

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

А.А.Баскова, В.Б.Кашкин*

Метод сингулярного спектрального анализа применен к разложению временного ряда, описывающего неравномерность вращения Земли. Выделены тренд и сезонные колебания, оценены флуктуации амплитуды и фазы годовой и полугодовой гармоник. Показано, что стандартная методика не позволяет корректно учесть приливные колебания неравномерности вращения Земли.

Точное время необходимо знать астрономам, геодезистам, морякам, связистам, исследователям космоса и т.д. Эта информация важна также для пользователей глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США).

Вращающаяся Земля представляет собой гироскоп с небольшой прецессией оси вращения и значительным собственным моментом количества движения (при радиусе 6370 км и массе $6 \cdot 10^{21}$ т Земля очень инерционна и сопротивляется попыткам изменить характеристики движения). Тем не менее, в результате исследований было установлено, что угловая скорость вращения Земли с течением времени меняется, т.е. вращение Земли неравномерно [1].

Пользователям навигационных спутниковых систем, например, это грозит неточностью в определении координат. Положение орбит навигационных спутников относительно инерциальной системы отсчета (т.е. неподвижных звезд) практически неизменно на большом интервале времени. Но земному наблюдателю при изменении скорости вращения Земли кажется, что изменяется орбита спутника. Неучтенное изменение длительности суток в течение 10 дней на 0,001 с приведет к погрешности в определении долготы на экваторе в 4,6 м.

Начиная со второй половины прошлого столетия за неравномерностью вращения Земли ведутся постоянные наблюдения. В России такого рода исследования проводит Институт прикладной астрономии РАН [2]. Текущие сведения, основанные на измерениях, проведенных в различных странах, обрабатываются в Международной службе вращения Земли IERS со штаб-квартирой в Париже [3]. Необходимо не только кон-

* © А.А.Баскова, Красноярский государственный технический университет; E-mail: baskov_a@mail.ru; В.Б.Кашкин, Красноярский государственный университет, 2006; E-mail: kashkin@krsk.info.

тролировать положение полюсов и длительность суток, но и уметь их предсказывать. Однако точность прогноза, даваемого Обсерваторией ВМС США в рамках IERS и помещаемого в сети Интернет [4], невелика.

Неравномерный характер вращения Земли учитывает шкала UTI (неравномерная шкала времени). Время UTI определяют по наблюдению небесных светил в оптическом диапазоне, а с 80-х гг. XX в. появились новые методы измерений: с помощью радиоинтерферометров со сверхдлинными базами, с помощью систем глобального позиционирования (ГЛОНАСС/GPS), с использованием лазерной локации искусственных спутников и т.д. [1].

В настоящее время в качестве равномерной и стабильной шкалы времени TAI используются показания атомного стандарта времени и частоты. С 1 января 1972 г. все страны мира перешли на счет времени с помощью атомных часов. В 1964 г. Международный Комитет мер и весов в качестве эталона времени принял атомные цезиевые часы, обеспечивающие относительную нестабильность 10^{-13} , было введено новое определение секунды. Сегодня секунда – это промежуток времени, за который происходит 9 192 631 770 колебаний электромагнитной волны, которую излучает атом цезия. Современный водородный стандарт обеспечивает еще меньшую относительную нестабильность, равную 10^{-15} . Ошибка хода современных атомных часов – менее 1 с за 100 000 000 лет.

Нестабильность скорости вращения Земли характеризуется величиной $UTI-TAI = \delta P$ – отклонением длительности земных суток от эталонных. Более медленное вращение Земли приводит к увеличению длительности суток. На рис. 1 показан график ряда δP за период 1997–2006 гг.; на 01.01.1997 г. взято $\delta P = -0,111549$ с. Ряд δP содержит тренд и периодические колебания с периодом год, полгода, а также неперiodические составляющие.

