

УДК 523.31

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВАРИАЦИЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ И АМПЛИТУДЫ ЧАНДЛЕРОВСКОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА

© 2010 г. В.Л. Горшков

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

По данным наиболее продолжительных рядов определения параметров вращения Земли определены низкочастотные (декадные) вариации продолжительности суток (ПС) и низкочастотные амплитудные и фазовые вариации основных составляющих в колебаниях полюса. На частотах близких к основной моде чандлеровского движения полюса (ЧДП) (0.84 цикла в год) выделена более слабая частотно переменная составляющая в диапазоне 0.78–0.92 цикла в год. Структурные особенности поведения амплитуды этой составляющей хорошо согласуются с моментами изменения скорости вековых вариаций геомагнитного поля (джерки). Обнаружено согласованное поведение долгопериодических колебаний амплитуды ЧДП и декадных вариаций ПС. Периоды синхронного изменения амплитуды ЧДП и скорости вращения Земли сменяются периодами обратной закономерности в их поведении.

Ключевые слова: чандлеровское колебание полюса, неравномерность вращения Земли, вариации геомагнитного поля.

Введение

Самыми низкочастотными вариациями в скорости вращения Земли являются декадные вариации с периодами от десятков лет и больше и амплитудами, достигающими единиц миллисекунд времени. В этих колебаниях сосредоточена основная энергия неравномерного вращения Земли. Причины этих вариаций в скорости вращения Земли приписывают различным механизмам взаимодействия мантии и ядра [Lambeck, 1980] и гляциологическим и климатическим вариациям [Сидоренков, 2002].

Колебания полюса также имеют низкочастотные вариации, так называемые волны Марковица, геофизическое возбуждение которых определяется вариациями многих параметров в системе атмосферно-океанических процессов в северной Атлантике [Горшков, 2007]. Помимо этого самая мощная составляющая в периодических колебаниях полюса, ЧДП, имеет значительные низкочастотные вариации амплитуды. Причины этих вариаций пока не выяснены, однако, в работе [Bellanger, Gibert, Le Mouél, 2002] показано, что почти все геомагнитные джерки (внезапные изменения скорости вековых вариаций геомагнитного поля) отражаются в характере поведения ЧДП. Следовательно, одной из причин возбуждения низкочастотных вариаций амплитуды ЧДП также может быть взаимодействие мантии и ядра.

Низкочастотные вариации в скорости вращения Земли и амплитудные вариации ЧДП имеют сложный нерегулярный характер, существенно усложняющий идентификацию и исследование возбуждающих их факторов. В этой связи особенно актуальны исследования структурных особенностей этих вариаций, что помогает понять природу их взаимодействия. В данной работе проведен анализ структурных особенностей низкочастотных вариаций в скорости вращения Земли и амплитудных вариациях ЧДП, а также исследована их взаимосвязь.

Данные и метод исследования

Для анализа вариаций в скорости вращения Земли в данной работе будем использовать вариации разности реальной и номинальной (86400 с) продолжительности суток (ΔPC). Данные о ΔPC и колебаниях полюса хранятся на сайте Международной службы вращения Земли (МСВЗ) [<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/product/>]. Для исследования продолжительности суток использовались астрометрический ряд классической службы определения параметров вращения Земли (ряд *eopAO*) за период 1956–1992 гг. и наиболее продолжительный сводный ряд данных космической геодезии (*Finals2000A.all*) с 1981 г. Во всех рядах из вариаций ΔPC были удалены приливные вариации от 5 дней до 18.6 лет.

Кроме того, использовался однородный ряд данных ΔPC до эпохи атомного времени, полученный на основе наблюдений покрытий звезд Луной (*LUNAR-97*), также хранящийся на сайте МСВЗ. Точность и плотность (одно значение в год) этого ряда существенно ниже других, но для определения долгопериодических вариаций ΔPC ряд вполне приемлем. Все эти ряды имеют пересечение в несколько лет, что позволило создать из них непрерывный композиционный ряд скорости вращения Земли.

