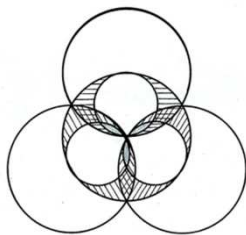


Преамбула к статье с ее обсуждением представлена в конце статьи.

УДК 521.172 + 523.2

ЭВОЛЮЦИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ ЗА МИЛЛИОНЫ ЛЕТ



Смульский И.И. (д. ф.-м. н., профессор)

*Институт криосферы Земли, ТюмНЦ СО РАН, Федеральный
Исследовательский Центр, г. Тюмень, РФ; jsmulsky@mail.ru*

Аннотация. В статье приведены основные этапы вывода дифференциальных уравнений вращательного движения Земли. На основании особенностей кинетического момента показаны периоды колебания оси Земли. Обсуждены константы уравнений, начальные условия и приведена теория их вычислений. Рассмотрены результаты численного интегрирования уравнений на интервалах времени от 0.1 года до 1 млн. лет. Рассмотрена теория преобразования решений к подвижной плоскости орбиты Земли за миллионы лет, и их результаты представлены на разных интервалах времени от 100 лет до 20 млн. лет. Проанализирована эволюция оси Земли. Установлено, что ось Земли прецессирует относительно неподвижного в пространстве направления, которое отличается от направления прецессии планетарных орбит. Приведены физические объяснения полученных колебаний оси Земли от 14.68° до 32.68° . Показаны колебания периода вращения Земли. Представлены доказательства достоверности полученных решений. Работа представляет интерес для широкого круга исследователей в областях астрономии, палеоклимата и геофизики.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, вращение Земли, пресессия, колебания, эволюция, периоды, причины, Луна, Солнце, планеты.

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача о вращении Земли за большие интервалы времени является одной из трех составляющих Астрономической теории палеоклимата [12, 13, 29]. В прежних ее вариантах, начиная с Милутина Миланковича [5], эта задача явно не фигурировала. Вращение плоскости экватора использовалось для определения прецессии перигелия орбиты Земли относительно подвижного экватора. Для этого использовались решения уравнений Пуассона.

По словам П.С. Лапласа [2] задачу о вращении Земли впервые рассмотрел И. Ньютон. С тех пор уравнения вращательного движения неоднократно выводились разными авторами. При этом они основывались на разных теоремах механики, использовались разные системы координат, разные обозначения и разные методы решения. Все авторы в процессе вывода уравнений начинали их упрощать с целью дальнейшего решения уравнений аналитическими методами. В подавляющем большинстве случаев в этих уравнениях отбрасывались вторые производные и произведения первых производных. Полученные уравнения называются уравнениями Пуассона.

В связи с этим отсутствуют общепринятые неупрощенные дифференциальные уравнения вращения Земли, которые без всякого изменения можно было бы подвергнуть численному интегрированию. Кроме того, при численном интегрировании возникает ряд конкретных проблем, например, задание начальных условий, которые невозможно решить, если детально не представлять все особенности вывода дифференциальных уравнений. Часто возникают противоречия между трактовкой сложного вращательного движения Земли в астрономии и требованиями, которые следуют из законов механики. В связи с этим нам пришлось проанализировать разные выводы уравнений, в результате чего был выбран

наиболее простой, который и представлен в настоящей работе. Ввиду его объемности здесь приведены лишь принципиальные положения и дана логическая схема вывода главных этапов.

Во второй половине 20-го века были введены в действие высокоточные системы наблюдения вращения Земли, которые позволили исследовать динамику Земной оси на малых интервалах времени. С целью ее объяснения были созданы теории прецессии и нутации. Расхождение между этими теориями и наблюдениями вынудило исследователей кроме основного гравитационного воздействия вводить дополнительные эффекты [22]. Перечислим некоторые из них. Для расчета гравитационного взаимодействия элемента массы Земли с точечным телом вводилась коррекция на распределение геопотенциала по поверхности Земли. Кроме того, рассматривалась неосесимметричная Земля с неравными между собой моментами инерции J_x и J_y , различие которых также определилось по поверхностному геопотенциалу. Вводилась коррекция на торможение вращения Земли за счет приливных сил. В уравнениях вращательного движения к гравитационным силам добавлялись также релятивистские силы путем учета геодезической прецессии [19], а также учетом релятивистской добавки в силовой функции в уравнениях для орбитального движения [24].

Для объяснения различия между теорией и наблюдениями вводили модели нежесткой Земли, а также структурированную Землю, в которой каждая структура, например, ядро Земли, имеют свое движение [20]. Также представляется, что перераспределение льда в полярных областях ведёт к изменению моментов инерции на длительных интервалах времени. Поэтому его учитывают при рассмотрении эволюции Земли за большие промежутки времени.

Практически все дополнительные эффекты не определены так точно, как гравитационное воздействие. Влияние ряда из них носит гипотетический характер. Некоторые из них предложены специалистами из разных областей физики, и специалистам в теоретической и небесной механике приходится применять их на веру, не подвергая строгому анализу. К таковым относятся релятивистские добавки. Эти силы зависят не только от расстояния, но и от скорости [7]. В теоретической механике системы с такими связями называются неголономными системами. Для неголономных систем энергетические методы механики требуют коррекции. А без коррекции уравнения движения общей теории относительности входят в противоречия с законами сохранения.

Все эти дополнительные слабые воздействия основаны на расхождениях между расчетами основного гравитационного воздействия на вращательное движение Земли и наблюдениями. Однако, этот расчет, как отмечалось ранее, выполнен приближенно. При выводе дифференциальных уравнений вращательного движения Земли существует целый ряд упрощений этих уравнений, которые могут давать отличия результатов расчетов от наблюдения. Поэтому представляет большой интерес получение как можно более точных решений на основании только одного гравитационного взаимодействия, чтобы не возникало сомнений, что невязки расчетов с наблюдениями действительно должны объясняться другими факторами. Это положение приобретает еще большую актуальность при исследовании вращательного движения за большие периоды времени. Дополнительные слабые воздействия, которые введены на подгонке результатов расчетов к наблюдениям за сотни лет, могут давать нереальные результаты на интервалах в миллионы лет. В связи с этим, далее рассматривается только ньютоновское гравитационное воздействие на вращательное движение осесимметричной Земли.

Проблема вращательного движения Земли является самой сложной задачей механики, в том числе и небесной механики. Этой проблемой автор занимался более десяти лет. На

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

протяжении 50 лет работе над ней предшествовали и сопутствовали другие работы по взаимодействиям и движениям тел [7, 10], в результате которых решены десятки нерешенных ранее проблем. Тем не менее, когда в результате решения задачи о вращении Земли были получены большие колебания оси Земли, превышающие колебания прежних решений в 7-8 раз, автора это насторожило. Поэтому в течение трех лет были проведены различные проверки и решения этой задачи другими методами. Все они подтвердили достоверность полученных решений [28].

Это позволило включить результаты задачи о вращении Земли в новую Астрономическую теорию палеоклимата. Ее результаты совпали с совокупностью сведений о палеоклимате за последние 50 тыс. лет [11]. Чем дальше в прошлое, тем неопределеннее становятся представления о палеоклимате. Однако, для автора совершенно ясно, что как день сменяет ночь, а на смену лета приходит зима, так точно в высоких широтах потепления сменяются похолоданиями. Все эти явления обусловлены характеристиками орбитального и вращательного движения Земли и их эволюцией. Поэтому нет сомнения, что новые решения по эволюции вращательного движения Земли, включенные в Астрономическую теорию климата, позволят палеоклиматологам с уверенностью систематизировать знания о прошлом, а также уточнять их возраст.

Отмеченное совпадение результатов с палеоклиматом позволило автору более детально рассмотреть результаты задачи о вращении Земли. В отличие от прежних представлений в небесной механике и астрономии, вместо математических объектов: прецессия от планет, прецессия от Луны и Солнца и т.п. автор вводит физические объекты: ось вращения Земли, ось орбиты и т.д. Поэтому рассматривается не математическая эволюция, а эволюция физических объектов. Детальный анализ этой эволюции объясняет причины больших колебаний оси Земли, а также становится понятным, почему предшественники получали неверные результаты.

Следует также отметить, что автор использует не энергетический подход в механике, а силовой. Особенности поведения момента силы определяют колебания оси Земли и их периоды. Как особенности эволюции, так и особенности момента силы являются дополнительными доказательствами достоверности полученных результатов.

В статье также рассмотрены короткопериодическая эволюция оси Земли, а также вопросы колебания ее скорости вращения. В физике Земли эти проблемы привлекают для понимания ее строения. Полученные в статье новые результаты представляют интерес для специалистов в этой области.

2. ТЕОРЕМА МОМЕНТОВ

Вращающаяся Земля, как нетвердое, т.е. подвижное, тело, принимает равновесную осесимметричную форму под действием двух систем сил: гравитационных и центробежных. Она образует сплюснутый у полюсов геоид с осью симметрии z (рис. 1), расположенной по вектору угловой скорости $\vec{\omega}$ собственного вращения. Этот вектор совершает сложное движение в пространстве, которое представляет абсолютная скорость вращения Земли $\vec{\omega}$ в невращающейся системе координат $x_1y_1z_1$. Угловая скорость $\vec{\omega}$ наклонена под углом θ к оси z_1 .

Любое тело B , находящееся в плоскости своей орбиты 3 , воздействует на две половины Земли: на ближнюю – силой \vec{F}_1 и дальнюю – силой \vec{F}_2 . Если бы Земля была центрально-

симметричным шаром, то равнодействующая сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 прошла бы через центр Земли O . Для сплюснутой Земли центр масс ближней части Земли приблизится к телу B , а дальней – удалится. Поэтому сила \vec{F}_1 увеличится, а сила \vec{F}_2 уменьшится, в результате чего возникнет момент сил m_O , направленный по часовой стрелке.

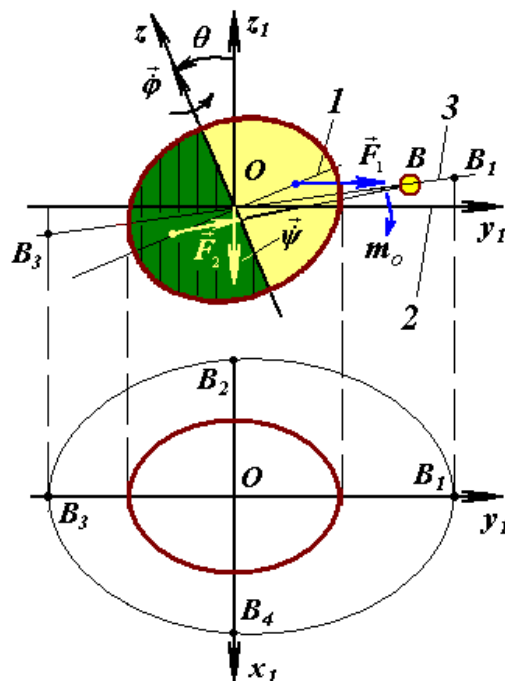


Рис. 1. Схема воздействия тела B на Землю в двух видах: сверху – в вертикальной плоскости, перпендикулярной плоскости экватора 1, внизу – в горизонтальной плоскости перпендикулярной оси z_1 ; 1 и 2 – плоскости экватора Земли и ее орбиты, соответственно; 3 – плоскость орбиты воздействующего на Землю тела B .

В результате воздействия момента сил ось z Земли начнет поворачиваться вокруг точки O с угловыми скоростями $\dot{\theta}$ и $\dot{\psi}$. Вектор абсолютной угловой скорости Земли будет

$$\vec{\omega} = \vec{\phi} + \vec{\theta} + \vec{\psi}. \quad (1)$$

Этот процесс воздействия на Землю определяется теоремой изменения момента количества движения:

$$\frac{d\vec{K}_O}{dt} = \sum \vec{m}_O(\vec{F}_k), \quad (2),$$

где \vec{K}_O – момент количества движения Земли относительно центра O в невращающейся системе координат $x_1y_1z_1$;

$\sum \vec{m}_O(\vec{F}_k)$ – сумма моментов сил \vec{F}_k , действующих на Землю тел.

Из анализа теоремы моментов (2) можно установить периоды колебаний оси Земли. Максимальные моменты сил $m_{O_{\max 1}}$ тело B создает в точках B_1 и B_3 , причем одного и того же направления. При нахождении тела в плоскости экватора (точки B_2 и B_4) моменты сил равны нулю, т.е. за одно обращения тела по орбите момент силы дважды изменяется от 0 до $m_{O_{\max 1}}$. Поэтому ось Земли будет подвержена колебаниям с полупериодами обращения планет, Солнца и Луны относительно подвижной плоскости экватора.

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

В своем орбитальном движении Земля и планеты сближаются. Если сближение произойдет в точке B_1 или B_3 , то максимальный момент возрастет до значения $m_{O_{\max 2}}$. Поэтому ось Земли будет испытывать колебания с периодами сближений Земли с планетами, особенно близкими к Земле, в точках B_1 и B_3 .

Так как орбиты Земли, Луны и планет не лежат в одной плоскости и не круговые, а эллиптические, то эти два обстоятельства приведут к модуляции отмеченных выше периодов. Например, амплитуда колебания оси Земли будет больше в той полупериод обращения Луны вокруг Земли, когда Луна будет находиться в своем перигее.

Момент силы, который создает тело B , зависит также от угла наклона между плоскостью подвижного экватора I (рис. 1) и плоскостью орбиты 3 . Поэтому ось Земли будет испытывать колебания с периодом прецессии орбиты тела относительно подвижной плоскости экватора Земли. Например, период прецессии орбиты Луны равен 18.6 лет. Так как он значительно меньше период прецессии плоскости экватора (25.7 тыс. лет), то с периодом 18.6 лет ось Земли будет испытывать еще одни колебания при воздействии Луны. А период прецессии орбиты Земли (68.7 тыс. лет) сопоставим с периодом 25.7 тыс. лет. Поэтому кроме полугодовых Солнце будет создавать колебания, период которых определяется разностью скоростей прецессии орбиты Земли и ее экватора.

3. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Дифференциальные уравнения вращательного движения Земли выводятся из теоремы моментов (1). Для этого необходимо, с одной стороны, выразить момент количества движения Земли \vec{K}_O в зависимости от ее моментов инерции и компонент угловой скорости $\vec{\omega}$. А с другой стороны, необходимо найти моменты сил $\vec{m}_O(\vec{F}_k)$, действующих на Землю тел, в зависимости от их масс и расстояний до Земли. Это требует рассмотрения задачи о вращении Земли в разных системах координат (рис. 2).

В задаче о вращении Земли орбитальное движение тел Солнечной системы рассматривается в неускоренной эклиптической барицентрической системе координат x_{10}, y_{10}, z_{10} (рис. 2), связанной с застabilизированной на эпоху T_0 плоскостью орбиты Земли I . Ось x_{10} направлена на точку весеннего равноденствия. Начало O невращающейся системы $x_1 y_1 z_1$ находится в центре масс Земли, и она поступательно движется относительно системы $x_{10} y_{10} z_{10}$. Ось z вращающейся экваториальной системы $x y z$, связанная с вращающейся Землей, направлена вдоль вектора скорости $\vec{\phi}$ собственного вращения Земли, а ось x в начальный момент $t = 0$ находится в плоскости нулевого меридиана, т.е. проходящего через г. Гринвич. Абсолютная угловая скорость $\vec{\omega}$ вращения Земли рассматривается с проекциями $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ на оси вращающейся системы $x y z$: $\vec{\omega} = \vec{i} \omega_x + \vec{j} \omega_y + \vec{k} \omega_z$. С этими проекциями она используется в системе $x_1 y_1 z_1$.

Вращательное движение Земли рассматривается по отношению к невращающейся системе координат $x_1 y_1 z_1$ (рис. 2). Подвижная плоскость экватора Земли 2 определяется углом наклона θ к плоскости I и углом прецессии $\psi = \gamma_0 K$. Кроме того рассматривается скорость собственного вращения Земли $\vec{\phi}$ относительно ее подвижной оси z .

В теореме моментов (2) кинетический момент \vec{K}_O создается всеми массами вращающейся Земли в системе координат $x_1 y_1 z_1$.

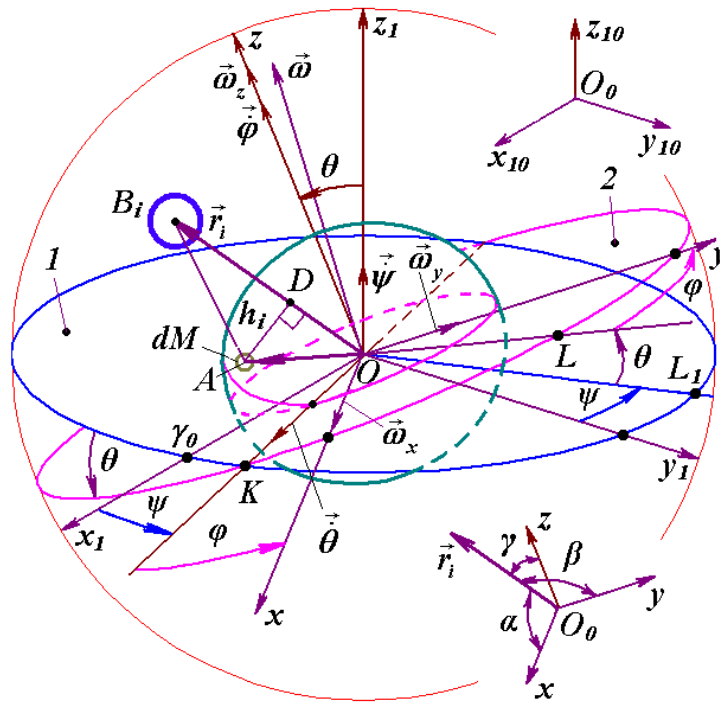


Рис. 2. Системы координат и воздействие тела B_i на элемент Земли dM : $x_{10}y_{10}z_{10}$ – неподвижная барицентрическая эллиптическая; $x_1y_1z_1$ – неврацающая эллиптическая и xuz – вращающаяся с Землей экваториальная – геоцентрические системы. Эйлеровы углы ψ, θ и φ положения системы xuz относительно $x_1y_1z_1$. 1 – неподвижная плоскость эклиптики; 2 – подвижная плоскость экватора Земли; $r = OA$ – расстояние элемента массы dM от центра Земли.

Так как в этой системе Земля вращается с угловой скоростью $\vec{\omega}$, то любой ее элемент dM с радиусом-вектором $\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y + \vec{k}z$ (рис. 2) движется со скоростью $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ и относительно центра O имеет момент количества движения $\vec{m}_o(dM \cdot \vec{v}) = \vec{r} \times \vec{v} \cdot dM$. Здесь вектора \vec{r} , \vec{v} , \vec{m}_o рассматриваются в проекциях на оси вращающейся системы координат. После интегрирования по всей массе Земли M кинетический момент будет: $\vec{K}_O = \int_M m_o(dM \cdot \vec{v}) = \int_M \vec{r} \times \vec{v} \cdot dM$. Продифференцировав \vec{K}_O по времени и подставив векторы \vec{r} , $\vec{\omega}$ и \vec{v} , после преобразования получаем производные от проекций кинетического момента на оси вращающейся системы xuz :

$$\dot{K}_{Ox} = J_x \varepsilon_x - (J_y - J_z) \omega_y \omega_z, \quad \dot{K}_{Oy} = J_y \varepsilon_y - (J_z - J_x) \omega_z \omega_x, \quad \dot{K}_{Oz} = J_z \varepsilon_z, \quad (3),$$

где J_x, J_y и J_z – моменты инерции Земли на оси вращающейся системы координат xuz ; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ и ε_z – проекции углового ускорения.

Из наблюдаемой скорости прецессии можно определить только отношение между двумя моментами J_z и J_x , но не их абсолютные значения. В последние годы рассматриваются модели трехосной Земли, в которой третий момент инерции J_y оценивается по распределению потенциала силы тяжести на поверхности Земли. Однако этот метод также не позволяет определить точное значение моментов инерции. Здесь же отметим, что в случае трехосной Земли из-за несимметричности распределения потенциала необходимо вводить в уравнения слагаемые с центробежными моментами инерции J_{xy}, J_{xz}, J_{yx} . Традиционно в выводах слагаемые с этими моментами опускают, а слагаемые с третьим моментом J_y оставляют. Однако, в конечных выражениях J_y приравнивают J_x . Поэтому выражения (3) записаны для

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

осесимметричной Земли: $J_y=J_x$ и $J_{xy}=J_{xz}=J_{yz}=0$. Для неосесимметричной Земли производные от кинетического момента даны в работе [26].

Подобно вычислению проекций кинетического момента (3) рассчитываются интегрированием по всем элементам Земли dM компоненты моментов сил $\vec{m}_O(\vec{F}_k)$ в теореме (1). Они также будут зависеть от моментов инерции Земли.

При выводе уравнений вращательного движения возникает проблема: при повороте тела в зависимости от системы координат изменяются или его моменты инерции или проекции угловой скорости. Поэтому вначале уравнения рассматриваются в тех координатах, в которых моменты инерции J_x, J_y, J_z не изменяются. Затем происходит переход к Эйлеровым угловым координатам ψ, θ и φ , в которых угловые скорости не зависят от поворота тела. Ввиду сложности и громоздкости вывода уравнений вращения Земли [26], здесь рассмотрим только логическую схему вывода, представленную на блок-схеме на рис. 3.

Вначале производные кинетического момента выражаются во вращающейся системе координат x_{uz} (действие 1). Выше это действие было продемонстрировано и получены выражения (3). После представления угловой скорости в переменных Эйлера (действие 2), получаем проекции производных кинетического момента в направлении Эйлеровых скоростей (действия 3 и 4).

Для нахождения момента сил необходимо определить силовую функцию (действие 5). Проектируя моменты сил на направления угловых скоростей Эйлера (действие 6), согласно теореме моментов (2), и после подстановки в нее кинетического момента и силовой функции (действие 7 и 8) получаем дифференциальные уравнения вращения Земли (действие 9). Они имеют следующий вид:

$$\ddot{\psi} = -2\dot{\psi}\dot{\theta} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} + \dot{\theta} \frac{J_z \omega_E}{J_x \sin \theta} - \sum_{i=1}^n \frac{3GM_i E_d J_z}{r_i^5 J_x} \left\{ 0.5 \sin(2\psi)(x_{1i}^2 - y_{1i}^2) - x_{1i} y_{1i} \cdot \cos(2\psi) + z_{1i} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} (x_{1i} \cos \psi + y_{1i} \sin \psi) \right\}; \quad (4)$$

$$\ddot{\theta} = 0.5\dot{\psi}^2 \sin(2\theta) - \frac{J_z \omega_E \dot{\psi} \sin \theta}{J_x} - \sum_{i=1}^n \frac{3GM_i \cdot E_d J_z}{2r_i^5 J_x} \left\{ \sin(2\theta) [x_{1i}^2 \sin^2 \psi + y_{1i}^2 \cos^2 \psi - z_{1i}^2 - x_{1i} y_{1i} \sin(2\psi)] + 2z_{1i} (x_{1i} \sin \psi - y_{1i} \cos \psi) \cos(2\theta) \right\}; \quad (5)$$

$$\dot{\varphi} = \omega_E - \dot{\psi} \cdot \cos \theta, \quad (6)$$

где J_x, J_y и J_z – моменты инерции Земли относительно осей системы координат, связанной с вращающейся Землей;

$E_d = (J_z - J_x) / J_z$ - динамическая эллиптичность Земли;

$\omega_E = \text{const}$ – проекция абсолютной скорости вращения Земли на ее ось z (см. рис. 2);

n – количество действующих на Землю тел, а M_i – их масса, а x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} – их координаты.

Следует отметить, что неизменность проекции угловой скорости $\vec{\omega}$ на ось z (рис. 3), т.е. $\omega_z = \omega_E = \text{const}$, вызвано равенством нулю проекции момента сил m_{Oz} . А это обусловлено осесимметричностью Земли. С другой стороны, для неосесимметричной модели Земли, например, трехосной, или нежесткой, момент сил m_{Oz} не равен нулю. Поэтому кроме двух дифференциальных уравнений второго порядка (4)-(5), будет еще одно для угла φ . Дополнительно, в выражения для кинетического момента \vec{K}_O и момента сил $\vec{m}_O(\vec{F}_k)$ в теореме

(2) войдут центробежные моменты инерции J_{xy} , J_{xz} и J_{yz} . В моделях с изменяющейся Землей изменяться будут центробежные моменты.

Поэтому при вычислении кинетического момента согласно (3) в это выражение войдут производные от центробежных моментов J_{xy} , J_{xz} и J_{yz} . Последнее обстоятельство во всех теориях с неосесимметричной моделью Земли не учитывают. Их авторы, предполагая, что выбранные ими оси x , y , z являются главными осями инерции, центробежные моменты инерции приравнивают нулю. Как известно из теоретической механики, это возможно только в одном случае, если оси x , y , z являются осями симметрии для тела. Поэтому в решения моделей неосесимметричной Земли заложена ошибка на уровне дифференциальных уравнений. Полученные в таких теориях вращения Земли отличия от решений в осесимметричной Земли в первую очередь обусловлены этой ошибкой.

