

ОБ АМПЛИТУДНОЙ МОДУЛЯЦИИ ЧАНДЛЕРОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА ЗЕМЛИ

В.Л. Горшков

В работе рассмотрен возможный механизм низкочастотной амплитудной модуляции чандлеровского движения полюса (ЧДП) и синхронных колебаний скорости вращения Земли. В случае переменного трения между литосферой и мантией, возбуждающие ЧДП факторы будут воздействовать на тело с соответствующим образом меняющимися моментами инерции. При слабом трении возбуждающие факторы будут действовать в большей степени на внешний слой с меньшим моментом инерции, при «жестком» сцеплении – на всю Землю, т.е. будет иметь место стандартно рассчитываемая ситуация. В случае такой переменности моментов инерции, наблюдаемое на поверхности чандлеровское колебание полюса и скорость вращения Земли будут испытывать соответствующие вариации амплитуды. В рамках этой модели анализируются данные международной службы вращения Земли.

Введение

Механизм возбуждения чандлеровского колебания полюса Земли (свободной нутации) остается одним из наиболее дискутируемых в геодинамических исследованиях. Продолжается как поиск других геофизических источников его возбуждения помимо метеорологического (Dumberry, Bloxham, 2002; Спиридонов, Акименко, 2003), так и разработка моделей, в которых чандлеровское движение полюса (ЧДП) рассматривается, фактически, как вынужденная нутация (Авсюк, 1996; Курбасова, Рыхлова, 2001; Акуленко и др., 2002). В целом, на основании анализа многих геофизических данных, собранных и проанализированных за последние десятилетия (Gross et al., 2003; Liao et al., 2003), можно считать, что основными факторами, поддерживающими ЧДП, являются атмосферный (ААМ), океанический (ОАМ) и гидрологический (НАМ) угловые моменты.

Заметим, что в большинстве геофизических моделей возбуждения свободной нутации не находит объяснения факт значительной переменности амплитуды ЧДП и изменения его фазы в 20-х годах прошлого столетия. По-видимому, должны существовать механизмы, модулирующие соответствующую динамику ЧДП. В работах (Воротков, Горшков, 2002; Горшков, Воротков, 2004) исследована модель возбуждения свободной нутации за счет нелинейного трения между внутренними слоями Земли. Это же переменное трение также может приводить к наблюдаемой картине изменения амплитуды ЧДП, что и является предметом настоящего исследования .

Геофизические предпосылки механизма амплитудной модуляции ЧДП

Для предлагаемого механизма существенно наличие взаимной подвижности слоев в недрах Земли с внутренним трением (динамической вязкостью η) между ними, которое может изменяться за характерное время порядка десятка и более лет. Наиболее подходящие для этого условия имеют место на границе литосферы и верхней мантии или астеносферы. Литосфера и астеносфера различаются состоянием вещества в них, т.е. это различие реологическое - астеносфера пластична по сравнению с хрупкой литосферой, представленной многочисленными плитами разных размеров, иногда расположенных одна под другой с флюидной «смазкой» между ними.

В активно развиваемой сейчас на основе последних геофизических данных флюидной геодинамике (Павленкова, 2004), характеризуемой переходом к геофизике многофазных сред и термодинамике неравновесных систем, все верхние слои Земли оказываются реологически расслоенными. Для них характерны обширные по площади слои толщиной 10÷30 км с пониженными скоростями распространения сейсмических волн и с повышенной электропроводностью. Разрабатываемая во флюидной геодинамике модель представляет верхнюю оболочку Земли (~ 100 – 200 км) как серию жестких пластин, разделенных ослабленными слоями. Горизонтальные движения представимы в виде относительных подвижек этих пластин и течения вещества между ними по ослабленным зонам. Процесс просачивания флюидного материала идет в основном вдоль плоскостей этих пластин и на порядок превосходит его перенос по вертикальным зонам трещиноватости.

