

ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ НУТАЦИОННО-ПРЕЦЕССИОННЫЕ ДВИЖЕНИЯ МГНОВЕННОГО ПОЛЮСА ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

В.Ю. Белашов¹, Е.С. Белашова², О.А. Харшиладзе³

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

²*Казанский национальный исследовательский технический университет
имени А.Н. Туполева, г. Казань, 420111, Россия*

³*Тбилисский государственный университет им. И. Джавахидовили,
г. Тбилиси, 0179, Грузия*

Аннотация

Исследовано влияние ротационного режима на реальные длиннопериодные нутационно-прецессионные движения мгновенного полюса вращения Земли. Рассмотрен солнечно-магнитосферный (через изменения угловой скорости вращения) механизм воздействия. Вынужденные 12-месячные колебания мгновенной оси вращения объясняются воздействием возникающей при изменении угловой скорости деформирующей силы, которая вызывает неравномерную по долготным зонам деформацию фигуры, без привлечения в качестве промежуточного звена барико-циркуляционных процессов. Свободные (чандлеровы) и вынужденные 12-месячные колебания места полюса рассмотрены с единых позиций – как результат переменности ротационного режима Земли. Анализ гелиогеофизических данных за 1900–2017 гг. подтверждает обоснованность предполагаемого механизма связей.

Ключевые слова: вращение Земли, нутация, прецессия, мгновенный полюс вращения, деформация фигуры, колебания места полюса, свободные колебания, вынужденные колебания, солнечно-магнитосферное управление

Введение

Известно, что мгновенная ось вращения Земли испытывает нутационно-прецессионные колебания относительно своего среднего положения, основными периодами являются 14-месячный (чандлеров период) и 12-месячный (вынужденные колебания). Кроме того, указанные колебания испытывают и значительные многолетние изменения, причины которых еще до конца не выявлены. Если для чандлеровских колебаний можно считать установленным факт их взаимосвязи с неравномерностью вращения Земли (по результатам Н. Стойко [1] корреляция между годичной вариацией продолжительности вращения Земли (T), с одной стороны, и амплитудой (A) и длительностью (P) периода Чандлера, с другой, $r_{TA} = 0.875$ и $r_{AP} = 0.910$), то 12-месячные вынужденные колебания большинство исследователей считает следствием изменений глобального барико-циркуляционного режима, выдвигая в качестве аргумента наблюдающуюся корреляцию движений полюса и солнечной активности (см., например, [2] и библиографию в ней). Кроме того, для объяснения многолетних изменений вынужденной части колебаний мгновенной оси вращения Земли привлекаются тектонические гипотезы (см. [3] и библиографию в этой работе). Задача настоящей работы – показать роль ротационного режима Земли в многолетних реальных колебаниях ее мгновенной оси вращения,

а также предложить механизм, качественно объясняющий наблюдающиеся многолетние вынужденные колебания мгновенной оси вращения возникающими при изменении угловой скорости деформациями фигуры Земли [4].

В разд. 1 на основе анализа гелиогеофизических данных показана связь реальных многолетних движений полюса с изменениями угловой скорости вращения Земли, а также, опираясь на гипотезу солнечно-магнитосферного управления ротационным режимом [5, 6], с колебаниями чисел Вольфа (W) и глобальной магнитной возмущенности (индекс $M = 10(\sum K_p - 10)$). Далее, для упруго-деформируемой Земли получены соотношения, связывающие период нутационно-прецессионных движений полюса и деформацию тела Земли с угловой скоростью вращения (разд. 2). Здесь же приведены результаты, показывающие корреляцию в циклах разной продолжительности параметров свободных (чандлеровых) колебаний полюса вращения Земли с изменениями гелиогеофизических факторов, что может служить косвенным подтверждением гипотезы [5]. В разд. 3 предлагается «деформационный» механизм определяющего влияния изменений ротационного вращения Земли на вынужденную часть нутационно-прецессионных колебаний оси вращения. Приведенные результаты анализа гелиогеофизических данных подтверждают обоснованность предполагаемых связей.

1. Реальные движения мгновенного полюса вращения Земли

В [7] было установлено, что в колебаниях места полюса наблюдается волна со средним периодом в 11 лет, отрицательно коррелирующая со среднегодовыми значениями чисел Вольфа, что было объяснено ускорением циркуляции тропосферы при увеличении W . Позднее [2] было показано, что такой параметр, как размер большой оси эллипса вынужденных колебаний, положительно коррелирует со средними за каждые 11 лет аномалиями чисел Вольфа, что объяснялось ослаблением климатического контраста между летом и зимой в эпоху максимума W (то есть уменьшением сезонного переноса). Однако в последнем случае размах вынужденных колебаний должен уменьшаться, что противоречит результатам анализа данных [2]. Это приводит к мысли о малообоснованности гипотезы определяющего влияния сезонных метеорологических явлений на вынужденные колебания места полюса. Для свободных колебаний в [2] было установлено единовременное изменение эллиптичности траектории полюса с изменениями длины суток.