Уравнениями (4) - (5) определяются углы наклона θ и прецессии ψ подвижного экватора 1 относительно неподвижной плоскости орбиты 2 (рис. 2). Из анализа уравнений (4) и (5) следует [26], что в установившемся режиме вторые производные $\ddot{\psi}$ и $\ddot{\theta}$ в уравнениях малы по сравнению с другими слагаемыми, т.е. $\ddot{\psi} \approx \ddot{\theta} \approx 0$. Так как ω_E на 6 порядков превышает производные $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$, то, пренебрегая слагаемыми с $\dot{\psi} \cdot \dot{\theta}$ и $\dot{\psi}^2$ в уравнениях (4)-(5), получаем:

$$\dot{\theta} \approx -\sum_{i=1}^n \frac{3GM_i E_d \sin \theta}{2\omega_E r_i^5} [\sin(2\psi)(x_{li}^2 - y_{li}^2) - 2x_{li} y_{li} \cos(2\psi) + 2z_{li} \frac{\cos \theta}{\sin \theta} (x_{li} \cos \psi + y_{li} \sin \psi)]; \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\psi} \approx -\sum_{i=1}^n \frac{3GM_i E_d}{2\omega_E r_i^5 \sin \theta} \{ \sin(2\theta) [x_{li}^2 \sin^2 \psi + y_{li}^2 \cos^2 \psi - z_{li}^2 - x_{li} y_{li} \sin(2\psi)] + \\ + 2z_{li} (x_{li} \sin \psi - y_{li} \cos \psi) \cdot \cos(2\theta) \}. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнения (7)-(8) идентичны уравнениям Пуассона. В результате их приближенных аналитических решений, получены результаты в прежней теории эволюции вращательного движения Земли.

4. КОНСТАНТЫ УРАВНЕНИЙ И НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ

4.1. Угловая скорость вращения Земли. Отличие геоида от сферы, влияющее на эволюцию вращательного движения Земли, характеризуют ее динамической эллиптичностью $E_d = (J_z - J_x) / J_z$. В уравнениях (4) - (5) отношение моментов инерции J_z / J_x может быть выражено через динамическую эллиптичность так: $J_z / J_x = 1 / (1 - E_d)$. Поэтому уравнения зависят от двух констант: проекции на ось z абсолютной скорости ее вращения ω_E и динамической эллиптичности Земли E_d . Угловая скорость вращения Земли ω_E представляет ее среднее значение за большой интервал времени. Ее можно определить по сидрическому периоду обращения Земли вокруг Солнца $P_{orsd} = 365.25636042$ дней. За время P_{orsd} точка земной поверхности относительно неподвижных звезд поворачивается на угол $\varphi_{Psd} = 2 \cdot \pi \cdot P_{orsd} + 2 \cdot \pi$, где

Блок-схема вывода уравнений вращательного движения Земли.

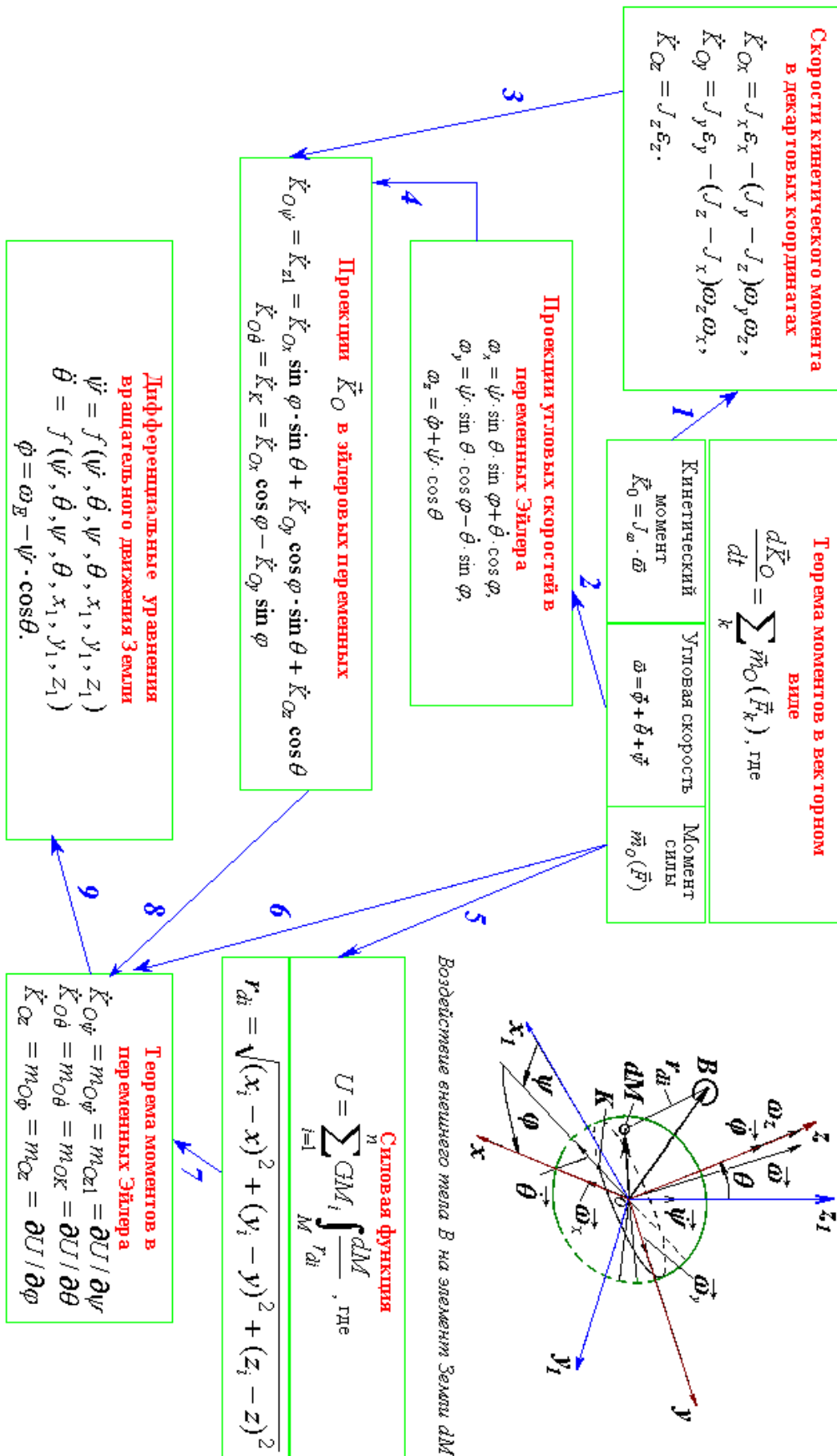


Рис. 3. Блок-схема вывода дифференциальных уравнений вращения Земли. Цифрами на стрелках показана очередность вывода (действия)

последнее слагаемое $2\cdot\pi$, обусловлено годовым обращением Земли вокруг Солнца. Тогда угловая скорость вращения Земли будет:

$$\omega_E = \varphi_{Psd}/P_{orsd} = 2\cdot\pi\cdot(1 + 1/P_{orsd})\cdot 24\cdot 3600 = 7.292115082711576\cdot 10^{-5} \text{ 1/сек.} \quad (9)$$

Это значение совпадает со значением в [16], которое приведено с 7 знаками. В источниках с большим числом значащих цифр [15, 24] значение (9) совпадает до 8 знака.

4.2. Динамическая эллиптичность Земли. Знания о распределении плотности Земли в настоящее время недостаточны, чтобы можно было рассчитать моменты инерции J_z и J_x с необходимой точностью. Поэтому динамическую эллиптичность Земли E_d определяют сравнением рассчитанной скорости прецессии $\dot{\psi}$ с наблюдаемой величиной, например, с прецессией оси Земли относительно неподвижной эклиптики [15, 23] за тропический год T_{tr}

$$p_1 = 50''.37084 + 0''.00493 T_{tr}. \quad (10)$$

В результате многократных вычислений разными авторами теорий вращения Земли динамическую эллиптичность Земли E_d уточнялась и в последних работах существенно не изменяется. Нами также проводились исследования по значению E_d [26] и мы пришли к выводу, что значение $E_d = 3.2737671\cdot 10^{-3}$ является приемлемым в настоящее время. Это значение использовал ряд авторов, в том числе [20].

4.3. Начальные условия. При интегрировании уравнений (4) - (5) в начальный момент времени необходимо задавать начальные значения углов ψ и θ , и начальные скорости $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$. Параметры вращательного движения Земли и орбитальных движений воздействующих тел задаются в системе неподвижной эклиптики на эпоху 2000.0 г. с юлианским днем $JD_s = 2451545$, а начало решения берется в сдвинутый на 0.5 столетия момент $T = 0$ с датой 30.12.1949 г. и юлианским днем $JD_0 = 2433280.5$.

Задание начальных условий представляет значительную проблему. Интегрирование уравнений (4) - (5) с воздействием одного тела [14, 26] показало, что переменные ψ , θ , $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$ колеблются с периодами суток, полумесяца, полугода и 18.6 лет. В астрономии приводятся осредненные изменения параметров, в которых эти колебания отсутствуют. Поэтому начальные условия (НУ) определяются в несколько стадий. Первоначально начальные условия рассчитываются на основании осредненных астрономических элементов, отражающих орбитальное и вращательное движения Земли. Основные геометрические характеристики этих движений представлены на рис. 4. В отличие от рис. 2 здесь приняты другие обозначения для декартовых координат: x_{uz} и $x_{e}y_{e}z_{e}$ – неподвижные экваториальная и эклиптическая системы, соответственно. Они связаны с плоскости экватора A_0A_0' и эклиптики E_0E_0' , соответственно, в эпоху JD_s . В любую другую эпоху JD плоскости экватора AA' и эклиптики EE' находятся в других положениях.

В 20-м веке использовалась система осредненных астрономических элементов, созданная в конце 19-го века С. Ньюкомбом [23]. В конце 20^{ого} века такую систему также создали Дж. Симон и др [25]. В Приложении 1 по каждой из этих систем приведен алгоритм определения начальных условий на эпоху JD_0 , а также их значения.

С этими начальными условиями интегрируются уравнения (4) - (5) за небольшой интервал времени, например за 0.1 года. На этом интервале проявляются суточные и

полумесячные периоды колебаний. Амплитуды суточных колебаний имеют определенную величину. Из уравнений видно, что вторые производные в левой части уравнений зависят от первых производных в правой части.

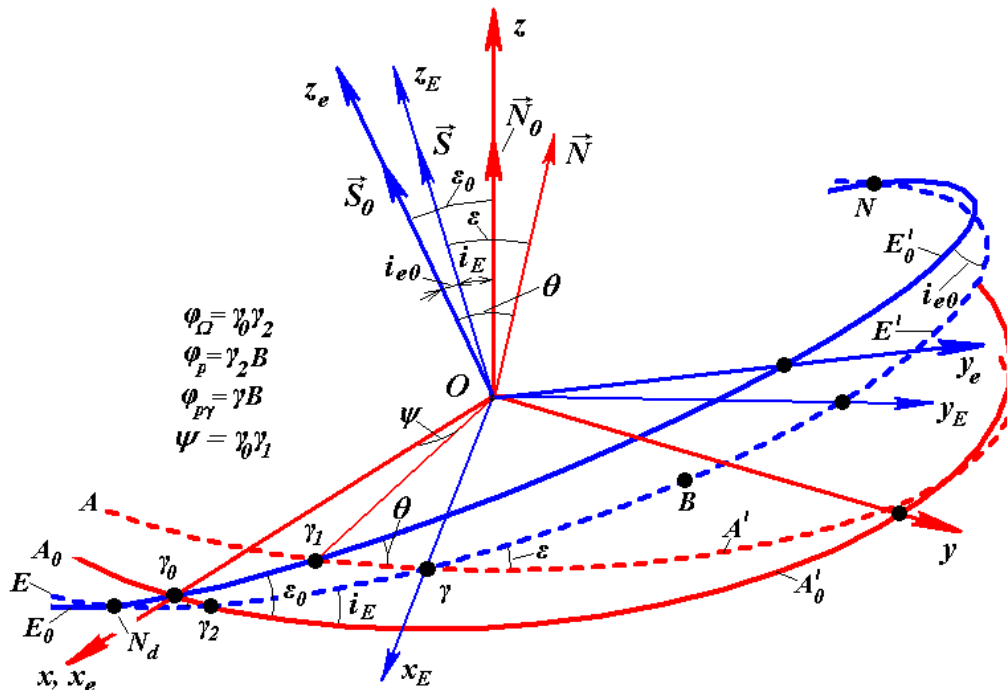


Рис. 4. Экваториальная $x_e y_e z_e$ и эклиптическая $x_e y_e z_e$ системы координат: $A_0 A'_0$ и $E_0 E'_0$ – плоскости на небесной сфере неподвижных экватора и эклиптики в эпоху JD_S ; AA' и EE' – подвижные плоскости экватора и эклиптики в произвольную эпоху JD ; \vec{S}_0 и \vec{S} – единичные перпендикуляры к плоскостям $E_0 E'_0$ и EE' , соответственно; \vec{N}_0 и \vec{N} – единичные перпендикуляры к плоскостям $A_0 A'_0$ и AA' , соответственно. Углы перемещения плоскости экватора по неподвижной эклиптике: θ и $\psi = \gamma_0 \gamma$. Вращение плоскостей с целью вывода зависимостей показано против часовой стрелки при изменении времени от прошлого в будущее.

Поэтому, в случае, когда начальные значения $\dot{\theta}_0$ и $\dot{\psi}_0$ не соответствуют реальным условиям взаимодействий, вторые производные будут большими, что приведет к большим амплитудам суточных колебаний. Полагается что, в течение предшествующей эволюции вращательного движения Земли установились такие условия взаимодействия, при которых суточные амплитуды являются минимальными. Поэтому проводя последовательное интегрирование на выбранном интервале времени производится уточнение значений $\dot{\theta}_0$ и $\dot{\psi}_0$ из условия стремления суточных амплитуд углов ψ , θ , или суточных амплитуд их производных $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$ к нулю. Таким образом, за 9 итераций величина $\dot{\theta}_0$ была уточнена по 3-й знак, а $\dot{\psi}_0$ – по 4-й знак. При этом амплитуды колебаний углов и производных уменьшились на два-три порядка.

На третьей стадии уточняются углы ψ_0 и θ_0 . Как уже отмечалось, на первой стадии определялись углы ψ_0 и θ_0 по астрономическим элементам, которые не содержат вышеупомянутых коротких колебаний, но содержат линейный тренд по времени, отражающий долгопериодические колебания. В полученных решениях также имеется

этот тренд, но идет он с начальной точки θ_0 . В действительности, тренд осредненных данных наблюдения должен идти по средней линии колебаний. Поэтому значение угла θ_0 уточняется по совпадению рассчитанных и наблюдаемых начал трендов угла ε между подвижными плоскостями экватора и орбиты. С этой целью уравнения (4) - (5) интегрировались на интервале 100 лет.

Угол прецессии ψ_0 уточнялся другим образом. В используемой системе отсчета на эпоху JD_S отсчет углов, в том числе угла прецессии ψ , производится от восходящего узла γ_0 , т.е. в момент JD_S угол ψ должен быть равен нулю. По этому условию было уточнено значение ψ_0 на начало интегрирования JD_0 . Такое уточнение имеет недостаток в том, что фаза рассчитанных короткопериодических колебаний может отличаться от фазы наблюдаемых колебаний. В данных исследованиях по эволюции вращательного движения Земли за миллионы лет это не имеет значение, поэтому мы ограничились этими тремя стадиями определения начальных условий. Они приведены в табл. 1.

Таблица 1. Уточненные начальные условия на эпоху JD_0 в системе неподвижной эклиптики на эпоху 2000.0 г.: углы – в радианах, угловые скорости – в рад/столетие.

| ψ | θ | $\dot{\psi}$ | $\dot{\theta}$ |
|-------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 0.012255883726341 | 0.409046452218535 | $-2.545885550373 \cdot 10^{-2}$ | $-4.6315231174 \cdot 10^{-3}$ |

Первоначально уравнения (4) - (5) с неуточненными начальными условиями интегрировались за разные интервалы времени, включая ± 200 тыс. лет. Долгопериодические изменения этих решений такие же, как и при уточненных НУ. Однако в первоначальной программе интегрирования DfEqAll.for суточные амплитуды увеличивались со временем. Для решения задачи за миллионы лет было введено второе уточнение. Третье уточнение потребовалось при сравнении результатов решений за 100 лет с данными наблюдений.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕГРИРОВАНИЯ УРАВНЕНИЙ (4) – (5)

На рис. 5 представлены результаты численного интегрирования уравнений (4) – (5) на шести интервалах времени I от 0.1 года до 10 тыс. лет. Учитывается воздействие планет, Луны и Солнца на вращение Земли. На графиках буквой I указан интервал времени в годах, а буквами θ_{ai} и ψ_{ai} – амплитуды колебаний с номером i . На интервале 0.1 года угол прецессии ψ , начиная с начального значения, ψ_0 уменьшается, совершая суточные колебания с периодом $P_I = 0.99727$ дня и амплитудой $\psi_{a1} = 7.28 \cdot 10^{-10}$ рад. = 0.15 mas, где 1 mas = 10^{-3} угловых секунд. Эти колебания едва заметны на графике. Более заметны два периода полумесячных колебаний.

Угол наклона θ на рис. 5 представлен в виде разности $\Delta\theta = \theta - \theta_0$. На интервале 0.1 года суточные колебания видны более отчетливо. Их амплитуда $\theta_{a1} = 3.01 \cdot 10^{-10}$ рад = 0.062 mas. Здесь также более выразительно проявляются полумесячные колебания. Следует отметить, что эти графики с целью представления суточных колебаний построены по начальным условиям, при которых их амплитуда увеличена на два порядка.

На интервале 1 год угол ψ продолжает уменьшаться с полумесячными колебаниями периодом $P_2 = 13.66$ дня и амплитудой $\psi_{a2} = 9.37 \cdot 10^{-7}$ рад. = 193 mas. Кроме того, на графике видны два периода полугодовых колебаний угла ψ . Аналогично, на графике $\Delta\theta$ видны полумесячные колебания со средней амплитудой $\theta_{a2} = 3.93 \cdot 10^{-7}$ рад = 81.0 mas, а также два периода полугодовых колебаний.

На интервале 10 лет продолжается уменьшение угла ψ . На этом интервале имеется 20 периодов полугодовых колебаний с периодом $P_3 = 182.6282$ дня. Их средняя амплитуда $\psi_{a3} = 6.64 \cdot 10^{-6}$ рад. = 1.37". Характер изменения ψ отличается от линейного, потому что начинается формирование колебаний с большим периодом. В изменении угла θ на графике $\Delta\theta$ также видно формирование колебания с большим периодом. А средняя амплитуда полугодовых колебаний $\theta_{a3} = 2.67 \cdot 10^{-6}$ рад = 551 mas.

На графиках полумесячных и полугодовых колебаний видно, что амплитуды соседних колебаний отличаются. Амплитуда больше в том колебании, во время которого Луна находится в перигее – для полумесячных, и Земля находится в перигелии – для полугодовых. Очередность больших и меньших амплитуд и их разница во времени изменяется. Это обусловлено движениями перигея и перигелия.

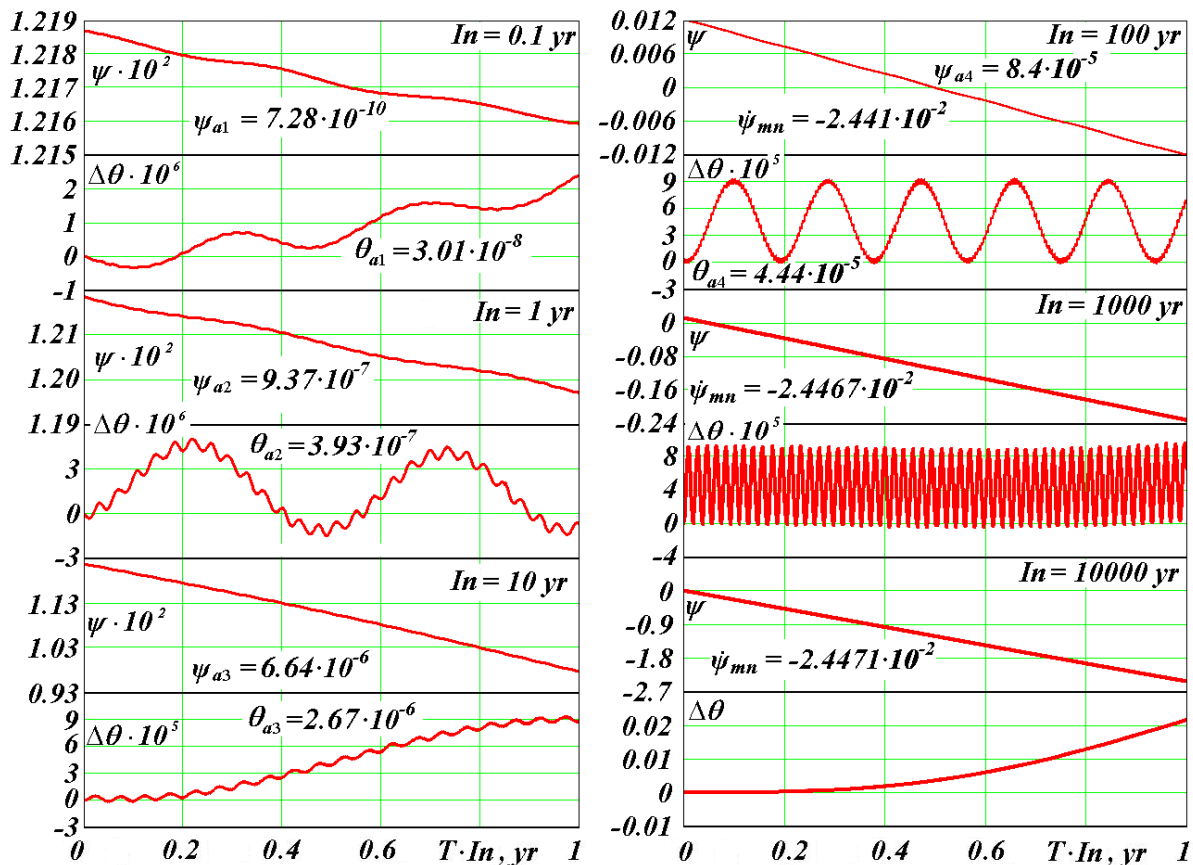


Рис. 5. Динамика углов прецессии ψ и наклона θ (в радианах) оси вращения Земли на 6 интервалах In времени в годах (yr). $\Delta\theta = \theta - \theta_0$, где θ_0 – угол наклона оси при $T = 0$. Периоды колебаний: $P_1 = 1$ день; $P_2 = 0.5$ месяца; $P_3 = 0.5$ года; $P_4 = 18.6$ лет. $\dot{\psi}_{mn}$ – средняя на интервале In скорость прецессии (радиан/столетие).

На интервале 100 лет средняя амплитуда колебаний угла прецессии $\psi_{a4} = 8.4 \cdot 10^{-5}$ рад. = 17.4", а средняя скорость прецессии $\dot{\psi}_{mn} = -2.441 \cdot 10^2$ рад/ст. Период этих

колебаний $P_4 = 18.6$ лет обусловлен прецессией орбиты Луны. Амплитуда колебаний угла θ с этим периодом $\theta_{a4} = 4.44 \cdot 10^{-5}$ рад. = $9.2''$.

На интервалах 1000 лет и 10 тыс. лет продолжают колебания с периодом $P_4 = 18.6$ лет. Средняя скорость прецессии на интервалах равна $-2.438 \cdot 10^{-2}$ и $2.425 \cdot 10^{-2}$ рад/ст, соответственно. На графике $\Delta\theta$ за 10 тыс. лет видно начало нового колебания с периодом больше 10 тыс. лет.

Итак, на исследованном интервале времени 10 тыс. лет проявляются колебания углов ψ и θ с суточными, полумесячными, полугодовыми периодами и периодом 18.6 года. Амплитуды колебаний увеличиваются с увеличением периодов. При этом амплитуда колебаний угла ψ в 2-3 раза больше амплитуды колебаний угла θ . Ранее, наличие этих периодов физически обосновано на основе теоремы моментов (2). Амплитуды периодов согласуются с амплитудами в работах других исследователей, например [19]. Амплитуда $\theta_{a4} = 9.2''$ периода 18.6 лет доступна для измерения. Она зафиксирована в астрономии и называется постоянной нутации [15]. Из-за наличия колебаний средняя скорость прецессии $\dot{\psi}_m$ изменяется с изменением периода осреднения. На интервале 100 лет ее величина $\dot{\psi}_m = -2.441 \cdot 10^{-2}$ рад/ст также совпадает с наблюдаемой величиной согласно [23] равной $-2.442 \cdot 10^{-2}$ рад/ст. и [25] – $-2.439 \cdot 10^{-2}$ рад/ст. (см. табл. 1п в Приложении).

Как отмечалось ранее, в прежней Астрономической теории изменения климата использовались решения уравнений Пуассона, которые идентичны уравнениям (7)-(8). Последние являются упрощением дифференциальных уравнений вращения Земли (4)-(5) за счет пренебрежения вторых производных и произведений первых производных. Поэтому в этих решениях колебаний с периодами $P_1 - P_4$ не получают. Это обстоятельство ставит под сомнение и долгие периоды в прежней Астрономической теории изменения климата.

