

УДК 531.37: 531.381

К ВОПРОСУ О ЗАТУХАНИИ СВОБОДНОЙ ПРЕЦЕССИИ АСТЕРОИДОВ*

© 2018 г.

Новиков В.В., Февральских Л.Н.

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

grigorieva_ln@mail.ru

Поступила в редакцию 15.12.2017

Изучается проблема оценки времени затухания свободной прецессии астероидов. Астероиды рассматриваются как упругие твердые тела, обладающие в недеформированном состоянии различными осевым и экваториальным моментами инерции. Рассматриваются два механизма диссипации энергии: за счет внутреннего трения, обусловленного вязкоупругими свойствами, и тепловых процессов, связанных с макроскопической термодиффузией. Приводятся выражения коэффициентов затухания прецессии для каждого из рассматриваемых механизмов диссипации.

Для некоторой группы наиболее известных астероидов проводится оценка времени затухания движений в теле астероида оси устойчивого вращения. Представлена зависимость времени затухания прецессии от среднего диаметра астероидов и периода их собственного вращения. Отмечается увеличение продолжительности свободной прецессии с уменьшением размера астероидов и замедлением собственного вращения. Проводится сравнение времени затухания прецессии со средним временем между последовательными столкновениями астероидов, приводящими к отклонению осей вращения от устойчивого положения. Оценки показывают, что большинство рассмотренных астероидов имеет время затухания, меньшее времени между последовательными столкновениями.

При оценке времени затухания прецессии изучается вклад в этот процесс каждого из рассматриваемых механизмов диссипации. Установлено, что для тел небольшого размера с продолжительным периодом собственного вращения диссипация в основном обусловлена вязкоупругими свойствами астероидов. Отмечено существенное влияние термодиффузии на затухание угловых движений больших быстро вращающихся астероидов, причем, в отличие от внутреннего трения, для некоторых астероидов термодиффузия приводит к уменьшению времени затухания прецессии, достаточному, чтобы наблюдать их вращение относительно оси наибольшего момента инерции.

Ключевые слова: астероиды, свободная прецессия, диссипация энергии, вязкоупругие свойства, внутреннее трение, макроскопическая термодиффузия.

* Выполнено при поддержке РФФИ (грант № 15-01-08326).

Введение

Множество заключений о строении и поведении небесных объектов основано на анализе кривых блеска – функции изменения яркости объекта во времени. При наблюдении за большим скоплением тел, в частности астероидов, сложные формы кривых блеска могут свидетельствовать о многих факторах: несферичности поверхности тела, наличии спутников, прецессионном движении [1–4]. Последнее наблюдается достаточно часто – столкновения астероидов между собой приводят к отклонению осей вращения от устойчивого положения. Однако исследования кривых блеска показывают, что в главном поясе астероидов также имеется большое количество тел, вращающихся вокруг оси наибольшего момента инерции. Это свидетельствует о затухании угловых движений оси вращения в теле за время, меньшее времени между двумя последовательными столкновениями астероида.

Вопросу об оценке времени затухания свободной прецессии астероидов посвящены, например, статьи [5–7]. В [5] получена оценка времени затухания прецессии упругого сфероида, основанная на вычислении диссипации энергии деформации. Для астероидов со среднестатистическими характеристиками показано, что диссипация приводит к достаточно быстрому затуханию угловых движений оси вращения в теле (10^5 – 10^8 лет). В [6] изучены потери энергии, исходя из модели деформируемой призмы. По сравнению с [5] сделано уточнение времени затухания прецессии с учетом влияния низкой температуры и выбора материала, схожего по характеристикам с породами астероидов. С использованием оценки, полученной в [5], в [7] проведены вычисления времени затухания прецессии для хорошо изученных тел, в том числе медленно вращающихся астероидов небольшого размера. Результаты [7] свидетельствуют о существовании объектов, для которых время затухания угловых движений оси вращения в теле превышает возраст Вселенной ($1,4 \cdot 10^{10}$ лет).

Некоторые вопросы динамики свободно вращающегося деформируемого твердого тела отражены в публикациях [8–14]. На конкретных моделях продемонстрированы новые качественные эффекты, обусловленные вязкоупругими свойствами и симметрией формы тел.

