

О модели свободной нутации и закономерностях процесса изменения широт

Ю. Н. Авсюк

Объединенный институт физики Земли РАН

И. А. Герасимов

Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга

Аннотация. Перемещение оси вращения в теле Земли установлено астрономами в конце прошлого века по материалам наблюдений за изменением широт (ИШ). Наблюдение за ходом этого процесса во времени ведет сеть обсерваторий; накоплен большой массив данных, установлены основные закономерности хода ИШ, начало которым положили исследования С. Чандлера (1891 г.). Положение дел с модельным объяснением ИШ на настоящий момент нельзя считать удовлетворительным [Runcorn et al., 1988]. Сложившаяся ситуация с противоречиями между собранной эмпирикой и реконструкцией процесса ИШ в рамках модели свободной нутации имеет объяснение, которое изложено в настоящей статье.

1. Введение

Факт изменения широты обсерватории со временем установил Кюстнер в Берлине в 1884 г. То, что этот процесс глобальный и что он обусловлен перемещением оси вращения в теле Земли было выяснено при синхронных определениях широт обсерваторий Берлина и Гонолулу в 1891 г., проведение которых было стимулировано Международной геодезической ассоциацией.

В 1891 г. С. Чандлер опубликовал эмпирическое описание временного хода вариаций широты. Согласно его описанию (которое сохраняет свою достоверность и в настоящее время) график изменения широт представляет собой кривую, являющуюся результирующей двух гармоник. Одна из них имеет период в 365 суток (т.е. год) и амплитуду, меняющуюся в диапазоне $0''.04-0''.2$. Другая имеет период 400–440 суток и амплитуду $0''.12$. Последующее непрерывное слежение за движением оси вращения в теле Земли или, что одно и то же, за движением географического полюса осуществляется несколькими обсерваториями, расположенными на одной параллели (39°). Движение полюса происходит всегда по прямому движению светил, размер траектории то

возрастает, то уменьшается с периодичностью 6–7 лет. Подробное описание методики и результатов наблюдений за процессом изменчивости широт можно найти в монографиях, например, в [Куликов, 1962; Манк, Макдональд, 1964].

В статье [Runcorn et al., 1988], посвященной 100-летию опубликования С. Чандлером эмпирического описания процесса изменчивости широт, ведущие астрометристы Европы и Америки, занимающиеся исследованиями процесса изменчивости широт, констатируют отсутствие какого-либо прогресса в понимании механизма возбуждения и демпфирования изменения положения оси вращения. Естественен вопрос, а почему вообще возник разговор о возбуждении и демпфировании. Если посмотреть на график изменения x и y координат полюса, построенный по материалам службы широт (см. рис. 1), то никаких признаков импульсного возбуждения и последующего затухания в них не обнаруживается. Более того, дискуссия о затухании не имеет смысла, если изменение амплитуды является сложением нескольких гармоник, имеющих разную периодичность.

Поэтому очевидно, что разговор о возбуждении и демпфировании никак не вытекает из собранной эмпирики, он является следствием модельного предположения о том, что процесс изменчивости широт является свободной нутацией оси вращения Земли. Для этой модели требуется как импульсное возбуждение, так и последующее затухание, которые наблюдениями не зарегистрированы.

©1999 Российский журнал наук о Земле.

Статья N RJE99028.

Онлайновая версия этой статьи опубликована 15 декабря 1999.
URL: <http://eos.wdcb.rssi.ru/rjes/RJE99028/RJE99028.htm>