На рис. 5 рассматривались результаты решения задачи (4)-(5) при изменении времени в будущее. На рис. 6 они представлены за 1 миллион лет назад (м.л.н.). Угол прецессии ψ колебательно возрастает в прошлое со средней за 1 млн. лет скоростью $\dot{\psi}_m = -0.024417015$ рад/ст.

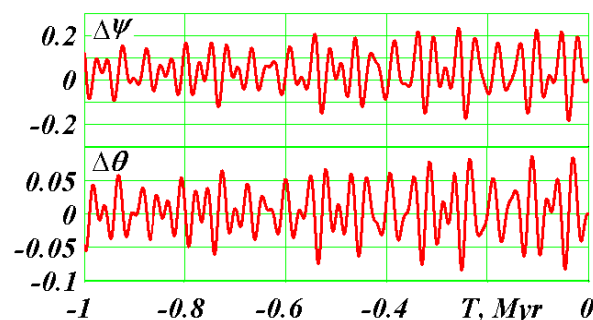


Рис. 6. Эволюция вращательного движения Земли за 1 м.л.н. Разности углов прецессии $\Delta\psi$ и наклона $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ даны в радианах.

Знак “-“ означает, что ось вращения Земли \vec{N} (рис. 4) относительно оси \vec{S}_0 пресессирует за часовой стрелкой. Средний период этой прецессии или вращения $P_{pr} =$

$2\pi/\dot{\psi}_m = -25738$ лет. Поэтому осредненное изменение угла прецессии происходит по линейному закону

$$\psi_a = \psi_0 + \dot{\psi}_m \cdot T. \quad (11)$$

В дальнейшем будем упоминать это округленное значение периода прецессии $P_{pr} = -25.74$ тыс. лет.

На рис. 6 показана эволюция разности угла прецессии $\Delta\psi = \psi - \psi_a$. За 1 млн. лет колебания $\Delta\psi$ происходят в диапазоне от -0.184 до 0.233 рад., т.е. размах колебаний равен 0.417 радиан. Величина $\Delta\theta$ колеблется подобно $\Delta\psi$, но в меньшем диапазоне: от -0.0845 до 0.0855 рад., т.е. размах колебаний равен 0.17 радиан. Таким образом, максимальная амплитуда колебаний угла θ в 2.45 раз меньше максимальной амплитуды колебаний угла ψ . Кроме того, колебания $\Delta\theta$ не совпадают по фазе с колебаниями $\Delta\psi$, они сдвинуты по оси времени T на -7.5 тыс. лет.

Как было показано на рис. 5, продолжительность долгих периодов колебаний превышает 10 тыс. лет. Вклад Луны в колебания оси Земли завершился периодом 18.6 лет. Вклад планет, как показано в работах [14, 26], имеет малую величину по сравнению с вкладом Луны и Солнца. Поэтому периоды колебаний углов ψ и θ на интервале 1 млн. лет обусловлены: 1) прецессией самой оси Земли с периодом 25.7 тыс. лет, 2) периодом прецессии орбиты Земли относительно подвижного экватора, 3) периодами изменения эксцентриситета орбиты Земли и 4) периодом вращения ее перигелия относительно подвижного экватора. Влияние этих четырех факторов приводит к нерегулярному характеру колебаний ψ и θ на рис. 6. Одним из ведущих периодов колебаний на этих графиках является период 25.74 тыс. лет, обусловленный прецессией оси Земли.

6. ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОДВИЖНОЙ ОРБИТЫ ЗЕМЛИ

Эволюция вращательного движения Земли представляет интерес по отношению к эволюции ее орбитального движения. Например, освещенность Земли Солнцем зависит от этого отношения. В результате интегрирования уравнений (4)-(5) получены угол прецессии ψ и угол наклона θ плоскости экватора AA' (рис. 4) относительно неподвижной плоскости орбиты или эклиптики E_0E_0' . Подвижная плоскость орбиты EE' координируется углами наклона i_E и положения восходящего узла φ_Ω относительно неподвижной плоскости экватора A_0A_0' . Проекция перигелия орбиты Земли на небесной сфере обозначена буквой B , а его положение относительно неподвижного экватора A_0A_0' определено углом $\varphi_p = \gamma_2 B$. Эволюция углов i_E , φ_Ω и φ_p определена в результате решения орбитальной задачи за 100 млн. лет [4, 30]. Необходимо определить эволюцию угла наклона ε между подвижными плоскостями экватора Земли AA' и орбиты EE' , а также эволюцию угла перигелия φ_{pr} , отсчитываемого от подвижного узла γ .

При рассмотрении этой проблемы за большие интервалы времени возникают множественные неоднозначные ситуации. Поэтому переход от неподвижных координат к подвижным был выполнен двумя способами: в сферических и декартовых координатах. В сферических координатах рассматривались углы между вышеупомянутыми плоскостями. А в декартовых координатах рассматривались углы

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

между осями плоскостей экватора \vec{N} и орбиты \vec{S} . На рис. 4 они показаны в момент T , а в момент T_0 соответственно обозначены: \vec{N}_0 и \vec{S}_0 . Эти оси являются единичными векторами, перпендикулярными к соответствующим плоскостям. Вывод выражений для ε и φ_{py} представлен в Приложении 2.

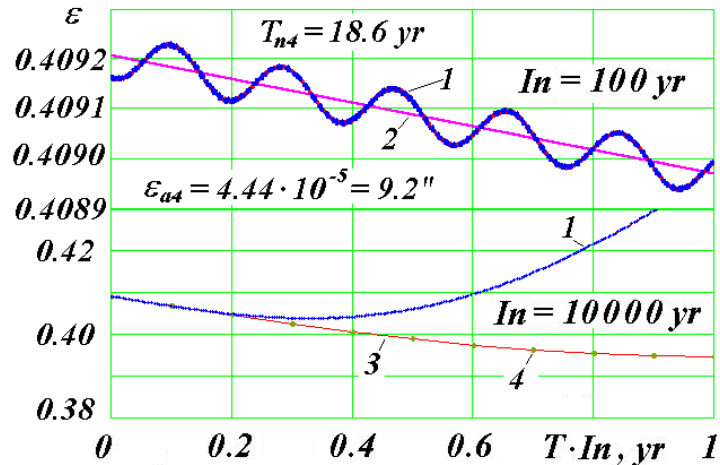


Рис. 7. Динамика угла наклона ε (в радианах) плоскости экватора Земли к плоскости ее орбиты на двух интервалах In времени: yr – год; T_{n4} и ε_{a4} – период и амплитуда колебаний угла наклона ε ; 1 – по нашим результатам численного интегрирования; 2 – аппроксимация данных наблюдений по [15, 23]; 3 – по результатам интегрирования Laskar et al. [21]; 4 – по результатам интегрирования Ш. Г. Шараф и Н. А. Будниковой [18].

На рис. 7 показано изменения угла наклона ε между подвижными плоскостями экватора и орбиты Земли на двух интервалах времени In за 100 лет и 10 тыс. лет. Колебания угла наклона ε на меньших интервалах времени идентично колебаниям угла θ на рис. 5.

На интервале $In = 100$ лет видно, что рассчитанный 1 угол наклона ε колеблется вокруг наблюдаемого среднего угла наклона 2 согласно работам [15, 23]. Амплитуда колебаний $\varepsilon_{a4} = 9.2''$ периода $T_{n4} = 18.6$ лет, как уже отмечалось, также совпадает с наблюдениями. Рассчитанный угол прецессии ψ также колеблется относительно осредненного угла прецессии по наблюдениям, а средняя динамика ψ также совпадает с наблюдениями.

Как видно из рис. 7, на интервале $In = 10$ тыс. лет такое совпадение с аппроксимацией данных наблюдения и результатами решений других авторов [18, 21] имеется до 2000 лет. Далее рассчитанный нами угол наклона ε начинает отличаться от результатов их решений.

На рис. 8 на интервале 200 тыс. лет показано, что со временем отличия нарастают, и дальнейшая эволюция рассчитанного нами угла наклона ε значительно отличается от эволюции, полученной другими авторами, которые решали упрощенную задачу (7) – (8) о вращении Земли. Как видно из графиков, колебания угла ε по нашим решениям происходят в диапазоне от 16.7° до 31° , в то время как по прежним решениям от 22.26° до 24.32° , т. е. диапазон колебаний больше в 7 раз.

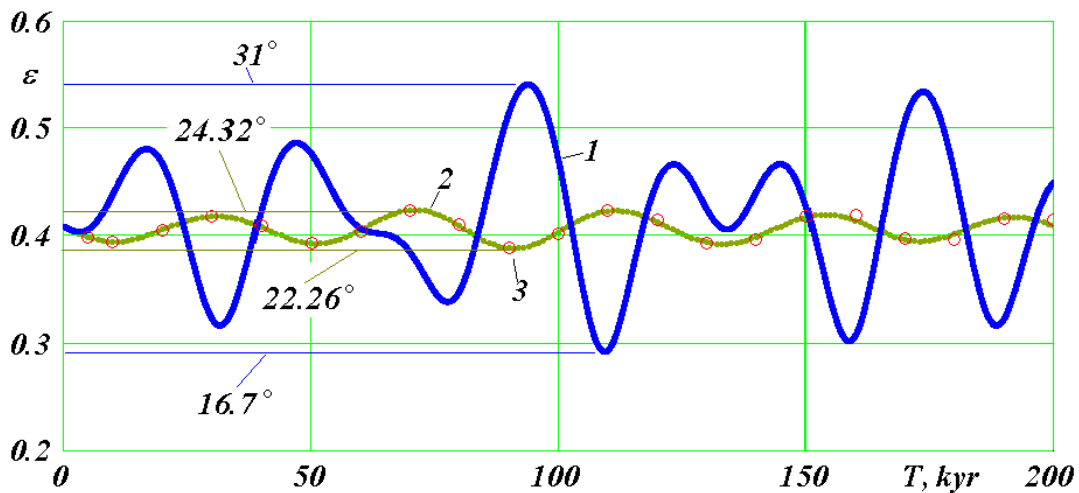


Рис. 8. Эволюция угла наклона ε (в радианах) плоскости экватора Земли к плоскости ее орбиты на интервале 200 тыс. лет: 1 – по нашим результатам численного интегрирования; 2 – по результатам интегрирования Laskar et al. [21]; 3 – по результатам интегрирования Ш.Г. Шараф и Н.А. Будниковой [18]. В градусах приведены максимальные и минимальные значения угла ε .

7. ЭВОЛЮЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ ЗА МИЛЛИОНЫ ЛЕТ

7.1. Эволюция углов наклона и перигелия за 5 м.л.н. На рис. 9 приведена эволюция углов ε и φ_{py} за 5 м.л.н. Колебания угла наклона ε происходят нерегулярно и с разными амплитудами. Основной период колебания, средний за 5 млн. лет, $T_{cm} = 25.73$ тыс. лет. Он равен периоду прецессии оси Земли. Период колебаний в конкретную эпоху может отличаться от среднего периода на тысячу лет. Могут быть и более существенные отличия. Например, в эпоху 4.6 м.л.н. один минимум ε вырождается, и за три интервала T_{cm} происходит два колебания, т.е. период колебаний становится равный 38.6 тыс. лет. Амплитуда колебаний переменная и изменяется от нулевой до максимальной, равной 9° . В среднем амплитуда равна 2.74° , а среднее значение угла наклона ε равно 23.8° при современном его значении – 23.44° .

На интервале 5 млн. лет нет повторяющихся участков изменения угла наклона ε . Распределение больших амплитуд колебаний также нерегулярно. Имеются два участка с очень большими амплитудами: $0 \div 0.25$ м.л.н. и $2.2 \div 2.8$ м.л.н. Имеются участки с очень малыми амплитудами колебаний, например, в эпохи $T \approx 3.3$ м.л.н. и $T \approx 4.2$ м.л.н. Самые большие значения ε приведены на рис. 9 в градусах: 32.68° в эпоху $T = 2.6582$ м.л.н. и 14.68° в эпоху $T = 0.2508$ м.л.н. Таким образом, наибольшая амплитуда колебаний оси Земли за 5 м.л.н. составляет $\varepsilon_{amx} = 9^\circ$.

Как видно из рис. 9, угол перигелия φ_{py} изменяется от 1.776 радиан в эпоху 30.12.1949 г. до -1445.7 радиан в эпоху 5 м.л.н. Это изменение свидетельствует о вращении перигелия против часовой стрелки при изменении времени в будущее, т.е. в направлении орбитального движения Земли. На рис. 9 приведены также текущие периоды T_{pyt} вращения на интервалах в 20 тыс. лет. Как видно, периоды вращения неравномерные, они изменяются от 13.8 до 41.8 тыс. лет. В среднем эти изменения происходят в пределах от 19 до 25 тыс. лет. А средний за 5 млн. лет период вращения

перигелия $T_{pym} = 21.7$ тыс. лет. Следует напомнить, что это период вращения перигелия относительно подвижной линии пересечения плоскостей экватора и орбиты Земли. Средний период вращения перигелия за 5 м.л.н. относительно неподвижного пространства $T_p = 138.5$ тыс. лет.

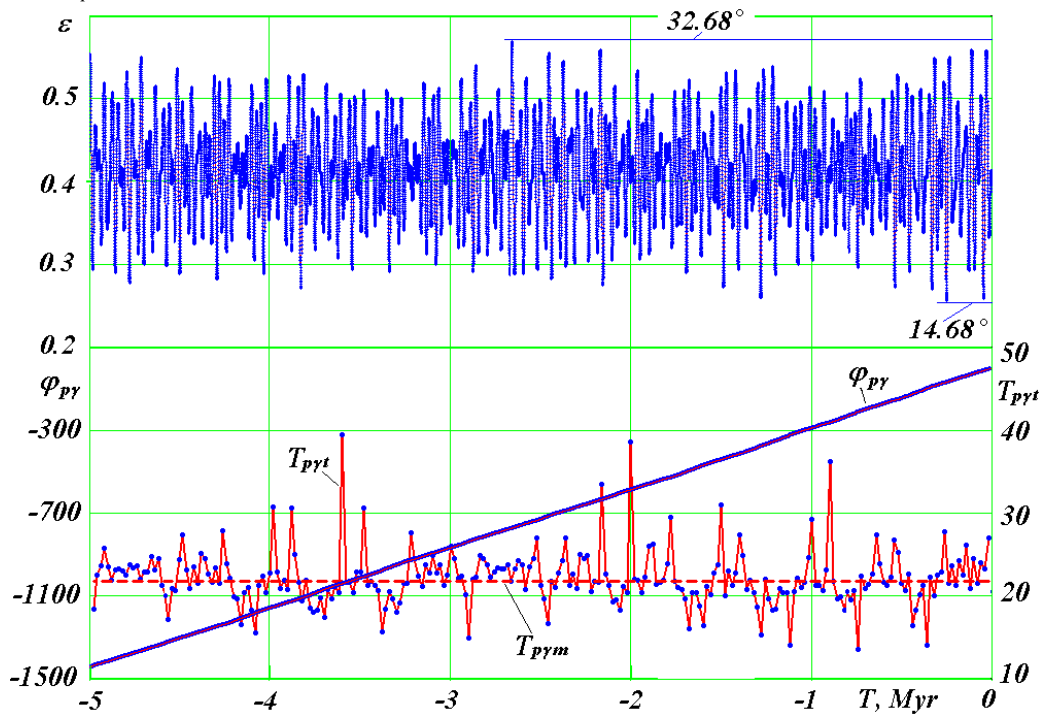


Рис. 9. Эволюция угла наклона ε и угла положения перигелия φ_{pyr} за 5 м.л.н.: T_{pyt} – текущий период вращения перигелия за 20-тыс. интервалы времени, в тысячелетиях; $T_{pym} = 21.7$ тыс. лет – средний период вращения перигелия.

7.2. Эволюция угла наклона за 20 м.л.н. На рис.10 линией 1 представлена эволюция угла наклона ε за 20 м.л.н. в виде десяти 2-х миллионных интервалов времени. Левый предел каждого интервала времени обозначен как T_l , который для верхнего графика за 2 м.л.н. записан в виде $T_l = -2$. Поэтому внизу шкала оси времени T начинается с T_l . Линией 2 на графиках, для сравнения, на примере работы [21] приведено изменение угла наклона ε по прежней теории эволюции оси Земли.

Чтобы выполнить статистический анализ этих результатов, введены градации угла ε . Весь диапазон колебаний от ε_{max} до ε_{min} разбит на 6 уровней с интервалом

$$\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})/6. \quad (12)$$

Среднее значение колебаний ε равно

$$\varepsilon_{mo} = 0.5 (\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}). \quad (13)$$

А границы первого и второго уровня больших углов наклона будут

$$\varepsilon_{t1} = \varepsilon_{mo} + \Delta\varepsilon; \quad \varepsilon_{t2} = \varepsilon_{mo} + 2 \cdot \Delta\varepsilon. \quad (14)$$

Границы первого и второго уровня малых углов наклона запишутся

$$\varepsilon_{c1} = \varepsilon_{mo} - \Delta\varepsilon; \quad \varepsilon_{c2} = \varepsilon_{mo} - 2 \cdot \Delta\varepsilon. \quad (15)$$

Большие значения для угла наклона ε соответствуют потеплениям на широтах $\varphi > 45^\circ$, а малые – похолоданиям [12, 13, 29]. Согласно этим соответствиям введены индексы границ: t – теплый, c – холодный.

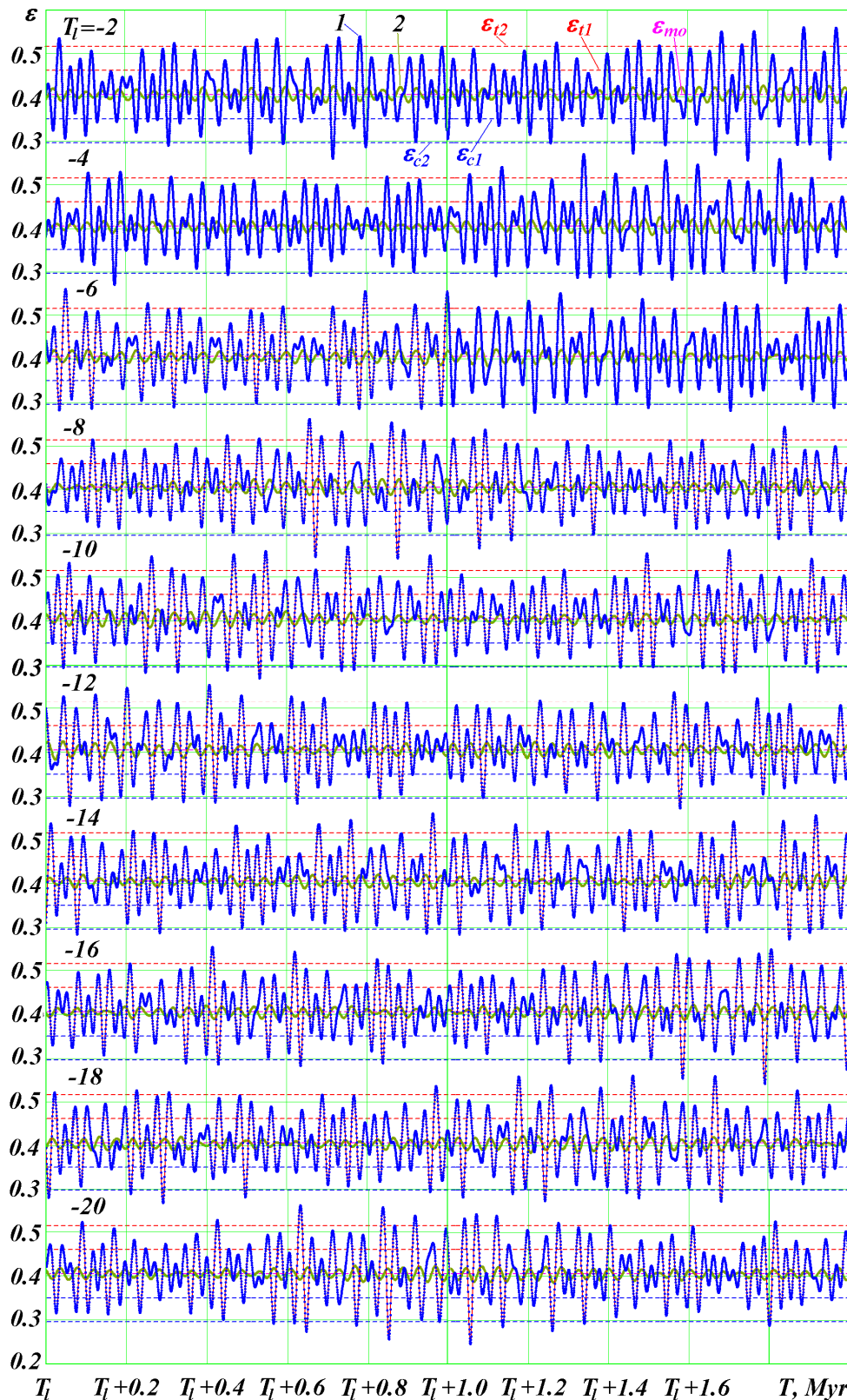


Рис. 10. Эволюция угла наклона ε за 20 м.л.н. в виде 10 графиков по 2 миллиона лет: линией 1 по нашим решениям и линией 2 по прежним решениям на примере работы [21]; T_1 – левый отсчет оси времени в млн. лет, приведенный в левом углу каждого графика; ε_{t1} , ε_{t2} и ε_{c1} , ε_{c2} – первая и вторая границы больших (t) и малых (c) уровней угла наклона, соответственно; ε_{mo} – среднее значение колебаний угла ε ; интервал между точками на графиках равен 200 лет на промежутке 0 – 5 м.л.н. и 500 лет после 5 м.л.н.

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

За 20 м.л.н. самое большое значение угла $\varepsilon_{max} = 0.57038 = 32.68^\circ$ было 2.6582 м.л.н, а самое малое $\varepsilon_{min} = 0.24255 = 13.897^\circ$ было 14.208 м.л.н.

Среднее значение ε_{mo} и границы ε_{t1} , ε_{t2} , ε_{c1} и ε_{c2} нанесены на графиках рис. 10. Рассмотрим распределение количеств самых высоких уровней наклона ε , больших ε_{t2} и самых низких уровней, меньших ε_{c2} на интервалах времени в 1 миллион лет. Высокие уровни наклона соответствуют сильным потеплениям в высоких широтах, а низкие – сильным похолоданиям.

Как видно из рис. 10, за первый миллион $T = -1$ Муг = 1 м.л.н. было 6 периодов с углом наклона $\varepsilon > \varepsilon_{t2}$ и 7 периодов с $\varepsilon < \varepsilon_{c2}$. Углы ε по разному превышают вторые уровни, поэтому эти периоды имеют разную интенсивность и разную длительность. Пренебрегая этим отличием, классифицируем эволюцию ε на миллионных интервалах по количеству превышений угла ε границ ε_{t2} и ε_{c2} (табл. 2).

Как видно из табл. 2, всего было 172 случая превышений вторых уровней. Из них было 90 случаев превышений очень больших углов наклона и 82 случая очень малых. Таким образом, в среднем за 1 миллион лет происходит 8.6 превышений вторых границ. При этом периодов с очень большими углами ε в среднем имеется 4.5, а с очень малыми – 4.1.

Таблица 2. Количество случаев, когда угол наклона ε превышает границы ε_{t2} и ε_{c2} , на миллионных интервалах времени: T_l – левая граница отсчета времени в м.л.н.; $\varepsilon_{t2} + \varepsilon_{c2}$ – сумма превышений границ ε_{t2} и ε_{c2} .

| T_l | ε_{t2} | ε_{c2} | $\varepsilon_{t2} + \varepsilon_{c2}$ | T_l | ε_{t2} | ε_{c2} | $\varepsilon_{t2} + \varepsilon_{c2}$ | T_l | ε_{t2} | ε_{c2} | $\varepsilon_{t2} + \varepsilon_{c2}$ |
|--------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|-------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|-------|--------------------|--------------------|---------------------------------------|
| 1 | 6 | 7 | 13 | 8 | 5 | 2 | 7 | 15 | 5 | 4 | 9 |
| 2 | 6 | 5 | 11 | 9 | 3 | 3 | 6 | 16 | 3 | 4 | 7 |
| 3 | 7 | 6 | 13 | 10 | 6 | 6 | 12 | 17 | 6 | 6 | 12 |
| 4 | 2 | 3 | 5 | 11 | 2 | 1 | 3 | 18 | 2 | 4 | 6 |
| 5 | 6 | 5 | 11 | 12 | 7 | 5 | 12 | 19 | 4 | 4 | 8 |
| 6 | 5 | 5 | 10 | 13 | 4 | 3 | 7 | 20 | 4 | 3 | 7 |
| 7 | 2 | 3 | 5 | 14 | 5 | 3 | 8 | | | | |
| Всего: | | | | | | | | | 90 | 82 | 172 |

Распределим миллионные интервалы на три режима эволюции вращательного движения Земли: обычного, беспокойного и спокойного. С учетом среднего числа превышений, равного 8.6, к обычному режиму эволюции ε отнесем миллионные интервалы с числом превышений $\varepsilon_{t2} + \varepsilon_{c2}$ от 7 до 10.