На наш взгляд это может объяснять различие «вертикальной» вязкости, определяемой по послеледниковому «всплытию», и «горизонтальной», ответственной за дрейф плит. При этом, ввиду постоянных горизонтальных взаимных движений этих пластин, локальные потоки эндогенного тепла также могут меняться и, следовательно, менять свойства «смазочного» материала, т.е. его вязкость. Возникающие при взаимных движениях этих пластин вязкие течения как раз и являются термически активируемым процессом с коэффициентом вязкости $\eta \sim \exp(-E_a/kT)$, где k – постоянная Больцмана, E_a – энергия активации, T – абсолютная температура.

Могут быть и другие причины регионального характера (океаническая или континентальная принадлежность, наличие поднятий, тектонических зон и т.д.), ответственные за региональный характер распределения вязкости. Глубинный профиль основных реологических параметров по современным оценкам (Mogency, Doin, 2004) показывает на глубинах около 100 км минимум эффективной вязкости ($\eta \approx (0.5 \div 1) \times 10^{19}$ пуаз

(дин·с/см²) и жесткость $\mu \approx (0.3 \div 1) \times 10^{11}$ дин/см². Вторичный минимум вязкости ($\eta \approx 10^{20}$ пуаз) наблюдается на глубинах около 50 км. Несмотря на некоторую условность глобальной оценки (тем более в рамках флюидной геодинамики), по этим данным можно оценить предельные значения времени релаксации $\tau = \eta / \mu$. В рассматриваемых слоях 50 и 100 км значения времени релаксации находятся в пределах $1 < \tau < 20$ лет. Таким образом в этих зонах возможны достаточно быстрые изменения агрегатного состояния вещества, сопоставимые с характерным временем амплитудной модуляции ЧДП.

Амплитудно-фазовые вариации ЧДП

Для исследования использовались наиболее продолжительные данные международной службы вращения Земли EOP(IERS)C01 (1846-2005 гг.) и ряд эксцесса продолжительности суток (LOD) LUNAR97 (1832-1997 гг.) (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>). Более надежные данные о движении полюса начинаются с момента образования международной службы широты в 1896 году, когда за счет равномерного распределения станций по долготе ошибки обеих координат полюса (X,Y) стали меньше $\pm 0.05''$. Ряд среднегодовых значений LOD до формирования в 1956 году службы атомного времени основан на наблюдениях покрытий звезд Луной и имеет в конце XIX века ошибки более ± 0.4 мсек, а в конце XX века уже менее ± 0.03 мсек.

Для исследования необходимы выделенные из общего движения полюса основные его моды – чандлеровское и годичное колебания полюса. Ранее нами (Воротков и др., 2002) были продемонстрированы возможности сингулярного спектрального анализа (SSA) (Данилов, Жиглявский, 1997) для выполнения декомпозиции этих рядов, имеющих ярко выраженную нестационарную природу. Среди первых по вкладу, помимо годичной составляющей, присутствуют две близкие по периоду к ЧДП составляющие – основная (T = 1.191 года) и «слабая» (T = 1.11 – 1.28 года).

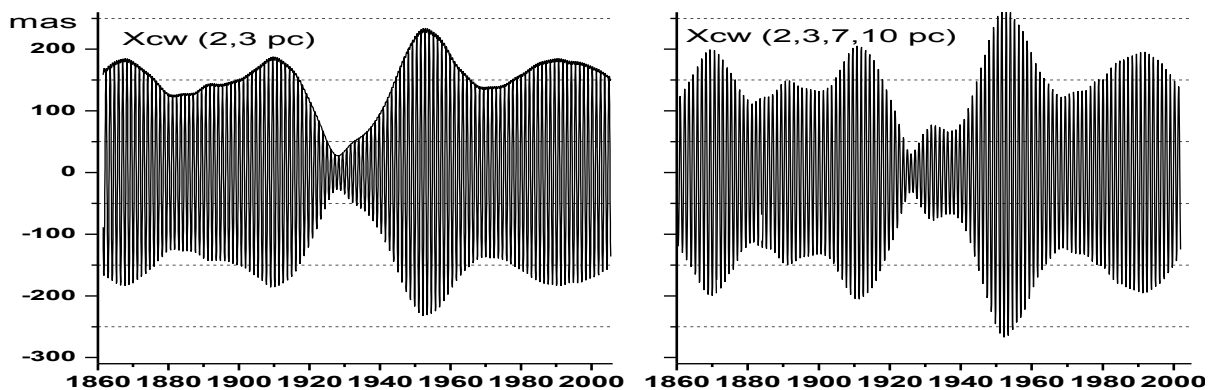


Рис. 1.