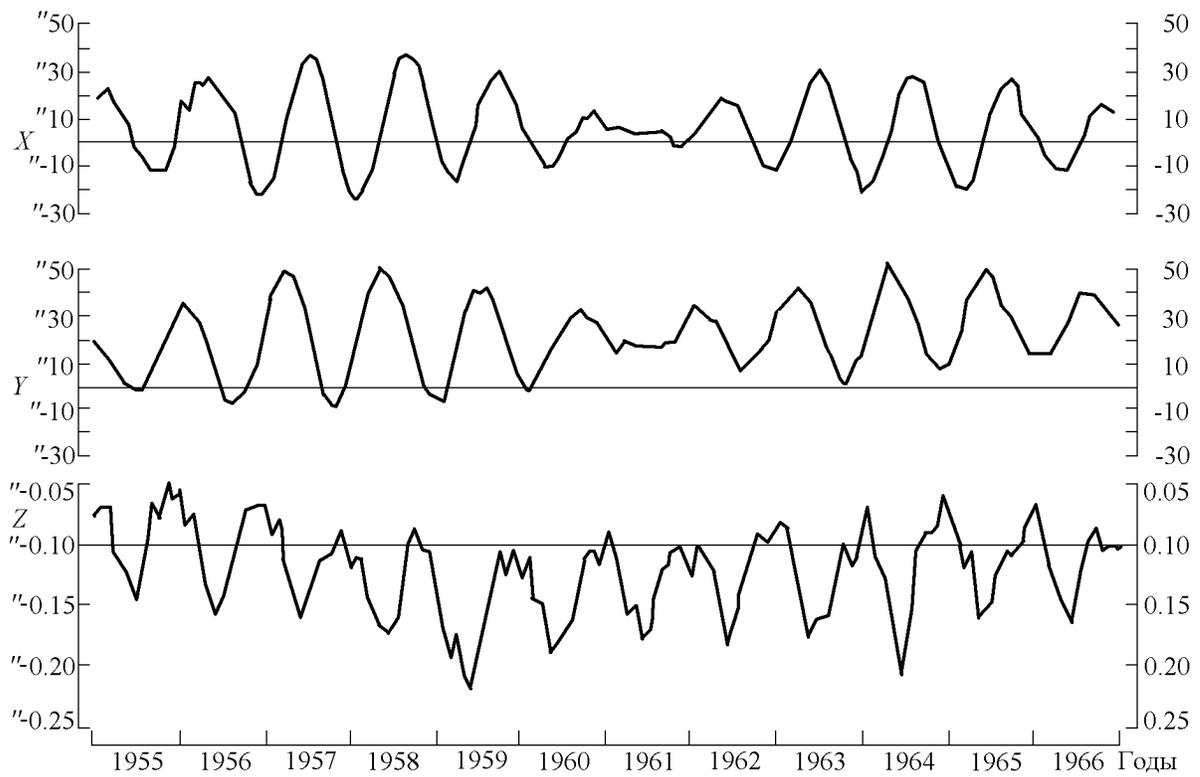


Рис. 1. Вариации координат полюса x, y, z за период 1955–1966 гг.

2. Предпосылки начала дискуссии о свободной нутации

Проанализируем, как и почему была выдвинута гипотеза о наличии у Земли режима свободной нутации оси вращения. То, что у вращающегося твердого тела ось вращения может находиться в режиме вынужденной прецессии и нутации при наличии внешнего воздействия, а при его отсутствии может реализоваться свободная нутация, — эти положения имеют строгое обоснование в классической механике твердого тела, основы которой заложены трудами Л. Эйлера, и не требуют обсуждения. Необходимо обсудить ситуацию, почему еще до сбора эмпирики по ИШ было высказано предположение, что у Земли, у которой регистрируются вынужденные прецессия и нутация, может наблюдаться в чистом виде также и свободная нутация.

Это предположение в 60–70-х гг. XIX века высказал Кельвин (тогда еще У. Томсон), который имел острую полемику с геологами по поводу возраста Земли. В дискуссии о возрасте присутствовал вопрос об агрегатном состоянии Земли. Кельвин

утверждал, что Земля твердая. Геологи придерживались контракционной гипотезы, считая Землю жидкой, расплавленной, покрытой тонкой оболочкой, которая по мере остывания деформировалась, что и запечатлелось в горных сооружениях. Опуская детали этой дискуссии, отметим только, что каждая из сторон искала в природных процессах подтверждение своей точки зрения. Эта дискуссия в определенной мере стимулировала постановку геофизических исследований, инициатором которых был Кельвин. Была разработана теория приливных деформаций Земли, был поставлен вопрос о свободной нутации.

Несколько слов о том, что представляет собой режим свободной нутации. Кинетическая энергия вращающегося тела K при отсутствии внешнего воздействия есть величина постоянная. Она может быть представлена как скалярное произведение векторов момента количества движения осевого вращения \bar{L} и угловой скорости $\bar{\omega}$, т.е.

$$K = \frac{\bar{L}\bar{\omega}}{2} = const. \quad (1)$$

Скалярное произведение векторов \bar{L} и $\bar{\omega}$ остается по-

стоянным при движении $\overline{\omega}$ по конусу относительно \overline{L} , т.е. ось вращения может изменять свое положение.

У твердого тела рассогласование в начальный момент векторов \overline{L} и $\overline{\omega}$ будет сохраняться, поэтому будет наблюдаться движение оси вращения, заданное начальными условиями и называемое свободной нутацией. У жидкого тела рассогласование \overline{L} и $\overline{\omega}$ не реализуемо из-за текучести жидкости.