Для исследования колебаний полюса (X_P, Y_P) использовались ряд *C01* с 1860 г. по 1963 г., составленный по данным международной службы широты (МСШ), и комбинированный ряд *C04* с 1962 г. Для исследования амплитудных вариаций ЧДП использовались данные только с 1860 г. ввиду недостаточной точности более ранних наблюдений для совместного анализа. Более того, для анализа низкочастотных вариаций колебаний полюса (волн Марковица) использовались данные о движении полюса только с момента создания международной службы широты (1896 г.), из-за отсутствия в более ранних данных трендовой составляющей [Рыхлова, 1970].

На рис. 1 представлены ошибки исследуемых рядов, приведенные для однородности к пятидневному интервалу для рядов ΔPC и к интервалу 0.05 года для ошибок координат полюса.

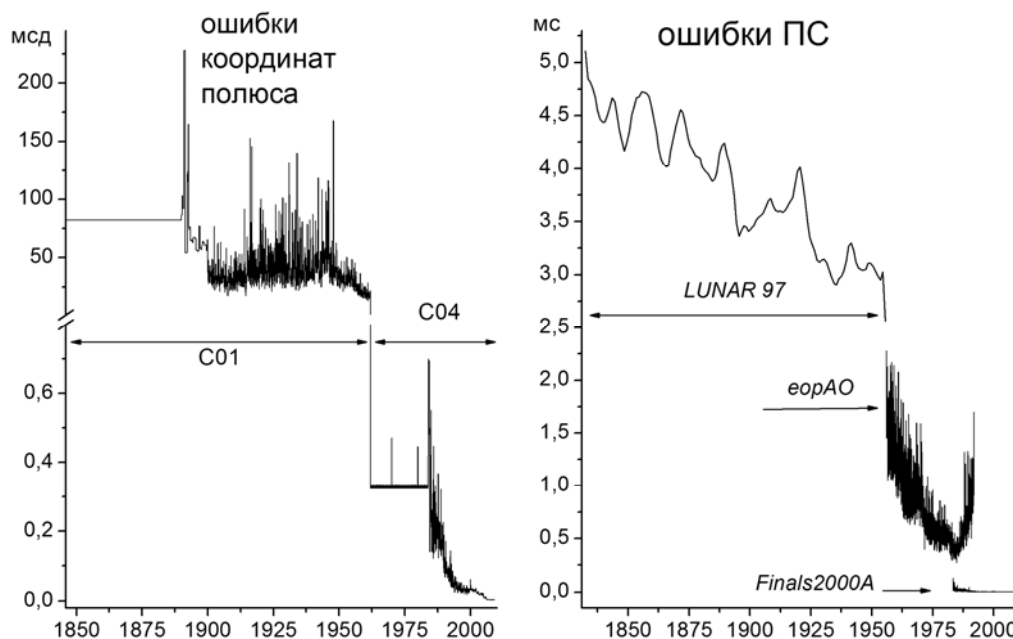


Рис. 1. Поведение среднеквадратических ошибок исследуемых рядов, формально приведенных к пятидневному интервалу оценки для ПС и к интервалу 0.05 года для ошибок координат полюса Земли

В качестве основного метода исследования использовался сингулярный спектральный анализ (ССА) и его многомерная версия (МССА) в программной реализации СПбГУ “Гусеница” [Данилов, Жиглявский, 1997; <http://www.gistatgroup.com/gus/>].

Метод наиболее адекватен для выделения информативных, необязательно гармонических компонент в рядах нестационарной природы с сохранением информации об амплитудных и фазовых вариациях ряда. С его помощью можно выделить отдельные, интересующие исследователя, трендовые, периодические или квазипериодические компоненты, восстановить ряд по выбранным компонентам и, таким образом, исследовать структуру исходного ряда. Более подробное изложение метода и особенностей его использования можно найти в работе [Горшков, 2010].

Анализ исследуемых рядов

Из всех рядов продолжительности суток с помощью ССА были выделены низкочастотные (периоды более 15 лет) вариации. Их вклад в исследуемые ряды составил соответственно 97.5% (*Lunar-97*), 96.5% (*eorAO*) и 95% (*Finals2000A*). Из них был составлен композиционный ряд, представленный на рис. 2. На этом же рисунке приведен линейный тренд ΔPC , характеризующий вековое замедление вращения Земли за счет приливного трения на исследуемом интервале (1.8 мс в столетие).