На **рис.1** представлено восстановленное с помощью SSA чандлеровское движение полюса только по координате **X**, слева по основной составляющей (2 и 3 главные компоненты разложения), справа по обеим (2, 3, 7 и 10 компоненты). Слабый компонент можно интерпретировать как воздействие некоторого зашумляющего (модулирующего) процесса, приводящего к уширению спектральной линии на частоте ЧДП, хотя это и не единственно возможная интерпретация (Манк, Макдональд, 1964). Так в работе (Vondrak, 1989) исследуется модель с переменной частотой свободной нутации, возникающей из-за слабой нелинейности отклика океана на изменение оси вращения внутри тела Земли. В работе (Воротков, Горшков, 2002) предложена модель дополнительного (к атмосферно-океаническому) возбуждения свободной нутации за счет нелинейного трения между внутренними слоями Земли. Это переменное, например, из-за вышеупомянутых эндогенных процессов, трение также может приводить к наблюдаемой картине изменения амплитуды ЧДП.

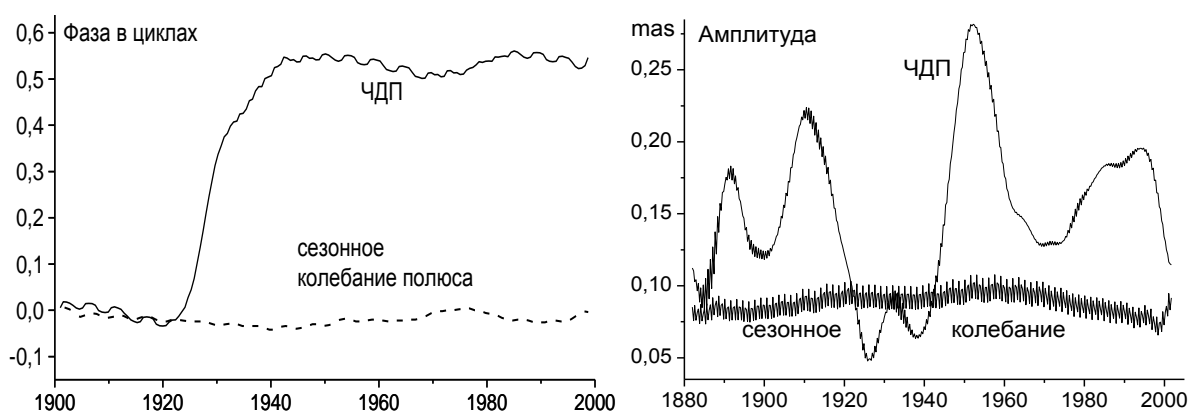


Рис. 2.

Проведенное разделение компонент позволило определить амплитудные и фазовые вариации чандлеровской и годичной составляющих движения полюса Земли, представленные на **рис. 2**. Видно, что свободные колебания испытывают сильные возмущения как тормозящего, так и разгоняющего свойства. Потеря фазы ЧДП на полпериода в 1920-х годах связана с почти полным затуханием этого колебания – за десять с небольшим лет амплитуда упала почти на 200 mas. Примерно за такое же время этот «маятник» был раскачан до еще больших амплитуд – в 1950-х годах амплитуда возросла более чем на 200 mas. При этом годичная составляющая движения полюса не претерпела за это время серьезных изменений ни фазы, ни амплитуды, как видно из того же **рис.2**.

Известно, что годичная составляющая движения полюса определяется, в основном, возбуждающим действием атмосферного, океанического и гидрологического уг-

ловых моментов. Некоторые вариации их годового периода, приводящие к уширению спектральной линии годичной составляющей возбуждающих движение полюса угловых моментов, оказываются почти достаточными для возбуждения близкой по частоте свободной нутации. Однако глобальные оценки этих угловых моментов имеются только с 1948 года и не покрывают вышеописанный критичный для верификации моделей интервал времени. На основании более продолжительных, но не глобальных, данных из метеорологического центра Хэдли (Великобритания) был промоделирован в прошлое ряд ААМ. На **рис. 3** из работы (Rosen, Salstein, 2000) приведены «реставрированные» до 1920 года данные ААМ с помощью разных моделей (широкая полоса на рисунке представляет размах этих моделей). Данные масштабированы в единицах 10^{25} кг·м²/с.