Для обоснования идеи о влиянии переменности ротационного режима (обусловленной согласно [5, 6] изменениями глобальной магнитосферной возмущенности, то есть в конечном счете колебаниями солнечной активности) на реальные движения мгновенного полюса вращения Земли в [3] были проанализированы данные по X - и Y -составляющим радиуса-вектора полюса за период с 1900 по 1985 гг. по материалам Международной службы широты (МСШ) и построены кривые реальных движений полюса по эпохам, отдельно для четных и нечетных 11-летних циклов солнечной активности с учетом реперных фаз, за которые принимались минимумы W , максимумы W , максимум M . Результаты нашего анализа на рядах 1985–2017 гг. подтверждают выводы, сделанные в [3], относительно того, что в колебаниях места полюса присутствует 7-летний цикл (период цикла изменяется за указанный срок от 6 до 9 лет, то есть этот цикл нельзя считать чисто классическим 7-летним циклом [8], являющимся следствием наложения вынужденных 12-месячных и свободных 14-месячных колебаний места полюса). Наблюдается запаздывание экстремумов этих циклов относительно реперных фаз по времени (в среднем порядка года), и, что особенно важно, экстремумы 7-летних циклов в колебаниях полюса обнаруживают четкую связь с экстремумами выявленных ранее [5] 7-летних

Табл. 1
 Экстремумы (+ максимум, – минимум) колебаний чисел Вольфа (W), индекса магнитной возмущенности (M), продолжительности суток ($\Delta\tau$) и величины радиуса-вектора полюса (R) в четном и нечетном циклах солнечной активности

Циклы	Четный				Нечетный		
W	–	+		–	+		–
M	–		+	–		+	–
$\Delta\tau$	+	–	+	–	+	–	+
R	+	–	+	–	+	–	+

циклов в изменениях продолжительности суток, причем тоже с соответствующим запаздыванием порядка 1 года, что наводит на мысль о причинно-следственной связи этих двух явлений. Наблюдающееся запаздывание в колебаниях величины радиуса-вектора полюса относительно изменений продолжительности суток позволяет последние считать причиной, а первые – следствием. Результаты анализа сведены в табл. 1.

Таким образом, следует отметить, что не только колебания с чандлеровым периодом, но и реальные движения мгновенного полюса вращения Земли происходят достаточно синхронно с изменениями угловой скорости вращения Земли.

2. Свободное вращение упруго деформируемой Земли

Рассматривая полярное сжатие планет Солнечной системы, их угловые скорости вращения и средние плотности, можно сделать вывод, что степень сжатия планеты главным образом зависит от ее скорости вращения [9], и поэтому изменение в ротационном режиме планеты должно в первую очередь сказываться на изменении полярного сжатия ($\Delta\alpha$, по оценкам [9], может достигать $\sim 0.09\%$ от среднего сжатия Земли для реальных колебаний длины суток).

Для описания вращения тела изменяющейся формы используются уравнения Лиувилля, учитывающие обмен количеством движения между различными частями тела. Однако в связи с трудностью учета влияния моментов количества движения, связанных с перераспределением плотности в подкоровом слое при деформации фигуры (которую полагаем сопряженной, то есть происходящей без изменения объема), пойдём по пути последовательных приближений, выбрав в качестве первого (наиболее грубого) приближения вращение абсолютно твердой недеформируемой Земли, которое описывается уравнениями Эйлера в форме [10]:

$$\begin{aligned}
 A \frac{dp}{dt} + rq(C - B) &= L, \\
 B \frac{dq}{dt} + pr(A - C) &= M, \\
 C \frac{dr}{dt} + pq(B - A) &= N,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где L , M и N – моменты внешних сил относительно главных осей инерции; A , B , C – моменты инерции; p , q , r – составляющие по осям координат x , y , z , фиксирующие положение Земли относительно оси вращения. Рассматривая свободное вращение эллипсоида (абстрагируясь от влияния приливных сил) и пренебрегая экваториальной эллиптичностью (членами малого порядка), а также учитывая соотношения, принятые МСШ: $X = p/\omega$, $Y = q/\omega$, получим из (1) $r = \text{const} \approx \omega$

и

$$\begin{aligned}\frac{dX}{dt} - \alpha\omega Y &= 0, \\ \frac{dY}{dt} - \alpha\omega X &= 0,\end{aligned}\tag{2}$$

где $\alpha = (C - A)/A$ – динамическое сжатие. Интегрируя (2), найдем

$$\begin{aligned}X &= R \cos(\alpha\omega t - \sigma), \\ Y &= R \sin(\alpha\omega t - \sigma),\end{aligned}\tag{3}$$

где σ – параметр Лагранжа. Таким образом, для модели абсолютно твердой недеформируемой Земли движение полюса происходит по круговой траектории с периодом

$$\tau_0 = 2\pi/\alpha\omega.\tag{4}$$

В (3) постоянные интегрирования R и σ находятся из наблюдений, величина динамического сжатия определена астрономически $\alpha = 1/305$ [10]. Теперь, если в качестве следующего приближения считать Землю упруго деформируемой (тело Гука) [4] и ввести параметр w уравнениями [10]

$$D = -Yw\alpha A, \quad E = -Xw\alpha A, \quad F = 0,$$

где $D = \int_M YZ dm$, $E = \int_M ZX dm$, $F = \int_M XY dm$ – произведения инерции; учитывая, что уравнение (4) в данном случае примет вид $\tau = 2\pi/[\alpha\omega(1 - w)]$, то есть можно записать $w = 1 - \tau_0/\tau$, для гидростатического равновесия $C - A = \frac{2}{3}\left(e - \frac{q}{2}\right) Ma^2$ (M – масса Земли, a – экваториальная полуось, e – эксцентриситет) путем несложных преобразований можно получить

$$\tau = \tau_0 \frac{2e - q}{2e - q(1 + k)}.\tag{5}$$

Здесь $q = f_1[\omega(t)] = \omega^2 a/2g$, $e = f_2[\omega(t)]$, k – модуль всестороннего сжатия.