Как видно из табл. 2, их было 8. При обычном режиме эволюции ε , см. например, рис. 10, интервал с $T_l = 19$ м.л.н., происходит по 4 периода с очень большими углами наклона и с 4 очень малыми. Или может быть по 5 таких превышений, как в интервале с $T_l = 6$ м.л.н. В других миллионных интервалах количество очень больших или очень малых углов может отличаться на 1. Только на интервале с $T_l = 8$ м.л.н. было 5 периодов с очень большими ε и только 2 периода с очень малыми.

К беспокойному режиму эволюции угла ε отнесем интервалы с числом всех превышений 11 и больше. Как видно из табл. 2, их было 7. При беспокойном режиме эволюции, см. например, интервалы с $T_l = 3$ м.л.н. и 12 м.л.н. происходит по 7 периодов

очень больших углов ε . В другие миллионные интервалы, как например с $T_l = 1$ м.л.н. было 7 периодов с очень малыми углами наклона. Последний миллионный интервал ($T_l = 1$ м.л.н.), в котором мы живем, относится к беспокойному режиму эволюции угла ε : здесь было одно из самых наибольших количеств суммарных превышений, а именно 13.

К спокойному режиму эволюции ε относятся интервалы с числом всех превышений 6 и меньше. Таких интервалов было 5. В двух из этих интервалов ($T_l = 4$ и 7 м.л.н.) имеются 2 периода с большими углами наклона и 3 – с малыми. Самый спокойный режим эволюции был в миллионный интервал с $T_l = 11$ м.л.н. Здесь было всего 3 периода с превышением границ ε_{c2} и ε_{l2} .

На эволюцию инсоляции Земли кроме угла наклона ε влияют угол перигелия φ_{pp} и эксцентриситет орбиты e . Поэтому периоды с наибольшими углами наклона не всегда совпадают с периодами наибольшей инсоляции в высоких широтах [12, 13, 29]. То же относится к наименьшим углам наклона ε и наименьшей инсоляции. Но в целом приведенная статистика режимов эволюции ε и трех групп климата беспокойного, обычного и спокойного совпадает [12, 13, 29].

Представленные на рис. 10 результаты и их анализ показывают, что на интервале 20 м.л.н. происходят стабильные колебания угла наклона ε . Проявившиеся за первые 50 тыс. лет пределы колебаний угла ε от 14.8° до 32.1° [12, 13] практически остаются неизменными в течение 20 м.л.н.

Экстремальные углы наклона происходят в нерегулярном порядке. Такой нерегулярный порядок наступления событий обычно называют хаотическим. Однако, в данном случае, эти события строго детерминированы и происходят в результате влияния многих факторов, определяющих орбитальное движение тел Солнечной системы и вращательное движение Земли. Поэтому рассматриваемый пример является тем случаем, когда воспринимаемые нами хаотически происходящие обстоятельства оказываются обусловленными строго детерминированными причинами. В данном случае, этими детерминированными причинами являются: 1) гравитационное воздействие планет, Солнца и Луны на орбитальное движение Земли, 2) воздействие этих тел на вращательное движение Земли и 3) изменение вращательного движения относительно орбитального.

Рассмотренные выше изменения углов ε и φ_{pp} , а также эксцентриситета орбиты e представлены на сайте <http://www.ikz.ru/~smulski/Data/Insol/> в файле OrAl0-5My.prn за 5 м.л.н., в файле OrAl-5-10My.prn на интервале 6 м.л.н. – 10 м.л.н. и в файле OrAl-11-20My.prn на интервале 11 м.л.н. – 20.369 м.л.н. Выполнить анализ этих данных и построить графики можно с помощью программы Insl2bd.mcd, которая имеется на этом сайте.

8. ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ

8.1. Прецессия оси Земли относительно неподвижного пространства.

Представленные изменения параметров вращательного движения ε и ψ позволяют рассмотреть эволюцию самой оси \vec{N} вращения Земли (рис. 11). Такая эволюция оси \vec{S} орбиты Земли была ранее нами рассмотрена [4, 8]. Было показано, что ось орбиты \vec{S}

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

прецессирует по часовой стрелке вокруг вектора момента \vec{M} , который является моментом количества движения всей Солнечной системы. В барицентрической экваториальной системе координат xuz плоскость, перпендикулярная \vec{M} , имеет координаты $\varphi_M = 0.0680946$ и $i_M = 0.401834$, где φ_M – угол восходящего угла этой плоскости, а i_M – ее угол наклона к плоскости экватора 2. С помощью проекций S_x, S_y и S_z , согласно (40п) - (42п) (Приложение 2), и этих углов определяются проекции оси орбиты Земли S_{xM}, S_{yM} и S_{zM} в системе координат, связанной с вектором \vec{M} .

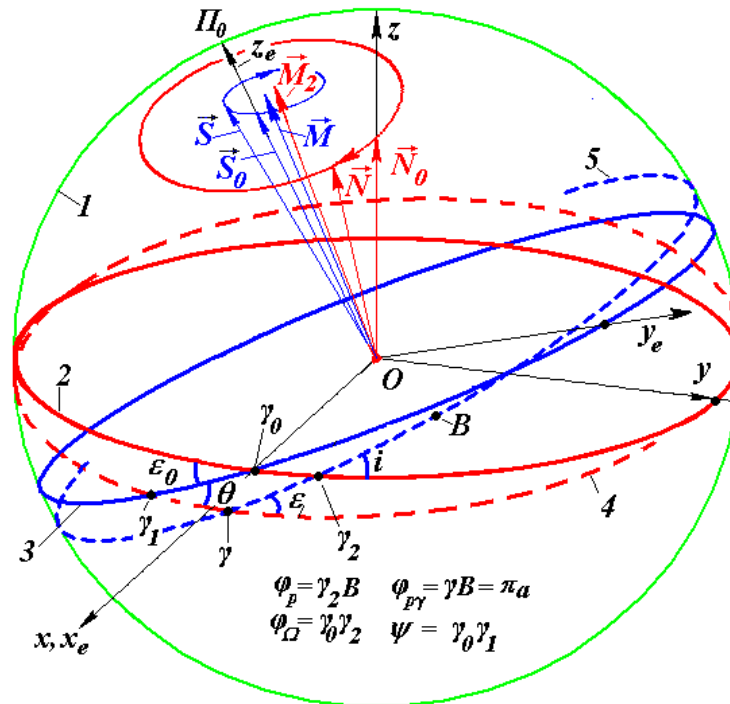


Рис. 11. Параметры орбиты и оси Земли в неподвижных экваториальной $x_e y_e z_e$ и эклиптической $x y z$ системах координат: 1 – небесная сфера; плоскости в эпоху T_0 : 2 – экватора Земли, 3 – орбиты Земли; плоскости в эпоху T : 4 – экватора Земли, 5 – орбиты Земли; единичные вектора: \vec{N} – оси Земли, \vec{S} – оси орбиты Земли, \vec{M} – момента количества движения Солнечной системы; γ_0 – точка весеннего равноденствия в эпоху T_0 ; B – положение перигелия на небесной сфере в эпоху T_0 ; $\varphi_{\Omega} = \gamma_0 \gamma_2$ – угол восходящего узла орбиты; $\varphi_p = \gamma_2 B$ – угол перигелия; i – угол наклона орбиты.

На рис. 12,а показана прецессия оси орбиты \vec{S} за 5 млн. лет вокруг вектора момента \vec{M} . Движение оси \vec{S} как за 5 млн. лет, так и за 100 млн. лет [4] проходит, в основном, в области с расстоянием 0.045 от вектора \vec{M} , которое соответствует углу 2.578° между \vec{S} и \vec{M} . Только в одном цикле прецессии имеется наибольшее отклонение оси \vec{S} от вектора \vec{M} , с расстоянием большим 0.05. Максимальное отклонение 0.0510672 оси \vec{S} от \vec{M} происходит в т. 2_5 в эпоху $T = -2.326$ кур, на угол 2.926° .

Система координат $x_{МУМ}z_M$, связанная с вектором \vec{M} момента количества движения Солнечной системы, является инерциальной системой, в которой

прецессируют оси орбит всех планет и Солнца [4, 8]. Возникает вопрос, будут ли прецессировать вокруг вектора \vec{M} оси вращения планет?

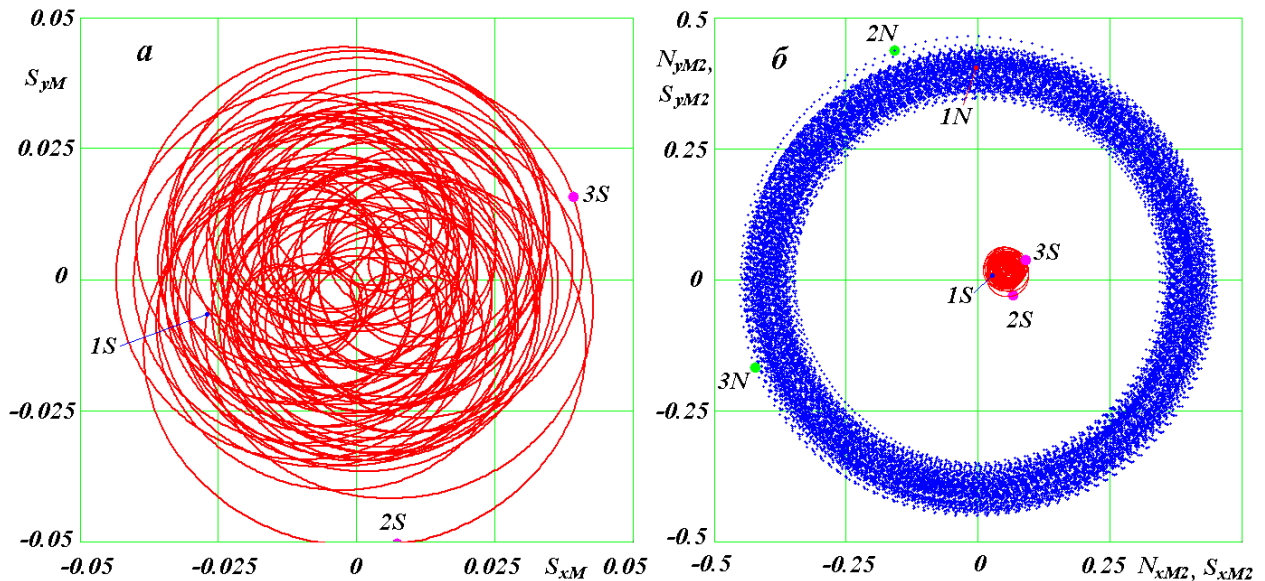


Рис. 12. Проекции траекторий прецессии осей орбиты Земли \vec{S} (а) и ее оси вращения \vec{N} (б) за 5 м.л.н. на плоскости, перпендикулярные векторам \vec{M} и \vec{M}_2 , соответственно: положения осей в моменты времени и углы между ними: 1_S и $1_N - T = 0$ kyr, $\varepsilon = 23.443^\circ$; 2_S и $2_N - T = -0.2326$ Myr, $\varepsilon = 30.778^\circ$; 3_S и $3_N - T = -2.6582$ Myr, $\varepsilon = 32.680^\circ$.

С этой целью аналогичным образом было изучено движение оси \vec{N} вращения Земли. В результате исследований было установлено, что прецессия \vec{N} происходит вокруг оси, смещенной относительно вектора момента \vec{M} . Для нахождения этой оси был использован следующий алгоритм. По проекциям N_{xe} , N_{ye} и N_{ze} оси \vec{N} в барицентрической эклиптической системе координат $x_e y_e z_e$, согласно (34п) - (36п) (Приложение 2), определены проекции оси Земли в экваториальной системе координат xuz

$$N_x = N_{xe}; \quad N_y = N_{ye} \cdot \cos \varepsilon_0 - N_{ze} \cdot \sin \varepsilon_0; \quad N_z = N_{ye} \cdot \sin \varepsilon_0 + N_{ze} \cdot \cos \varepsilon_0. \quad (16)$$

По проекциям (16) рассчитываются их средние значения N_{xm} , N_{ym} и N_{zm} , например, за 5 м.л.н. и модуль средней величины

$$N_m = \sqrt{N_{xm}^2 + N_{ym}^2 + N_{zm}^2}. \quad (17)$$

Будем считать, что единичный вектор \vec{M}_2 , вокруг которого проходит процессия оси Земли \vec{N} , совпадает со средним положением оси Земли N_m , т.е. имеет те же проекции N_{xm} , N_{ym} и N_{zm} в экваториальной системе координат xuz . Тогда плоскость, перпендикулярная вектору \vec{M}_2 , наклонена к плоскости экватора 2 (рис. 11) под углом:

$$i_{M2} = \arcsin \left((N_{xm}^2 + N_{ym}^2)^{0.5} / N_m \right), \quad (18)$$

а угол восходящего угла этой плоскости

$$\varphi_{M2} = \arcsin \left(N_{xm} / (N_{xm}^2 + N_{ym}^2)^{0.5} \right). \quad (19)$$

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

За 5 м.л.н. углы равны: $i_{M2} = 0.417728$ и $\varphi_{M2} = -0.0664662$. На рис. 11 прецессия оси вращения Земли \vec{N} показана вокруг неподвижного вектора \vec{M}_2 . Угол между неподвижными векторами \vec{M}_1 и \vec{M}_2 равен 3.201402° . С учетом углов (18) и (19) проекции оси вращения Земли на оси системы координат, связанной с вектором \vec{M}_2 будут:

$$N_{xM2} = N_x \cdot \cos\varphi_{M2} + N_y \cdot \sin\varphi_{M2}; \quad (20)$$

$$N_{yM2} = N_x \cdot \sin\varphi_{M2} \cdot \cos i_{M2} + N_y \cdot \cos\varphi_{M2} \cdot \cos i_{M2} + N_z \cdot \sin i_{M2}; \quad (21)$$

$$N_{zM2} = N_x \cdot \sin\varphi_{M2} \cdot \sin i_{M2} + N_y \cdot \cos\varphi_{M2} \cdot \sin i_{M2} + N_z \cdot \cos i_{M2}. \quad (22)$$

На рис. 12б показана прецессия оси Земли \vec{N} вокруг вектора \vec{M}_2 за 5 млн. лет. Точкой I_N отмечено положение оси в начальный момент времени, а точками 2_N и 3_N – в другие эпохи. Из графика видно, что, действительно, прецессия оси Земли осесимметрична относительно начала координат. В эту точку проектируется вершина вектора \vec{M}_2 . Ось Земли \vec{N} прецессирует по часовой стрелке при изменении времени в будущее. Прецессия происходит в пределах кольца со средним расстоянием от вектора \vec{M}_2 равным 0.4. Среднее отклонение оси \vec{N} от \vec{M}_2 составляет $\theta_{M2} = 23.614^\circ$, а максимальное – $\theta_{M2max} = 27.756^\circ$. Здесь угол между этими векторами определяется как

$$\theta_{M2} = \arccos N_{zM2}. \quad (23)$$

Итак, прецессия оси \vec{N} вращения Земли происходит во второй инерциальной системе, связанной с вектором \vec{M}_2 . Очевидно, что для каждой планеты этот вектор будет свой. Он определяется ее условиями образования, а также ее развитием, связанным с изменением массы.

На рис. 12б также показано движение оси орбиты Земли \vec{S} по отношению к вектору \vec{M}_2 . Точками I_S , 2_S и 3_S отмечены положения оси \vec{S} в соответствующие эпохи. Эпоха $T = -0.232$ Муг с наибольшим углом θ_{M2max} на 600 лет опережает эпоху $T = -0.2326$ Муг (т. 2_S на рис. 12б), в которой наибольшее отклонение оси орбиты \vec{S} . В эту эпоху (т. 2_N на рис. 12,б) угол $\theta_{M2} = 27.736^\circ$, т.е. очень близок к θ_{M2max} .

Итак, в точках 2_N и 2_S оси \vec{N} и \vec{S} находятся в одну и ту же эпоху $T = -0.2326$ Муг. Как видим, большое отклонение оси орбиты S вызвало большое отклонение оси Земли \vec{N} . Однако центр прецессии оси \vec{S} сдвинут в перпендикулярном направлении линии $2_N 2_S$ отклонения осей \vec{N} и \vec{S} . Поэтому угол ε между ними в эту эпоху равный 30.778° не является максимальным (рис. 10). Максимальный за 5 млн. лет угол ε равен 32.68° в эпоху $T = -2.6582$ Муг, когда оси \vec{N} и \vec{S} находятся в противоположных точках своих траекторий (т. 3_S и 3_N на рис. 12б).

8.2. Эволюция оси вращения Земли во второй инерциальной системе координат. В инерциальной системе, связанной с вектором \vec{M}_2 , для оси \vec{N} уже был введен угол наклона θ_{M2} в виде (23). Угол прецессии оси \vec{N} , отсчитываемый от оси x_{M2} , определяется так:

$$\psi_{M2} = \arcsin (N_{xM2} / (N_{xM2}^2 + N_{yM2}^2)^{0.5}), \quad (24),$$

где ось x_{M2} направлена по линии пересечения плоскости экватора и плоскости $x_{M2}O_{yM2}$.

На рис. 13 представлена эволюция углов θ_{M2} и $\Delta\psi_{M2}$ оси вращения Земли относительно неподвижного вектора \vec{M}_2 за 1 млн. лет. Угол наклона θ_{M2} за 5 млн. лет изменяется в пределах от 20.044° до 27.756° . Основной период колебаний равен $P_{\theta M2} = 41.1$ куг. Здесь же показана эволюция угла между осями \vec{N} и z_e , т.е. угла θ . Он изменяется в диапазоне от 18.594° до 28.677° . Таким образом, размах колебаний угла θ на 2.37° больше размаха колебаний θ_{M2} . Кроме того, у угла θ появились промежуточные колебания (рис. 13).

На рис. 13 представлена также эволюция угла наклона ε между подвижными осями Земли \vec{N} и ее орбиты \vec{S} . Он изменяется в диапазоне от 14.676° до 32.68° . Таким образом диапазон колебаний ε больше диапазона колебаний угла θ_{M2} на 10.292° . Кроме того изменилась структура колебаний. Появившиеся новые колебания угла θ , для угла ε приобрели большие амплитуды. Все эти изменения углов θ и ε по сравнению с углом θ_{M2} объясняются динамикой осей \vec{N} и \vec{S} на рис. 12б.

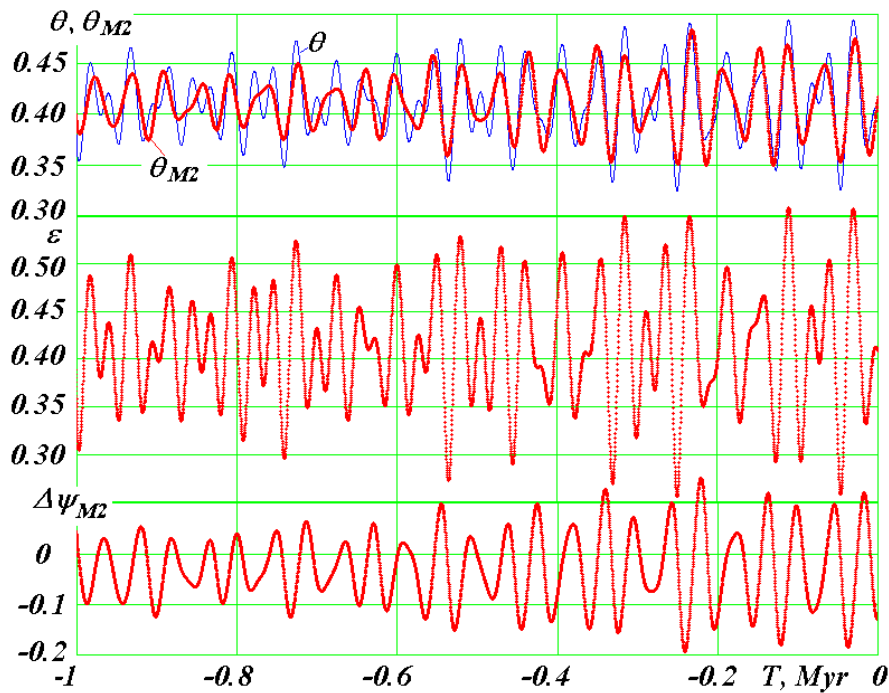


Рис. 13. Эволюция углов θ_{M2} и $\Delta\psi_{M2}$ оси вращения Земли \vec{N} относительно неподвижного вектора \vec{M}_2 за 1 м.л.н. и сопоставление углов наклона θ_{M2} с углами θ и ε .

Угол прецессии ψ_{M2} оси вращения Земли \vec{N} относительно вектора \vec{M}_2 (рис. 11) в среднем за 5 м.л.н. изменяется по линейному закону

$$\psi_{M2a} = \psi_{M20} + 2\pi T/P_{prM2}, \quad (25),$$

где $\psi_{M20} = 3.153580$ – угол прецессии при $T = 0$;

$P_{prM2} = -25.732623$ куг – средний период прецессии оси \vec{N} относительно вектора \vec{M}_2 . Он отличается от периода прецессии относительно оси z_e всего на 0.346 года, т.е. практически совпадает.

На рис. 13 показаны прецессионные колебания оси \vec{N} в виде разности

$$\Delta\psi_{M2} = \psi_{M2} - \psi_{M2a}. \quad (26)$$

Основной период этих колебаний такой же, как у угла наклона θ_{M2} , т.е. равен $P_{\theta M2} = 41.1$ куг. Диапазон колебаний угла $\Delta\psi_{M2}$ равен 20° , при диапазоне колебаний $\theta_{M2} - 7.7^\circ$. Таким образом, наибольшая амплитуда колебаний угла прецессии ψ_{M2} превышает наибольшую амплитуду угла θ_{M2} в 2.6 раза. Колебания углов θ_{M2} и ψ_{M2} не одновременны. Экстремумы θ_{M2} опережают экстремумы ψ_{M2} на $0.25 \cdot P_{\theta M2} = -10.275$ куг, т.е. при изменении времени в будущее вначале возникает экстремум θ_{M2} , а через 10.275 куг появляется экстремум $\Delta\psi_{M2}$.

8.3. Физическое отличие прежней и новой теорий эволюции оси вращения Земли. В прежней теории эволюции оси вращения Земли основной период колебаний равнялся 41 тыс. лет. Как уже отмечалось, эта теория основывалась на решении упрощенных дифференциальных уравнений (7)-(8) первого порядка. В результате такого упрощенного рассмотрения положения векторов \vec{M}_2 и \vec{M} совпадало (рис. 11), что на рис. 12б соответствует совпадению центра траектории оси орбиты Земли \vec{S} с центром траектории оси вращения \vec{N} . Так как эти оси прецессируют в одном направлении (за часовой стрелкой), то влияние орбитального движения на вращательное будет зависеть от их относительной скорости прецессии $2\pi/P_{prM2} - 2\pi/P_{prS}$, т.е. период этого влияния будет определяться так:

$$P_{rl} = \frac{P_{prS} \cdot P_{prM2}}{P_{prS} - P_{prM2}} = -41.1 \text{ куг}, \quad (27),$$

где $P_{prS} = -68.7$ куг.

Таким образом, периодом колебаний угла ε в прежней теории эволюции оси Земли является период относительной прецессии P_{rl} осей вращения \vec{N} и орбиты \vec{S} . Отсюда следует физическое объяснение отличия новой теории эволюции оси Земли от прежней. В прежней теории оси прецессии \vec{M} и \vec{M}_2 осей орбиты \vec{S} и Земли \vec{N} совпадали. В новой теории (рис. 11 и рис. 12б) они не совпадают. Вследствие несовпадения векторов \vec{M} и \vec{M}_2 моменты сил воздействия всех тел на Землю имеют больший размах колебаний. Поэтому увеличивается размах колебаний θ относительно неподвижной системы координат $x_e y_e z_e$. Дополнительно к этому увеличивается размах колебаний угла ε между подвижными осями орбиты \vec{S} и оси \vec{N} . В итоге амплитуда колебаний угла ε по новой теории превышает амплитуду колебаний по прежней теории в 7-8 раз.

8.4. Короткопериодическая эволюция оси Земли. Короткопериодические колебания оси Земли, которые меньше периодов продолжительностью в десятки тысяч лет, начинаются с периода 18.6 лет. Поэтому рассмотрим эволюцию оси Земли на интервалах времени 100 лет и меньше. Проекции оси Земли N_{xe}, N_{ye}, N_{ze} , согласно (34п) - (36п), в системе неподвижной эклиптики усредним на текущих интервалах времени 18.6 лет. Тогда скользящие средние этих величин $N_{xet18.6}, N_{yet18.6}, N_{zet18.6}$ представляют проекции средней за 18.6 лет оси Земли $\vec{N}_{t18.6}$. Рассмотрим эволюцию мгновенной оси Земли относительно средней:

$$\Delta N_{xel} = N_{xe} - N_{xet18.6}; \quad \Delta N_{yel} = N_{ye} - N_{yet18.6}; \quad \Delta N_{zel} = N_{ze} - N_{zet18.6}. \quad (28)$$

На рис. 14а показана эволюция мгновенной оси Земли в плоскости, перпендикулярной вектору средней оси $\vec{N}_{18.6}$. Решение уравнений (4)-(5) выполнялось на интервале от $T = 0$ до $T = -100$ лет. Результаты выдавались с интервалом $\Delta T_e = 0.04$ года. Начальная точка 1 соответствует моменту $T_1 = -9.28$ лет, а весь график с конечной точкой 2 представлен за 18.6 лет. Как видно из рис. 14а, мгновенная ось \vec{N} совершает полный оборот вокруг средней $\vec{N}_{18.6}$ за 18.6 года. Ее движение происходит по часовой стрелке при изменении времени в будущее. Траекторией этого движения является симметричный овал с большой осью $a_{NI} = 4.2 \cdot 10^{-5}$, расположенной вертикально. Другие обороты, за оставшиеся до 100 лет решения уравнений (4)-(5), накладываются на этот овал. Они не показаны, чтобы не затенять короткопериодические движения мгновенной оси.