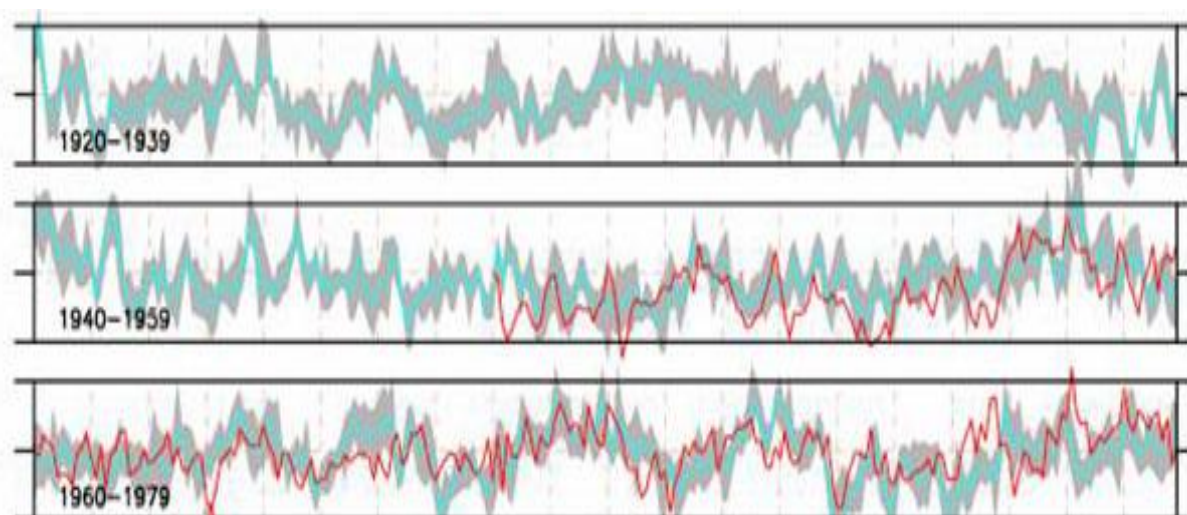


Рис. 3

Видно, во-первых, значительное расхождение модельных рядов (жирной линией, начиная с 1948 года, представлены результаты глобальной переработки метеорологических данных в проекте «NCEP/NCAR reanalysis»). Во-вторых, и это главное для нашего рассмотрения, заметно отсутствие в 1920-х годах какой-либо особенности в поведении ААМ, которая могла бы объяснить соответствующую реакцию ЧДП. Заметим, что данные об ОАМ, вычисляемые на основе данных о глобальных океанических течениях и придонном давлении, могли бы оказать более существенное влияние на поведение ЧДП ввиду того, что по текущим оценкам их относительное влияние на возбуждение колебаний полюса больше чем влияние ААМ. Однако эти данные в настоящее время доступны в прошлое только до 1970 года (Ponte, Stammer, 1999) и вряд ли могут быть продолжены в еще более раннее время с приемлемой точностью.

Связь амплитудных вариаций ЧДП и вариаций продолжительности суток

Нетрудно рассчитать затраты на вышеупомянутые затухание и последующее возбуждение ЧДП в первой половине XX века. Кинетическая энергия (при постоянстве энергии упругих деформаций) пропорциональна квадрату амплитуды колебания (Lambeck, 1980):

$$E \approx 0.5A\Omega^2(X^2+Y^2)(C-A)/C, \quad (1)$$

где X и Y - координаты полюса в радианах за вычетом движения среднего полюса, $C = 8.0365 \times 10^{37}$ и $A = 8.0101 \times 10^{37}$ кг·м² – осевой и экваториальный моменты инерции Земли, $\Omega = 7.292115 \times 10^{-5}$ радиан/сек – средняя угловая скорость вращения Земли. Из данных о вариациях амплитуды ЧДП в XX веке следует:

$$(X^2+Y^2)_{1910,1950}/(X^2+Y^2)_{1920-1930} \approx 20 \div 28. \quad (2)$$

Таким образом энергия чандлеровского колебания полюса Земли изменялась в этот период более чем в 20 раз.