В настоящей статье исследуются угловые движения упругого твердого тела, динамически симметричного в недеформированном состоянии. Рассматриваются два механизма рассеяния энергии: внутреннее трение, обусловленное вязкоупругими свойствами материала, и макроскопическая термодиффузия, возникающая вследствие разницы температур. Диссипация энергии приводит к затуханию движения оси вращения в теле и переходу ее в положение оси наибольшего момента инерции. Исходя из уравнений угловых движений деформируемого тела, дается оценка времени затухания прецессии для каждого из рассмотренных механизмов диссипации. Полученные оценки используются для изучения возможности затухания прецессии астероидов до следующего их столкновения с другими телами. В статье представлены результаты для группы из 1120 астероидов.

1. Угловые движения деформируемого тела

Пусть однородное деформируемое тело объемом V , ограниченное поверхностью S , совершает свободные угловые движения относительно центра инерции. Свяжем с телом систему координат $Ox_1x_2x_3$, вращающуюся с угловой скоростью ω . Смещение элемента тела в $Ox_1x_2x_3$ при деформировании характеризуется вектором

$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$. Выбор связанной системы осуществляется в соответствии с условиями [11, 12]:

$$\int_V \mathbf{u} dV = 0, \quad \int_V [\mathbf{r}, \dot{\mathbf{u}}] dV = 0. \quad (1)$$

Эти условия означают отсутствие в системе малых поступательных перемещений и поворотов тела как жесткого целого.

1.1. Диссипация, обусловленная вязкоупругими свойствами. Рассмотрим случай, при котором диссипация энергии происходит за счет внутреннего трения, обусловленного вязкоупругими свойствами тела.

В качестве масштабов длины и времени выберем l – характерный размер тела и t_* – характерное время движения тела как целого относительно центра инерции. Введем безразмерные параметры:

$$\varepsilon^2 = \frac{\rho l^2}{\mu t_*^2}, \quad s = \frac{\eta}{\rho \mu}, \quad \kappa = \frac{\lambda}{\mu}, \quad \zeta = \frac{\xi}{\eta},$$

где ρ – плотность тела; λ, μ – постоянные Ламе; ξ, η – параметры вязкости. Параметр ε характеризует упругие свойства тела и связан с периодом его упругих колебаний, параметр s отвечает вязкоупругим свойствам и определяет характерный масштаб процессов, обусловленных вязкостью.

Уравнение движения элемента тела в связанной системе координат и условия отсутствия напряжений на поверхности тела имеют вид [8]:

$$\begin{aligned} & \varepsilon^2 (\ddot{\mathbf{u}} + [\dot{\boldsymbol{\omega}}, \mathbf{r} + \mathbf{u}] + [\boldsymbol{\omega}, [\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r} + \mathbf{u}]] + 2[\boldsymbol{\omega}, \dot{\mathbf{u}}]) = \\ & = \left[\kappa + 1 + \varepsilon s (\zeta + 1) \frac{\partial}{\partial t} \right] \text{grad div } \mathbf{u} + \left(1 + \varepsilon s \frac{\partial}{\partial t} \right) \Delta \mathbf{u} \quad \text{в объеме } V, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\left[\left(\kappa + \varepsilon s \zeta \frac{\partial}{\partial t} \right) u_{ii} \delta_{ij} + 2 \left(1 + \varepsilon s \frac{\partial}{\partial t} \right) u_{ij} \right] n_j = 0 \quad \text{на поверхности } S, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3)$$

где

$$u_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

– тензор малых деформаций, n_j – компоненты вектора нормали к поверхности тела.

Будем рассматривать случай, при котором тело достаточно жестко. Диссипация энергии обеспечивает быстрое затухание упругих колебаний за время, много меньшее периода вращательных движений тела как целого относительно центра инерции. В этом случае выполняется условие:

$$\varepsilon \ll s \ll 1.$$

Это позволяет искать вектор перемещений в виде ряда по малым параметрам ε, s :

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \varepsilon^2 [\mathbf{u}_0(\mathbf{r}, t) + \varepsilon s \mathbf{u}_1(\mathbf{r}, t)].$$

Левая часть уравнения движения элемента тела (2) содержит вектор угловой скорости $\boldsymbol{\omega}$, поэтому решение задачи (2), (3) будет зависеть от его компонент.