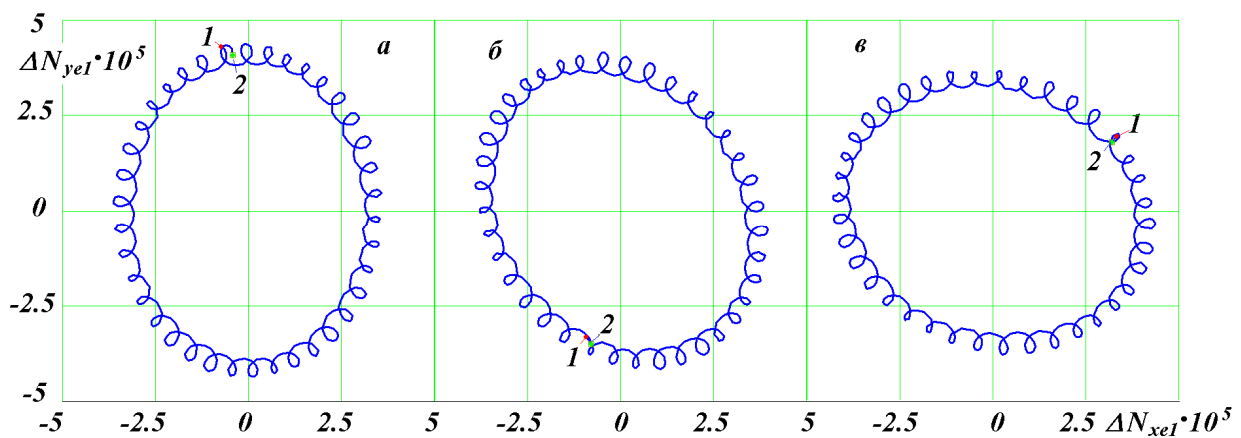


Рис. 14. Движение в прошлое за 18.6 года мгновенной оси вращения Земли \vec{N} относительно скользящей средней оси $\vec{N}_{18.6}$ в разные эпохи: 1 и 2 – начальная и конечная точки движения, соответственно; начальные моменты времени T_1 в эпохи: а – $T_1 = -0.00928$ куг; б – $T_1 = -2.50928$ куг; в – $T_1 = -5.00928$ куг.

Как видно из рис. 14а, мгновенная ось совершает также более мелкие вращения против часовой стрелки при изменении времени в будущее. Их период равен 0.5 года. За 18.6 лет имеется больше 37 таких мелких вращений.

Вращение мгновенной оси \vec{N} относительно средней $\vec{N}_{18.6}$ происходит по овалу, а не по окружности. Эта особенность потребовала проведения дополнительных исследований с проекциями вектора \vec{N} в других системах координат, связанных с подвижным экватором и эклипстикой, а также в неподвижной системе, связанной с вектором \vec{M}_2 . Во всех этих системах траектория оставалась овалом. Были повторены расчеты за 100 лет, но только в другие эпохи: $T = -2.5$ куг (рис. 14б) и $T = -5$ куг (рис. 14в). Формы овалов не изменились, однако расположение больших осей оказалось повернутым: за -2.5 куг на 36° (рис. 14б) и за -5 куг – на 72° (рис. 14в). Эти результаты показывают, что овал совершает полный оборот за период прецессии $P_{pr} = -25.74$ куг. Вращение происходит по часовой стрелке при изменении времени в будущее.

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

Так как вектора оси имеют единичную длину, то наибольшее отклонение мгновенной оси \vec{N} от средней $\vec{N}_{t18.6}$

$$\Delta\theta_I = \arcsin(a_{NI}) = 8.7'' \quad (29)$$

Если начало вектора оси $\vec{N}_{t18.6}$ расположить в центре Земли перпендикулярно экватору, то ось мгновенной оси \vec{N} на ее поверхности будет описывать овал с большой осью

$$R_{PI} = R_{EP} \cdot a_{NI} = 267 \text{ м}, \quad (30),$$

где $R_{EP} = 6356.765$ км – полярный радиус Земли.

Итак, при изменении времени в будущее мгновенная ось вращения Земли по часовой стрелке описывает овал вокруг средней $\vec{N}_{t18.6}$ за 18.6 года. Этот овал также поворачивается по часовой стрелке, совершая полный оборот за 25.74 тыс. лет. Эти движения на поверхности Земли соответствуют движению мгновенного Северного полюса по овалу с большой осью равной 267 м. Движения по овалу за 18.6 лет и его вращение за 25.74 тыс. лет происходит по часовой стрелке. При этом происходят мелкие вращения мгновенного полюса против часовой стрелки с периодом 0.5 года.

Для изучения более коротких периодов эволюции оси Земли уравнения (4)-(5) были проинтегрированы за 20 лет в прошлое с выдачей результатов через $\Delta T_e = 0.002$ года. Были рассчитаны скользящие средние проекции оси Земли за 0.5 года: $N_{xe0.5}$, $N_{ye0.5}$, $N_{ze0.5}$, а также отклонения от их мгновенной оси ΔN_{xe2} , ΔN_{ye2} , ΔN_{ze2} , которые определялись аналогично (28). На рис. 15а показана траектория движения мгновенной оси \vec{N} относительно средней $\vec{N}_{t0.5}$.

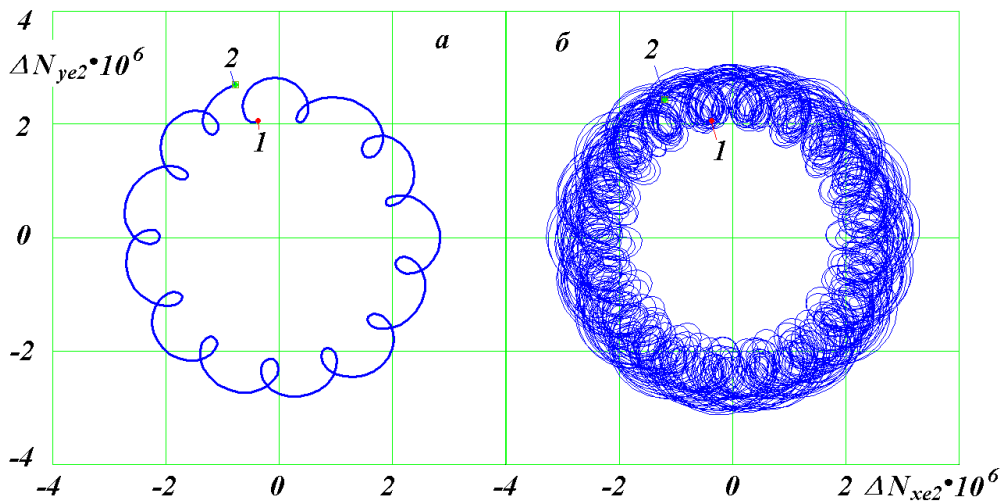


Рис. 15. Движение в прошлое за полгода (а) и за 19.5 лет (б) мгновенной оси вращения Земли \vec{N} относительно скользящей средней оси $\vec{N}_{t0.5}$: 1 и 2 – начальный и конечный точки движения, соответственно; начальный момент времени $T_1 = -0.0025$ кур.

Ось \vec{N} совершает полный оборот за 0.5 года против часовой стрелки при изменении времени в будущее, начиная с точки 2 и заканчивая точкой 1 при $T = -0.25$ года. При этом происходит почти 13 дополнительных малых оборотов, направленных также против часовой стрелки. Продолжительность малых оборотов равна полумесяцу.

На рис. 15б эти движения оси Земли от начальной точки 1 до конечной 2 показаны за 19.5 лет. В данном случае полугодовые движения происходят по окружности с радиусом не больше $a_{N2} = 3 \cdot 10^{-6}$. Это соответствует отклонению мгновенной оси от средней на угол $\Delta\theta_2 = 0.62''$. А на поверхности Земли мгновенная ось вокруг средней $\vec{N}_{t0.5}$ будет совершать эти движения в пределах круга радиусом $R_{p2} = 19$ м.

Аналогичные исследования были выполнены по полумесячным движениям мгновенной оси Земли \vec{N} относительно средней $\vec{N}_{t0.5M}$ за 0.5 месяца. На рис. 16а эти движения показаны на графике $\Delta N_{ye3}(\Delta N_{xe3})$ за 0.5 года.

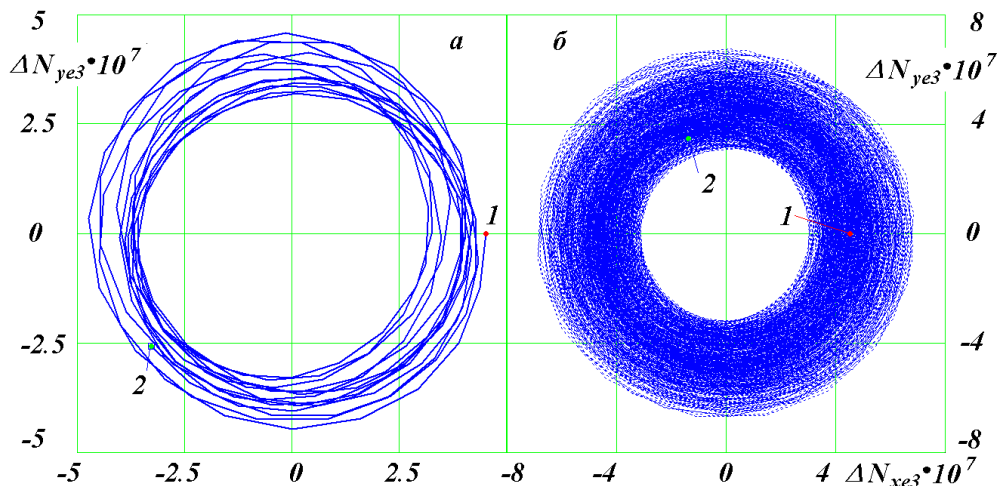


Рис. 16. Движение в прошлое за полгода (а) и за 20 лет (б) мгновенной оси вращения Земли \vec{N} относительно скользящей средней оси $\vec{N}_{t0.5M}$: 1 и 2 – начальный и конечный точки движения, соответственно; начальный момент времени $T_1 = -0.00018$ кур; масштабы на рис. а и б – разные.

Мгновенная ось вращения Земли, при изменении времени в будущее, начиная с точки 2 до момента 1 при $T = -0.0018$ года, движется против часовой стрелки. За полмесяца она совершает оборот по траектории, близкой к окружности. Однако окружности эти незамкнутые и с каждым оборотом смещаются. За 20 лет полумесячные обороты оси Земли заполняют кольцевую область с радиусом от $3 \cdot 10^{-7}$ до $7 \cdot 10^{-7}$ (рис. 16б), т.е. со средним расстоянием от центра $a_{N3} = 5 \cdot 10^{-7}$. Это соответствует отклонению мгновенной оси от средней $\vec{N}_{t0.5M}$ на $\Delta\theta_3 = 0.1''$ и полумесячному ее движению на поверхности Земли по кругу радиусом $R_{p3} = 3$ м.

Итак, при изменении времени в будущее мгновенная ось вращения Земли совершает полугодовое движение против часовой стрелки вокруг средней за 0.5 года оси $\vec{N}_{t0.5}$, а также направленное в ту же сторону полумесячное движение вокруг средней за полмесяц оси $\vec{N}_{t0.5M}$. При этом радиус полумесячного движения в 6 раз меньше полугодового.

Непрерывное движение оси Земли приводит к проблеме определения точек ее пересечения с поверхностью Земли, которые называют полюсами. Их определяют по положению средней оси вращения Земли. Тогда мгновенная ось вращения Земли будет

совершать относительно полюса циклические движения. Вышепредставленные исследования показывают, что вид этих движений зависит от того, по какому усреднению назначены географические полюса Земли.

В этой связи рассмотрим движение мгновенной оси Земли относительно скользящей средней \vec{N}_{tppr} за период прецессии оси Земли $P_{pr} = -25.74$ тыс. лет. Рассчитаем проекции \vec{N}_{tppr} , и аналогично (28) – проекции отклонений ΔN_{ye4} и ΔN_{xe4} мгновенной оси от скользящей средней \vec{N}_{tppr} . График $\Delta N_{ye4}(\Delta N_{xe4})$ представляет собой узкое кольцо толщиной 0.02 и радиусом 0.4. Это соответствует отклонению мгновенной оси от средней \vec{N}_{tppr} на $\Delta\theta_4 = 23.58^\circ$ и ее движению на поверхности Земли по кругу радиусом $R_{P4} = 2542$ км. При изменении времени в будущее мгновенная ось Земли по часовой стрелке совершает оборот вокруг \vec{N}_{tppr} за 25.74 тыс. лет.

9. КОЛЕБАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ СОБСТВЕННОГО ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

В литературе рассматривают ряд факторов, которые могут влиять на вращение Земли. Это изменения в распределении воздушных масс в атмосфере, снежного и ледового покровов, изменения уровня Мирового океана, взаимодействие внутренних оболочек Земли и т.д. [6]. Все эти факторы являются предполагаемыми. Поэтому представляет интерес колебания угловой скорости вращения Земли, которые непосредственно следуют из взаимодействия Земли с окружающими ее телами.

Как видно из уравнения (6), собственная скорость вращения Земли $\dot{\phi}$ зависит от скорости прецессий $\dot{\psi}$ оси Земли и угла ее наклона θ . Поэтому вариации последних двух параметров приводят к вариациям угловой скорости вращения Земли $\dot{\phi}$. Далее будем рассматривать изменение периода собственного вращения Земли, который связан с $\dot{\phi}$ так:

$$P_{rt} = 2\pi / \dot{\phi}. \quad (32)$$

Так как вариации периода P_{rt} небольшие, то будем рассматривать их разности в миллисекундах в виде $\Delta P = P_{rt} - P_{rtm}$, где P_{rtm} – среднее значение периода P_{rt} на исследованном интервале времени. С точностью до 6 знаков сидерический период вращения Земли равен $P_{rtm} = 0.997270$ дня.

На рис. 17 представлено изменение отклонения ΔP на четырех интервалах времени: 0 – -2 года; 0 – -20 лет; 0 – 5 тыс. лет и 0 – -500 тыс. лет. Первые два интервала представляют результаты интегрирования уравнений (4) - (5) за -20 лет с шагом $\Delta T_s = 0.4 \cdot 10^{-4}$ года. На интервале 0 – 5 тыс. лет шаг интегрирования был $\Delta T_s = 1 \cdot 10^{-4}$ года, а последний интервал представляет результаты интегрирования за -5 млн. лет с таким же шагом. Точки на графиках даны с шагами ΔT_e , значительно превышающими шаги интегрирования ΔT_s .

На первом интервале 0 – -2 года видны полумесячные и полугодовые колебания ΔP с периодами 13.66 дня и 182.6 дня, соответственно. Их средние амплитуды соответственно равны 5.2 мсек. и 2.5 мсек, где 1 мсек = $1 \cdot 10^{-3}$ сек. Амплитуды в соседних колебаниях – разные. Здесь приведены средние их значения. Полумесячные

колебания имеют наибольшую амплитуду. Полугодовые колебания с меньшей амплитудой модулируют их.

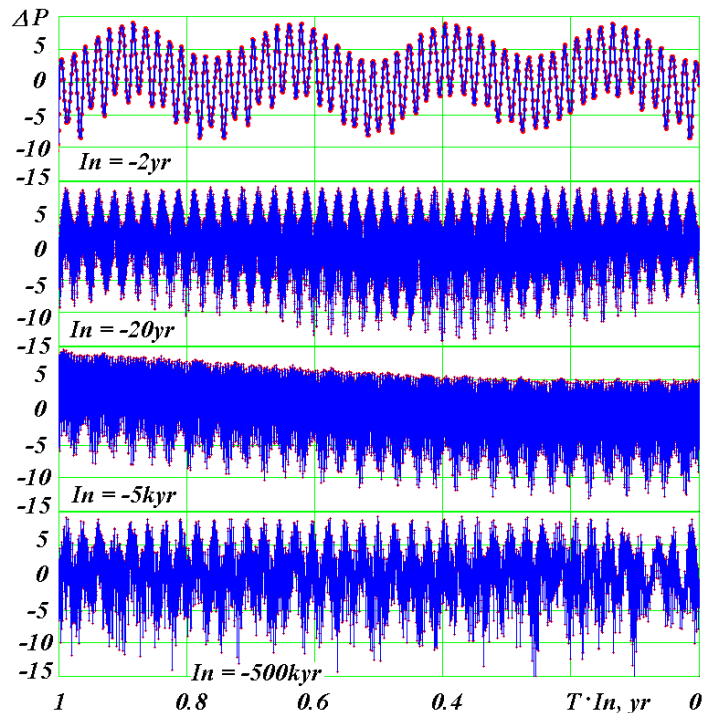


Рис. 17. Динамика отклонения сидерического периода вращения Земли на четырех интервалах времени $In = 2, 20, 5000$ и 500000 лет назад: yr – год.

На втором интервале 0 – -20 лет нижние части колебаний изменяются, это происходит модуляция колебаний величины ΔP с периодом 18.6 лет. Амплитуда этих колебаний равна 1 мсек. Эти колебания обусловлены прецессией оси орбиты Луны с таким же периодом.

На последних двух интервалах 0 – -5 тыс. лет и 0 – -500 тыс. лет величина ΔP не превышает пределов отклонений на предыдущих интервалах. Это свидетельствует, что кроме выявленных трех периодов колебаний других периодов со значимыми амплитудами нет. Наблюдаемые на последних двух графиках колебания ΔP с периодами 152 года и 13.2 тыс. лет обусловлены разреженностью данных: интервалы между точками составляют 1 год и 200 лет, соответственно, в то время когда периоды колебаний равны полмесяца и полгода. Поэтому выбранные точки этих колебаний с последовательностью ΔT_e образуют фиктивные колебания с периодами 152 года и 13.2 тыс. лет. На графике интервала 0 – -5 тыс. лет наблюдается также тренд ΔP . Он также обусловлен разреженностью данных. Этот вывод подтверждается на всем исследованном интервале за -5 млн. лет: диапазон отклонений ΔP находится в пределах от -15 до 10 мсек.

Итак, сидерический период собственного вращения Земли колеблется с полумесячными, полугодовыми периодами и периодами 18.6 лет. Амплитуды этих колебаний с увеличением периодов уменьшаются в последовательности: 5.2, 2.5 и 1 мсек, соответственно.

Как уже отмечалось, амплитуды соседних полумесячных и полугодовых колебаний неодинаковы. Они больше для колебаний, соответствующим тем полумесяцам и полугодиям, которые содержат перицентрии орбит Луны и Земли, соответственно.

Угол собственного вращения φ оси Земли отсчитывается по подвижному экватору 4 от линии Oy_1 (рис. 11) его пересечения с неподвижной плоскостью орбиты Земли 3. Эта линия подвижна в пространстве, поэтому скорость собственного вращения $\dot{\varphi}$ и его период P_{π} колеблются из-за колебания системы отсчета, связанной с этой линией.

10. ДОКАЗАТЕЛЬСТВА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ВРАЩЕНИИ ЗЕМЛИ

Вопросы достоверности решения задачи о вращении Земли детально рассмотрены в работах [12, 13, 28, 29]. В рамках принятой технологии ее решения все необходимые проверки были выполнены. Например, задача решалась последовательно, при воздействии одного из 10 тел: Солнца, 8-ми планет и Луны [14, 26]. Полученные периоды колебаний оси Земли подтвердились общетеоретическими выводами на основании теоремы моментов, а также результатами других авторов [19]. При воздействии всех тел задача решалась за разные интервалы времени, и полученные результаты, как показано ранее, совпали с наблюдениями. Интегрирование уравнений (4) - (5) за 200 тыс. лет проводилось с разными начальными условиями и с разными шагами интегрирования. Это не привело к изменению периодов колебаний, их амплитуд и моментов наступления экстремумов.

Как уже отмечалось, задача о вращении Земли является одной из самых сложных задач механики. Это также подтверждается видом уравнений (4)-(5). Их вывод связан с рядом переходов из одной системы координат в другую, с принятием определенных упрощений и приближений. Вид решений может зависеть от выбора начальных условий, метода решения, а также от преобразований решений относительно подвижной орбиты Земли. Поэтому кардинальной проверкой полученных результатов являлось бы их получение без решения дифференциальных уравнений (4)-(5).

При исследовании орбит выяснилось, что эволюция оси орбиты Луны подобна эволюции оси вращения Земли. Этот результат привел нас к составной модели Земли, в которой часть массы Земли равномерно распределена между периферийными телами, обращающимися вокруг центрального тела по круговой орбите. Под воздействием Луны, Солнца и планет орбиты периферийных тел начинают изменяться. Эволюция оси орбиты одного из этих тел моделирует эволюцию оси вращения Земли. Такое моделирование вращательного движения Земли включает несколько стадий решения орбитальной задачи с помощью программы Galactica. В первоначальной серии исследований [3, 4] было изучено три модели, и была подтверждена возможность моделирования эволюции земной оси. В этих моделях периоды прецессии осей орбит моделей были 170 лет и 2604 года, в то время как средний период прецессии оси Земли $P_{pr} = -25740$ лет. В последующем было разработано еще 11 моделей, пока не был достигнут необходимый период прецессии. В 13-ой модели радиус орбиты

периферийных тел равен радиусу Земли, их период обращения 0.142 часа, а взаимодействие между телами модели усилено в 9.6 раза по сравнению с гравитационным воздействием. Таким образом, тела 13-ой модели в 170 раз вращаются быстрее Земли. Чтобы исследовать эволюцию таких моделей была создана программа *Galactica* с измененным взаимодействием между определенными телами.

Решение задачи для 13-ой составной модели Земли на интервале 300 лет [12, 13, 29] дало все характеристики динамики земной оси, в том числе полумесячные, полугодовые и с периодом 18.6 лет колебания углов ε и ψ . Их амплитуды также совпали с результатами задачи (4)-(5). Такое совпадение результатов модельной задачи с результатами прямой происходит до 3 тыс. лет. Дальнейшее решение задачи затруднено необходимостью уменьшать шаг интегрирования до таких величин, при которых требуется невыполнимое время счета.

Итак, составная модель Земли на интервале 3000 лет подтвердила полученные результаты интегрирования дифференциальных уравнений (4)-(5) вращения Земли. Это свидетельствует, что принятые допущения и упрощения при выводе уравнений, их вывод, метод решения и преобразование результатов интегрирования в конечный вид также подтвердился.

Вторая независимая проверка заключалась в использовании более точного метода при интегрировании уравнений (4)-(5), а именно метода Рунге-Кутты 8-ого порядка в реализации Дорманда и Принса [17]. До этого в программе *DfEqA11-.for* использовался метод интегрирования Рунге-Кутты 4-ого порядка в реализации Крутько и др. [1]. Мы использовали его в течение нескольких десятков лет для решения разнообразных задач, и всегда получали удовлетворительные результаты. При интегрировании уравнений (4)-(5) за интервалы времени порядка 200 тыс. лет мы столкнулись с неожиданным недостатком этого метода. Амплитуда суточных колебаний производных $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$ к концу интервала интегрирования увеличивалась на несколько порядков. Была разработана программа решения задачи *DfEqADP8-.for* с методом Дорманда-Принса и уравнения (4)-(5) была проинтегрированы на разных интервалах времени, включая 200 тыс. лет. Все полученные ранее результаты подтвердились. При этом амплитуды суточных колебаний $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$ не увеличиваются и остаются на одном уровне. Итак, метод интегрирования уравнений не влияет на полученные результаты, и применение более точного метода подтверждает их.

Третья независимая проверка заключалась в смене технологии решения задачи. В дифференциальные уравнения вращательного движения (4)-(5) входят координаты x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} воздействующих на Землю тел. Они определяются при решении орбитальной задачи с помощью программы *Galactica*. Однако массив этих данных с шагом интегрирования задачи (4)-(5) за большие промежутки времени занимает нереализуемый объем памяти. Поэтому мы создали математическую модель Солнечной системы [9], которая в необходимый момент времени позволяет получать координаты тел x_{1i}, y_{1i}, z_{1i} на основании результатов задачи двух тел: материнского тела и его спутника. При этом параметры орбиты тела: $e, i, \varphi_{\Omega}, \varphi_p, R_p$ и др. в каждый момент определяются по данным, предварительно рассчитанных с помощью программы *Galactica*. В процессе решения этой задачи математическая модель Солнечной системы

была всесторонне проверена. Тем не менее, оставалась вероятность того, что на больших интервалах времени несущественные отличия результатов математической модели Солнечной системы от значений координат, полученных с помощью программы Galactica, могут повлиять на эволюцию параметров вращательного движения ε и ψ . Была разработана новая программа glc3rte2.for совместного решения орбитальной задачи и задачи о вращении Земли. В ней за один шаг по времени происходит решение методом программы Galactica орбитальной задачи, затем методом Дорманда-Принса за этот шаг решается задача о вращении Земли. С помощью новой программы были выполнены решения этих двух задач за разные интервалы времени, включая интервал 200 тыс. лет. Все ранее полученные результаты подтвердились. Этой проверкой была также подтверждена математическая модель Солнечной системы на большом интервале времени.