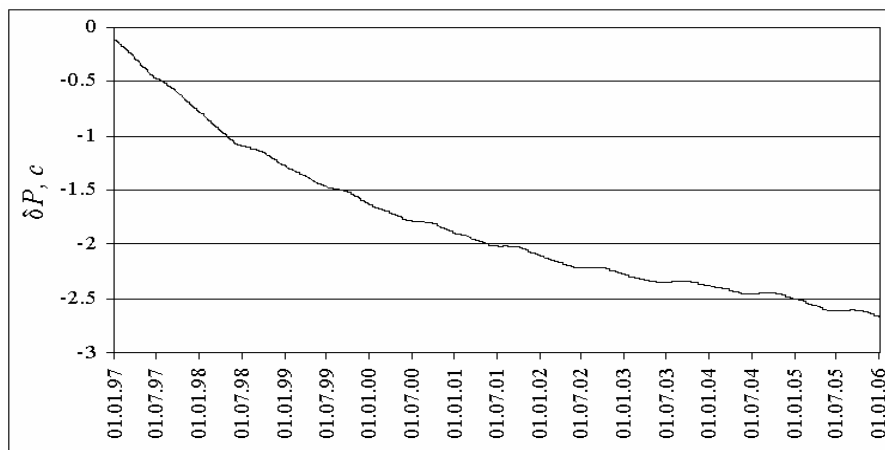


Рис. 1. Отклонение δP длительности земных суток от эталонных в период с 1997 по 2006 гг.

Скорость вращения Земли бывает наименьшей в апреле и ноябре, а наибольшей – в январе и июле. Январский максимум значительно меньше июльского. Разность между минимальной величиной отклонения длительности земных суток от эталонных в июле и максимальной – в апреле или ноябре составляет 0,02 с.

Притяжение Луны и Солнца вызывают приливные колебания величины δP . Приливные выступы в океанах и на суше постоянно перемещаются по земной поверхности вслед за Луной и Солнцем – с востока на запад, т.е. в направлении, обратном суточному вращению Земли. Трение при движении выступов тормозит вращение планеты, возникает вековое замедление скорости вращения. Оценки показывают, что из-за этого сутки должны удлиняться на 0,003 с за 100 лет. Неравномерности вращения Земли, представленные на рис. 1, почти не связаны с вековым замедлением, а вызываются другими причинами [1].

Земные приливы играют заметную роль в колебаниях скорости вращения Земли с периодами меньше месяца. Эти колебания можно прогнозировать, методика приведена в материалах IERS [3]. На рис. 2 показаны приливные колебания, рассчитанные по этой методике.

Неприливная неравномерность вращения Земли и движения полюсов связана с изменением распределения воздушных масс в атмосфере, снежного и ледяного покровов, осадков и растительности на земной поверхности, вариациями уровня Мирового океана, взаимодействием ядра и мантии Земли, извержением вулканов, землетрясениями, воздействием внешних сил и т.д. Наиболее существенна первая причина [1].

Сезонная неравномерность вращения Земли, в основном, обусловлена зональной атмосферной циркуляцией (под циркуляцией атмосферы понимается система движений атмосферы; зональная циркуляция – перемещение масс воздуха вдоль параллели). В среднем атмосфера движется относительно земной поверхности в низких широтах с востока на запад (преобладают восточные ветры), а в средних и высоких – с запада на восток (преобладают западные ветры) [1].

Когда усиливаются западные ветры или ослабевают восточные, то вращение Земли замедляется. Если ослабевают западные или усиливаются восточные ветры, вращение Земли ускоряется. Атмосфера в целом вращается вокруг оси быстрее Земли. Период обращения атмосферы составляет в апреле и ноябре 23 ч 36 мин, в августе – 23 ч 45 мин. В среднем за год сутки для атмосферы длятся 23 ч 38 мин, а для Земли – 23 ч 56 мин [1].

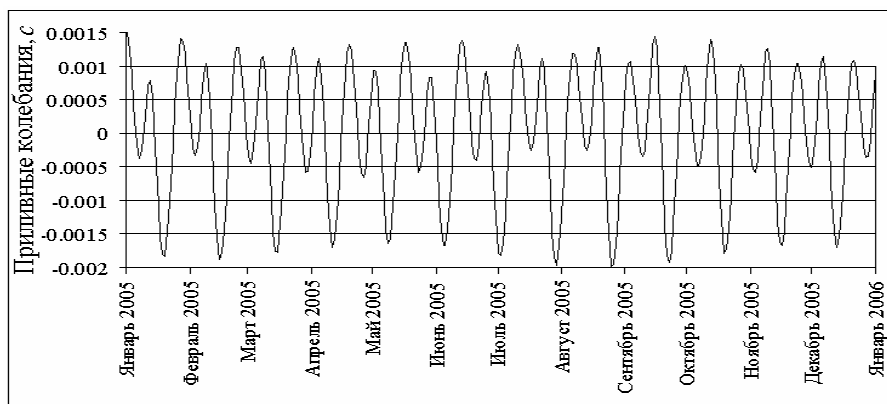


Рис. 2. Расчетные приливные колебания неравномерности вращения Земли в 2005 г.

