Historical and Scientific Problems / Ed. by S. Dick, D. McCarthy, B. Luzum; Proceedings of IAU Colloquium 178 (Cagliari, Sardinia, Italy, 27–30 September 1999). Astronomical Society of the Pacific conference series. Chelsia, Michigan, 2000. V. 208. P. 373.
14. Anderson J.D., Jurgens R.F., Lau E.L. et al. // Icarus. 1996. **124**, Iss. 2, December. P. 690.
15. Barkin Yu.V. // Proc. of Intern. Conf. «AstroKazan-2001». Astronomy and geodesy in new millennium (24–29 September 2001). Kazan, 2001. P. 59.
16. Barkin Yu.V., Vilke V.G. // Astron. Astrophys. Trans. 2004. **23**, Iss. 6. P. 533.
17. Spohn T., Sohl F., Wiczerkowski K., Conzelmann V. // Planetary and Space Science. 2001. **49**, P. 1561.
18. Milani A., Rossi A., Vokrouhlicky D. et al. // Planetary and Space Science. 2001. **49**. P. 1579.
19. Баркин Ю.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1979. **20**, № 6. С. 73.
20. Barkin Yu.V., Ferrandiz J.M., Zotov L.V. // Abstract Book (CD) of European Planetary Science Congress (Münster, Germany, 21–26 September 2008). 2008. V. 3, EPSC 2008-A-00140.
21. Баркин Ю.В. // Астрон. журн. АН СССР. 1975. **53**, № 5. С. 1110. (Soviet Astron. 1976. **20**, P. 628).
22. Barkin Yu.V.; Ferrandiz J.M. // Journees 2003 (September 22–25, 2003, St. Petersburg, Russia). St. Petersburg, 2003. P. 201.
23. Smith D.E., Zuber M.T., Phillips R.J. et al. // Icarus. 2010. **209**. P. 88.
24. Barkin Yu.V., Ferrandiz J.M. // EGU General Assembly (Vienna, Austria, 3–7 April 2011). Geophysical Research Abstracts. 2011. Vol. 13, abstr. EGU2011-11500.

Librations of Mercury in the longitude on the ground-based radar observations

Yu. V. Barkin

P. K. Sternberg State Institute of Astronomy, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.
E-mail: barkin@inbox.ru.

On the base of the analytic theory of librations of Mercury in longitude (on elliptical orbit) and data of determination of the values of the angular velocity of Mercury, obtained by using high-precision complex method of ground radar tracking, the amplitude, phase and period of the free librations and the amplitudes of five harmonics of the forced librations of the planet in longitude (annual, semi-annual, ...) have been determined.

Keywords: Mercury, rotation, librations in longitude, radiolocation observations.

PACS: 96.30.Dz, 96.12.De.

Received 14 September 2010.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 3(2011).

Сведения об авторе

Баркин Юрий Владимирович — докт. физ.-мат. наук, профессор, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-50-24, e-mail: barkin@inbox.ru.