В табл. 3 приведены количественные сравнения периода прецессии P_{pr} , и минимального ε_{min} и максимального ε_{max} углов наклона с точностью до пятой значащей цифры. С этой точностью первые два метода полностью совпали. Результаты третьего метода, как видно из табл. 3, по периоду прецессии P_{pr} отличаются в 4-ом знаке, а по углу наклона ε – в 5-ом. Так этот метод является более точным, то последние величины являются уточнением результатов, полученных первыми двумя методами.

Таблица. 3. Сравнение результатов трех методов интегрирования уравнений вращательного движения (4)-(5) за 200 т.л.н.: РГ-4 – метод Рунге-Кутты 4-ого порядка; ДП-8 – метод Рунге-Кутты 8-го порядка в реализации Дорманда-Принса; Gal – координаты тел, входящих в уравнения (4)-(5), определяются по программе Galactica, уравнения решаются методом ДП-8.

| Метод | P_{pr} , лет | ε_{min} | ε_{max} |
|-------|----------------|---------------------|---------------------|
| РГ-4 | -25774 | 14.806° | 32.073° |
| ДП-8 | -25774 | 14.806° | 32.073° |
| Gal | -25749 | 14.802° | 32.077° |

Итак, выполненные разнообразные тестирования и проверки первоначального метода решения задачи о вращении Земли, а также независимые от него решения этой задачи тремя другими методами подтвердили, что ось вращения Земли совершает колебания с амплитудой в 7-8 раз большей, нежели в решениях наших предшественников.

Следует отметить, что установленная выше прецессия оси вращения Земли относительно вектора \vec{M}_2 , позволяет наметить пределы применимости составной модели вращения Земли. Как уже отмечалось, при решении орбитальной задачи за 100 м.л.н. было установлено, что оси орбит планет процессируют вокруг вектора момента количества движения \vec{M} , а ось орбиты Луны – вокруг оси орбиты Земли \vec{S} . Аналогично орбите Луны будут прецессировать и периферийные тела составной модели. Поэтому эту модель можно применять на интервалах времени меньших периодов прецессии орбиты и оси Земли. Ее исследования действительно, как отмечено выше, дали достоверные результаты на интервале 3 тыс. лет, который значительно меньше периода прецессии оси Земли 25.74 тыс. лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гравитационное воздействие Луны, Солнца и планет приводит к прецессии оси Земли со средним периодом 25.74 тыс. лет. Прецессионное движение не постоянно. Оно проходит с колебаниями. Короткопериодические колебания заключаются в дополнительных прецессионных движениях с полумесячным, полугодовым периодами и периодом 18.6 лет. Размеры дополнительных прецессий увеличиваются с ростом периода. При наибольшем периоде 18.6 года амплитуда колебания угла наклона ε равна $9.2''$.

Долгопериодические колебания прецессии оси Земли обусловлены колебаниями орбиты Земли. Они приводят к смещению воздействующих на Землю тел относительно ее плоскости экватора, в первую очередь Луны и Солнца. На вращательное движение Земли оказывают влияние три характеристики орбитального движения Земли: прецессионное движение орбиты Земли с периодом 68.7 тыс. лет, движение ее перигелия с сильно изменяющимся периодом и колебания эксцентриситета с несколькими периодами. При этом влияние прецессии орбиты и вращения перигелия определяется относительными периодами этих двух движений орбиты по отношению и прецессионному движению оси Земли.

Прецессионные движения оси Земли и ее орбиты проходят вокруг разных направлений в пространстве, угол между которыми равен 3.2° . Поэтому на кругах прецессии и движения перигелия орбиты имеются моменты времени, когда есть сближения или удаления с положением Земли на круге ее прецессии. Это обстоятельство приводит к дополнительной модуляции угла наклона ε . Вся совокупность этих воздействий приводит к колебаниям оси Земли от 14.68° до 32.68° . Уровень этих колебаний сохраняется на всем исследованном интервале в 20 млн. лет.

Множество перечисленных факторов являются причиной того, что долгопериодические колебания оси Земли происходят в нерегулярном порядке, который называют хаотическим. Однако, эти колебания строго детерминированы, и каждое из них имеет точную дату проявления.

Новая астрономическая теория изменения климата, основанная на этих решениях задачи о вращении Земли, была сопоставлена с палеоклиматом. Разрозненные, часто противоречивые из-за разной трактовки свидетельства колебаний палеоклимата объединяются новыми колебаниями инсоляции Земли. Более того, новая структура колебаний солнечного тепла в высоких широтах показывает неизбежность наблюдающихся колебаний палеоклимата. Поэтому, на наш взгляд, эти колебания орбитального и вращательного движения Земли являются главной причиной долгопериодических колебаний климата.

Особенности вращательного движения Земли являются одним из источников различных геофизических моделей Земли и ее оболочек. Нам представляется, что полученные результаты будут являться источником для их уточнения. В качестве примера приведем некоторые соображения по магнитному полю Земли. В настоящее время предполагается, что его источником является некоторая структура внутри Земли.

Однако существует ряд свидетельств о том, что атмосфера Земли, обладающая электрическим зарядом, может давать существенный вклад в магнитное поле Земли. Вспышки на Солнце проявляются потоками солнечного вещества, которое возмущает

атмосферу Земли. При этом происходят существенные нарушения магнитного поля Земли, которые называют магнитными бурями. Планеты, как Меркурий и Марс, имеющие крайне разреженную атмосферу, не имеют значимого магнитного поля. Невращающиеся планеты, имеющие как Венера мощную атмосферу, также не имеют магнитного поля. Только планеты, как Земля, Юпитер и Сатурн, обладающие атмосферой и к тому же вращающиеся имеют сильное магнитное поле.

Вращающаяся атмосфера не жестко связана с Землей. Поэтому под влиянием внешних тел она, как и Земля, будет прецессировать. Если периоды и фазы прецессии атмосферы и Земли будут не совпадать, то не совпадать будут и их оси прецессии. Таким образом, магнитный полюс будет смещаться относительно географического. Будет наблюдаться картина, аналогичная движению мгновенной оси вращения Земли \vec{N} относительно скользящей средней \vec{N}_{ipr} , рассмотренной ранее в п. 8.3. Наблюдаемые движения магнитного полюса, на наш взгляд, являются подтверждением атмосферного происхождения магнитного поля.

Мы привели этот пример возможного влияния полученных результатов на понимание геофизических процессов на Земле, чтобы привлечь внимание специалистов. Представленный здесь механизм эволюции оси Земли позволит по-новому взглянуть на известные им факты, и, возможно, по-другому их объяснить.

Благодарности. Настоящая статья является итогом 20-летней работы автора в Институте криосферы Земли по этой теме, которая в последние годы выполнялась в рамках госзадания Рег. № НИОКТР АААА-А17-117051850061-9. Представленные результаты по эволюции вращательного движения Земли основаны на решении задач об орбитальном и вращательном движениях Земли на суперкомпьютерах ЦКП Сибирского Суперкомпьютерного Центра ИВМиМГ СО РАН.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

1.1. Введение. Задача о вращении Земли решается в системе неподвижной эклиптики на эпоху 2000.0 г. с юлианским днем $JD_S = 2451545$, а начало решения рассматривается в сдвинутый на 0.5 столетия момент $T = 0$ с датой 30.12.1949 г. и юлианским днем $JD_0 = 2433280.5$. Положение плоскостей орбиты Земли и экватора на небесной сфере на эпоху JD_S и произвольную эпоху JD представлено на рис. 4.

В астрономии приводятся осредненные изменения параметров, отражающих орбитальное и вращательные движения Земли. Как правило, их получают выдающиеся астрономы, в результате обобщения всех данных наблюдения и анализа их предшествующих обобщений. Такие обобщения следуют через многие десятилетия и даже через несколько веков. Последнее обобщение С. Ньюкомба [23] в конце 19 века являлось астрономической основой для вычислений в 20 веке. В конце 20 века появилось обобщение Дж. Симона и др. [25]. Поэтому рассмотрим определение начальных условий по этим двум обобщениям.

1.2. Начальные условия по С. Ньюкомбу. Для определения начальных значений углов θ и ψ и их производных в эпоху $T = 0$ по С. Ньюкомбу [23] для необходимых угловых параметров (см. рис. 4) используем следующие зависимости:

$$\varepsilon = 23^\circ.45229444 - 0^\circ.0130125 \cdot T_{ip}(T) - 0^\circ.16388889 \cdot 10^{-5} \cdot (T_{ip}(T))^2 +$$

$$+ 0^\circ.50277778 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{tp}(T))^3; \quad (1п)$$

$$p_1 = d\gamma_0\gamma_1/dT = d\psi/dt = -[50''.37084 + 0''.00493 \cdot T_{tp}(T)]; \quad (2п)$$

$$p = d\gamma_2\gamma/dT = -[50''.25641 + 0''.02223 \cdot T_{tp}(T)]; \quad (3п)$$

$$\pi_\varepsilon = di_{e0}/dT = 0''.47107 - 0''.00068 \cdot T_{tp}(T), \quad (4п),$$

где $T_{tp}(T)$ – время в тропических столетиях по 36524.22 эфемеридных суток от фундаментальной эпохи 1900.0 с юлианским днем $JD_f = 2415020.3134$ [15]:

$$T_{tp}(T) = k_{jt} [T + (JD_0 - JD_f)/36525], \quad (5п),$$

где $k_{jt} = 36525/36524.22$; T – в юлианских столетиях от эпохи JD_0 .

Угловые скорости вращения экватора p и p_1 взяты с обратными знаками, т.к. они вращаются по часовой стрелке. Угловые скорости p_1 , p и π_ε в выражениях (2п) - (4п) имеют размерность "/год. Интегрируя эти скорости при нулевых значениях углов в эпоху JD_s , к которой относится система координат, получаем выражения для соответствующих углов в радианах:

$$\psi(T) = \gamma_0\gamma_1(T) = - \{ [5037''.084 \cdot [T_{tp}(T) - T_{st}] + 0.5 \cdot 0''.493 [(T_{tp}(T))^2 - T_{st}^2]] / k_{rd}; \quad (6п)$$

$$\gamma_2\gamma(T) = - \{ [5025''.641 \cdot [T_{tp}(T) - T_{st}] + 0.5 \cdot 2''.223 [(T_{tp}(T))^2 - T_{st}^2]] / k_{rd}; \quad (7п)$$

$$i_{e0}(T) = 100 \{ 0''.47107 \cdot [T_{tp}(T) - T_{st}] - 0.5 \cdot 0''.00068 \cdot [(T_{tp}(T))^2 - T_{st}^2] \} / k_{rd}, \quad (8п),$$

где T_{st} – время в тропических столетиях от эпохи JD_s до начальной эпохи JD_0 : $T_{st} = T_{tp}(T_s)$, где $T_s = (JD_s - JD_0)/36525$ – время в юлианских столетиях от начальной эпохи JD_0 ; $k_{rd} = 3600 \cdot 180/\pi$.

Перемещение $\gamma_0\gamma_2$ плоскости эклиптики EE' (рис. 4) по неподвижному экватору A_0A_0' трудно определить из данных Ньюкомба, поэтому воспользуемся уточненными результатами наших решений орбитальной задачи [4]:

$$\gamma_0\gamma_2(T_{sd}) = a_q \cdot (T_{sd} - \Delta T_c)^2 + b_q \cdot (T_{sd} - \Delta T_c) + c_q, \quad (9п),$$

где $a_q = 2.376361216684775 \cdot 10^{-6}$; $b_q = 4.788549396485488 \cdot 10^{-5}$; $c_q = -2.325022430798324 \cdot 10^{-5}$;

$T_{sd} = T \cdot k_{js}$ – время в сидерических столетиях по 36525.636042 дней в 1 столетии от эпохи JD_0 ;

$$k_{js} = 365.25/365.25636042;$$

$\Delta T_c = 0.02567575$ – время коррекции, введенное для того, чтобы в эпоху JD_s восходящие узлы γ_0 и γ_2 совпадали, т.е. $\gamma_0\gamma_2(T_s) = 0$.

В треугольнике $\gamma_0\gamma_2N$ на рис. 4 известны три элемента: дуга $\gamma_0\gamma_2$ и два угла: i_{e0} и $\angle\gamma_0 = \varepsilon_0$. По теореме синусов $\sin i_{e0}/\sin \gamma_0\gamma_2 = \sin \varepsilon_0/\sin \gamma_2N$ находим дугу γ_2N через функцию $\arcsin x$. Эта функция дает два значения: x и $\pi - x$. В астрономии эволюцию плоскости эклиптики рассматривают как вращение относительно мгновенной оси, которая лежит в ее плоскости и проходит через точку K . Она находится вблизи т. N (на рис. 4 не показана) и имеет долготу $\Pi = \gamma K = 173^\circ 57' 03''$ [15]. Поэтому для $\arcsin x$ выбираем второе значение $\pi - x$. Тогда для дуги γ_2N получаем выражение:

$$\gamma_2N = \pi - \arcsin[(\sin \gamma_0\gamma_2 \cdot \sin \varepsilon_0)/\sin i_{e0}]. \quad (10п)$$

С целью упрощения выражений, здесь и далее, не показываем зависимость величин от времени T . Теперь можем (см. рис. 4) определить дугу

$$\gamma N = \gamma_2N - \gamma_2\gamma, \quad (11п)$$

где дуга $\gamma_2\gamma$ определяется формулой (7п).

В треугольнике $\mathcal{N}\mathcal{N}_l$ (рис. 4) известны два угла: $\angle\gamma = (\pi - \varepsilon)$ и i_{e0} и сторона \mathcal{N} . По теореме косинусов находим угол θ

$$\theta = \arccos[-\cos(\pi - \varepsilon) \cdot \cos i_{e0} + \sin(\pi - \varepsilon) \cdot \sin i_{e0} \cdot \cos \mathcal{N}]. \quad (12\text{п})$$

Так как все величины, в том числе θ и ψ , являются функциями T , то производные этих величин в эпоху T могут быть рассчитаны так:

$$\dot{\psi} = (1/k_{js}) \cdot [\psi(T + \Delta T) - \psi(T - \Delta T)] / 2 \cdot \Delta T; \quad (13\text{п})$$

$$\dot{\theta} = (1/k_{js}) \cdot [\theta(T + \Delta T) - \theta(T - \Delta T)] / 2 \cdot \Delta T, \quad (14\text{п}),$$

где $\Delta T = 0.001$ столетия; время T отсчитывается в сидерических столетиях.

В табл. 1 приведены начальные значения углов и скоростей, рассчитанные по выражениям (13п) - (14п) при $\Delta T = 0.001$ столетия в эпоху JD_0 , т.е. при $T = 0$. При уменьшении ΔT в десять раз $\dot{\psi}$ меняется в 13 знаке, а $\dot{\theta}$ – в седьмом. Отметим, что производная от угла прецессии, определенная согласно (2п) $\dot{\psi} = 100 \cdot p_1 / k_{js} = -2.4422092576843 \cdot 10^{-2}$ 1/ст отличается в шестом знаке. Все это свидетельствует о достаточной степени точности определения производных.

1.3. Начальные условия по Дж. Симону и др. В работе Дж. Симона и др. [25, С. 677] приводятся элементы орбит планет в динамической эклиптике и равноденствии текущей даты в зависимости от времени в юлианских тысячелетиях, отсчитываемого от эпохи JD_S . Эти выражения для Земли [25, С. 664] при отсчете времени от эпохи JD_0 запишутся так:

$$\varepsilon_{Si} = 23^\circ 26' 21''.412 - 468''.0927 (T_k + T_{k0}) - 0''.0152 (T_k + T_{k0})^2 + 1''.9989 (T_k + T_{k0})^3 - 0''.0051 (T_k + T_{k0})^4 - 0''.0025 (T_k + T_{k0})^5; \quad (15\text{п})$$

$$\mathcal{N}_i = P = -[50288''.200 (T_k + T_{k0}) + 111''.2022 (T_k + T_{k0})^2 + 0''.0773 (T_k + T_{k0})^3 - 0''.2353 (T_k + T_{k0})^4 - 0''.0018 (T_k + T_{k0})^5 + 0''.0002 (T_k + T_{k0})^6], \quad (16\text{п}),$$

где T_k – время в юлианских тысячелетиях от эпохи JD_0 , а $T_{k0} = -0.050005475701574$ – время эпохи JD_S от эпохи JD_0 ; буквы Si в индексе свидетельствуют о происхождении данных из работы Дж. Симона и др.

В работе [25, С. 675] приводится также долгота восходящего узла подвижной орбиты Земли (рис. 4) \mathcal{N}_{Si} и скорость изменения угла ее наклона di_{e0}/dt относительно неподвижной эклиптики $E_0E'_0$. После интегрирования скорости di_{e0}/dt мы получили выражение для угла i_{e0Si} . Приведем эти выражения:

$$\mathcal{N}_{Si} = \Omega = 174^\circ 87317577 - [8679''.27034 (T_k + T_{k0}) - 15''.34191 (T_k + T_{k0})^2 - 0''.00532 (T_k + T_{k0})^3 + 0''.03734 (T_k + T_{k0})^4 + 0''.00073 (T_k + T_{k0})^5 - 0''.00004 (T_k + T_{k0})^6]; \quad (17\text{п})$$

$$i_{e0Si} = \{469''.97289 (T_k + T_{k0}) - 3''.35053 (T_k + T_{k0})^2 - 0''.12374 (T_k + T_{k0})^3 + 0''.00027 (T_k + T_{k0})^4 - 0''.00001 (T_k + T_{k0})^5 + 0''.00001 (T_k + T_{k0})^6\}. \quad (18\text{п})$$

В треугольнике $\mathcal{N}_i\mathcal{N}$ (рис. 4) известны два угла: ε_0 и i_{e0} и дуга \mathcal{N} между ними. По теореме косинусов находим противоположный угол

$$\angle\mathcal{N}_i = \arccos [-\cos \varepsilon_{0Si} \cdot \cos i_{e0Si} + \sin \varepsilon_{0Si} \cdot \sin i_{e0Si} \cdot \cos \mathcal{N}_{Si}], \quad (19\text{п}),$$

где ε_{0Si} – наклон подвижного экватора к подвижной эклиптике в эпоху JD_S ; определяется (15п) при $T_k = -T_{k0}$.

Из этого же треугольника по теореме синусов находим сторону

$$\gamma_2 N_{Si} = \pi - \arcsin [(\sin \gamma N_{Si} \cdot \sin \varepsilon_{0Si}) / \sin \gamma_2 Si], \quad (20\text{п})$$

Так как функция $\alpha = \arcsin A$ при $A > 0$ имеет два значения: α и $\pi - \alpha$, то в выражении (20п) выбрано второе значение. Оно обусловлено ситуацией на рис. 4: дуга $\gamma N_{Si} \approx \pi$, согласно формулы (17п).

В соответствии с рис. 4 дуга γN может быть определена так:

$$\gamma N_{Si} = \gamma_2 N_{Si} - \gamma_2 \gamma_{Si}. \quad (21\text{п})$$

Тогда в треугольнике $\gamma \gamma N$ известны два угла $\angle \gamma = \pi - \varepsilon$ и i_{e0} , и сторона между ними. По теореме косинусов находим противоположный угол

$$\theta_{Si} = \arccos [-\cos (\pi - \varepsilon_{Si}) \cdot \cos i_{e0Si} + \sin (\pi - \varepsilon_{Si}) \cdot \sin i_{e0Si} \cdot \cos \gamma N_{Si}]. \quad (22\text{п})$$

Из треугольника $\gamma \gamma N$ по теореме синусов определяем дугу

$$\gamma N_{Si} = \pi - \arcsin [(\sin (\pi - \varepsilon_{Si}) \cdot \sin \gamma N_{Si}) / \sin \theta_{Si}]. \quad (23\text{п})$$

В этом выражении также выбрано второе значение \arcsin . Тогда согласно рис. 4 угол прецессии будет:

$$\psi_{Si} = \gamma \gamma = \gamma N_{Si} - \gamma N_{Si}. \quad (24\text{п})$$

Параметры, определяемые формулами (15п) - (24п) зависят от времени T_k в юлианских тысячелетиях от эпохи JD_0 . Поэтому производные от углов прецессий ψ_{Si} и наклона θ_{Si} можем вычислить по формулам (13п) - (14п), но функции $\psi_{Si}(T_k)$ и $\theta_{Si}(T_k)$ определять через промежуток времени $\Delta T_k = 0.1 \cdot \Delta T$.

Таблица 1п. Начальные условия на эпоху JD_0 по разным источникам: Ncmb [23]; Sim [25]; углы – в радианах, угловые скорости – в рад/сид. столетие.

| Источ- ник | ψ | θ | $\dot{\psi}$ | $\dot{\theta}$ | $\varepsilon(T_0)$ |
|---------------|-----------------------|-----------------------|--|--|------------------------|
| Ncmb | 0.0122127305 52039 | 0.4090926671861 17 | - 2.442261412753 $3 \cdot 10^{-2}$ | - 2.28396865141963 $3 \cdot 10^{-7}$ | 0.40920620554 76293 |
| Sim | 0.0121933812 4895 | 0.4090926963009 43 | - 2.438820058679 $4 \cdot 10^{-2}$ | - 2.75742706398377 $1 \cdot 10^{-7}$ | 0.40920610959 21452 |

В строке Sim табл. 1п приведены рассчитанные по этим выражениям начальные значения углов и скоростей. Из сравнения начальных условий по С. Ньюкомбу и Дж. Симону и др. видно, что величины ψ , $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$ отличаются в третьей значащей цифре, а θ – в седьмой. Угол наклона между экватором и эклипстикой ε на эпоху JD_0 также отличается в 7 знаке.

Параметры ε и θ являются углами треугольника $\gamma \gamma N$ (рис. 4). Были также сопоставлены другие элементы $\gamma \gamma N$. Как видно из таблицы 2п, они отличаются в четвертом знаке. По-видимому, отличия этих элементов и дают разности в третьем знаке параметров ψ , $\dot{\psi}$ и $\dot{\theta}$. В связи с тем, что параметры Дж. Симона и др. [25] получены сравнительно недавно, будем использовать начальные условия, вытекающие из них.

Таблица 2п. Сравнение других параметров треугольника $\gamma_1\gamma N$ (рис. 4), полученных по данным С. Ньюкомба [23] и Дж. Симона и др. [25]

| Источник | i_{e0} | γN |
|----------|-------------------------|------------|
| Ncmb | $-1.1408 \cdot 10^{-4}$ | 3.044 |
| Sim | $-1.1398 \cdot 10^{-4}$ | 3.042 |

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПЕРЕХОД ОТ ПАРАМЕТРОВ ОСИ ЗЕМЛИ ψ И θ ОТНОСИТЕЛЬНО НЕПОДВИЖНОЙ ЭКЛИПТИКИ К ПАРАМЕТРАМ ε И $\varphi_{p\gamma}$ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОДВИЖНОЙ ЭКЛИПТИКИ

2.1. Сферические координаты. После интегрирования дифференциальных уравнений вращательного движения Земли (4) - (5) получаем угол прецессии ψ и наклона θ подвижной плоскости экватора AA' относительно неподвижной эклиптики $E_0E'_0$ (см. рис. 4). Необходимо перейти к параметрам относительно подвижной эклиптики EE' : к углу наклона ε подвижного экватора и углу перигелия $\varphi_{p\gamma} = \gamma B$.

В треугольнике $\gamma_1\gamma N$ (рис. 4) известен угол θ и могут быть определены угол i_{e0} и дуга γN . Тогда угол наклона подвижного экватора к подвижной эклиптике по теореме косинусов определяется в виде:

$$\varepsilon = \pi - \arccos [-\cos \theta \cos i_{e0} + \sin \theta \sin i_{e0} \cdot \cos \gamma N]. \quad (25\text{п})$$

Из другого треугольника $\gamma_0\gamma_2N$ по этой же теореме угол наклона между подвижной и неподвижной эклиптиками равен

$$i_{e0} = \arccos [-\cos \varepsilon_0 \cdot \cos (\pi - i_E) + \sin \varepsilon_0 \cdot \sin (\pi - i_E) \cdot \cos \varphi_\Omega]. \quad (26\text{п})$$

Дуга γN через долготу $\Omega = \gamma_0 N$ восходящего узла плоскости подвижной эклиптики EE' определяется так:

$$\gamma N = \Omega - \psi, \quad (27\text{п}),$$

где долгота по теореме синусов для треугольника $\gamma_0\gamma_2N$ запишется в виде:

$$\Omega = \gamma_0 N = \arcsin [\sin \varphi_\Omega \sin (\pi - i_E) / \sin i_{e0}]; \quad \text{при } i_E < \varepsilon_0 \quad \Omega' = \pi - \Omega; \quad (28\text{п})$$

В выражении (28п) учтено условие: когда $i_E < \varepsilon_0$, то принимается новое значение угла Ω' .