Таким образом, предположение о наличии свободной нутации оси вращения Земли – это аргумент (при его подтверждении наблюдениями) в пользу точки зрения Кельвина о том, что Земля твердая. При этом вопрос о возможности одновременной реализации как вынужденной прецессии и нутации, так и свободной нутации оставлен без ответа. Возникает вопрос, по какой количественной характеристике может быть выявлено явление свободной нутации. Одного качественного признака, а именно перемещения оси вращения в исследуемом теле, недостаточно. Должен быть количественный критерий, который должен согласовываться с другими измеренными параметрами исследуемого тела. То есть период свободной нутации должен предвычисляться (так же, как период свободных колебаний маятника), даже если не представляется возможности его непосредственной регистрации.

Л. Эйлером было получено точное решение уравнений свободной нутации осесимметричного (экваториальные моменты инерции равны, т.е. $A = B$) твердого тела, из которого выводилось соотношение, связывающее продолжительность периода свободной нутации T_0 со значениями моментов инерции C – полярного и A – экваториального, имеющее вид

$$T_0 = \frac{A}{C - A} \tau, \quad (2)$$

где τ – период осевого вращения исследуемого тела [Сретенский, 1958]. Соотношение (2) позволяет предвычислить величину периода T_0 , если известны значения моментов инерции.

3. Определение величины динамического сжатия реальной Земли по наблюдаемым значениям ψ и ν

Напомним, что интерпретация материалов наблюдений астрономов за вращением Земли проводится преимущественно в рамках модели твердого тела.

Модель твердого тела означает, что деформации, например, земной коры, или текучесть океана, безусловно, всегда существующие, изменяют моменты

инерции на величину, влияние которой не поддается регистрации современными инструментами. Модель твердого тела позволяет изучать вращение Земли с помощью относительно простых математических средств. Вместо уравнений в частных производных, необходимых в случае, если бы на Земле происходили активные деформационные процессы, перераспределяющие массы, астрометристы пользуются обыкновенными дифференциальными уравнениями. Несколько забегаая вперед, заметим, что хотя С. Ньюкомб заявлял о том, что привлекая эффекты упругих деформаций земной коры, он подкорректирует теорию вращения Земли, в действительности он сохранял модель твердого тела и манипулировал только терминами. В рамках модели твердого тела величины главных моментов инерции (A, B, C) характеризуют сбалансированность масс в Земле, в то время как центробежные моменты (I_{12}, I_{22}, I_{13}) отражают неуравновешенности в распределении масс. Поэтому совершенно излишними являются термины “абсолютно-жесткая”, “идеально-твердая” Земля, которые вошли только в астрометрическую и геофизическую литературу после публикации статьи [Newcomb, 1892], о которой пойдет в дальнейшем речь. Кажется нелепостью говорить о моментах инерции твердого тела и о моментах инерции “абсолютно-твердого тела”, когда как в том, так и в другом случае не обсуждается внутренняя структура тела и связи между составляющими ее частицами.

Для описания движения Земли в соответствии с положениями механики твердого тела вводятся две системы координат: неподвижная, с плоскостью XU , совпадающей с эклиптической и перпендикулярной к ней осью Z и подвижная система координат, с плоскостью xu , совпадающей с экватором вращения Земли и осью z , ориентированной по направлению осредненного (на момент составления каталога звезд) положения оси вращения Земли. Начало систем координат совмещают с центром масс Земли.

Оси систем координат как подвижной, так и неподвижной, закрепляются в пространстве каталогами звезд на определенный средний момент эфемеридного времени, называемого астрономами эпохой. Закрепленная таким образом система осей позволяет по материалам текущих наблюдений определять изменение ориентации осей одной системы координат относительно другой. Не имея возможности входить в детали, отметим только те угловые переменные, которые регистрируют астрономы: это угол ψ – между направлением на линию пересечения плоскостей экватора и эклиптики (линия равноденствия в момент наблюдения) и линией равноденствия эпохи каталога; угол ν – наклон экватора к эклиптике на ту же эпоху, угол ξ – отсчитыва-

ется в плоскости экватора как угол между избранным нулевым меридианом вращающейся Земли и меридианом линии пересечения экватора и эклиптики. Для определения положения линии пересечения экватора и эклиптики среди звезд проводятся меридиональные наблюдения зенитных углов $Z(T)$ и азимутов $A(T)$ Солнца и избранных (видимых днем) звезд около моментов весеннего и осеннего равноденствия. Поэтому исходный материал наблюдений за скоростью предварения равноденствий, т.е. за вынужденной прецессией, ведется с реальной Земли и проверяется практически почти непрерывно, так как звездное время отсчитывается от направления на точку весеннего равноденствия и, следовательно, находится под постоянным контролем астрономов-практиков. Никаких редуций за упругость и приведение к “абсолютно-жесткой” Земле в материалах наблюдений вынужденной прецессии и нутации не проводится. Следовательно, если бы были какие-либо мощные процессы перераспределения массы в Земле, это в первую очередь обнаружилось бы в материалах наблюдений за вынужденной прецессией.