Формула (5) выражает чандлеровский период движения полюса и показывает, что всякое изменение угловой скорости вращения, а также связанная с этим деформация фигуры Земли [4], которая по оценкам [11] может достигать 10% от приливной, будут вызывать изменение периода свободных (чандлеровых) движений полюса вращения Земли.

Теперь отметим, что если гипотеза о солнечнообусловленных (через магнитосферу) изменениях угловой скорости вращения Земли [5, 6] верна, то должна наблюдаться связь между колебаниями солнечной активности и магнитной возмущенности, с одной стороны, и свободными колебаниями оси вращения Земли, с другой. Для иллюстрации этого в [3] и настоящей работе проведен анализ изменений солнечной активности (чисел Вольфа [12, 13]), магнитной возмущенности (индекса M [14, 15]), размеров большой полуоси эллипса выделенного свободного движения полюса V_{\max} и координат X и Y свободного движения полюса Земли за период с 1900 по 2017 г. для циклов разной продолжительности. На рис. 1 приведен наиболее характерный пример сопоставления изменений индекса W и V_{\max} (колебания с периодами менее 20 лет отфильтрованы методом скользящих интервалов). Наблюдается в целом противофазный ход кривых со сдвигом противоположных фаз W и V_{\max} в среднем порядка 4 года, что представляется естественным, так как при увеличении уровня солнечной активности угловая скорость вращения Земли

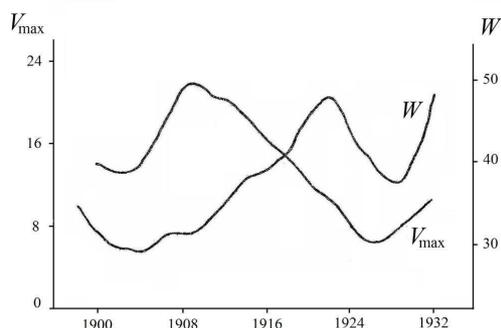


Рис. 1. Изменение средних значений V_{\max} в сотых долях дуговой секунды в сопоставлении с колебаниями W в 22-летних циклах, 1900–1932 гг.

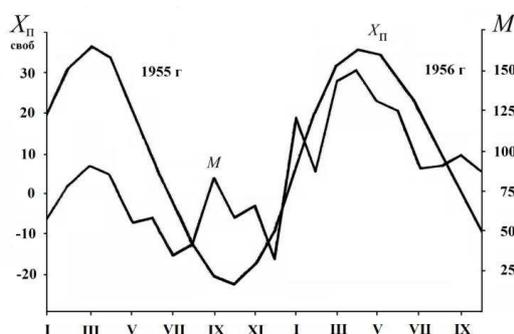


Рис. 2. Изменение магнитной возмущенности $M = 10(\sum K_p - 10)$ в сопоставлении со значениями координаты X_{Π} , январь 1955 г. – октябрь 1956 г.

уменьшается (сдвиг фаз $\sim 3\text{--}4$ года) [5], и, следовательно, должен уменьшаться размах свободных колебаний полюса вращения.

На рис. 2 приведен наиболее характерный пример сопоставления хода индекса M и колебаний координаты X выделенного свободного движения полюса за период январь 1955 г. – октябрь 1956 г. Виден согласованный ход кривых. Отсутствие на рис. 2. в изменениях X_{Π} волн с периодами, меньшими чандлерова, присутствующих в колебаниях M , может быть, по-видимому, объяснено большой инерцией изменения α по сравнению с колебаниями ω в формуле (3), в результате чего волны меньшего периода «маскируются» значительно превышающей их по амплитуде 14-месячной волной.

Проведенный в [16] анализ Фурье позволил, однако, выделить в изменениях широты, наряду с известной ранее полугодовой, волну с периодом, равным половине чандлерова. Рис. 1 и 2 показывают, что связь между солнечной активностью, магнитной возмущенностью и элементами свободного движения мгновенного полюса вращения Земли действительно наблюдается.

3. Вынужденные движения мгновенного полюса вращения Земли

Во введении отмечалось, что большинство исследователей считает причиной вынужденных 12-месячных колебаний мгновенного полюса вращения Земли сезонные изменения атмосферной циркуляции и барического поля. Однако, по нашему

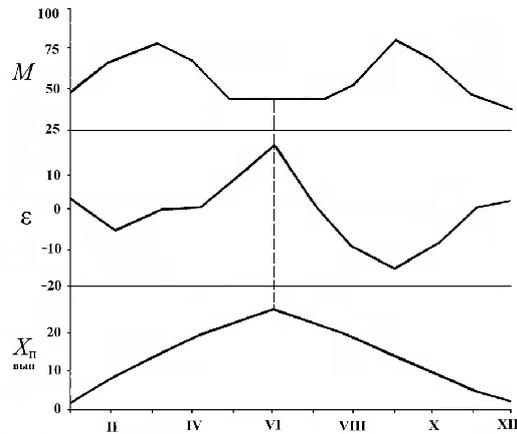


Рис. 3. Средние за период 1955–1974 гг. циклические кривые индекса M , углового ускорения ε и проекции радиуса-вектора полюса на ось X ($0 - 180^\circ$) (вынужденная волна)