По компонентам вектора перемещений определяется тензор инерции в рассматриваемом приближении:

$$I_{ij} = \int_V [(x_i^2 + 2x_i u_i) \delta_{ij} - (x_i x_j + 2x_i u_j)] dV = I_{ij}^0 + \varepsilon^2 I_{ij}' + \varepsilon^3 s I_{ij}''$$

где I_{ij}^0 – тензор инерции недеформированного тела; I'_{ij} – поправка, обусловленная упругими свойствами; I''_{ij} – поправка, связанная с вязкоупругими свойствами тела. Поправки I'_{ij} , I''_{ij} зависят от деформаций тела и являются квадратичными функциями компонент угловой скорости.

Угловая скорость определяется из уравнения Эйлера:

$$\dot{\mathbf{K}} + [\boldsymbol{\omega}, \mathbf{K}] = 0, \quad (4)$$

где компоненты вектора кинетического момента \mathbf{K} содержат линейные и кубические члены компонент угловой скорости.

Пусть оси связанной системы координат являются главными осями инерции недеформированного тела, а эллипсоид инерции в недеформированном состоянии является эллипсоидом вращения: $I_{11}^0 = I_{22}^0 = A$, $I_{33}^0 = C$.

Приведем тело во вращение с угловой скоростью $\boldsymbol{\omega} = \omega_0 \mathbf{e}_3$ вокруг оси Ox_3 наибольшего момента инерции в недеформированном состоянии. Будем рассматривать малые возмущения этого вращения $\omega_1, \omega_2 \ll \omega_0$.

Уравнение (4) в проекциях на оси связанной системы имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_1 + \frac{C-A}{A} \omega_0 \omega_2 + \varepsilon^3 s k \omega_0^4 \omega_1 &= 0, \\ \dot{\omega}_2 - \frac{C-A}{A} \omega_0 \omega_1 + \varepsilon^3 s k \omega_0^4 \omega_2 &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где параметр

$$k \sim \left(\frac{C-A}{A} \right)^2$$

может быть получен в результате последовательного решения краевых задач для векторов $\mathbf{u}_0(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{u}_1(\mathbf{r}, t)$ [8].

Коэффициент затухания угловых движений, определяемых системой (5), равен:

$$\delta_B \sim k \varepsilon^3 s \omega_0^4 = k \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \frac{\eta}{\mu^2 t_*^3} l^3 \omega_0^4 \sim k f_B \frac{l^3}{t^7}, \quad (6)$$

где t – период собственного вращения астероида; f_B – множитель, зависящий от вязкоупругих свойств материала.

Вещество, из которого состоят астероиды, для большинства объектов обладает схожими характеристиками (плотность, параметры упругих и вязких свойств). Время затухания угловых движений в теле определяется скоростью вращения и характерным размером тела. Согласно приведенной оценке (6), чем больше период собственного вращения астероида и меньше его линейный размер, тем медленнее происходит затухание прецессии.

1.2. Диссипация, обусловленная макроскопической термодиффузией. Рассмотрим механизм диссипации энергии, возникающей вследствие разницы температур. Пусть θ – относительное отклонение температуры тела T от температуры окружающей среды T_0 .

При построении модели упругого деформируемого тела необходимо учесть, что вклад в деформации вносит изменение градиента температуры θ . Уравнение движения запишется в виде [8]:

$$\begin{aligned} & \varepsilon^2 (\ddot{\mathbf{u}} + [\dot{\boldsymbol{\omega}}, \mathbf{r} + \mathbf{u}] + [\boldsymbol{\omega}, [\boldsymbol{\omega}, \mathbf{r} + \mathbf{u}]] + 2[\boldsymbol{\omega}, \dot{\mathbf{u}}]) = \\ & = (\kappa + 1) \text{grad div } \mathbf{u} + \Delta \mathbf{u} - \alpha_1 \text{grad } \theta \quad \text{в объеме } V, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{2}{3} \alpha T_0 (\kappa + 1),$$

α – коэффициент линейного расширения.

Для определения вектора перемещений \mathbf{u} и поля температуры θ к уравнению (7) следует добавить уравнение теплопроводности:

$$\tau \Delta \theta = c_1 \frac{\partial \theta}{\partial t} + \alpha_1 \frac{\partial}{\partial t} \text{div } \mathbf{u} \quad \text{в объеме } V, \quad (8)$$

в котором безразмерные параметры имеют вид:

$$\tau = \frac{T_0 \chi t_*}{\mu l^2}, \quad c_1 = \frac{c T_0}{\mu}, \quad \nu = \frac{\alpha_1 \varepsilon^2}{\tau},$$

χ – коэффициент теплопроводности, c – удельная объемная теплоемкость в отсутствие деформаций.