Естественно задаться вопросом – на что была затрачена эта энергия при торможении и откуда взята при очередном разгоне ЧДП? Стандартный ответ, в рамках геофизического (ААМ + ОАМ + НАМ), в основном сезонного (т.е. годичного), возбуждения колебания полюса, должен предполагать значительные и продолжительные вариации частоты (ω) и/или амплитуды (a) возбуждающего колебания ввиду пропорциональности амплитуды возбуждаемого колебания (на частоте ЧДП ω_{cw}) величине $a \cdot e^{i\omega t} \cdot \omega_{cw} / (\omega - \omega_{cw})$ (Lambeck, 1980). Так при наблюдаемом увеличении амплитуды ЧДП должно также наблюдаться и стремление частоты возбуждающего колебания ω к резонансной частоте $\omega_{cw} = 0.84$ и/или существенное увеличение его амплитуды a , а при уменьшении – наоборот. Однако столь продолжительных и заметных вариаций атмосферных параметров согласно **рис.3** не наблюдалось и, с точки зрения геофизических причин возбуждения, можно рассчитывать только на отсутствующие данные ОАМ.

Однако согласно (1) можно предложить и иную интерпретацию вариаций энергии – изменяться могли также и моменты инерции. Примечательно, что приблизительно такое же, как в (2), соотношение имеет место между моментами инерции литосферы и всей Земли. Согласно оценкам, приведенным в (Артюшков, 1979), мощность континентальной литосферы $d \approx 80 \div 100$ км, а океанической $d \approx 50 \div 70$ км. Поскольку ошибки этих величин составляют 20-25 км, то можно положить в среднем для всей литосферы $d \approx 70$ км. Тогда, не прибегая к интегрированию по сфере, используя среднюю плотность

литосферы $\rho \approx 3 \text{ г/см}^3$ и полагая одинаковым динамическое сжатие литосферы и мантии ($\mathbf{H}_L \approx \mathbf{H} = (\mathbf{C} - \mathbf{A})/\mathbf{C}$), получим приближенную оценку для момента инерции литосферы $C_L \approx (8/3) \pi R^4 \rho d = 2.94 \times 10^{36} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Сравнивая ее с главными моментами инерции всей Земли, получим $C/C_L \approx A/A_L \approx 27$. В некоторых работах мощность литосферы оценивается в 100 – 120 км, и тогда $C/C_L \approx A/A_L \approx 17$. Таким образом:

$$C/C_L \approx A/A_L \approx 17 \div 27. \quad (3)$$

Принятые допущения не меняют широкий диапазон полученного соотношения, замечательно совпадающего с вариациями энергии колебания полюса по (2).

Следовательно, можно предположить, что в 1910-х годах по каким-то причинам произошло более жесткое сцепление литосферы с верхней мантией, которое потом сильно уменьшилось и к 1960 году вышло на среднее состояние. Тогда, согласно (1), энергия, затрачиваемая геофизическими угловыми моментами на возбуждение ЧДП, может оставаться практически постоянной, будучи, условно говоря, приложена либо ко всей Земле, как, например, в интервале 1910 – 1930 годов, либо только к ее верхнему наиболее жесткому слою (литосфере) в зависимости от внутреннего трения между слоями Земли. Разумеется, таких экстремальных значений вязкости не может быть обеспечено состоянием вещества в глобальном масштабе в зоне между литосферой и мантией. Однако региональные проявления процесса взаимных движений между этими слоями Земли, очевидным образом отражающиеся в сейсмичности Земли (накопления и сброса напряжений), вполне могут приводить к изменению соотношения моментов инерций в приведенном в (3) интервале.

Это предположение должно касаться также и аксиальной составляющей вектора вращения Земли. На **рис. 4**, приведены декадные вариации LOD, обычно объясняемые взаимодействием мантии и ядра, в сопоставлении с амплитудными вариациями ЧДП из **рис. 2**. Очевидна синфазность графиков в интервале 1908-1942 гг., т.е. увеличению скорости вращения Земли (уменьшение LOD) соответствовало уменьшение амплитуды колебания полюса и наоборот. В остальное время графики этих процессов приблизительно противофазны.