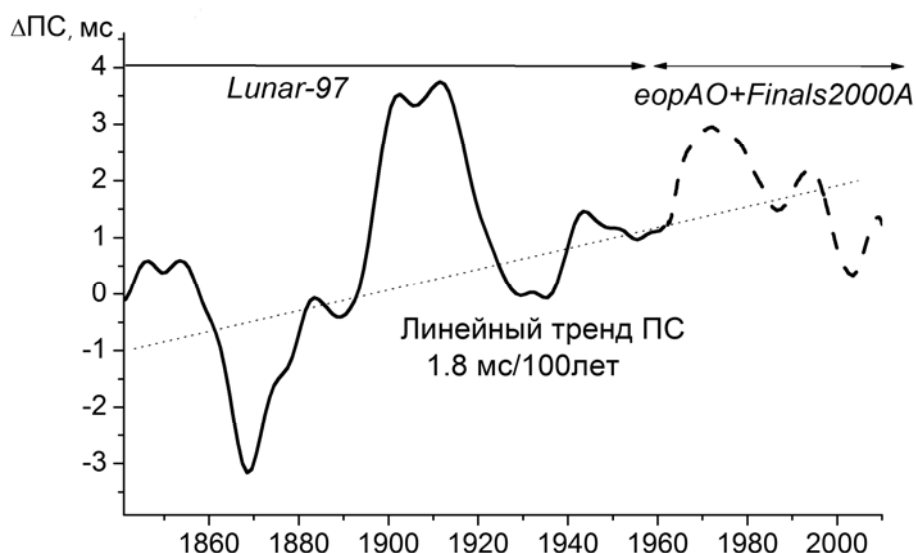


Рис. 2. Комбинированный ряд вариаций ПС (сплошная линия) и средний тренд скорости вращения Земли (пунктир)

В рядах координат полюса (X_P, Y_P) с помощью МССА также были выделены компоненты с периодами более 15 лет, составившие 36% от общей мощности колебания полюса. Выделенные тренды соответствуют движению среднего полюса (X_m, Y_m) (рис. 3). Спектр этих компонент помимо почти линейной части, вызванной стремлением оси вращения занять положение с минимальным осевым моментом инерции, содержит составляющие с периодами от 23 до 50 лет, отражающие геофизические возмущения этого процесса.

После исключения из координат полюса $P = X_P - iY_P$ движения среднего полюса остатки, в основном, представлены чандлеровским колебанием (X_{CW}, Y_{CW}), дающим 41.7% в общее движение полюса по данным МССА разложения, и годичным колебанием (X_{an}, Y_{an}) с 14.3% от общей мощности колебательного процесса:

$$(X, Y) = (X_P - X_m, Y_P - Y_m) \approx (X_{CW} + X_{an}, Y_{CW} + Y_{an}).$$

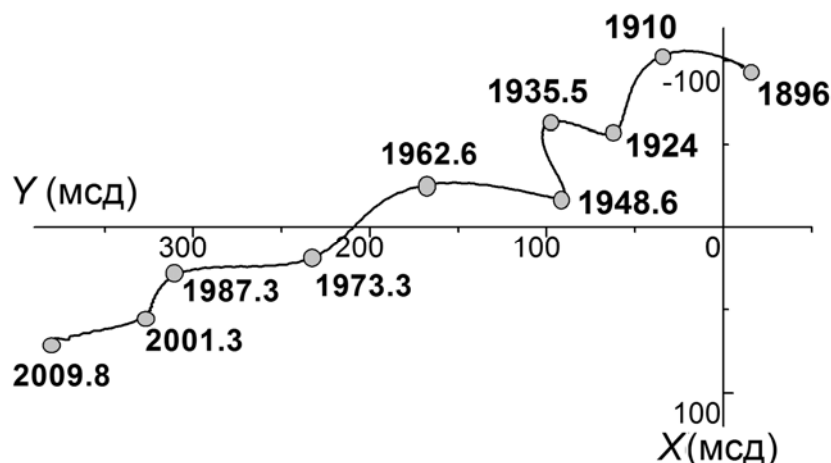


Рис. 3. Движение среднего полюса Земли с 1896 г.