Связь между изменениями во времени независимых углов ψ, ν, ξ с компонентами угловой скорости $(\omega_1, \omega_2, \omega_3)$, спроектированными на оси подвижной референц-системы, описывается кинематическими уравнениями Эйлера

$$\begin{aligned} (\sin \nu) \dot{\psi} &= -\omega_1 \sin \xi - \omega_2 \cos \xi \\ \dot{\nu} &= -\omega_1 \cos \xi + \omega_2 \sin \xi \\ \dot{\xi} &= \omega_3 - \dot{\psi} \cos \nu \\ \omega_1 &= -\dot{\nu} \cos \xi - \dot{\psi} \sin \nu \sin \xi \\ \omega_2 &= \dot{\nu} \sin \xi - \dot{\psi} \sin \nu \cos \xi \\ \omega_3 &= \dot{\psi} \cos \nu + \dot{\xi} . \end{aligned} \quad (3)$$

Компоненты $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ не регистрируют, их определяют через ψ, ν, ξ .

Допуская, что оси системы координат x, y, z не совмещены с направлениями главных моментов инерции Земли и что начало системы отсчета предполагается совпадающим с центром масс в доверительном интервале значений $\Delta x, \Delta y, \Delta z$, выражения для кинетической энергии осевого вращения K , потенциалов гравитационного взаимодействия Земли с Луной U_1 , Солнцем U_2 и компонент момента импульса осевого вращения $L_{i(1,2,3)}$ записываются в виде

$$\begin{aligned} 2K &= \bar{A}\omega_1^2 + \bar{B}\omega_2^2 + \bar{C}\omega_3^2 \\ &- 2\bar{T}_{23}\omega_2\omega_3 - 2\bar{T}_{13}\omega_1\omega_3 - 2\bar{T}_{12}\omega_1\omega_2 , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_1 &= fM_1 \left[\frac{M_0}{\rho_1} + \frac{\bar{B} + \bar{C} - 2\bar{A}}{2\rho_1^3} \right. \\ &+ \frac{3(\bar{A} - \bar{B})}{2\rho_1^5} y_1^2 - \frac{3(\bar{C} - \bar{A})}{2\rho_1^5} z_1^2 \\ &\left. + 2\frac{\bar{T}_{23}y_1 z_1}{\rho_1^5} - 2\frac{\bar{T}_{13}x_1 z_1}{\rho_1^5} - 2\frac{\bar{T}_{12}x_1 y_1}{\rho_1^5} \right] , \end{aligned} \quad (4)$$

$$U_2 = fM_2 \left[\frac{M_0}{\rho_2} + \frac{\bar{B} + \bar{C} - 2\bar{A}}{2\rho_2^3} + \dots \right] ;$$

$$\begin{aligned} L_1 &= \bar{A}\omega_1 + \bar{T}_{12}\omega_2 + \bar{T}_{13}\omega_3 , \\ L_2 &= \bar{A}\omega_1 + \bar{B}\omega_2 + \bar{T}_{23}\omega_3 , \\ L_3 &= \bar{T}_{31}\omega_1 + \bar{T}_{32}\omega_2 + \bar{C}\omega_3 , \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{A} &= A + M_0(\Delta y^2 + \Delta z^2) , \\ \bar{B} &= B + M_0(\Delta x^2 + \Delta z^2) , \\ \bar{C} &= C + M_0(\Delta x^2 + \Delta y^2) ; \\ \bar{T}_{12} &= I_{12} + M_0\Delta x\Delta y , \\ \bar{T}_{13} &= I_{13} + M_0\Delta z\Delta y , \\ \bar{T}_{21} &= I_{21} + M_0\Delta x\Delta y , \\ \bar{T}_{23} &= I_{23} + M_0\Delta x\Delta z , \\ \bar{T}_{31} &= I_{31} + M_0\Delta y\Delta z , \\ \bar{T}_{32} &= I_{32} + M_0\Delta x\Delta z , \end{aligned}$$

а M_0, M_1, M_2 – массы Земли, Луны, Солнца; ρ_1, ρ_2 – расстояния между центрами масс Земли-Луны, Земли-Солнца; $x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2$, – координаты Луны и Солнца в подвижной земной системе координат; $A, B, C, I_{12}, I_{23}, I_{13}$ – главные и центробежные моменты инерции Земли.