мнению [5, 6], энергетические эффекты атмосферных процессов вряд ли достаточно для того, чтобы в реальных пределах нарушать стабильность вращения Земли. Из результатов [2] следует, что «размах» колебаний с периодом 12 месяцев увеличивается при возрастании уровня солнечной активности, что позволяет говорить о генетической связи этих двух явлений. Проведенные нами исследования внутреннего хода вынужденных колебаний полюса (выделенная вынужденная составляющая X), изменений углового ускорения вращения Земли ε [17–23] и индекса магнитной возмущенности M показали (рис. 3), что эти величины меняются сходным образом. В частности, из рисунка видно, что проекция радиуса-вектора полюса на ось X ($0 - 180^\circ$) максимальна при максимальной угловой скорости вращения Земли, то есть колебания вдоль оси X при увеличении ε возрастают. Отмеченное сходство в колебаниях указанных элементов позволяет выдвинуть гипотезу о деформационной (вследствие изменения угловой скорости вращения) природе вынужденных колебаний места полюса.

Чтобы получить аналитическое решение задачи зависимости вынужденных нутационно-прецессионных колебаний оси вращения от деформации тела Земли, точнее, от перемещения подкорковых масс в теле Земли и соответствующего перераспределения плотности, происходящих [9] вследствие переменности ротационного режима планеты, необходимо, в качестве следующего приближения (см. разд. 2), перейти от уравнений Эйлера к уравнениям Лиувилля, учитывающим влияние моментов количества движения относительно осей, связанных с мантией Земли [10]:

$$h_i = \int_V \rho \varepsilon_{ijk} x_j u_k dV, \quad (6)$$

где

$$\varepsilon_{ijk} = \begin{cases} 0 & \text{при } i = j \text{ или } i = k, \\ 1 & \text{для правильного порядка индексов : } 1, 2, 3, 1, \dots, \\ -1 & \text{для нарушенного порядка : } 1, 3, 2, 1, \dots \end{cases}$$

Однако в (6) необходимо точно знать функцию $\rho(x, y, z, t)$, то есть плотность в каждой точке Земли в функции времени, что само по себе в настоящее время

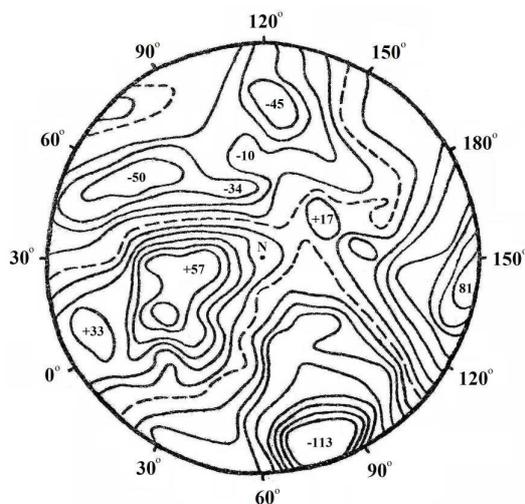


Рис. 4. Кривые уровня геоида ($e = 1/298.225$) нанесены через 10 м, пунктирной линией показан нулевой уровень. Модель Ламбека и Гапошкина [10] (северное полушарие)

представляется нерешаемой задачей. Поэтому здесь мы выдвинем гипотезу и сделаем попытку обосновать ее с качественных позиций, то есть путем логических рассуждений и анализа имеющегося фактического материала.

В некотором приближении Земля представляет собой трехосный эллипсоид вращения. Эллиптичность экватора указывает на то, что массы в теле Земли по долготным зонам (то есть плотность по этим зонам) распределены неравномерно. На это указывают и прямые геодезические измерения уровня геоида, и гравиметрические измерения, и, наконец, измерения отклонений орбит спутников от идеальных эллипсов. Модель Ламбека и Гапошкина [10], хорошо согласующаяся с прямыми измерениями, дает картину уровней геоида, показанную на рис. 4. Из рисунка можно видеть, что Земля в экваториальной плоскости сжата в направлении $80^\circ E - 100^\circ W$ и в направлении $0 - 180^\circ$ имеет выпуклость. Этот факт, по нашему мнению, следует объяснить тем, что в долготных зонах $40 - 130^\circ E$ и $40 - 140^\circ W$ залегают более тяжелые, плотные массы, которые и вызывают положительную аномалию силы тяжести в этих зонах и, вследствие этого, сжатие геоида в направлении $80^\circ E - 100^\circ W$. Соответственно, в долготных зонах $40^\circ E - 40^\circ W$ и $130^\circ E - 140^\circ W$ залегают менее плотные массы, и вследствие отрицательной аномалии силы тяжести в этих зонах наблюдается выпуклость. Это важное замечание дополним тем, что массы меньшей плотности, что естественно, обладают большей подвижностью, чем более плотные массы.

Рассмотрим теперь возможность возникновения вынужденных колебаний оси вращения Земли. Как было показано в [4, 9], при изменении угловой скорости вращения возникает деформация фигуры Земли, следствием которой является «перетекание» подкорковых масс из полярных областей в экваториальные (при уменьшении полярного диаметра Земли, то есть при увеличении угловой скорости вращения) и наоборот (при уменьшении ω , когда Земля стремится к гравитационному равновесию при уже новом (меньшем) значении деформирующей центробежной силы).