Метод ССА позволяет выделить из этой реализации ряда (X, Y) помимо основной моды ЧДП с частотой 0.84 цикл/год ($CW1$) группу компонент с близкими частотами в интервале 0.78–0.92 цикл/год ($CW2$) (рис. 4). Вклад $CW1$ в общий процесс чандлеровского колебания составляет 67%, а $CW2$ – 33%.

На рис. 4 нанесены также моменты глобальных (длинные вертикальные линии) и локальных (короткие линии) зарегистрированных джерков по данным работ [Ротанова, Бондарь, Иванов, 2002; Bellanger, Gibert, Le Mouél, 2002; De Michelis, Tozzi, Meloni, 2005]. Видно, что практически все структурные особенности в поведении $CW2$ приурочены к периодам изменения скорости вековых вариаций геомагнитного поля, имеющих, к тому же, достаточную продолжительность, иногда в несколько лет. Таким образом, возможно, выделена именно та составляющая ЧДП, которая отражает происходящие взаимодействия мантии с ядром.

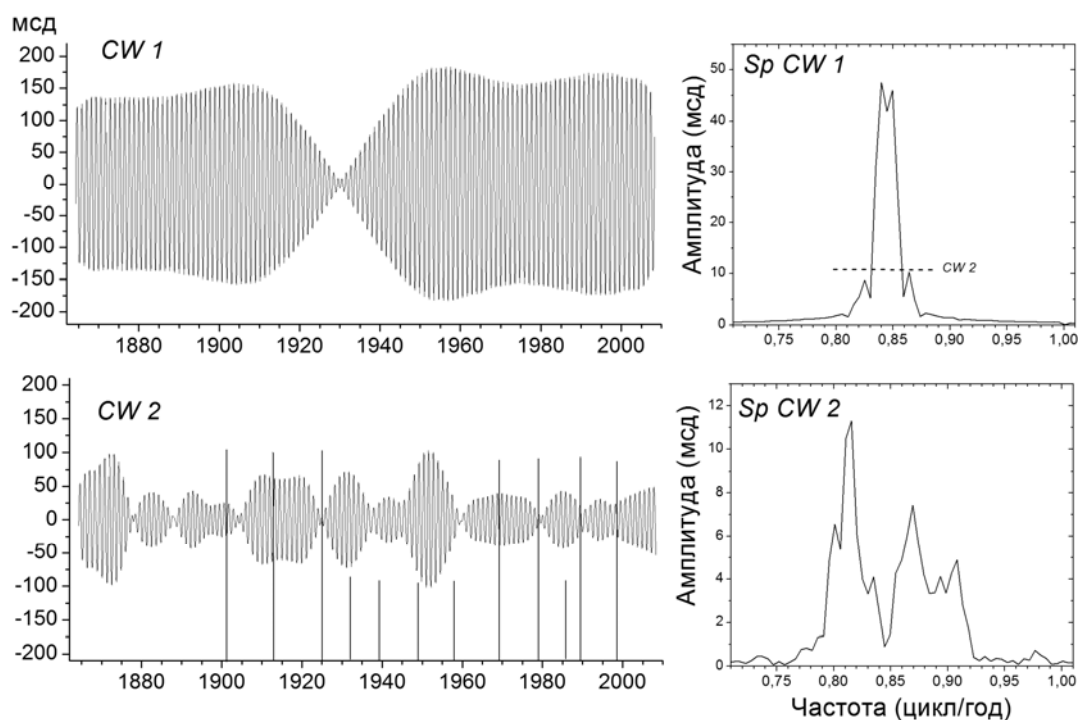


Рис. 4. Вверху – основной компонент ЧДП и его амплитудный спектр, на котором горизонтальной линией отмечен вклад второго компонента ЧДП. Внизу – второй компонент ЧДП и его амплитудный спектр. Вертикальными линиями отмечены моменты джерков

С помощью метода огибающей [Левин, 1969] по чандлеровской и годичной составляющим можно определить амплитуду (огибающую) и фазу их колебаний.