Используя подход Лагранжа $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\nu}} \right) - \frac{\partial K}{\partial \nu} = \frac{\partial U}{\partial \nu}$

или подход Эйлера $\frac{d}{dt} \bar{L} + (\bar{\omega} \times \bar{L}) = \bar{N}$ (где \bar{N} – момент внешних сил), можно на основании соотношений (3), (4), (5) вывести уравнения, описывающее вынужденную прецессию, вынужденную нутацию ($N_i \neq 0$) или уравнения, описывающие свободную нутацию ($N_i = 0$). Упрощения при выводе тех и других уравнений делаются на основании собранной эмпирики, которая в соответствии с возможностями (точностью) регистрирующих инструментов позволяет не вводить в описание те или иные члены.

Для тела со сбалансированным распределением масс, каким в первом приближении является Земля, малые изменения в ориентации осей референц-системы незначительно сказываются в “смешанных”

величинах моментов инерции. Например, если у тела с моментами инерции $A, B, C, I_{12}, I_{13}, I_{23}$ изменить ориентацию осей референц-системы поворотом на угол α вокруг направления момента инерции A , то “смешанные” величины моментов будут определяться из соотношений вида:

$$\begin{aligned} A' &= A, \\ B' &= B \cos^2 \alpha + C \sin^2 \alpha + 2I_{23} \sin \alpha \cos \alpha, \\ C' &= C \cos^2 \alpha + B \sin^2 \alpha - 2I_{23} \sin \alpha \cos \alpha, \\ I'_{23} &= I_{23} \cos 2\alpha + (C - B) \sin \alpha \cos \alpha, \\ I'_{13} &= I_{13} \cos \alpha + I_{12} \sin \alpha, \\ I'_{12} &= I_{12} \cos \alpha - I_{13} \sin \alpha. \end{aligned} \quad (6)$$

Понятно, что при произвольной ориентации осей референц-системы нет возможности получить значения главных и центробежных моментов в “чистом виде”, но, например, различие в значениях комбинаций $\frac{A'}{C' - A'}$ будет

$$\begin{aligned} &\frac{A'}{C' - A'} \\ &= \frac{A}{C - A + (B - C) \sin^2 \alpha - I_{23} \sin 2\alpha}, \end{aligned}$$

т.е. малой величиной. Поэтому рассогласование осей референц-системы может быть ощутимым для тел с несбалансированным распределением масс и малозначащим для тел с осесимметричным строением.

Современная геофизическая изученность воздействия землетрясений на ориентацию “оси фигуры” относительно оси вращения показывает, что, например, Аляскинское землетрясение 1964 г. с энергией порядка 10^{25} эрг могло бы вызвать рассогласование осей порядка $0''.0001$ [Стейси, 1972].

На основании соотношений (4) или (5) и с привлечением соотношений (3), выводятся уравнения Пуассона, с использованием которых по измеренным значениям ψ и ν оценивается комбинация $\frac{C - A}{C}$ и, следовательно, по формуле (2) период T_0 . Не проводя достаточно утомительных преобразований, сопутствующих выводу уравнений Пуассона, отметим, что все упрощения делаются только на основании эмпирики, собранной в ходе астрономических наблюдений на реальной Земле, никаких “абсолютно-жестких” или “идеально-твердых” редукций к выводу уравнений не привлекается.

Результаты астрономических наблюдений показывают, что экваториальные моменты инерции A и B Земли не различаются настолько, чтобы быть ощутимыми в четвертом знаке после запятой, т.е.

$\leq 0''.00005$. Внутреннее распределение масс Земли таково, что можно считать

$$\frac{B - A}{C - A} < 0,02 \quad \frac{B - A}{C} < 0,02H,$$

где

$$H = \frac{C - A}{C}.$$

Поэтому астрометристы считают нецелесообразным при современной точности регистрации угловых переменных включать в теорию прецессии и нутации комбинации $(B - A)$, а, следовательно, и I_{12}, I_{13}, I_{23} , [Подобед, Нестеров, 1975]. Этот вывод согласуется с результатами исследования Земли методами космической геодезии. Порядок величин $(C - A)$, $(B - A)$, I_{12}, I_{13}, I_{23} определен по коэффициентам разложения геопотенциала, полученным на основании спутниковых наблюдений. Так, согласно [Ержанов, Колыбаев, 1984], имеем:

Модель геопотенциала	$(C - A) \cdot 10^{44}$ г·см ²	$(B - A) \cdot 10^{44}$ г·см ²	$I_{12} \cdot 10^{44}$ г·см ²
GEM-9	0,0263458	0,0000764	-0,00043
GEM-10	0,0263460	0,0000764	-0,00043
GMP	0,0253586	0,0000762	-0,00043

Разные модели дают близкие значения $(C - A)$, $(B - A)$, I_{12} . На основании этих данных можно уверенно считать центробежные моменты инерции I_{12}, I_{13}, I_{23} величинами одного порядка с $(B - A)$ (точнее, $I_{12} \cong 5(B - A)$) и составляющими примерно 2% от $(C - A)$ и примерно 0,005% от среднего момента инерции Земли.

Принимая значение $(B - A) \cong 10^{40}$ г·см² за верхний предел модулей моментов, исходные соотношения (4), (5) существенно упрощаются; исключаются из рассмотрения центробежные моменты и допускается неопределенность в положении референц-системы порядка 10^3 м. После проведения соответствующих упрощений, уравнения Пуассона записываются в виде [Вуллард, 1963]:

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} &= -3f \frac{M_1(C - A)}{C\omega_3\rho_1^3} \{ \sin \nu \cos \beta_1 \sin(\lambda_1 - \psi) \dots \} \\ &\quad - 3f \frac{M_2(C - A)}{C\omega_3\rho_2^3} \{ \sin \nu \dots - \}, \\ \ddot{\nu} &= -3f \frac{M_1(C - A)}{C\omega_3\rho_1^3} \{ \sin \nu \cos \beta_1 \sin(\lambda_1 - \psi) \dots \} \\ &\quad - 3f \frac{M_2(C - A)}{C\omega_3\rho_2^3} \{ \sin \nu \dots - \}. \end{aligned}$$

Постоянная нутации $\nu = 9''.21$ (эпоха 1900) и постоянная общей прецессии в долготе $\psi = 5025''.64$ в тро-

пическое столетие 1900 г. определяют значение комбинации

$$H = \frac{C - A}{C} = 0,00327293 \pm 0,0000075 = \frac{1}{305,53}.$$

Если значениями центробежных моментов для Земли нельзя было бы пренебречь, то это повлекло бы за собой значительные вычислительные трудности, в чем можно убедиться, поупражнявшись с уравнениями (5), приводя их в соответствии с (3) к измеряемым угловым характеристикам ψ и ν . Понятно, что в этом случае комбинацию $\frac{C - A}{C}$ дополнили бы также центробежные моменты I_{12}, I_{13}, I_{23} . Но и в этом случае величина новой комбинации вида $\frac{C - A}{C}$ все равно определялась бы через численное значение измеренных ψ, ν и была бы равна тому же значению 0,0032.

Таким образом, измеряемые значения ψ и ν позволяют в рамках модели твердой осесимметричной Земли ($A = B$) получить величину ее динамического сжатия $H = \frac{C - A}{C}$, через которое определяется $\frac{A}{C - A} = \frac{1}{H} - 1$ и в соответствии с формулой (2) оценивается величина периода $T_0 = 304 \pm 1 \div 2$ суток.

4. Модель свободной нутации не применима к объяснению закономерностей изменений широт

На основании вышесказанного несложно понять обоснованность просьбы Кельвина к астрономам (в частности, к С. Ньюкомбу) поискать в материалах наблюдений широт вариации с периодом в 300 суток. Цитируем дословно [Манк, Макдональд, 1964]: “Проанализировав по просьбе Кельвина наблюдения широты Вашингтона в 1862–1865 гг. с целью выявить 10-месячные колебания, С. Ньюкомб нашел амплитуду этих колебаний равной $0''.05 \pm 0''.03$. Об этом результате Кельвин в 1876 г. объявил в президентской речи перед Британской ассоциацией как о достаточно убедительном доказательстве существования свободной нутации”.

Ход рассуждений Кельвина строго научный. Высказано предположение: “У Земли может наблюдаться свободная нутация”. Предложен контрольный опровергающий или подтверждающий эксперимент: 1. Если не будет обнаружена вариация с продолжительностью 300 суток, предположение следует отбросить. 2. Если вариация в 300 суток будет обнаружена – это доказательство правоты утверждения. Астроном С. Ньюкомб сообщил, что в материалах

изменяемости широты Вашингтона за 1862–1865 гг. обнаружена вариация с продолжительностью 300 суток. Предположение Кельвина на основании сообщения С. Ньюкомба обретает статус утверждения.