Метод исследования

При изучении временных рядов обычно используется спектральный анализ Фурье или вейвлет-анализ. Гармонические составляющие величины δP ранее были исследованы с помощью анализа Фурье [1]. В настоящей работе получены новые результаты, применен аппарат сингулярного спектрального анализа («Гусеница»), недавно разработанный и обоснованный сотрудниками Санкт-Петербургского государственного университета [5, 6].

Метод «Гусеница» основан на переходе от одномерного временного ряда длиной n с равномерным шагом $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ к многомерным рядам, построенным из исходного одномерного и на анализе главных компонент. «Гусеница» позволяет выделить интересующие компоненты временных рядов, в частности, компоненты с заранее известным и заранее неизвестным периодом, сгладить исходные данные, сделать прогноз ряда.

Из исходного ряда составляется матрица X

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_k & \dots & x_m \\ x_2 & x_3 & x_4 & \dots & x_{k+1} & \dots & x_{+1} \\ x_3 & x_4 & x_5 & \dots & x_{k+2} & \dots & x_{m+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_k & x_{k+1} & x_{k+2} & \dots & x_{2k-1} & \dots & x_n \end{pmatrix}.$$

Здесь $m < n$ – длина гусеницы, последней строкой с номером $k = n - m + 1$ являются элементы $(x_k, x_{k+1}, \dots, x_n)$, причем $x_{ij} = x_{i+j-1}$. Эту матрицу можно рассматривать как m -мерную выборку объема k или m -мерный временной ряд. В некоторых приложениях могут быть вычислены средние значения μ_i и оценки стандартных отклонений σ_i по столбцам. Матрица X может быть центрирована по столбцам и нормирована на σ_i ; ниже использовано центрирование. Далее вычисляется матрица $R = 1/k X X^T$. Если матрица X центрирована, то R – выборочная корреляционная матрица. Элементами матрицы R служат выражения

$$r_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (x_{i+l-1} - \mu_i)(x_{j+l-1} - \mu_j)$$

По обычной методике анализа главных компонент вычисляются собственные числа и собственные векторы матрицы R , т.е. проводится её сингулярное разложение $R = \Lambda P^T$, где Λ – диагональная матрица упорядоченных по убыванию собственных чисел матрицы R :

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_m \end{pmatrix},$$

\mathbf{P} – ортогональная матрица собственных векторов матрицы \mathbf{R} :

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{m1} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_{1m} & p_{2m} & \dots & p_{mm} \end{pmatrix}$$

Выполняются следующие соотношения: $\mathbf{P}^T = \mathbf{P}^{-1}$, $\mathbf{P}\mathbf{P}^T = \mathbf{I}$, $\mathbf{A} = \mathbf{P}^T\mathbf{R}\mathbf{P}$, $\sum_{i=1}^m \lambda_i = m$, \mathbf{I} – единичная матрица. Из

последнего выражения следует, что при умножении собственных чисел λ_i на $1/m \cdot 100\%$ получаются доли дисперсий в процентах, которые можно рассматривать как доли общей информации, содержащейся в каждом главном компоненте. Матрицу \mathbf{P} можно рассматривать как матрицу перехода к ортогональным составляющим (главным компонентам) $\mathbf{X}\mathbf{P}=\mathbf{Y}=(y_1, y_2, \dots, y_m)$. Преобразование $y_j = \mathbf{X}p_j$ является линейным преобразованием исходного процесса с помощью дискретного оператора свертки:

$$y_j [t] = \sum_{q=1}^m x_{lq} p_{jq} = \sum_{q=1}^m x_{l+q-1} p_{jq}$$

В этом случае собственные векторы p_{jq} матрицы \mathbf{R} играют роль передаточных функций некоторых фильтров, настроенных на составляющие исходного процесса. Ширина полосы пропускания фильтра зависит от формы передаточной функции фильтра и определяется как видом собственного вектора, так и длиной интервала усреднения, т.е. длиной «гусеницы» m . Чем больше m , тем уже полоса фильтра. Максимальное значение m равно половине длины ряда n , в этом случае при четном n матрица \mathbf{X} квадратная.