Представим эти колебания в виде $X(t) = E(t)\cos F(t)$, $Y(t) = E(t)\sin F(t)$, где $F(t) = -ut + \varphi(t)$, $u > 0$ – частота, а $E(t)$ и $\varphi(t)$ – амплитуда (огибающая) и фаза колебаний (CW и AN). Вводя обозначения

$$A(t) = E(t)\cos\varphi(t), \quad B(t) = E(t)\sin\varphi(t), \quad (*)$$

представим эти колебания в виде:

$$X(t) = A(t)\cos ut + B(t)\sin ut,$$

$$Y(t) = -A(t)\sin ut + B(t)\cos ut.$$

Отсюда

$$A(t) = X(t)\cos ut - Y(t)\sin ut,$$

$$B(t) = X(t)\sin ut + Y(t)\cos ut.$$

В итоге, подставляя последние выражения в (*), можно оценить вариации амплитуды $E(t) = (A(t)^2 + B(t)^2)^{1/2}$ и фазы $\varphi(t) = \arctg(B(t)/A(t))$ колебаний, представленные на рис. 5.

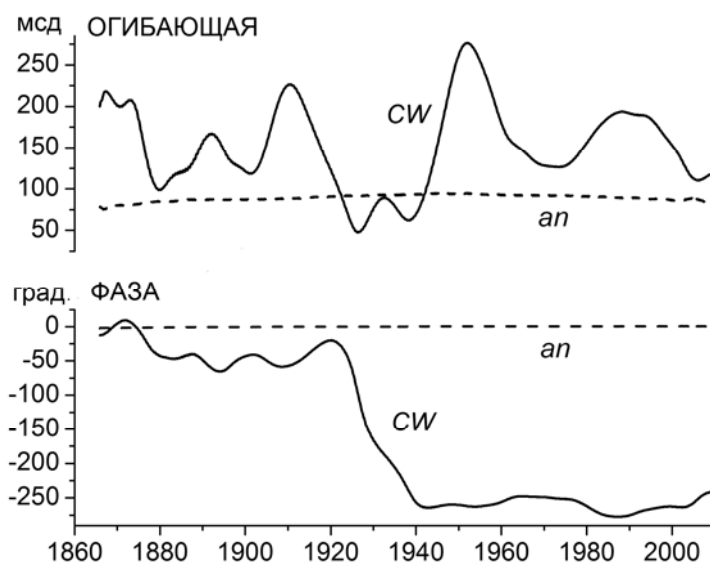


Рис. 5. Вариации амплитуды годичной (an) и чандлеровской (CW) составляющих движения полюса Земли (вверху) и вариации фазы этих составляющих (внизу)

Видно, что годичный компонент движения полюса имеет практически постоянную амплитуду и фазу колебания (вариации менее 10% и 3% соответственно), в то время как ЧДП имеет сильные вариации как амплитуды, так и фазы. При этом событие 1920-х годов, когда процесс чандлеровского колебания полюса Земли практически был прерван и возобновился с потерей фазы, остается уникальным явлением в наблюдательной истории МСВЗ. Если сопоставлять его с геомагнитными джерками, то можно предположить, что джерк 1913 г. связан с запуском процесса торможения ЧДП, а джерк 1925 г. сопоставим с освобождением его раскачки.

Сопоставим полученные вариации амплитуды ЧДП и вариации продолжительности суток по среднегодовым данным (рис. 6). Их общая согласованность составляет $r_0 = 0.18$, что для данного объема выборки ($n = 164$) статистически значимо на уровне 5% и на грани значимости на уровне 1% [Ликеиш, Ляга, 1985].

В совместной динамике кривых на рис. 6 заметна особенность – периоды почти синхронного, вплоть до деталей, их поведения последовательно сменяются периодами значительно менее выраженной асинхронности. В нижней части рис. 6 приведены величины корреляций этих кривых для соответствующих периодов. Все корреляции значимы