Примерно 15 лет открытие свободной нутации по материалам изменяемости широты Вашингтона не подвергалось сомнению. Но в 1891 г. С. Чандлер опубликовал результаты своих исследований, согласно которым изменяемость широт характеризуется гармоникой с периодом в год (365 суток) и гармоникой с периодом в 410–440 суток; вариации с продолжительностью 10 месяцев нет. Публикация С. Чандлера была, по сути дела, опровержением открытия свободной нутации. “Этот вывод был совершенно неожиданным и вызвал сомнения в полноценности наблюдений. Однако всего через год С. Ньюкомб сумел доказать, что упругие свойства Земли и океанов могут вызвать как раз такое увеличение периода с 10 до 14 месяцев” [Манк, Макдональд, 1964]. Статья [Newcomb, 1892], на которую делаются ссылки как на работу, разъясняющую сложившуюся ситуацию с несоответствием наблюдательного материала модели свободной нутации, не выдерживает критики.

Во-первых, С. Ньюкомб ничего не доказывает, он делает априорное утверждение, что изменяемость широт – это свободная нутация. Далее делается заявление о том, что оценка периода свободной нутации через измеренные значения ψ и ν не имеет никакого отношения к реальной Земле, а характеризует “абсолютно-жесткую Землю”. Почему? Анализа вывода уравнений Пуассона у С. Ньюкомба нет. Из периодичностей, обнаруженных С. Чандлером, обособляется вариация с периодом в 427 суток и говорится, что это период реальной Земли с упругой корой и течениями в океане. Почему бы ему не обособить период в 365 дней и не назвать его периодом свободной нутации реальной Земли?

Вместо того, чтобы признать опровержение модели свободной нутации, С. Ньюкомб переформулировал проблему, ушел от попытки понять, что представляет собой процесс изменяемости широт, предложив втискивать эмпирику в ничем не обоснованную модель.

Появление работы С. Ньюкомба можно объяснить только с позиций продолжавшейся полемики Кельвина с геологами. Действительно, опровержение наличия свободной нутации было бы равноценно опровержению аргумента Кельвина в пользу твердой Земли, который базировался на сообщении С. Ньюкомба о широте Вашингтона. Поэтому тактически более правильно было сохранить модель свободной нутации (или поставить вопрос о необходимости проведения новых независимых эмпирических измерений) и свести дискуссию не к поиску

другой модели, а к согласованию числовых значений параметров с манипулированием терминами об “абсолютно-жесткой” и упругой Земле. Понятно, что такую переформулировку проблемы нельзя считать научной, и на основании исследований процесса изменчивости широт С. Чандлера следует считать модель свободной нутации неприменимой к объяснению процесса изменчивости широт.

5. Открытие И. Леманн внутреннего ядра (1936 г.) и модельное объяснение закономерностей, установленных С. Чандлером (1891 г.)

Можно предположить, что априорное утверждение С. Ньюкомба базировалось на предположении о том, что у перемещений оси вращения в теле Земли нет никакого альтернативного объяснения, кроме притяжения модели свободной нутации. Но это не так. Альтернативное объяснение есть, и его фактическое обоснование можно приурочить к открытию И. Леманн в 1936 г. внутреннего ядра Земли. После этого открытия появилась естественная необходимость изучения вращения структурно-неоднородной Земли. Если в центре Земли есть ядро радиуса ~ 1200 км, “взвешенное” в окружающем его расплаве, то естественен вопрос – сохраняет ли оно во время ускоренного орбитального движения Земли неизменное положение или оно перемещается, и, следовательно, изменяет свое положение центр масс относительно оболочки. Иными словами, необходимо рассмотреть теорию вращения структурно-неоднородной Земли с подвижным началом, т.е. Δx , Δy , Δz в уравнениях (4), (5) не равны нулю, и их изменение оценивается через модуль внешнего воздействия (их наличие может быть установлено по частотному соответствию воздействия и отклика).