В таком случае естественно предположить, что в силу большей подвижности при увеличении угловой скорости вращения первоначально придут в движение подкорковые массы в зонах, соответствующих экваториальной выпуклости (то есть

по направлению $0 - 180^\circ$), что вызовет прецессионно-нутацонные колебания оси вращения, так как изменится момент инерции Земли, причем проекция большой оси эллипсоидальных движений мгновенного полюса вращения Земли на ось X (то есть на направление $0 - 180^\circ$) будет увеличиваться. Проведенный анализ изменений угловой скорости вращения Земли (угловых ускорений ε) и проекции радиуса-вектора полюса на ось X подтверждает наше предположение (см. рис. 3). Уменьшение угловой скорости вращения Земли вызывает, соответственно, обратное перемещение масс, и колебания радиуса-вектора полюса вдоль оси X уменьшаются. Отсутствие полугодового цикла (по крайней мере значимой амплитуды) в изменениях X_{Π} (присутствующего в колебаниях ε и M), на наш взгляд можно объяснить запаздыванием в выравнивании фигуры до гравитационного равновесия при изменении угловой скорости вращения Земли.

В циклах большой длительности (22 года, вековой цикл), согласно [2], большая ось эллипса вынужденных колебаний места полюса лежит в направлении малой экваториальной оси земного эллипсоида вращения, то есть согласно рис. 4 в направлении $80^\circ E - 100^\circ W$. Это, по нашему мнению, объясняется тем, что в циклах большей длительности главную роль в изменении момента инерции Земли играет перемещение (происходящее тоже в длительных циклах, вместе с циклами большой продолжительности в изменениях ω) более плотных подкоровых масс, лежащих в долготных зонах $40 - 130^\circ E$ и $40 - 140^\circ W$, тогда как длительные циклы в перемещениях масс меньшей плотности менее значительны в силу компенсации полярно-экваториальных и экваториально-полярных перемещений (происходящих в циклах меньшей длительности) на большом интервале времени.

Положительная корреляция изменений величины большой оси эллипса вынужденных колебаний с солнечной активностью в 22-летних циклах [2], учитывая наблюдаемую корреляцию в 22-летних циклах угловой скорости вращения Земли и чисел Вольфа [5, 6], в свете выдвинутой в этих работах (с учетом результатов [4]) гипотезы объясняется наличием аналогичного цикла в глобальных деформационных процессах.

На рис. 5 представлены кривые выделенных вынужденных движений мгновенного полюса вращения Земли, осредненные в 7-летних циклах, а также изменение за этот же период отношения проекций большой оси эллипса вынужденных колебаний полюса ($V = V_x/V_y$), солнечной активности (W), магнитной возмущенности (M) и продолжительности суток ($\Delta\tau$)¹ [17–23]. Из рисунка видно, что вынужденные движения полюса (в частности, такие элементы, как эллиптичность, длина большой оси и направление большой оси эллипса вынужденных колебаний) изменяются в соответствии с угловой скоростью вращения Земли, а также соответствуют реперным фазам циклов чисел Вольфа и индекса M . Колебания вдоль оси X достигают максимума на ветви роста ω , а затем (приблизительно за $0.5 \div 1$ год до максимума ω) наблюдается уменьшение эллиптичности траектории полюса, что может быть объяснено установлением динамического равновесия при новом соотношении моментов. В изменениях элементов траектории движения полюса просматривается также вековой цикл.

Полученное соответствие в колебаниях W , M , $\Delta\tau$ и V еще раз подтверждает наше предположение о солнечнообусловленных (через угловую скорость вращения Земли и вызванную ее изменениями деформацию эллипсоида) вынужденных нутацонно-прецессионных колебаниях мгновенной оси вращения Земли.

¹ Выделение 11-летних колебаний W и M , а также 7-летних колебаний в изменениях продолжительности суток производилось сглаживанием скользящими интервалами аналогично [5]. Параметр V характеризует эллиптичность траектории полюса и направление большой оси эллипса.

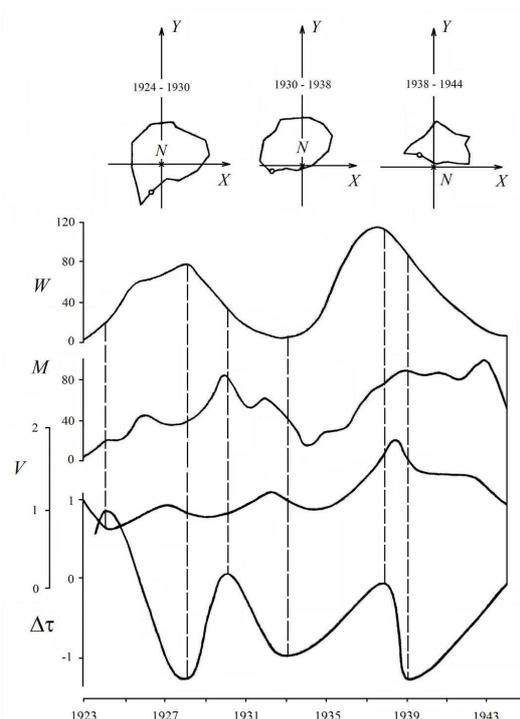


Рис. 5. Вынужденные движения мгновенного полюса вращения Земли за период 1955–1974 гг. и изменение за тот же период V , W , M и $\Delta\tau$