Будем считать, что на поверхности тела S поддерживается температура окружающей среды:

$$\theta = 0. \quad (9)$$

Тогда условие отсутствия напряжений на поверхности S принимает вид:

$$[\kappa u_{ii} \delta_{ij} + 2u_{ij}] n_j = 0, \quad i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Аналогично случаю диссипации за счет вязкоупругих свойств тела предположим, что выполняются условия:

$$\varepsilon^2 \ll \nu \alpha_1 \ll 1.$$

Это позволяет искать решение задачи (7)–(10) в виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(\mathbf{r}, t) &= \varepsilon^2 [\mathbf{u}_0(\mathbf{r}, t) + \nu \alpha_1 \mathbf{u}_1(\mathbf{r}, t)], \\ \theta &= \nu \theta_0. \end{aligned}$$

В рассматриваемом приближении тензор инерции также содержит две поправки, возникающие при деформировании тела:

$$I_{ij} = I_{ij}^0 + \varepsilon^2 I_{ij}' + \varepsilon^2 \nu \alpha_1 I_{ij}''.$$

В отличие от случая внутреннего трения, здесь I_{ij}'' – поправка, обусловленная деформациями при изменении поля температур.

Рассматривая малые угловые движения в окрестности оси Ox_3 , можно оценить коэффициент затухания свободной прецессии [8]:

$$\delta_T \sim k \varepsilon^2 \nu \alpha_1 \omega_0^4 = k \frac{\rho^2 \alpha_1^2}{\mu T_0 \chi t_*^5} l^6 \omega_0^4 \sim k f_T \frac{l^6}{t^9}, \quad (11)$$

где f_T – множитель, зависящий от термоупругих свойств материала.

Сравнивая полученное выражение с (6), можно заметить, что в случае макро-

скопической термодиффузии линейный размер тела и период его собственного вращения сказываются на времени затухания прецессии сильнее, чем в случае внутреннего трения.

2. Оценки времени затухания свободной прецессии астероидов

Полученные выражения коэффициентов затухания прецессии в случае внутреннего трения (6) и макроскопической термодиффузии (11) позволяют оценить продолжительность этого процесса для некоторых астероидов. Для группы из 1120 астероидов с известными характеристиками [15–18] сделаны оценки времени затухания прецессии с учетом каждого из рассмотренных механизмов диссипации в отдельности. Для случая вязкого трения представлены зависимости времени затухания свободной прецессии астероидов от среднего диаметра (рис. 1) и периода собственного вращения (рис. 2).

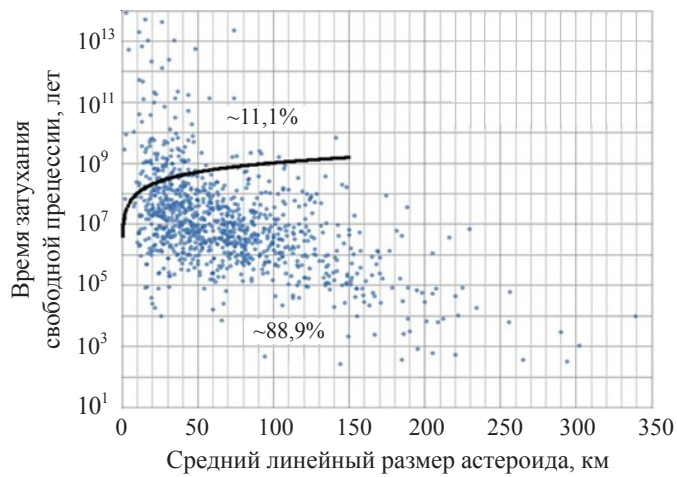


Рис. 1

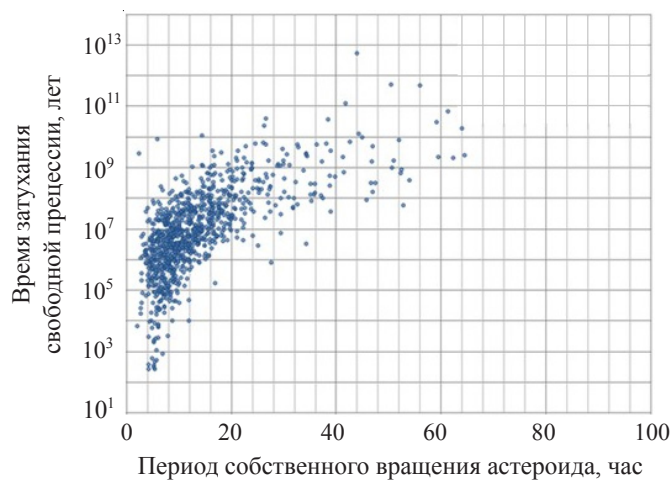


Рис. 2

При диссипации, обусловленной термодиффузией, зависимости времени затухания от среднего диаметра и периода собственного вращения показаны на рис. 3, 4.