Здесь ε_0 – угол наклона между неподвижными экватором и эклиптикой. Углы i_E , φ_Ω и используемый ниже φ_p являются углами наклона, долготы восходящего узла подвижной плоскости орбиты Земли и перигелия ее орбиты, соответственно. Эволюция этих углов получены по нашим численным решениям орбитальной задачи за 100 м.л.н. [4, 30] с помощью программы Galactica [27].

Дуга перигелия $\varphi_{p\gamma} = \gamma B$ в подвижной эклиптике (см. рис. 4) вычисляется так:

$$\varphi_{p\gamma} = \varphi_p - \gamma_2 \gamma \quad (29\text{п})$$

где дуга $\gamma_2 \gamma$ и входящие в нее дуги определяются по формулам:

$$\gamma_2 \gamma = \gamma_2 N - \gamma N; \quad (30\text{п})$$

$$\gamma_2 N = \arcsin [\sin \varphi_\Omega \cdot \sin \varepsilon_0 / \sin i_{e0}]; \quad \text{при } i_E < \varepsilon_0 \quad \gamma_2 N' = \pi - \gamma_2 N; \quad (31\text{п})$$

$$\gamma N = \arcsin [\sin \gamma_1 N \cdot \sin \theta / \sin (\pi - \varepsilon)]; \quad \text{при } i_E < \varepsilon_0 \quad \gamma N' = \pi - \gamma N, \quad (32\text{п})$$

где $\gamma_2 N'$ и $\gamma N'$ – новые значения $\gamma_2 N$ и γN , соответственно.

2.2. Декартовы координаты. При рассмотрении задачи за большие промежутки времени угловые параметры орбиты и плоскости экватора изменяются

настолько, что значения обратных тригонометрических функций в силу их неоднозначности переходят от одного значения к другому. Поэтому возникают множественные нарушения: скачки, разрывы и т.п., и их трудно предусмотреть и исключить. Поэтому переход к подвижным плоскостям экватора и эклиптики был осуществлен также в декартовых координатах.

Вместо плоскостей экватора и орбиты Земли рассматриваются проекции на декартовую систему координат единичных векторов осей вращения Земли \vec{N} и орбиты Земли \vec{S} . На рис. 4 показаны: вектор \vec{N} , перпендикулярный плоскости подвижного экватора AA' , и вектор \vec{S} , перпендикулярный плоскости подвижной орбиты Земли EE' , а также вектора \vec{N}_0 и \vec{S}_0 , перпендикулярные плоскостям A_0A_0' и E_0E_0' соответственно, положение которых в эпоху JD_S связано с неподвижной системой отсчета.

Угол ε (см. рис. 4) между векторами \vec{N} и \vec{S} в декартовых координатах обозначим как ε_d . Он определяется через их скалярное произведение следующим образом:

$$\varepsilon_d = \arccos(N_{xe} \cdot S_{xe} + N_{ye} \cdot S_{ye} + N_{ze} \cdot S_{ze}), \quad (33\text{п}),$$

где проекции векторов \vec{N} и \vec{S} на оси неподвижных эклиптической $x_e y_e z_e$ и экваториальной $x_{uz} y_{uz} z_{uz}$ систем координат вычисляются по формулам:

$$N_{xe} = -\sin \theta \sin \psi, \quad (34\text{п})$$

$$N_{ye} = \sin \theta \cos \psi, \quad (35\text{п})$$

$$N_{ze} = \cos \theta, \quad (36\text{п})$$

$$S_{xe} = S_x; \quad (37\text{п})$$

$$S_{ye} = S_y \cdot \cos \varepsilon_0 + S_z \sin \varepsilon_0; \quad (38\text{п})$$

$$S_{ze} = -S_y \cdot \sin \varepsilon_0 + S_z \cos \varepsilon_0; \quad (39\text{п})$$

$$S_x = \sin i_E \cdot \sin \varphi_\Omega; \quad (40\text{п})$$

$$S_y = -\sin i_E \cdot \cos \varphi_\Omega; \quad (41\text{п})$$

$$S_z = \cos i_E. \quad (42\text{п}).$$

Угол перигелия в декартовых координатах обозначим $\varphi_{p\gamma d}$ (см. рис. 4). Он вычисляется так:

$$\varphi_{p\gamma d} = \varphi_p - \gamma_2 \gamma'', \quad (43\text{п}),$$

где штрихами обозначена вторая коррекция $\gamma_2 \gamma''$ угла $\gamma_2 \gamma$. Она определяется с помощью ряда условий.

Вначале рассчитывается дуга $\gamma_2 \gamma$, зависимость для которой на большом интервале времени имеет множество разрывов и изломов, по формуле:

$$\gamma_2 \gamma = \arcsin(\sin(\gamma_2 O \gamma)), \quad (44\text{п}),$$

где $\gamma_2 O \gamma$ – центральный угол этой дуги (рис. 4).

Далее введены центральные углы $\beta = NO\gamma_0$, $\beta_2 = NO\gamma$ и $\beta_3 = NO\gamma_2$ (на рис. 4 не показаны), которые координируют положение осей \vec{N} и \vec{N}_0 относительно NO , линии пересечения плоскостей E_0E_0' и EE' . Ниже приведены тригонометрические функции этих углов в зависимости от проекций \vec{N} и \vec{S} на декартовые оси координат. Тригонометрические функции угла $\gamma_2 O \gamma = \beta_3 - \beta_2$ равны:

$$\sin(\gamma_2 O \gamma) = \sin \beta_3 \cdot \cos \beta_2 - \sin \beta_2 \cdot \cos \beta_3; \quad (45\text{п})$$

$$\cos(\gamma_2 O \gamma) = \cos \beta_3 \cdot \cos \beta_2 + \sin \beta_3 \cdot \sin \beta_2. \quad (46\text{п})$$

Перпендикулярно NO в плоскости $E_0 E_0'$ проведена линия OL , а в плоскости EE' – линия OL_1 (на рис. 4 не показаны). Тригонометрические функции для углов β_2 и β_3 через проекции \vec{N} и \vec{N}_0 на эти линии запишутся так:

$$\sin \beta_2 = N_{ON} / (N_{ON}^2 + N_{OL1}^2)^{0.5}; \quad \cos \beta_2 = -N_{OL1} / (N_{ON}^2 + N_{OL1}^2)^{0.5}; \quad (47\text{п})$$

$$\sin \beta_3 = N_{0ON} / (N_{0ON}^2 + N_{0OL1}^2)^{0.5}; \quad \cos \beta_3 = -N_{0OL1} / (N_{0ON}^2 + N_{0OL1}^2)^{0.5}, \quad (48\text{п})$$

где проекции векторов \vec{N} и \vec{N}_0 рассчитываются так:

$$N_{ON} = N_{xe} \cdot \cos \beta + N_{ye} \cdot \sin \beta; \quad (49\text{п})$$

$$N_{OL} = N_{xe} \cdot \sin \beta - N_{ye} \cdot \cos \beta; \quad (50\text{п})$$

$$N_{OL1} = N_{OL} \cdot \cos i_{e0} - N_{ze} \cdot \sin i_{e0}; \quad (51\text{п})$$

$$N_{0xe} = 0; \quad N_{0ye} = \sin \varepsilon_0; \quad N_{0ze} = \cos \varepsilon_0; \quad (52\text{п})$$

$$N_{0OL} = N_{0xe} \cdot \sin \beta - N_{0ye} \cdot \cos \beta; \quad (53\text{п})$$

$$N_{0ON} = N_{0xe} \cdot \cos \beta + N_{0ye} \cdot \sin \beta; \quad (54\text{п})$$

$$N_{0OL1} = N_{0OL} \cdot \cos i_{e0d} - N_{0ze} \cdot \sin i_{e0d}, \quad (55\text{п})$$

где

$$i_{e0d} = \arccos(S_{ze}). \quad (56\text{п})$$

В этих выражениях функции угла β определяются проекциями оси орбиты \vec{S} по формулам:

$$\sin \beta = S_{xe} / (S_{xe}^2 + S_{ye}^2)^{0.5}; \quad \cos \beta = -S_{ye} / (S_{xe}^2 + S_{ye}^2)^{0.5}. \quad (57\text{п})$$

Чтобы в зависимости (30п) ликвидировать изломы дуги $\gamma_2 \gamma$ используется условие:

$$\gamma_2 \gamma' = \pi - \gamma_2 \gamma \quad \text{при} \quad \cos(\gamma_2 O \gamma) > 0. \quad (58\text{п})$$

В зависимости для дуги $\gamma_2 \gamma'$ по времени существуют скачки дуги на величину $\sim 2\pi$. Так как все используемые величины получены численным интегрированием и представлены в виде рядов с шагом по времени ΔT_e , то можно найти разности дуги $\gamma_2 \gamma'$ между соседними моментами по времени T_i и T_{i-1} :

$$\Delta \gamma_2 \gamma = \gamma_2 \gamma'_i - \gamma_2 \gamma'_{i-1}. \quad (59\text{п})$$

Основные значения разности находятся вблизи некоторого уровня, например, равной 0.05 при интервале между точками $\Delta T_e = 2$ столетия, а в моменты скачков дуги $\gamma_2 \gamma'$ величина $\Delta \gamma_2 \gamma$ достигает значения 2π . Среднее значение модуля $\Delta \gamma_2 \gamma$ равно

$$\Delta \gamma_2 \gamma_m = \sum_{i=1}^{N_4} |\Delta \gamma_2 \gamma_i| / N_4, \quad (60\text{п})$$

где $i = 1, 2, \dots, N_4$, а N_4 – общее количество точек.

С целью устранения скачков на величину 2π выполняется операция при $|\Delta \gamma_2 \gamma| > 2 \cdot \Delta \gamma_2 \gamma_m$ $\Delta \gamma_2 \gamma'_i = \Delta \gamma_2 \gamma - 2\pi$ для $T > 0$ и $\Delta \gamma_2 \gamma'_i = \Delta \gamma_2 \gamma + 2\pi$ для $T < 0$, (61п) в остальных случаях $\Delta \gamma_2 \gamma'_i = \Delta \gamma_2 \gamma$.

После этого рассчитывается новое значение дуги $\gamma_2 \gamma$:

$$\gamma_2 \gamma'_i = \gamma_2 \gamma'_{i-1} + \Delta \gamma_2 \gamma'_i, \quad \text{где} \quad \gamma_2 \gamma'_1 = \gamma_2 \gamma_1, \quad (62\text{п})$$

в результате чего $\gamma_2 \gamma''$ становится непрерывной функцией времени. Тогда угол перигелия от подвижного узла γ в виде непрерывной функции по времени в декартовых координатах полностью определяется выражением (43п).

Следует отметить, что этот геометрический метод расчета астрономических параметров экватора и эклиптики, по-видимому, ранее не применялся. Он позволяет получить непрерывные зависимости во времени искомым характеристик, которые обычными методами сферической геометрии получить затруднительно. Этот метод позволил также устранить неопределенности при выводе преобразований в сферических координатах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крутько П.Д., Максимов А.И., Скворцов Л.М. Алгоритмы и программы проектирования автоматических систем. – М.: Радио и связь, 1989. – 306 с.
2. Лаплас П.С. Изложение системы мира. – М.: Наука, 1982. – 376 с.
3. Мельников В.П., Смульский И.И., Смульский Я.И. Составная модель вращения Земли и возможный механизм взаимодействия континентов // Геология и Геофизика. – 2008. – № 11. – С. 1129-1138. – URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/RGGRu190.pdf>.
4. Мельников В.П., Смульский И.И. Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. – Новосибирск: Академическое изд-во "Гео", 2009. – 98 с. – URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/AsThAnR.pdf>.
5. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. – М.-Л.: ГОНТИ, 1939. – 207 с.
6. Сидоренков Н.С. Нестабильности вращения Земли // Вестник Российской Академии Наук. – 2004. – № 8. – С. 701-709.
7. Смульский И.И. Теория взаимодействия. – Новосибирск: Из-во Новосиб. ун-та, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1999. – 294 с. – URL: http://www.ikz.ru/~smulski/TVfulA5_2.pdf.
8. Смульский И.И. Новая геометрия эволюции орбит // Proceeding of Joint International Scientific Conference "New Geometry of Nature (August 25 - September 5, 2003). – Kazan State University, 2003. – С. 192-195. – URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/smul1/Russian1/IntSunSyst/NeGeEv2.doc>.
9. Смульский И.И. Математическая модель Солнечной системы / В сб. Теоретические и прикладные задачи нелинейного анализа. Российская Академия Наук: ВЦ им. А.А. Дородницына. – М.: ВЦ РАН А.А. Дородницына, 2007. – С. 119-138. – <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/MatMdSS5.pdf>.
10. Смульский И.И. Актуальные математические задачи и тернистые пути науки // Путь науки. Международный научный журнал. – 2015. – № 10 (20). – С. 10-38. – URL: <http://scienceway.ru/arhiv>.
11. Смульский И.И. Новые результаты по инсоляции Земли и их корреляция с палеоклиматом Западной Сибири в позднем плейстоцене // Геология и Геофизика. – 2016. – Т. 57, № 7. – С. 1393-1407. – URL: <http://dx.doi.org/10.15372/GiG20160709>.
12. Смульский И.И. Эволюция оси Земли и палеоклимата за 200 тысяч лет. – Saarbrücken, Germany: "LAP Lambert Academic Publishing". – 2016. – 228 с. – ISBN 978-3-659-95633-1. – URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/InfEvEAPC02M.pdf>.
13. Смульский И.И. Новая Астрономическая теория ледниковых периодов. – "LAP LAMBERT Academic Publishing, Riga, Latvia, 2018. – 132 с. – ISBN 978-613-9-86853-7. – URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/gb/book/978-613-9-86853-7/Новая-Астрономическая-теория>.
14. Смульский И.И., Сеченов К.Е. Уравнения вращательного движения Земли и их решения при воздействии Солнца и планет / Институт криосферы Земли СО РАН. – Тюмень. –

2007. – 35 с. Деп. в ВИНТИ 02.05.07 г. № 492-В2007. – URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/UVrVzSPc.pdf>.

15. Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / Под ред. Г. Н. Дубошина. – Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Наука, 1976. – 862 с.

16. Труды ИПА РАН. Эфемеридная астрономия. – Санкт-Петербург: ИПА РАН, 2004. – Вып. 10. – 488 с.

17. Хайпер Э., Нёрсетт С.П., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1990. – 513 с.

18. Шараф Ш.Г., Будникова Н.А. Вековые изменения элементов орбиты Земли и астрономическая теория колебаний климата // Тр. Инст. теоретич. астрономии. – Л.: Наука. – 1969. – Вып. XIV. – С. 48-109.

19. Bretagnon P., Rocher P. and Simon J.L. Theory of the rotation of the rigid Earth // *Astron. Astrophys.* – 1997. – V. 319. – P. 305-317.

20. Bretagnon P., Simon J.L. Towards the construction of a new precession-nutation theory of nonrigid Earth // *Celest. Mech & Dyn. Astr.* – 2001. – V. 80. – P. 177-184.

21. Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. A Long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth // *Astron. and Astrophys.* – 2004. – V. 428. – P. 261-285.

22. Mathews P.M., Bretagnon P. Polar motions equivalent to high frequency nutations for a nonrigid Earth with anelastic mantle // *Astronomy & Astrophysics.* – 2003. – V. 400. – P. 1113-1128.

23. Newcomb S. The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy. – Washington: Government printing office, 1895. – 202 p.

24. Quinn T. R., Tremaine S., Duncan M. A three million year integration of the Earth's orbit // *Astronomical Journal.* – 1991. – V. 101. – P. 2287-2305.

25. Simon J.L., Bretagnon P., Chapront J., Chapront-Touze M., Francou G., & Laskar J. Numerical Expression for Precession Formulae and Mean Elements for the Moon and the Planets // *Astron. and Astrophys.* – 1994. – V. 282. – P. 663-683.

26. Smulsky J.J. The Influence of the Planets, Sun and Moon on the Evolution of the Earth's Axis // *International Journal of Astronomy and Astrophysics.* – 2011. – № 1. – 117-134. – URL: <http://dx.doi.org/10.4236/ijaa.2011.13017>.

27. Smulsky J.J. Galactica Software for Solving Gravitational Interaction Problems // *Applied Physics Research.* – 2012. – Vol. 4, № 2. – P. 110-123. URL: <http://dx.doi.org/10.5539/apr.v4n2p110>.

28. Smulsky J.J. Fundamental Principles and Results of a New Astronomic Theory of Climate Change // *Advances in Astrophysics.* – 2016. – Vol. 1, № 1. – P. 1-21. – URL: <http://www.isaacpub.org>, <http://www.isaacpub.org/Journal/AdAp>.

29. Smulsky J.J. Future Space Problems and Their Solutions. – Nova Science Publishers, New York, 2018. – 269 p. – ISBN: 978-1-53613-739-2. – URL: <https://novapublishers.com/shop/future-space-problems-and-their-solution>.

30. Smulsky J.J., Smulsky Ya.J. Dynamic Problems of the Planets and Asteroids, and Their Discussion // *International Journal of Astronomy and Astrophysics.* – 2012. – № 2. – P. 129-155. – URL: <http://dx.doi.org/10.4236/ijaa.2012.23018>.

THE EVOLUTION OF THE EARTH'S ROTATIONAL MOVEMENT FOR MILLION YEARS

Smulsky J.J. (Dr. Sci. (Physics and Mathematics), prof.)

Institute of Earth's Cryosphere, Tyumen, Russian Federation

jsmulsky@mail.ru

Abstract. There are the main points of the derivation of the differential equations of the Earth's rotational motion. The periods of oscillation of the Earth's axis are grounded by the angular

momentum theorem. The constants of the equations, the initial conditions, and the theory of their computations are discussed. The results of integrating the equations over time intervals from 0.1 year to 1 million years are considered. The theory of solutions transformation to the mobile plane of the Earth's orbit is considered for millions of years, and the solution results are presented at different time intervals from 100 years to 20 million years. The evolution of the Earth's axis is analyzed. It is established that the Earth's axis precesses with respect to a fixed direction in space, which differs from the direction of the precession of planetary orbits. Physical explanations of the received oscillations of the Earth's axis from 14.68° to 32.68° are given. The oscillations of the Earth's rotation period are shown. Evidence of the reliability of the solutions obtained is presented. The work is of interest to a wide range of researchers in the fields of astronomy, paleoclimate and geophysics.

Keywords: differential equations, Earth rotation, precession, oscillations, evolution, periods, causes, Moon, Sun, planets.

REFERENCES

1. Krutko P. D., Maksimov A. I. & Skvortsov L. M. Automated system engineering algorithms and programs. Moscow, Radio and Communication, 1989, 306 p. [In Russian].
2. Laplace P.S. Exposition du Système du Monde. Fayard, Paris, 1984, 376 p.
3. Melnikov V. P., Smulskii I. I. & Smul'skii Ya. I. Compound modeling of earth rotation and possible implications for interaction of continents. *Russian Geology and Geophysics*, 2008, no. 49, pp. 851-858.
4. Melnikov V. P., Smulsky J. J. Astronomical theory of ice ages: New approximations. Solutions and challenges. Novosibirsk, Academic Publishing House, 2009, URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/AsThAnE.pdf>.
5. Milankovich M. Mathematical climatology and the astronomical theory of climate change. Moscow, Gonti, 1939, 207 p. [In Russian].
6. Sidorenkov N.S. Earth rotation instabilities. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2004, no. 74 (8), pp. 701-709.
7. Smulsky J.J. The theory of interaction. Novosibirsk, Publishing house of Novosibirsk University, 1999, 294 p. [In Russian], URL: http://www.ikz.ru/~smulski/TVfulA5_2.pdf.
8. Smulsky J.J. The New Geometry of Orbits Evolution. In: Proceeding of The Joint International Scientific Conference "New Geometry of Nature", August 25 - September 5, 2003, Kazan State University, 2003, pp. 192-195, URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/smull/Russian1/IntSunSyst/NeGeEv2.doc>.
9. Smulsky J.J. A mathematical model of the solar system. In: The theoretical and applied tasks of the nonlinear analysis. Moscow, Russian Academy of Sciences, 2007, pp. 119-138. [In Russian], URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/MatMdSS5.pdf>.
10. Smulsky J.J. Actual Mathematical Problems and Thorny Way of Science. *The Way of Science. International scientific journal*, 2015, no. 10 (20), pp. 10-38, URL: <http://scienceway.ru/arhiv>.
11. Smulsky J.J. New results on the Earth insolation and their correlation with the Late Pleistocene paleoclimate of West Siberia. *Russian Geology and Geophysics*, 2016, no. 57, pp. 1099-1110, URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2016.06.009>.
12. Smulsky J.J. Evolution of the Earth's axis and paleoclimate for 200 thousands years. Saarbrücken, GR, LAP Lambert Academic Publishing, 2016, 228 p. [In Russian], URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/InfEvEAPC02MEn.pdf>.
13. Smulsky J.J. New Astronomical Theory of Ice Ages. "LAP LAMBERT Academic Publishing", Riga, Latvia, 2018, 132 p. [In Russian], ISBN 978-613-9-86853-7, URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/InfNwATLPEn.pdf>.

14. Smulsky J.J., Sechenov K.E. Equations of the earth's rotational motion and their solutions with regard to action of the sun and the planets. 2007, 35 p. [In Russian], Deposited in VINITI 02.05.07, no. 492-V2007, URL: <http://www.ikz.ru/~smulski/Papers/UVrVzSPc.pdf>.
15. Duboshin G. N. (Editor). Celestial Mechanics and Astrodynamics: A Handbook. Moscow, Nauka, 1976, 864 p. [In Russian].
16. Ephemeris Astronomy, Transactions. St. Petersburg: Institute of Applied Astronomy, 2004, no. 10, 488 p.
17. Hairer E., Nersett S. & Vanner G. Solving ordinary differential equations. Moscow, Mir, 1990, 513 p. [In Russian].
18. Sharaf Sh. G., Budnikova N.A.. Secular changes in the orbital elements of Earth and the astronomical theory of climate change. In: Trans. Inst. Theor. Astron., Issue XIV, L: Nauka, 1969, pp. 48-109. [In Russian].
19. Bretagnon P., Rocher P. and Simon J.L. Theory of the rotation of the rigid Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 1997, vol. 319, pp. 305–317.
20. Bretagnon P., Simon J.L. Towards the construction of a new precession-nutation theory of nonrigid Earth. *Celest. Mech & Dyn. Astr*, 2001, vol. 80, pp. 177–184.
21. Laskar J., Robutel P., Joutel F., Gastineau M., Correia A.C.M., Levrard B. A Long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astron. and Astrophys*, 2004, vol. 428, pp. 261-285.
22. Mathews P.M., Bretagnon P. Polar motions equivalent to high frequency nutations for a nonrigid Earth with anelastic mantle. *Astronomy & Astrophysics*, 2003, vol. 400, pp. 1113-1128.
23. Newcomb S. The elements of the four inner planets and the fundamental constants of astronomy. Washington, Government printing office, 1895, 202 p.
24. Quinn T. R., Tremaine S., Duncan M. A three million year integration of the Earth's orbit. *Astronomical Journal*, 1991, vol. 101, pp. 2287-2305.
25. Simon J.L., Bretagnon P., Chapront J., Chapront-Touze M., Francou G., & Laskar J. Numerical Expression for Precession Formulae and Mean Elements for the Moon and the Planets. *Astron. and Astrophys*, 1994, vol. 282, pp. 663-683.
26. Smulsky J.J. The Influence of the Planets, Sun and Moon on the Evolution of the Earth's Axis. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2011, no. 1, pp. 117-134, URL: <http://dx.doi.org/10.4236/ijaa.2011.13017>.
27. Smulsky J.J. Galactica Software for Solving Gravitational Interaction Problems. *Applied Physics Research*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 110-123, URL: <http://dx.doi.org/10.5539/apr.v4n2p110>.
28. Smulsky J.J. Fundamental Principles and Results of a New Astronomic Theory of Climate Change. *Advances in Astrophysics*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 1-21, URL: <http://www.isaacpub.org>, <http://www.isaacpub.org/Journal/AdAp>.
29. Smulsky J.J. Future Space Problems and Their Solutions. Nova Science Publishers, New York, 2018, 269 p., ISBN: 978-1-53613-739-2, URL: <https://novapublishers.com/shop/future-space-problems-and-their-solution>.
30. Smulsky J.J., Smulsky Ya.J. Dynamic Problems of the Planets and Asteroids, and Their Discussion. *International Journal of Astronomy and Astrophysics*, 2012, no. 2, pp. 129-155, URL: <http://dx.doi.org/10.4236/ijaa.2012.23018>.

Преамбула.

1. Моя статья “Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет” 15.11.2017 г. была направлена в журнал «Астрономический вестник».

29 января 2019 г. я получил следующий ответ из редакции «Астрономического вестника»:

“Добрый день, Иосиф Иосифович!

Ваша статья "Эволюция вращательного движения..." была рассмотрена на заседании редколлегии от 22.01.2019 г. и отклонена на основании отзыва.