Напомним характеристики орбитального движения Земли. Вокруг Солнца с годичной циклическостью движется система Земля-Луна. Плоскость эклиптики – это плоскость орбиты центра масс Земля-Луна (барицентра). Вокруг барицентра по эллиптической, наклоненной к эклиптике орбите с месячной периодичностью движется как Земля, так и Луна. Месячное движение Земли возмущенное. Модуль возмущений достигает величины порядка $2 \cdot 10^{-5}$ см/с². На центр масс Земли действует переменная во времени приливная сила. Периодичность изменения модуля возмущения зависит от разности долгот Земли λ_{\oplus} и Солнца λ_{\odot} , которая в свою очередь зависит от положения Земли относительно узла Ω , перигея Γ и аномалии W , т.е.

$$\lambda_{\oplus} - \lambda_{\odot} = \Omega + \Gamma + W - \lambda_{\odot} = (\Omega + \Gamma - \lambda_{\odot}) + W .$$

Таким образом, сделанное нами предположение об изменении Δx , Δy , Δz во времени проверяется опровергающим экспериментом. Если частоты изменения Δx , Δy , Δz не соответствуют частотам внешнего воздействия, то предположение отбрасывается. Если частоты изменения Δx , Δy , Δz соответствуют частотам внешнего воздействия, то предположение принимается как утверждение. Действительно, при дискретности опроса раз в месяц (т.е. с периодичностью изменения W), модуль возмущения изменяется с периодом изменения $(\Omega + \Gamma - \lambda_{\odot})$ 412–437 суток; при дискретности опроса раз в год, модуль возмущения изменяется с периодом $(\Omega + \Gamma)$ в шесть лет. При дискретности опроса в несколько суток должна появиться двухнедельная гармоника, т.е. с циклическостью $2W$. Это краткая иллюстративная справка, более подробные количественные оценки приведены в статье [Авсюк, 1980]. Таким образом, процесс изменчивости широт, не вступая в противоречие с материалами и выводами из наблюдений за вынужденной прецессией и нутацией, объясняется в рамках модели вращения структурно-неоднородной твердой Земли с подвижным центром. И развитие этих исследований является естественным этапом усложнения модельного описания на основании собранной астрономами и геофизиками эмпирики.

6. Заключение

Настоящая статья была ориентирована на устранение затруднений в сопоставлении эмпирики процесса изменения широт со следствиями модели свободной нутации. На наш взгляд, затруднения возникли из-за того, что никто не проверял исходные предпосылки появления априорного заявления С. Ньюкомба. Получалось так, что делались технически безупречные работы в рамках непроверенных предпосылок. Естественно, что следствия этих работ входили в полное противоречие с результатами наблюдений. Необходимо было сказать: “Давайте проверим обоснованность первоисточков”, что мы и попытались сделать.

Такого рода ситуация отмечается не только в геофизике, она имеет место и в астрономии, и в других разделах естествознания. Х. Альфен и Г. Арениус по этому поводу написали [Альфен, Арениус, 1979]: “При анализе современных общепринятых взглядов на строение Солнечной системы вызывает удивление тот факт, что подозрительно большая часть этих концепций исходит из старых туманных теорий, принимаемых даже при недостаточном подтверждении их наблюдениями. Наблюдения часто вписывают в рамки таких теорий, даже если результаты противоречивы. Мы полагаем, что многое

из традиционного материала, приводимого в учебниках, не должно увековечиваться без тщательной проверки его обоснования”.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 96-02-17550.

Литература

- Авсюк Ю. Н., Возможное объяснение процесса изменчивости широт, *ДАН*, 254, (4), 834–837, 1980.
- Альфен Х., Аррениус Г., *Эволюция Солнечной системы*, 511 с., Мир, Москва, 1979.
- Вулард Э., *Теория вращения Земли вокруг центра масс*, 142 с., ГИФ-МЛ, Москва, 1963.
- Ержанов Ж. С., Калыбаев А. А., *Общая теория вращения Земли*, 254 с., Наука, Москва, 1984.
- Куликов К. А., *Изменяемость широт и долгот*, 400 с., ГИФ-МЛ, Москва, 1962.
- Манк У., Макдональд Г., *Вращение Земли*, 334 с., Мир, Москва, 1964.
- Подобед В. В., Нестеров В. В., *Общая астрометрия*, 551 с., Наука, Москва, 1975.
- Сретенский Л. Н., *Динамика твердого тела в работах Эйлера*, с. 210–231, Леонард Эйлер, Сборник статей в честь 250-летия со дня рождения, 607 с., Изд-во АН СССР, Москва, 1958.
- Стейси Ф., *Физика Земли*, 342 с., Мир, Москва, 1972.
- Newcomb S., *On the dynamics of the Earth rotation with respect to the periodic variation of latitude MN*, pp. 335–341, March 1892.
- Runcorn S. K., Wilkins G. A., Groten E., et al., The excitation of the Chandler Wobble, *Survey in Geophysics*, 9, 429–449, 1988.
- Yumi S., *Results of the international latitude service 1962–1967*, Vol. XII, Central Bureau of IPMS, International Latitude observatory of Mizusawa, 1978.

(Поступила в редакцию 15 ноября 1999.)