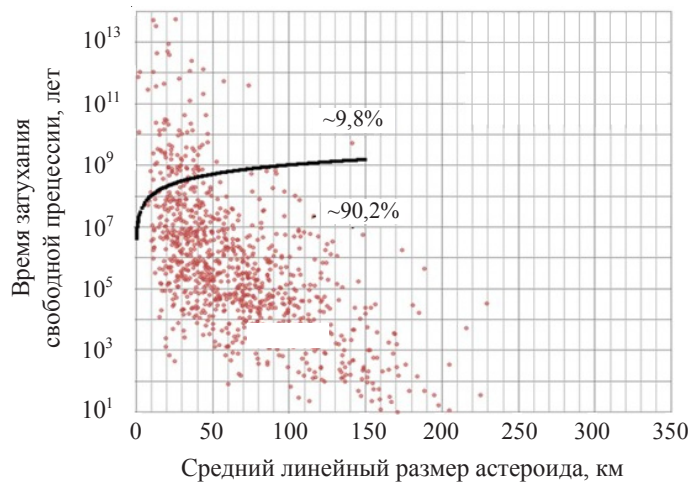


Рис. 3

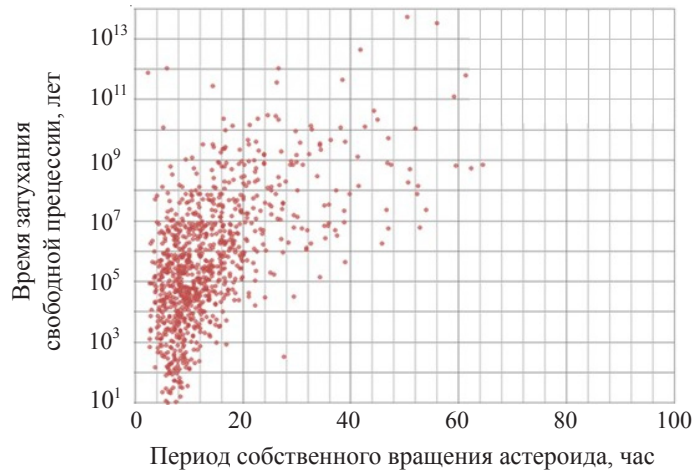


Рис. 4

Из рис. 1–4 видно, что для больших (> 50 км) быстро вращающихся астероидов движения оси вращения в теле быстро затухают. Напротив, чем меньше размер астероида и больше период его собственного вращения, тем дольше будет продолжаться свободная прецессия.

Интерес представляет сравнение времени затухания прецессии со средним периодом между двумя последовательными столкновениями астероидов, приводящими к отклонению оси вращения от устойчивого положения. Время между столкновениями некоторого тела с другими небесными объектами можно оценить, используя вероятностные модели [19, 20]. На рис. 1, 3 изображена кривая, соответствующая зависимости времени между столкновениями астероида от его линейного размера. Точки над кривой соответствуют астероидам, ось вращения которых не успеет прийти в устойчивое положение до следующего внешнего воздействия. При наблюдении за этими телами с высокой степенью вероятности можно отметить прецессионное движение. Данную группу астероидов преимущественно составляют тела малого размера (< 50 км). Из представленной выборки процентное соотноше-

ние астероидов с продолжительным временем затухания прецессии равно 11,1% при рассеянии энергии за счет внутреннего трения (см. рис. 1) и 9,8% при макроскопической термодиффузии (см. рис. 3). Для астероидов, обозначенных на этих рисунках точками под кривой, характерно относительно быстрое возвращение оси вращения в устойчивое положение. Наблюдения за этими объектами может выявить как свободную прецессию, так и вращение вокруг оси наибольшего момента инерции.

Проводя сравнение двух механизмов диссипации энергии, нужно отметить существенное влияние термоупругих свойств материала на время затухания угловых движений оси вращения в теле. В отличие от внутреннего трения, для некоторых астероидов термодиффузия приводит к уменьшению времени затухания прецессии, достаточному, чтобы наблюдать их вращение вокруг оси наибольшего момента инерции.