Заключение

В настоящей работе свободные 14-месячные (чандлеровы) и вынужденные 12-месячные колебания мгновенной оси вращения Земли рассмотрены с единых позиций – как следствие переменности ротационного режима Земли (обусловленной, согласно гипотезе [5, 6], изменениями солнечной активности опосредованно через колебания глобальной магнитной возмущенности). Сделана попытка объяснить (на качественном уровне) вынужденную часть реальных колебаний места полюса вращения возникающим при полярных пульсациях фигуры Земли, обусловленных переменностью ротационного режима, неравномерным по долготным зонам перемещением подкорковых масс в теле планеты. Реальность перемещения подкорковых масс, «перетекания» их из полярных областей в экваториальные и наоборот при изменении ротационного режима и происходящего по причине этого перераспределения плотности в теле Земли вытекает прежде всего из почти установленного геофизикой факта, что вещества в подкорковом слое вследствие колоссальных давлений и температур находятся в жидком или по крайней мере полужидком состоянии [10]. Далее, опираясь на тот факт, что плотность в теле Земли распределена неравномерно, нами была высказана гипотеза о «деформационной» природе вынужденной нутационно-прецессионной волны в колебаниях мгновенной оси вращения Земли и проведен анализ имеющихся гелиогеофизических данных за 1900–2017 гг. Основные выводы можно сформулировать следующим образом.

1. Реальные колебания места мгновенного полюса вращения происходят достаточно синхронно с колебаниями угловой скорости вращения Земли, причем с некоторым запаздыванием относительно последних, что позволяет выдвинуть переменность ротационного режима планеты как причину длиннопериодных прецессионно-нутационных движений земной оси вращения.

2. Возникающая при изменении угловой скорости деформирующая (центробежной природы) сила вызывает неравномерную по долготным зонам (вследствие неравномерности распределения плотности в теле планеты) деформацию фигуры. При такой неравномерной деформации изменяется момент инерции Земли, что вызывает колебания ее мгновенной оси вращения, то есть нутацию и прецессию оси (вынужденная волна).

3. Анализ имеющегося фактического материала подтверждает обоснованность предположения об определяющей роли изменений угловой скорости вращения Земли как для свободных 14-месячных (чандлеровых), так и для вынужденных 12-месячных колебаний мгновенной оси вращения Земли.

4. Наблюдающаяся корреляция циклических изменений солнечной активности, магнитной возмущенности и колебаний мгновенной оси вращения Земли находит свое объяснение, с учетом гипотезы [5, 6], через циклические изменения ротационного режима, без привлечения в качестве промежуточного звена барикоциркуляционных процессов, имеющих сравнительно невысокую энергетическую эффективность.

5. Изменения барикоциркуляционного режима естественно считать следствием переменности отклоняющей силы вращения Земли (силы Кориолиса) как по величине, так и по направлению. Сам вектор силы Кориолиса претерпевает изменения, так как меняется во времени вектор угловой скорости вращения Земли.

Таким образом, в качестве единой причины нутационно-прецессионных колебаний мгновенной оси вращения выдвигается солнечно-обусловленная (через магнитосферу) переменность ротационного режима Земли, причем принципиально новым является рассмотрение переменности ротационного режима в качестве причины вынужденных движений полюса вращения планеты.

Благодарности. Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Работа была поддержана Национальным научным фондом Грузии им. Шота Руставели (SRNF) (проект № FR17 252).

Литература

1. *Эйгенсон М.С.* О солнечном управлении вращательным движением Земли // Информ. бюл. Оргкомитета МГГ при Президиуме АН УССР. – 1958. – № 1. – 16 с.
2. *Максимов И.В.* Геофизические силы и воды океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 448 с.
3. *Белашов В.Ю.* Длиннопериодные нутационно-прецессионные движения мгновенного полюса вращения Земли: Препринт. – Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1985. – 19 с.
4. *Белашов В.Ю., Белашова Е.С., Харшшладзе О.А.* Изменения скорости вращения Земли и связанная с ними деформация фигуры // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2020. – Т. 162, кн. 1. – С. 66–76. – doi: 10.26907/2541-7746.2020.4.66-76.
5. *Белашов В.Ю.* О влиянии магнитосферной возмущенности на ротационный режим Земли: Препринт. – Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984. – 17 с.
6. *Белашов В.Ю., Насыров И.А., Гордеев Р.С.* К вопросу о влиянии возмущенности магнитосферы на ротационный режим Земли // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 4. – С. 617–630.
7. *Максимов И.В.* О некоторых географических проявлениях одиннадцатилетнего цикла солнечной деятельности // Изв. АН СССР. Сер. геогр. – 1954. – № 1. – С. 135–138.