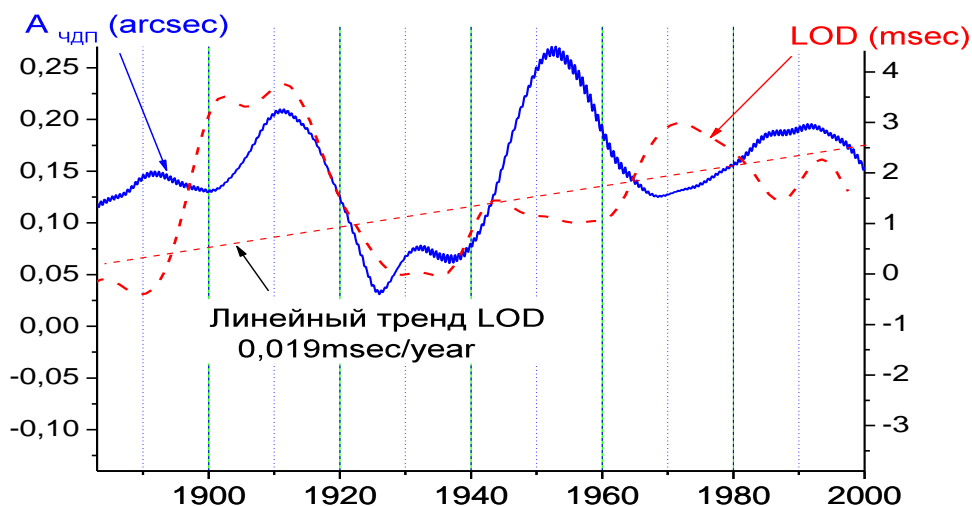


Рис. 4

В принятой сейчас концепции тектоники литосферных плит предполагается наличие взаимного вращения литосферы относительно астеносферы (Bostrom, 1971). При этом литосфера как бы отстаёт во вращении от астеносферы, то есть смещается к западу по разным оценкам от 5 до 20 см в год на экваторе (Smith, Lewis, 1998). Взяв среднее из этих оценок и переведя их в угловую меру получим, что *мантии вращается быстрее литосферы в среднем на 0.28 мсек/год*. Ввиду западного дрейфа внешней оболочки Земли увеличение её трения с более быстро вращающейся и значительно более массивной мантией (более чем в сто раз) должно приводить к наблюдаемому на поверхности увеличению скорости вращения Земли.

Из рис. 4 видно, что с 1912 по 1929 год *наблюдаемое на поверхности ускорение вращения Земли* (по нашему предположению, за счет увеличения сцепления с мантией) *оказалось равным 0.26 мсек/год*. Если учесть что вышеупомянутая оценка дрейфа относится к экваториальной части Земли и теоретически должна исчезать в полярных областях, то совпадение соответствующих оценок удивительное. Уменьшение трения в зонах раздела этих слоев постепенно возвратило процесс вращения к доминированию диссипативных процессов во вращении Земли, т.е к вековому замедлению вращения Земли на 2 мсек в столетие, отмеченному на рис. 4 пунктирной линией.

Понятно, что это идеализированная схема, в которой не учтены сопутствующие процессы и обратные связи. В частности, более жесткое сцепление верхних слоев должно приводить к незначительному торможению вращения самой мантии (в обратном отношении моментов инерции (3) мантии и литосферы), что в среднем, как фоновый процесс, и происходило во второй половине XX века и до 1910 года, как это видно из рис. 4.

Заключение

Таким образом можно заключить, что данные о вариациях амплитуды чандлеровского колебания полюса в начале XX века и синхронные с ними вариации скорости вращения Земли находятся в хорошем согласии с гипотезой о переменном внутреннем трении между мантией и литосферой с характерным временем порядка 10 и более лет. Причиной переменности этого трения может быть изменение вязкости в широкой зоне сопряжения этих слоев, возникающее из-за переменности потока эндогенного тепла.