На рис. 5 представлена диаграмма распределения астероидов по порядку времени затухания прецессии для каждого из рассмотренных механизмов диссипации. Пик распределения в случае внутреннего трения соответствует времени затухания 10^6 – 10^7 лет. Этот диапазон значений характерен для 57% астероидов (острый пик). Большинство астероидов (84%) имеют время затухания прецессии 10^5 – 10^8 лет, что согласуется с оценками, приведенными в [5]. В случае термодиффузии диаграмма имеет более закругленный пик. При этом он смещается в сторону уменьшения времени затухания (10^5 лет). Для 70% астероидов характерна продолжительность процесса затухания прецессии порядка 10^3 – 10^7 лет.

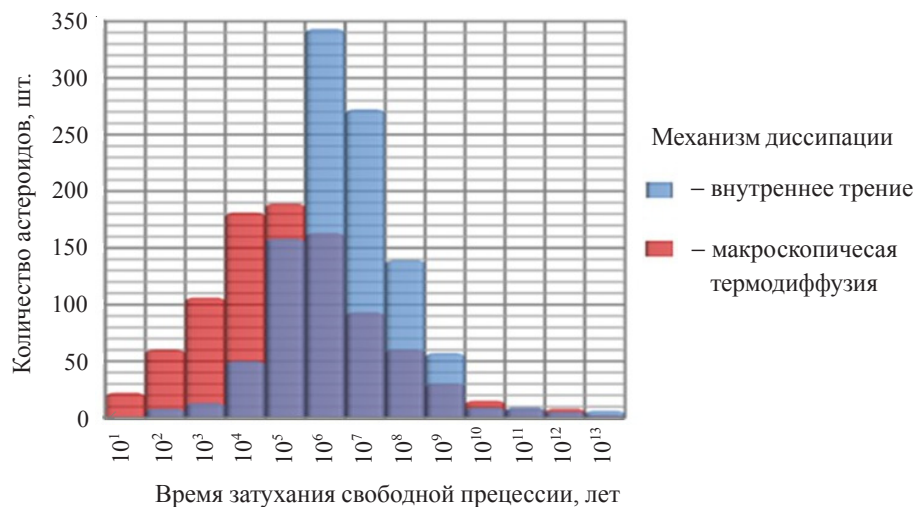


Рис. 5

Согласно выражению (11), рассеяние энергии, происходящее за счет термодиффузии, наиболее сильно сказывается на больших быстро вращающихся астероидах. Для них время затухания прецессии находится в диапазоне 10 – 10^5 лет. Для медленно вращающихся тел малого размера наибольший вклад в диссипацию вносит внутреннее трение (см. (6)). Однако время затухания прецессии таких астероидов, как правило, превышает возраст Вселенной.

Заключение

Проведенная оценка времени затухания свободной прецессии астероидов подтверждает выводы [6, 7] о весьма продолжительном течении этого процесса для небольших медленно вращающихся тел. Показано существенное влияние термоупругих свойств на время затухания прецессии, о чем поднимался вопрос в [6]. Тем не менее, результаты статьи не противоречат выводам [5] о наличии большого числа астероидов, оси вращения которых способны вернуться в устойчивое положение до следующего столкновения.

Установлено, что изменение поля температуры является существенным фактором для оценки времени затухания угловых движений больших быстро вращающихся тел. В телах небольшого размера с продолжительным периодом вращения диссипация в основном обусловлена вязкими свойствами астероидов.

Учет суммарных потерь энергии при внутреннем трении и макроскопической термодиффузии позволяет обнаружить, что 9% из рассмотренных астероидов имеют время затухания прецессии большее, чем время между двумя последовательными столкновениями астероидов. Наблюдения за этими телами с высокой степенью вероятности могут выявить свободную прецессию.

В настоящее время лишь у немногих астероидов изучено угловое движение, поэтому оценка времени затухания прецессии может дать представление о характере столкновений астероидов.