8. Куликов К.А. Изменяемость широт и долгот. – М.: Физматгиздат, 1962. – 400 с.
9. Стопас М.В. Опыт математического анализа тектонических процессов, вызываемых изменениями фигуры Земли: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – Л., 1961. – 24 с.
10. Мельхиор П. Физика и динамика планет. – М.: Мир, 1975. – Ч. 1. – 575 с.; 1976. – Ч. 2. – 483 с.
11. Bursa M. The variations in J2 and in the moments of inertia: satellite results and consequences for the angular momentum budget of the Earth–Moon–Sun system // Earth’s Rotation from Eons to Days / Eds. P. Brosche, J. Sundermann. – Berlin: Springer, 1990. – P. 52–57.
12. Витинский Ю.И. Цикличность и прогнозы солнечной активности. – Л.: Наука, 1973. – 257 с.
13. Sunspot Number. – URL: <http://sidc.oma.be/silso/datafiles/>.
14. Оль А.И. Индексы возмущенности магнитного поля Земли и их гелиогеофизическое значение // Тр. Аркт. и Антаркт. н.-и. ин-та, 1969. – Т. 289. – С. 5–21.
15. Space Weather Prediction Center. – URL: <http://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index/>.
16. Höpfner J. Low-frequency variations, Chandler and annual wobbles of polar motion as observed over one century // Surveys in Geophysics. – 2004. – V. 25. – P. 1–54. – doi: 10.1023/B:GEOP.0000015345.88410.36.
17. Сидоренков Н.С. Неравномерность вращения Земли по данным астрономических наблюдений за период 1955.5 – 1965.0 гг. // Астрон. журн. – 1967. – Т. 44, № 3. – С. 650–662.
18. Сидоренков Н.С. Влияние атмосферной циркуляции на скорость вращения Земли на примере 1956.8–1964.8 гг. // Астрон. журн. – 1968. – Т. 45, № 4. – С. 892–903.
19. Сидоренков Н.С. К вопросу о методах оценки влияния атмосферной циркуляции на скорость вращения Земли // Астрон. журн. – 1968. – Т. 45, № 2. – С. 382–388.
20. Сидоренков В.Н. Неравномерность вращения Земли по данным астрономических наблюдений за 1965.0–1968.0 годы // Астрон. журн. – 1969. – Т. 46, № 1. – С. 215–218.
21. Сидоренков Н.С. Неравномерность вращения Земли по данным астрономических наблюдений за период 1968.0–1971.0 гг. // Астроном. журн. – 1971. – Т. 48. – С. 1305–1307.
22. Сидоренков Н.С. Неравномерность вращения Земли по данным астрономических наблюдений за период 1971.0–1974.5 гг. // Астрон. журн. – 1975. – Т. 52. – С. 1108–1112.
23. Brouwer D. A study of the changes in the rate of rotation of the Earth // Astron. J. – 1952. – V. 57, No 5. – P. 125–146.

Поступила в редакцию
16.11.2019

Белашов Василий Юрьевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник НИИ исследований ближнего космоса

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: vybelashov@yahoo.com

Белашова Елена Семеновна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерных систем

Казанский национальный исследовательский технический университет имени

А.Н. Туполева

ул. К. Маркса, д. 10, г. Казань, 420111, Россия

E-mail: *bel_lena@mail.ru*

Харшиладзе Олег Автандилович, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник Центра космических исследований Института геофизики им. М. Нодия

Тбилисский государственный университет им. И. Джавахишвили

ул. Чавчавадзе, д. 1, г. Тбилиси, 0179, Грузия

E-mail: *o.kharshiladze@mail.ru*

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

**UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)**

2020, vol. 162, no. 4, pp. 467–480

doi: 10.26907/2541-7746.2020.4.467-480

Long-Period Nutational-Precessional Motions of the Instantaneous Earth Rotation Pole

V. Yu. Belashov^{a}, E. S. Belashova^{b**}, O. A. Kharshiladze^{c***}*

^a*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

^b*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev,
Kazan, 420111 Russia*

^c*Ivane Javakhishvili Tbilisi State University, Tbilisi, 0179 Georgia*

E-mail: **vybelashov@yahoo.com, **bel_lena@mail.ru, ***o.kharshiladze@mail.ru*

Received November 11, 2019

Abstract

The influence of the rotational regime on real long-period nutational-precessional motions of the instantaneous pole of the Earth's rotation is considered. The solar magnetospheric (through changes in the angular velocity of rotation) mechanism of action is discussed. The observed 12-month oscillations of the instantaneous axis of rotation are explained by the influence of the deforming force arising when the angular velocity changes, which causes deformation of the figure that is not uniform in the longitudinal zones, without involving baric-circulation processes as an intermediate link. Thus, free (Chandler) and forced 12-month fluctuations of the pole position are considered from a single point of view, i.e., as resulting from the variability of the rotational regime of the Earth. The analysis of heliogeophysical data for 1900–2017 confirms the validity of the proposed relationship mechanism.

Keywords: Earth rotation, nutation, precession, instantaneous pole of rotation, Earth figure deformation, pole position fluctuations, free oscillations, forced oscillations, solar magnetospheric control

Acknowledgments. The work is performed according to the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University and supported by the Shota Rustaveli National Science Foundation (project no. FR17 252).

Figure Captions

Fig. 1. Changes in the mean values of V_{\max} with an accuracy of a hundredth of an arc-second, as compared with the oscillations of W in 22-year cycles, 1900–1932.

Fig. 2. Changes in the magnetic disturbance $M = 10(\sum K_p - 10)$, as compared with the coordinate X_{Π} , January 1955 – October 1956.

Fig. 3. Mean for the period 1955–1974 cyclic curves of the index M , angular acceleration ε , and projection of the radius vector of the pole on the X ($0 - 180^\circ$) axis (forced wave).

Fig. 4. Geoid curves ($e = 1/298.225$) spaced every 10 m, zero level is shown with a dotted line. Lambeck and Gaposchkin's model [10] (northern hemisphere).

Fig. 5. Forced motions of the instantaneous pole of the Earth's rotation (for the period 1923–1944) and changes over the same period V , W , M , and $\Delta\tau$.