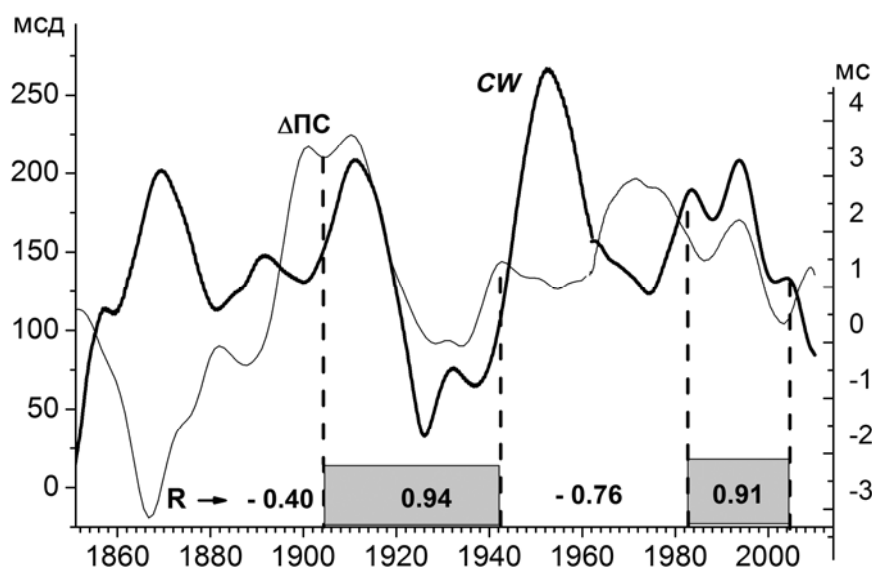


Рис. 6. Вариации продолжительности суток $\Delta\PС$ (тонкая линия, шкала справа) и вариации амплитуды ЧДП (утолщенная линия, шкала слева). Вертикальные линии разделяют периоды синхронного (выделены серым цветом) и асинхронного поведения кривых. Внизу указаны соответствующие этим периодам корреляции кривых

на уровне 1%, при этом для некоторых интервалов корреляции незначительно увеличиваются при относительном сдвиге кривых в 1–2 года. Эти периоды не имеют определенной регулярности, и их смена не привязана к известным событиям джерков и к каким-либо особенностям в атмосферно-океанической динамике.

Причины переключения этих процессов достаточно загадочны, если не считать их просто случайными [Цуркис, Спиридонов, 2009]. Можно предположить, что на границе ядро–мантия помимо процессов взаимодействия определенную роль играют переменные процессы обмена моментами между литосферой и верхней мантией, геофизическими средствами пока не детектируемые.

Полная картина кросскорреляции (несмещенная оценка) этих кривых для сдвигов до половины реализации приведена на рис. 7. Предварительно из обоих рядов был снят тренд и произведена их нормировка.

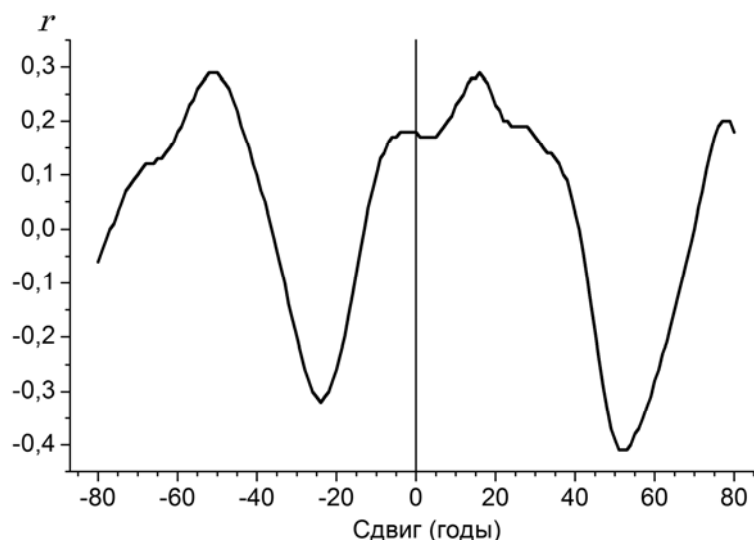


Рис. 7. Несмещенная оценка кросскорреляционной функции кривых из рис. 6. Положительным сдвигам соответствует смещение $\Delta\PС$ вправо относительно амплитуды ЧДП

Кросскорреляционная функция имеет явно гармонический вид с элементами низкочастотного шума. Видно, что при положительном смещении кривой вариаций продолжительности суток ($\Delta ПС$) относительно кривой вариаций амплитуды ЧДП достигается значимый на уровне 1% максимум корреляции ($r_{\max} = 0.29$), т.е. вариации амплитуды ЧДП, условно говоря, предшествуют на 14–17 лет вариациям продолжительности суток. Кроме того видно, что оба процесса имеют сходную доминирующую 60–70-летнюю низкочастотную структуру.