Список литературы

1. *Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра*. М.: Физматлит, 2010. 384 с.
2. Harris A.W., Lupishko D.F. Photometric lightcurve observations and reduction techniques. Asteroids II. *Proceedings of the Conference. 8–11 Mar. 1988*. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 1989. P. 39–53.
3. Binzel R.P., Sauter L.M. Trojan, Hilda, and Cybele asteroids: New lightcurve observations and analysis. *Icarus*. 1992. Vol. 95. P. 222–238.
4. Binzel R.P., Farinella P., Zappala V., Cellino A. Asteroid rotation rates-distribution and statistics. Asteroids II. *Proceedings of the Conference. 8–11 Mar. 1988*. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 1989. P. 416–441.
5. Burns J.A., Safronov V.S. Asteroid nutation angles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1973. Vol. 165. P. 403–411.
6. Efroimsky M., Lazarian A. Inelastic dissipation in wobbling asteroids and comets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2000. Vol. 311. P. 269–278.
7. Harris A.W. Tumbling asteroids. *Icarus*. 1994. Vol. 107. Iss. 1. P. 209–211.
8. Денисов Г.Г., Новиков В.В. О затухании угловых движений свободного деформируемого тела. *Вестник ННГУ. Сер. Механика*. 2003. № 5(1). С. 5–11.
9. Denisov G.G., Novikov V.V., Fevral'skikh L.N. The Earth's viscoelastic property like reason of Chandler's nutation. *Materials Physics and Mechanics. Institute of Problems of Mechanical Engineering (RAS)*. St. Peterburg. 2016. Vol. 28. P. 48–52.
10. Денисов Г.Г., Новиков В.В., Февральских Л.Н. *Свободные угловые движения вязкоупругого твердого тела*. Учебное пособие. Н. Новгород: Изд-во ННГУ [Электронное издание], 2015. 60 с.
11. Денисов Г.Г., Новиков В.В. О свободных движениях деформируемого твердого тела, близкого к шару. *Известия АН СССР. Механика твердого тела*. 1983. №3. С. 43–50.
12. Новиков В.В. Анизотропно-упругий шар в свободном движении. *Прикладная математика и механика*. 1987. Т. 51. Вып. 5. С. 767–774.
13. Новиков В.В., Григорьева Л.Н. Об одном механизме глобального перемещения полюсов тела в свободном угловом движении. *Вестник ННГУ*. 2013. №4(1). С. 169–172.

14. Новиков В.В., Февральских Л.Н. К задаче о свободных угловых движениях деформируемого твердого тела, близкого по форме к шару. *Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки*. 2014. Т. 156. Кн. 1. С. 109–116.
15. <http://ssd.jpl.nasa.gov> (дата обращения 6.02.2017).
16. <http://www.meteorites.ru> (дата обращения 6.02.2017).
17. <http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html> (дата обращения 6.02.2017).
18. <http://newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodys/neoibo> (дата обращения 6.02.2017).
19. Zappala V., Cellino A., Dell'Oro A. *Physical and Dynamical Properties of Asteroid Families. Asteroids III*. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 2002. P. 619–631.
20. Marzari F., Davis D.R., Vanzani V. Collisional evolution of asteroid families. *Icarus*. 1995. Vol. 113. P. 168–187.