References

1. Eigenson M.S. On solar control of the rotational motion of the Earth. *Inf. Byull. Orgkom. MGG Prezidium Akad. Nauk Ukr. SSR*, 1958, no. 1. 16 p. (In Russian)
2. Maksimov I.V. *Geofizicheskie sily i vody okeana* [Geophysical Forces and Ocean Waters]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1970. 448 p. (In Russian)
3. Belashov V.Yu. *Dlinnoperiodnye nutatsionno-pretseSSIONnye dvizheniya mgnovennogo polyusa vrashcheniya Zemli: Preprint* [Long-Periodical Nutation-Precession Movements of the Instant Pole of Rotation of the Earth: Preprint]. Magadan, SVKNII DVNTs AN SSSR, 1985. 19 p. (In Russian)
4. Belashov V.Yu., Belashova E.S., Kharshiladze O.A. Changes in the Earth's rotational velocity and figure deformation associated with them. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2020, vol. 162, no. 1, pp. 66–76. doi: 10.26907/2541-7746.2020.4.66-76. (In Russian)
5. Belashov V.Yu. *O vliyaniy magnetosfernoi vozmushchennosti na rotatsionnyi regim Zemli: Preprint* [On the Influence of Magnetosphere Disturbance on the Rotational Regime of the Earth: Preprint]. Magadan, SVKNII DVNTs Akad. Nauk SSSR, 1984. 17 p. (In Russian)
6. Belashov V.Yu., Nasyrov I.A., Gordeev R.S. On the problem of the influence of the magnetosphere disturbance onto the rotational regime of the Earth. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 4, pp. 617–630. (In Russian)
7. Maksimov I.V. On some geographical displays of the eleven-years cycle of the solar activity. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Geogr.*, 1954, no. 1, pp. 135–138. (In Russian)
8. Kulikov K.A. *Izmenyaemost' shirot i dolgot* [Variability of Latitudes and Longitudes]. Moscow, Fizmatizdat, 1962. 400 p. (In Russian)
9. Stovas M.V. Mathematical analysis of tectonic processes caused by changes in the figure of the Earth. *Extended Abstract of Doct. Phys.-Math. Sci. Diss.* Leningrad, 1961. 24 p. (In Russian)
10. Mel'khior P. *Fizika i dinamika planet* [Physics and Dynamics of the Planets]. Moscow, Mir, Pt. 1, 1975: 575 p.; Pt. 2, 1976: 483 p. (In Russian)
11. Bursa M. The variations in J_2 and in the moments of inertia: Satellite results and consequences for the angular momentum budget of the Earth–Moon–Sun system. In: Brosche P., Sundermann J. (Eds.) *Earth's Rotation from Eons to Days*. Berlin, Springer-Verlag, 1990, pp. 52–57.

12. Vitinskii Yu.I. *Tsyklichnost' i prognozy solnechnoi aktivnosti* [Cycles and Forecasts of Solar Activity]. Leningrad, Nauka, 1973. 257 p. (In Russian)
13. Sunspot Number. Available at: <http://sidc.oma.be/silso/datafiles/>.
14. Ol' A.I. The indices of the Earth magnetic field disturbance and their helio-geophysical importance. *Tr. Arkt. Antarkt. Nauchno-Issled. Inst.*, 1969, vol. 289, pp. 5–21. (In Russian)
15. Space Weather Prediction Center. Available at: <http://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index/>.
16. Höpfner J. Low-frequency variations, Chandler and annual wobbles of polar motion as observed over one century. *Surv. Geophys.*, 2004, vol. 25, pp. 1–54. doi: 10.1023/B:GEOP.0000015345.88410.36.
17. Sidorenkov N.S. Nonuniformities in the Earth's rotation from astronomical observations during 1955.5–1965.0. *Sov. Astron.*, 1967, vol. 11, no. 3, pp. 516–525.
18. Sidorenkov N.S. The influence of atmospheric circulation on the Earth's rotational velocity, 1956.8–1964.8. *Sov. Astron.*, 1969, vol. 12, no. 4, pp. 706–714.
19. Sidorenkov N.S. Methods for estimating the influence of atmospheric circulation on the Earth's rotational velocity. *Sov. Astron.*, 1968, vol. 12, no. 2, pp. 303–308.
20. Sidorenkov V.N. Nonuniformities in the Earth's rotation from astronomical observations during 1965.0–1968.0. *Sov. Astron.*, 1969, vol. 13, no. 1, pp. 166–168.
21. Sidorenkov N.S. Nonuniformities in the Earth's rotation from astronomical observations during 1968.0–1971.0. *Sov. Astron.*, 1972, vol. 15, no. 6, pp. 1039–1041.
22. Sidorenkov N.S. Nonuniformities in the Earth's rotation from astronomical observations during 1971.0–1974.5. *Sov. Astron.*, 1976, vol. 19, no. 5, pp. 665–667.
23. Brouwer D. A study of the changes in the rate of rotation of the Earth. *Astron. J.*, 1952, vol. 57, no. 5, pp. 125–146.

Для цитирования: *Белашов В.Ю., Белашова Е.С., Харшиладзе О.А. Длиннопериодные нутационно-прецессионные движения мгновенного полюса вращения Земли // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2020. – Т. 162, кн. 4. – С. 467–480. – doi: 10.26907/2541-7746.2020.4.467-480.*

For citation: *Belashov V.Yu., Belashova E.S., Kharshiladze O.A. Long-period nutational-precessional motions of the instantaneous Earth rotation pole. Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki, 2020, vol. 162, no. 4, pp. 467–480. doi: 10.26907/2541-7746.2020.4.467-480. (In Russian)*