Литература:

- Авсюк Ю.Н.**, *Приливные силы и природные процессы*, М., 1996, ОИФЗ РАН.
- Акуленко Л.Д., Кумакшев С.А., Марков Ю.Г., Рыхлова Л.В., 2002**, *Прогноз движения полюса деформируемой Земли*, АЖ, т.79, № 10, с 952-960.
- Артюшков Е.В., 1979**, *Геодинамика*, М., Наука, 328 с.
- Спиридонов Е.А., Акименко Я.В., 2003**, *Чандлеровское качание полюса, инициированное движением внутреннего ядра Земли*, Физика Земли, № 11, с.74-78.
- Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. (ред.), 1997**, *Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница»*, СПбГУ, с. 308.
- Воротков М.В., Горшков В.Л., 2002**, *Динамика движения полюса и долгопериодические вариации скорости вращения земли*, Изв. ГАО, №216, с. 415-425.
- Воротков М.В., Горшков В., Миллер Н.О., Прудникова Е.Я., 2002**, *Исследование основных составляющих в движении полюса Земли*, Изв. ГАО РАН. № 216, с. 406-414.
- Горшков В.Л., Воротков М.В., 2004**, *Динамика движения полюса и сейсмический процесс*, Изв. ГАО РАН. № 217. с. 379-387.
- Курбасова Г.С., Рыхлова Л.В., 2001**, АЖ, *Свободные колебания полюса Земли в системе Земля-Луна*, т. 78, №11, с. 1049 – 1056.
- Манк У., Макдональд Г., 1964**, *Вращение Земли*, Мир, М., 385 с.
- Павленкова Н.И., 2004**, *Эмпирические основы ротационно-флюидной гипотезы глобального тектоногенеза*, Геофиз. Журнал, т. 26, №6, с. 41-60.
- Bostrom R., 1971**, *Westward displacement of the lithosphere*, Nature, v.234, p. 536-538.
- Dumberry M., Bloxham J., 2002**, *Inner core tilt and polar motion*, Geophys. J. Int., V. 151, p. 377-392.

Gross R., Fukumori I., Menemenlis D., 2003, *Atmospheric and Oceanic Excitation of the Earth's Wobbles during 1980-2000*, J. Geophys. Res., 108(B8), 2370, doi: 10.1029/2002JB002143.

Lambeck K., 1980, *The Earth's variable rotation: Geophysical causes and consequences*, Cambridge Univ. Press, NY, 450 p.

Liao Dechun, Liao Xinhao, Zhou Yonghong, 2003, *Oceanic and atmospheric excitation of the Chandler wobble*, Geophys. J. Int, V.152, 215-227.

Morency C., Doin M.-P., 2004, *Numerical simulations of the mantle lithosphere delamination*, J. Geophys. Res., Vol. 109, B03410, doi:10.1029/2003JB002414.

Ponte R., D. Stammer, 1999, *Role of ocean currents and bottom pressure variability on seasonal polar motion*, J. Geophys. Res., 104, № C10, 23,393 – 23,409.

Rosen R., D. Salstein, 2000, *Multidecadal signals in the interannual variability of atmospheric angular momentum.*, Climate Dynamics, 16, 693-700.

Smith A., Lewis C., 1998, *Differential rotation of lithosphere and mantle and the driving forces of plate tectonics*, J. Geodynamics, 28, 97-116.

Vondrak J., 1989, *Prediction of polar motion from air and water excitations*, Rep. № 402, Dep. of Geodetic Science and Surveying the Ohio State Univ., p.60.

ON THE AMPLITUDE MODULATION OF THE CHANDLER WOBBLE

V.L. Gorshkov

The possible mechanism of the low-frequency amplitude modulation of chandler wobble (CW) and synchronous length of day (LOD) variations is examined. If the variable friction acts between the mantle and the lithosphere of Earth, then CW and LOD excitation factors act on the body with appropriate variable moments of inertia. When friction is weak excitation factors act only on outer layer with smaller moments of inertia and when there is mantle and lithosphere coupling, then common excitation is used. If such variability of the moments of inertia takes place, observed CW and LOD will have corresponding amplitude variations. This model is tested by IERS data.