Удаление из анализируемых рядов значительно менее точных данных за XIX век (см. рис. 1) улучшает корреляцию до $r_0 = 0.40$. При этом максимум корреляции $r_{\max} = 0.42$ достигается при отрицательном смещении $\Delta ПС$ относительно амплитуды ЧДП всего на 2 года, что уже можно отнести за счет ошибки при выборке $n = 110$ с интервалом одно значение в год.

Это свидетельствует о том, что низкочастотное поведение вектора вращения Земли, как его осевой составляющей, так и изменений координат полюса (ЧДП), определяются одинаковыми геофизическими причинами, за исключением приливного замедления скорости вращения Земли.

Заключение

По данным наиболее продолжительных рядов определения параметров вращения Земли выделены низкочастотные составляющие вариаций скорости вращения Земли и определены низкочастотные вариации колебаний полюса. Показано, что основная мода в движении полюса (чандлеровское движение полюса) может быть разложена на основную и дополнительную составляющие. Структурные особенности вариаций амплитуды дополнительной составляющей ЧДП хорошо согласуются с моментами изменения скорости вековых вариаций геомагнитного поля (джерками).

Обнаружено согласованное поведение долгопериодических колебаний амплитуды ЧДП и декадных вариаций продолжительности суток. Периоды синхронного изменения амплитуды ЧДП и декадных вариаций скорости вращения Земли сменяются периодами обратной закономерности в их поведении.

Литература

- Горшков В.Л. Связь низкочастотных вариаций полюса Земли с североатлантическим колебанием // Астрон. вестник. 2007. Т. 41, № 1. С.70–76.
- Горшков В.Л. Исследование межгодовых вариаций скорости вращения Земли // Астрон. вестник. 2010. Т. 44, № 6. С.519–529.
- Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. (ред.) Главные компоненты временных рядов: метод “Гусеница”. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. 308 с.
- Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.
- Ликеш И., Ляга Й. Основные таблицы математической статистики. М.: Финансы и статистика, 1985. 356 с.
- Ротанова Н.М., Бондарь Т.Н., Иванов В.В. Временные изменения в вековых геомагнитных вариациях // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т. 42, № 5. С.708–720.
- Рыхлова Л.В. Координаты полюса Земли за 1846.0–1891.5 годы // Сообщения ГАИШ. 1970. Т. 163. С.3–10.
- Сидоренков Н.С. Физика неустойчивостей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. 385 с.
- Цуркис И.Я., Спиридонов Е.А. О применимости аппарата Марковских процессов к описанию чандлеровского движения полюса // Физика Земли. 2009. № 4. С.3–17.
- Bellanger E., Gibert D., Le Mouél J.-L. A geomagnetic triggering of Chandler wobble phase jumps // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, N 7, 10.1029/2001GL014253.

De Michelis P., Tozzi R., Meloni A. Geomagnetic jerks: observation and theoretical modeling // *Memorie Societa Astronomica Italiana*. 2005. V. 76. P.957–960.

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

Сведения об авторе

ГОРШКОВ Виктор Леонидович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ГАО РАН. 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, д. 65. Тел.: +7 (812) 363-70-25. E-mail: vigor@gao.spb.ru

STUDY OF THE LOW FREQUENCY VARIATIONS OF THE EARTH'S ROTATION AND AMPLITUDE OF CHANDLER WOBBLE

V.L. Gorshkov

Central (Pulkovo) Astronomical Observatory, Russian Academy of Science, St.Peterburg, Russia

Abstract. The low frequency (decadal) length-of-day (LOD) variations and amplitude and phase variations of chandlerian (CW) and annual wobbles of polar motion were detected by the longest series of the Earth's orientation parameters. The weak CW component was extract in the frequency band 0.78-0.91 cycle per year. The structural features of the amplitude variations of this component conform well to the moments of geomagnetic jerks. There was found a consistency of the long-term CW amplitude variations and LOD decadal variations. The spans with synchronous CW amplitude and LOD variations are interchanged with spans when they have opposite behavior.

Keywords: Chandler wobble of Pole, irregularities of the Earth's rotation, variations of the geomagnetic field.