С уважением

Зав. редакцией журнала "Solar System Research" ("Астрономический вестник")

Лубнина Татьяна Дмитриевна.

Отзыв о статье И.И. Смутьского

“ЭВОЛЮЦИЯ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЗЕМЛИ ЗА МИЛЛИОНЫ ЛЕТ”

В рецензируемой статье описаны результаты численного моделирования изменений наклона оси и других параметров вращения Земли на длительных интервалах времени. Следует отметить, что основной результат, сформулированный в работе (о том, что долговременные колебания оси вращения Земли имеют амплитуду в 7-8 раз больше чем согласно общепринятым данным других авторов), уже опубликован автором (J.J. Smulsky, “New results on the Earth insolation and their correlation with the Late Pleistocene paleoclimate of West Siberia” Russian Geology and Geophysics, Volume 57, Issue 7, Pages 1099-1110 (2016)). Поэтому рецензируемая статья не может быть рекомендована к публикации в Астрономическом вестнике.

Также необходимо отметить, что указанный вывод нельзя считать обоснованным. Автор не локализует четко предполагаемую ошибку предшественников. В статье утверждается, что предшественники “решали упрощенную задачу”, однако сравнение постановок задачи в рецензируемой работе и в уже ставшей классической (около тысячи цитирований) статье Ласкара и др. (Astron. Astrophys. 428, 261–285 (2004); в рецензируемой статье дана неверная ссылка) показывает, что упрощенной является, наоборот, задача, решаемая автором. Коль скоро автор считает, что работа Ласкара и др. грубо ошибочна, естественно было бы направить комментарий к этой статье для публикации в Astronomy and Astrophysics, где она была напечатана.”

Это решение редакции окончательное и обжалованию не подлежит. Поэтому 4 февраля 2019 г. я направил письмо со своими аргументами третьей стороне.

Отделение математики РАН:
академику В.В. Козлову,
академику Б.С. Кашину,
чл.-корр. В.А. Гущину

Главному редактору журнала
“Астрономический вестник”
академику М.Я. Марову

Глубокоуважаемые коллеги:

Валерий Васильевич,

Борис Сергеевич,

Валентин Анатольевич!

Мировая наука находится в кризисе: вместо знаний о мире она плодит заблуждения. И чем более они экстравагантнее, тем больший у них рейтинг. Нет доверия общества к результатам такой науки.

Эта наука создала неопределимый барьер для ее критики, и тем самым законсервировала себя в своих заблуждениях. Как говорят западные исследователи, неконвенциональные работы не публикуют Мейнстрим-журналы.

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

В науке потеряно представление об истине и доказательстве. В ней воцарилась ложь и обман. Из науки эта парочка перекечала в общество. И теперь, даже на межгосударственном уровне ложь, обман и клевета правит миром.

Отечественная наука следует в фарватере мировой, где-то на ее задворках. Одни ученые в своих выступлениях сетуют, что кризис обусловлен недостатком финансирования. Другие считают, что кризис усугубляется неквалифицированными действиями руководства страны. Нет, кризис – в другом, а действия руководства соответствуют разумению, которое создано самой Мейнстрим-наукой.

Чтобы это все исправить, нужно начинать с науки. Каждый может внести свою лепту, и мир будет становиться лучше. Ложь в науке происходит здесь, рядом с нами. В этом письме приведен один из таких случаев. Можно пройти мимо. А можно вмешаться и предотвратить. Каждый из нас может внести свою лепту, и мир будет становиться лучше!

Есть важная статья (прилагаемый файл EVDZ02_1.pdf) и отрицательный отзыв на нее (см. выше). Результаты в статье получены с помощью математики. Кто, если не математики, может сказать, плоха или хороша статья?

Математика – тоже разная. В статье – математика, основы которой создали Эвклид, К. Птолемей, И. Ньютон, Л. Эйлер, П.-С. Лаплас и др.

Глубокоуважаемый Михаил Яковлевич!

В Ваш журнал “Астрономический вестник” 20.11.2017 г. поступила моя статья “Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет”, а 29.01.2019г. я получил первое извещение о ней: это Ваше решение от 22.01.2019 г. об отклонении статьи на основании отзыва.

Этот отзыв после года и 2-х месяцев рассмотрения статьи приведен выше.

Моя статья (прилагаемый файл EVDZ02_1.pdf) объемом ~1.5 п.л. (16000 слов) содержит 17 рисунков, 92 формулы и 2 приложения.

Вас не удивляет этот короткий отзыв в виде отписки на такую основательную статью после 1 года и 2-х месяцев её рассмотрения?

Меня не удивляет, потому что это обманный и лживый отзыв, изготовленный специально для отклонения статьи.

О чем моя статья? В статье рассмотрена и решена самая сложная задача как небесной, так и теоретической механики. Это самая сложная задача современной науки (если кто-то не согласен, пусть мне об этом сообщит), и она решена в этой статье! Уровень решения этой задачи, анализа её результатов и их оформления представлен в статье, и каждый может убедиться: он очень высокий! Кто с этим не согласен, пусть мне также сообщит.

Я повторно прошу сообщить мне отрицательное мнение о моей работе, потому что ни об одной своей работе, ни от кого я не слышал отрицательных мнений, за исключением таких обманных отзывов, как этот, когда имя рецензента скрыто. К сожалению, таковы реалии современной науки, которые создают условия, чтобы ученый, инкогнито, мог безбоязненно лгать и обманывать, и забыть о святом предназначении науки: истине и доказательстве. Но с Главного редактора ответственность не снимается: за ложь и обман в журнале он несет полную ответственность.

О содержании статьи можно судить по названию её основных параграфов:

1. Введение.
 2. Теорема моментов.
 3. Дифференциальные уравнения вращательного движения.
 4. Константы уравнений и начальные условия.
 5. Результаты интегрирования дифференциальных уравнений.
 6. Изменение параметров вращательного движения Земли относительно подвижной орбиты Земли.
 7. Эволюция параметров вращательного движения Земли за миллионы лет.
 8. Особенности эволюции вращательного движения Земли.
 9. Колебания угловой скорости собственного вращения Земли.
 10. Доказательства достоверности решения задачи о вращении Земли.
- Благодарности.

Заключение.

Список литературы.

Приложение 1. Определение начальных условий.

Приложение 2. Переход от параметров оси Земли ψ и θ относительно неподвижной эклиптики к параметрам ϵ и φ_{py} относительно подвижной эклиптики.

Во Введении, кратко и по существу, изложено состояние проблемы, её история, прежние методы решения, их недостатки, и как эти недостатки преодолеваются, и какие методы применяются, чтобы решить эту задачу. Содержание остальных параграфов каждый может посмотреть в статье.

Остановлюсь только на главном отличии моего решения от решений предшественников. Они отбрасывали вторые производные в дифференциальных уравнениях вращательного движения в задаче о вращении Земли за большие интервалы времени. Что это значит? Это идентично тому, если в дифференциальных уравнениях поступательного движения отбросить вторые производные. То есть отбросить силу. Тогда тела совершают равномерные и прямолинейные движения.

Во вращательном движении при отброшенных вторых производных происходят более сложные движения, чем при поступательном. Но это не те движения, которые происходят в действительности. Например, ось Земли испытывает короткопериодические колебания. При отброшенных производных они отсутствуют.

При моем неупрощенном решении задачи все короткопериодические колебания оси Земли получены, и они совпали с наблюдениями, как по частоте, так и амплитуде.

Как я уже отметил, это проблема – сложная проблема современной науки. Для решения этой задачи необходимо решить ряд дополнительных проблем. Это сложные геометрические и математические задачи. Они решены аналитически и их результаты приведены в этой статье. Решение этих проблем является дальнейшим развитием небесной механики.

Может эта задача о вращении Земли – никчемная и никому не нужна? Нет, она очень важна для понимания многих процессов, происходящих на Земле и в космосе. От положения оси вращения Земли по отношению к плоскости орбиты зависит освещение Земли Солнцем. Полученные решения об эволюции оси Земли за 20 млн. лет позволили определить эволюцию количества тепла по поверхности Земли за такой же период времени. Колебания этого тепла совпали с эпохами наступления ледниковых периодов и эпохами потеплений между ними. Таким образом, созданная мной новая Астрономическая теория климата, объяснила причину потеплений и похолоданий, имевших место на Земле, в то время как прежняя не объясняла их и им противоречила.

Существует масса вопросов, связанных со строением Земли. Все её физические модели зависят от эволюции её полюсов. В течение сотни лет ведутся их наблюдения, а понимание причины нет. Полюс Земли – это точка пересечения оси вращения Земли её поверхности. Движение оси в работе исследованы с высокой детальностью, в том числе её траектория при различных осреднениях, а также колебания периодичности вращательного движения. Эти движения надежно установлены, и можно отбросить все предположительные и гипотетические модели. Вычтя из движения полюсов движения оси Земли, мы получим чистые движения самой поверхности Земли. Это позволяет создавать адекватные модели физического строения Земли.

Вся технология решения этой сложной задачи компактно представлена в статье. Она позволит исследователям решить проблемы по вращению других планет, в частности Марса. Астрономическая теория изменения климата Марса покажет, почему на нем остались следы деятельности воды, и когда это происходило. От вращения Солнца зависит ряд процессов на Земле, в том числе короткопериодические изменения климата и погода. Решение задачи об эволюции вращательного движения Солнца позволит определить эволюцию соответствующих процессов.

А теперь вернемся к Отзыву.

1. В первом пункте сообщается, что основной результат о больших колебаниях оси Земли опубликован в журнале “Геология и Геофизика” в статье по корреляции новой инсоляции Земли с палеоклиматом. Поэтому статья не рекомендуется для публикации в Астрономическом вестнике.

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

В рассматриваемой статье “Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет” решена сложная задача современной науки и никакой её частный использованный результат никаким образом не отменяет публикацию решения этой задачи. Наоборот, успешный эффект от этого результата требует незамедлительной публикации решения этой задачи.

Это первая ложь и обман рецензента.

2. В отзыве говорится, что вывод о больших колебаниях нельзя считать обоснованным. А это как понять? В первом пункте сообщается, что статья не представляет интереса для публикации, так как уже все известно, а тут оказывается вывод – не обоснованный! С логикой то все в порядке у рецензента?

Это вторая ложь и обман. Она является следствием первой лжи. Таков закон лжи, она проявляется множество раз: шила в мешке не утаишь, - говорят в народе.

3. Далее в отзыве сообщается, что автор не локализует четко предполагаемую ошибку предшественников. Это неверно. Об ошибке, все с повышающей степенью детализации, объяснятся во Введении и других параграфах. А в параграфе 8 имеется даже пункт 8.3. Физическое отличие прежней и новой теории эволюции оси вращения Земли.

Это третья ложь и обман рецензента.

4. Далее в отзыве говорится, что сравнение постановок показывает, что, наоборот, упрощенной является задача, решаемая автором.

Это главная ошибка статьи! Как можно говорить о такой ошибке без всяких доказательств?!

Это четвертая ложь и обман рецензента.

5. Далее рецензент советует о грубой ошибке Дж. Ляскара дать комментарий к его статье в журнале *Astronomy and Astrophysics*.

Видимо. Рецензент при изготовлении своего отзыва почувствовал свое величие и позволил себе снобистскую издевку.

Если мою статью в отечественном журнале с такой легкостью отклоняют, то в зарубежном от комментария российского автора об ошибке маэстро еще с большей легкостью отмахнутся.

Тем не менее, мысль о комментарии не безнадежна. Если рецензент покается в своих преступлениях (покаянных и убогих у нас прощают), и мою статью опубликуют, то рецензент по материалам статьи сам сможет дать такой комментарий. Он получит не как Дж. Ляскар, 1000 цитирований, а несколько тысяч.

Дело не в Дж. Ляскаре и его многочисленных учениках. Им много сделано в науке. Но сделано на тех основаниях, которые были до него. Во Введении моей статьи эта ситуация описана. Задача о вращении Земли последовательно рассматривалась Ньютоном, Лапласом, Эйлером и др., и шло её развитие. В 20-ом веке развития её не было. И в 21 веке я продвинул её решение, начиная с вывода уравнений и заканчивая её решением за 20 млн. лет.

Итак, Михаил Яковлевич, Ваше решение отклонить статью основано на четырех ложных и обманных положениях отзыва. Мне, кажется, любой исследователь увидит ложь и фальшь Отзыва даже без моих разъяснений.

Это третья моя статья, которую Вы отклонили. В 2007г. также необоснованно были отклонены статьи “Эволюция орбиты Марса в течение 100 млн. лет, сопоставление и стабильность Солнечной Системы” и “Прецессия и нутация оси вращения Земли под воздействием Солнца и планет”. Если бы они были опубликованы, то ссылок на них было бы не меньше, чем у Дж. Ляскара.

Эти статьи, как и первая, дают знания о том, как устроен наш мир. Например, в статье по эволюции орбиты Марса показана стабильность Солнечной системы, в то время как у других авторов, в том числе у Дж. Ляскара, в Солнечной системе наступает хаос.

Как расценивать такую деятельность журнала и его главного редактора? Может, Вы даже не осознаете, и не понимаете. Так поступали Ваши учителя, так поступают Ваши коллеги. Нет ничего здесь страшного!

Отнюдь, не так. Общество выделяет средства для науки, чтобы она получала знания о мире и прокладывала путь его дальнейшего развития. Но эти средства используются для других целей. Эти цели – обслуживать интересы узкого круга людей, связанных с журналом. В угоду этим целям

устанавливаются препятствия, чтобы полученные исследователем знания не достигали общества, если он не принадлежит к этому кругу.

Такая деятельность является преступной.

С уважением

04.02.2019 г.

И.И. Смульский

625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,
г.н.с., д. ф.-м. н., профессор Смульский Иосиф Иосифович

http://samlib.ru/s/smulxskij_i_i/;
<http://www.ikz.ru/~smulski/smul1/>

От третьей стороны, которой направлялось вышеприведенное письмо, я не получил ответа.

2. Эту статью 10.04.2019 г. я направил в журнал "Физика Земли".

14 августа 2019 я получил следующий ответ.

"Уважаемый Иосиф Иосифович!

Высылаю Вам на доработку рецензию на Вашу статью "Эволюция вращательного движения...". Просьба также учесть замечание куратора статьи (я приведу отрывок из его заключения): "...беспокоит большой объем статьи, просьба к автору, по возможности, несколько сократить текст и число рисунков (например, возможно сослаться на опубликованные работы, где есть материал, изложенный в Приложении)".

Просьба вместе с исправленной статьей прислать ответы рецензенту и куратору.

С уважением. Зав.редакцией Стороженко Людмила Львовна".

Рецензия на статью

«Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет»

автор Смульский И.И.

Статья посвящена исследованию вращательного движения Земли на длительных интервалах времени (до 100 миллионов лет). Статья состоит из введения, десяти пунктов, заключения и списка использованных источников из тридцати наименований.

Из положительных моментов следует отметить, что задача рассматривается с учётом нелинейных членов в уравнениях вращения. Уравнения вращения Земли решаются методом численного интегрирования. Получено решение, приведены графические иллюстрации, на которых изображены изменения во времени различных параметров вращения.

Однако, следует сделать несколько критических замечаний.

Прежде всего, в статье четко не указана и не описана модель Земли, для которой решается задача. Так, в начале статьи, говорится об изменениях моментов инерции со временем, различных эффектах, связанных с оледенениями и других. Однако, затем выписываются основные уравнения (4) - (7) из которых следует, что решается задача для невязкой и недеформируемой модели Земли в которой вся Земля моделируется твердым телом.

Кроме того, следует развеять заблуждение автора о том, что центробежные моменты инерции в имеющихся теориях опускают. Это не так: в современных теориях считают, что при отсутствии приливных сил (в невозмущённом состоянии) центробежные моменты равны нулю. А при наложении приливного воздействия возникают малые отклонения от равновесных значений, которые приближённо могут быть выражены через так называемый вектор наклона. Вектор наклона наряду с угловой скоростью входит в уравнения вращения современных теорий и именно он отвечает за изменение моментов инерции со временем.

Модель твёрдой недеформируемой модели Земли является слишком грубым приближением к реальной Земле, чтобы можно было серьёзно говорить о применимости результатов, полученных в рамках этой модели к реальной Земле на таких больших интервалах времени. Тем не менее, автор пишет о том, что его результаты хорошо согласуются с экспериментом и дополняют астрономическую теорию палеоизменений климата Миланковича. На самом деле, теория Миланковича объясняет палеоизменения климата изменением геометрии и положения орбиты Земли вокруг Солнца, которое действительно может приводить к изменениям суммарного потока солнечной энергии, получаемой Землей от Солнца (при изменении параметров вращения этого нет). Кроме того, известно, что теория Миланковича не может объяснить

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

главной части наблюдаемых изменений палеоклимата, что заставляет искать другие факторы. Следует также отметить что, если наложить кривую изменения угла наклона оси вращения Земли к эклиптике из статьи на график палеоизменений средней температуры Земли, то никакой заметной корреляции обнаружить не удастся.

Таким образом, в текущем варианте статья не может быть опубликована и нуждается либо в переработке, либо в решении задачи в рамках другой модели Земли. Переработка может быть произведена в следующем ключе. Автор не будет претендовать на описание вращения Земли на длительных интервалах времени, а только лишь на совершенствование метода численного интегрирования уравнений вращения с учётом нелинейных членов в уравнениях вращения, который он в будущем планирует использовать для изучения вращения Земли на длительных интервалах времени. В качестве пробной модельной задачи он применяет свой метод к задаче о вращении твёрдой Земли и сравнивая свои результаты с предшественниками доказывает, что его метод работает и что он даёт новые интересные и достоверные результаты. На дальнейшее, он планирует выписать систему уравнений более подходящую для реальной Земли (как минимум, мантию с жидким ядром и как-то учитывать изменение моментов инерции из-за глобальных оледенений/потеплений), которую планирует решать с помощью разработанного им метода численного интегрирования. Что же касается изменений палеоклимата, то здесь задача обратная: автору придётся учитывать изменение моментов инерции Земли на основе данных о ледниковых и межледниковых периодах, а не объяснять возникновение этих периодов изменением параметров вращения Земли.

18 августа 2019 я отправил в журнал “Физика Земли” следующий ответ.

Ответ на Рецензию статьи

«Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет»

Смульский И.И.

Задача о вращательном движении Земли сформировалась в результате трудов Ньютона, Эйлера и Лапласа. Дифференциальные уравнения второго порядка за счет пренебрежения вторых производных сведены к дифференциальным уравнениям первого порядка, которые были решены приближенными аналитическими методами. Эти решения не содержат короткопериодических колебаний оси Земли, а основные долгопериодические колебания имели период 41 тыс. лет.

В 20-м веке эта проблема не решалась. Чтобы получить короткопериодические колебания начали создавать различные модели Земли: трехосной Земли, нежесткой Земли и т.д., а прежнюю задачу обозвали моделью жесткой Земли.

Однако эта задача, по существу не была решена, т.е. дифференциальные уравнения второго порядка не были проинтегрированы. Я эту задачу решил и получил все колебания оси Земли: и короткопериодические и долгопериодические. Короткопериодические с периодом 18.6 лет доступны наблюдениям. Наблюдаемые колебания такие, как я получил в решениях. Совпадают с наблюдениями и другие параметры вращательного движения.

Таким образом, полученные мной решения полностью определяют вращательное движение Земли. Поэтому отпадает необходимость в изобретении различных моделей Земли: трехосной, вязкой, с мантией и ядром и т.д.

К сожалению, рецензент поверхностно познакомился со статьей. Из рецензии видно, что он сторонник создания различных моделей Земли, по его мнению, могущих уточнить ее вращательное движение за счет разных моделей строения Земли, учета льда ледниковых периодов и т.д.

Рецензент предлагает автору решить задачу о вращении Земли за короткие интервалы времени, сравнить свои результаты с предшественниками, доказать их достоверность и показать, что они интересные. Именно это имеется в статье, наряду с результатами и за большие интервалы времени.

Рецензент также поверхностно представляет Астрономическую теорию изменения климата, поэтому его Рецензия содержит ряд ошибочных умозаключений.

Распределение солнечного тепла по широте Земли зависит от трех параметров: эксцентриситета орбиты Земли, угла перигелия, отсчитываемого от дня равноденствия, и угла между плоскостями орбиты и экватора Земли. Эволюция последних двух параметров может быть

получена в результате решения двух задач: орбитальной задачи и задачи о вращении Земли. До меня последняя задача не была решена, поэтому прежняя Астрономическая теория изменения климата давала неверные результаты. Созданная мной, новая Астрономическая теория изменения климата, дает результаты, которые полностью совпадают с надежно установленными изменениями палеоклимата за последние 50 тыс. лет. Таким образом, колебания параметров орбитального и вращательного движений Земли являются причиной изменения палеоклимата.

Поэтому нет необходимости, как предлагает рецензент, создавать модели Земли с учетом изменения палеоклимата. Более того, отпадает необходимость изобретения различных моделей Земли, так как цели, для которых они создавались, достигнуты.

Наоборот новые результаты по вращению Земли, в частности по колебаниям ее периода вращения, помогут выяснить ее реальное строение.

Как я уже отмечал, в Рецензии имеется множество ошибочных умозаключений. Так рецензент не увидел корреляции между углом наклона и средней температурой Земли. Средняя температура Земли точно не определена даже в современную эпоху, а назначена в рамках стандартной атмосферы. Что касается изменения температуры за прошлые эпохи, то их имеется столько, сколько существует гипотез о связи палеопараметров со средней температурой. Это с одной стороны. А с другой, за счет изменения параметров орбитального и вращательного движения изменяется распределение тепла по широте Земли, а общее количество тепла, поступающего на Землю, остается неизменным. Следовательно, не изменяется и средняя температура Земли.

Из этого примера видно, что рецензент имеет поверхностное и диффузное представление об окружающем мире, навеянное различными гипотетическими построениями о нем, которыми переполнена современная наука. Досадно, что таким рецензентам доверяется оценка работы, в которой строгими методами теоретической и небесной механик получены результаты, которые показывают, как на самом деле устроен наш мир.

Этот текст моего ответа повторяет сведения, имеющиеся в рассматриваемой статье. В ней имеются доказательства использованных аргументов, ссылки на мои работы, где приведены результаты и установлена их достоверность. Но, как я уже отметил, рецензент познакомился со статьей поверхностно, что и стало причиной ошибочности его Рецензии.

Ответ куратору статьи

Я согласен с куратором статьи, статья, действительно, большая. Я еще раз прочитал ее с целью сокращения статьи. Есть некоторые иллюстрации, например, рис. 2, рис. 4 и рис. 11 с системами координат, которые имеются в других моих работах. К этим рисункам идет обращение на всем протяжении статьи. На других иллюстрациях представлены графики результатов за определенный период времени. Если их убрать, то весь этот период времени выпадает из статьи. Материал в Приложениях нигде не опубликован. А он уникален. Без него невозможно решить задачу и получить представленные в статье результаты.

В статье изложена проблема, к решению которой человечество шло 300 лет. Она решалась мной на протяжении нескольких десятилетий. Статьи по отдельным этапам направлялись в журналы, в том числе и в “Физику Земли”, но были отклонены. Материал по этой проблеме огромен, и при благоприятных обстоятельствах она была бы опубликована в десятках статей. В настоящей статье этот материал я представил в конспективном виде и так, чтобы он охватил основные стороны проблемы и был понятен широкому кругу исследователей. Остальная детализация имеется в моих работах, которые доступны, и ссылки на которые имеются в статье. Все это, в совокупности, позволит пытливому исследователю осознанно использовать результаты работы в своей области, может повторить решение этой проблемы, или решить ее для другой планеты, например для Марса.

Рассчитываю, что куратор статьи учтет мои аргументы и примет решение опубликовать статью в ее теперешнем объеме.

Файлом EVDZ02_3tx.doc высылаю текст статьи, в котором исправлены замеченные мной грамматические ошибки.

05.02.2020 г. из редакции журнала “Физика Земли” я получил следующее письмо.

“Уважаемый автор!”

Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет

Ваша статья «Эволюция вращательного движения Земли ...» рассмотрена редколлегией журнала «Физика Земли».

Статья посвящена решению ряда актуальных задач астрономии и небесной механики – построению системы уравнений, описывающих особенности вращательного движения Земли. Эта тема относится к исследованиям в области астрономии. Связь полученных автором результатов с проблемами физики Земли в статье не раскрыта. На этом основании редколлегия приняла решение отклонить статью, как не соответствующую тематике журнала «Физика Земли».

Мой комментарий. С момента подачи статьи 10.04.2019 г. прошло 10 месяцев. Они позволили, редколлегии журнала убедиться, что статья не соответствует тематике журнала по физике Земли.

Я считаю, что, скорее, журнал не соответствует этой тематике, чем моя статья.

А может, я ошибаюсь? Если да, прошу мне сообщить.

Ссылаться на статью на русском и английском языках так:

Смульский И.И. Эволюция вращательного движения Земли за миллионы лет // Сложные системы. 2020. № 1 (34). С. 4-49. <https://thecomplexsystems.ru/archive/>.

Smulsky J.J. The Evolution of the Earth's Rotational Movement for Millions Years // The Complex Systems. 2020, № 1 (7), 3-42.