References

1. *Asteroidno-kometnaya opasnost: vchera, segodnya, zavtra [Asteroid-Comet Danger: Yesterday, Today, Tomorrow]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2010. 384 p. (In Russian).
2. Harris A.W., Lupishko D.F. Photometric lightcurve observations and reduction techniques. Asteroids II. *Proceedings of the Conference. 8–11 Mar.* 1988. Tucson. AZ. University of Arizona Press. 1989. P. 39–53.
3. Binzel R.P., Sauter L.M. Trojan, Hilda, and Cybele asteroids: New lightcurve observations and analysis. *Icarus*. 1992. Vol. 95. P. 222–238.
4. Binzel R.P., Farinella P., Zappala V., Cellino A. Asteroid rotation rates-distribution and statistics. Asteroids II. *Proceedings of the Conference. 8–11 Mar.* 1988. Tucson. AZ. University of Arizona Press. 1989. P. 416–441.
5. Burns J.A., Safronov V.S. Asteroid nutation angles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1973. Vol. 165. P. 403–411.
6. Efroimsky M., Lazarian A. Inelastic dissipation in wobbling asteroids and comets. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2000. Vol. 311. P. 269–278.
7. Harris A.W. Tumbling asteroids. *Icarus*. 1994. Vol. 107. Iss. 1. P. 209–211.
8. Denisov G.G., Novikov V.V. O zatukhanii uglovykh dvizheniy svobodnogo deformiruемого tela [On angular motion damping of free deformable body]. *Vestnik NNGU. Seriya Mekhanika. [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod. Series of Mechanics]*. 2003. No 5(1). P. 5–11 (In Russian).
9. Denisov G.G., Novikov V.V., Fevral'skikh L.N. The Earth's viscoelastic property like reason of Chandler's nutation. *Materials Physics and Mechanics. Institute of Problems of Mechanical Engineering (RAS)*. St. Peterburg. 2016. Vol. 28. P. 48–52.
10. Denisov G.G., Novikov V.V., Fevral'skikh L.N. *Svobodnye uglovye dvizheniya vyazko-uprugogo tverdogo tela [Free Angular Motions of a Viscoelastic Solid]*. Textbook. Electronic edition. N.Novgorod. UNN Publ. 2015. 60 p. (In Russian).
11. Denisov G.G., Novikov V.V. O svobodnykh dvizheniyakh deformiruемого tverdogo tela, blizkogo k шару [On free motions of a deformable rigid body close to a sphere]. *Izvestiya AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]*. 1983. No 3. P. 43–50 (In Russian).
12. Novikov V.V. Anizotropno-uprugiy шар v svobodnom dvizhenii [Anisotropic elastic ball in free motion]. *Prikladnaya matematika i mekhanika [Journal of Applied Mathematics and Mechanics]*. 1987. Vol. 51. Iss. 5. P. 767–774 (In Russian).
13. Novikov V.V., Grigorieva L.N. Ob odnom mekhanizme globalnogo peremeshcheniya polyusov tela v svobodnom uglovom dvizhenii [About one mechanism of global movement of poles of a body in free angular movement]. *Vestnik NNGU. [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod]*. 2013. Vol. 4(1). P. 169–172 (In Russian).
14. Novikov V.V., Fevral'skikh L.N. K zadache o svobodnykh uglovykh dvizheniyakh deformiruемого tverdogo tela, blizkogo po forme k шару [On the problem of free angular motions of a deformable solid close in shape to a sphere]. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskie nauki [Scientific Notes of Kazan University. Physical and Mathematical Sciences]*. 2014. Vol. 156. Book 1. P. 109–116 (In Russian).
15. <http://ssd.jpl.nasa.gov> (Date of access 6.02.2017).
16. <http://www.meteorites.ru> (Date of access 6.02.2017).

17. <http://cfa-www.harvard.edu/iau/mpc.html> (Date of access 6.02.2017).
18. <http://newton.dm.unipi.it/cgi-bin/neodyd/neoibo> (Date of access 6.02.2017).
19. Zappala V., Cellino A., Dell'Oro A. *Physical and Dynamical Properties of Asteroid Families. Asteroids III*. Tucson, AZ. University of Arizona Press. 2002. P. 619–631.
20. Marzari F., Davis D.R., Vanzani V. Collisional evolution of asteroid families. *Icarus*. 1995. Vol. 113. P. 168–187.

TO THE PROBLEM OF THE DAMPING OF THE FREE PRECESSION OF ASTEROIDS

Novikov V.V., Fevralskikh L.N.

Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation

The problem of estimating the damping time of free precession of asteroids is studied. Asteroids are considered as elastic solids, possessing of various axial and equatorial moments of inertia in the undeformed state. Two mechanisms of energy dissipation are considered: internal friction due to viscoelastic properties, and processes associated with macroscopic thermal diffusion. Expressions of the precession damping coefficients for each of the dissipation mechanisms are given.

An estimate of the damping time of the motions in the body of the axis of stable rotation is made for some group of the most known asteroids. The dependence of the precession damping time on the average diameter of asteroids and the period of their own rotation is presented. There is an increase in the duration of the free precession with a decrease in the size of the asteroids and slowing down their own rotation. The precession damping time is compared with the average time between successive collisions of asteroids, which lead to the deviation of the rotation axes from the stable position. Estimates show that most of the considered asteroids have a decay time of less time between successive collisions.

The contribution of each of the dissipation mechanisms to process of damping is considered. It is established that the dissipation is mainly due to the viscoelastic properties for bodies of small size with a long period of own rotation. A significant effect of thermal diffusion on the damping of angular motions of large rapidly rotating asteroids is noted. Unlike the internal friction, thermal diffusion leads to a decrease in the precession damping time for some asteroids. That damping time is sufficient to observe rotation of asteroids relative to the axis of the greatest moment of inertia.

Keywords: asteroids, free precession, energy dissipation, viscoelastic properties, internal friction, macroscopic thermal diffusion.