При выборе m , которое значительно меньше характерной ритмичности ряда (в пределе при $m = 2$), происходит его сглаживание. Рассмотрение собственных векторов и главных компонент, полученных в результате линейной фильтрации, дает информацию о структуре изучаемого процесса и свойствах его слагаемых. В частности, среди главных компонент можно выделить: относящиеся к тренду (медленно меняющиеся), периодические, шумовые.

Ввиду ортогональности матрицы \mathbf{P} можно восстановить матрицу $\mathbf{X}=\mathbf{Y}\mathbf{P}^T$, используя при этом выбранные главные компоненты \mathbf{Y}_i . Выбор нескольких главных компонент эквивалентен параллельному соединению соответствующих фильтров, что позволяет управлять формой спектральной характеристики.

При выделении гармонических составляющих или близких к ним «Гусеница» дает ортогональные пары собственных векторов, отличающихся по фазе на $\pi/2$ (квадратурных компонент) вида

$$S_1 = A(t) \cos [\omega_0 t + \varphi(t)], \quad S_2 = A(t) \sin [\omega_0 t + \varphi(t)],$$

где $A(t)$ и $\varphi(t)$ – медленно меняющиеся амплитуда и фаза, ω_0 – фиксированная частота спектрального компонента. Ниже рассмотрены случаи, когда частоты известны и соответствуют годовой и полугодовой гармонике временного ряда, описывающего изменение величины δP . Амплитуду $A(t)$ можно найти как $A(t) = (S_1^2 + S_2^2)^{1/2}$. Если умножить S_1 на $\cos \omega_0 t$, а S_2 на $\sin \omega_0 t$ и оба произведения сложить, получим, что

$$S_1 \cos \omega_0 t + S_2 \sin \omega_0 t = A(t) \cos \varphi(t), \text{ откуда } \varphi(t) = \arccos [(S_1 \cos \omega_0 t + S_2 \sin \omega_0 t)/A(t)].$$

Изменение фазы приводит к изменению частоты: $\omega(t) = \omega_0 + d\varphi/dt$.

Можно провести аналогии метода «Гусеница» с вейвлет-анализом и Фурье-анализом (если ряд состоит из набора строго гармонических компонент, то фактически «Гусеница» осуществляет разложение в ряд Фурье). Наиболее важные преимущества метода сингулярного спектрального анализа «Гусеница» состоят в следующем: а) базисные функции метода порождаются исследуемым рядом, так как являются собственными векторами \mathbf{R} ; б) выделенный тренд правильно отображает поведение медленно меняющейся составляющей не только в середине ряда, но и на его концах; в) возможна оценка частоты и амплитуды периодических компонент анализируемого ряда, но и мгновенной фазы; г) возможно восстановление ряда по информативным компонентам с удалением шума.

Анализ данных неравномерности вращения Земли

В качестве исходных данных использовались сводные ряды ежедневных величин ряда $\delta P = (UTI - TAI)$ отклонения длительности земных суток от эталонных по данным Международной службы вращения Земли IERS [3] за 1991 – начало 2006 гг. и 1997 – 2005 гг. По методике IERS [3] вычислялась приливная нестабильность вращения Земли. «Приливные гармоники» вычитались из δP , далее рассматривается именно такой ряд.

Для обработки рядов $\delta P = (UTI - TAI)$ был использован пакет прикладных программ CaterpillarSSA 3.30 [6]. Во всех случаях длина «Гусеницы» выбиралась максимальной и равной половине длины исследуемого

ряда. На рис. 3 приведены графики ортогональных пар собственных векторов ряда 1997 – 2005 гг. Эти векторы были использованы программой «Гусеница» как передаточные функции соответствующих фильтров.

На рис. 3А показаны собственные векторы, позволяющие выделять тренд. Эти векторы отвечают собственным числам λ_1 и λ_2 , на которые в сумме приходится 99,991 % «общей информации». График на рис. 3Б показывает собственные векторы, позволяющие выделять годовую гармонику (период 365,25 года). На соответствующие собственные числа λ_3 и λ_4 приходится около 0,006 % информации. График на рис. 3В показывает собственные векторы, позволяющие уточнять концы тренда. На собственные числа λ_5 и λ_6 приходится около 0,002 % информации. На рис. 3Г показаны собственные векторы – передаточные функции фильтров полугодовой гармоники. На числа λ_7 и λ_8 приходится около 0,001 % информации.

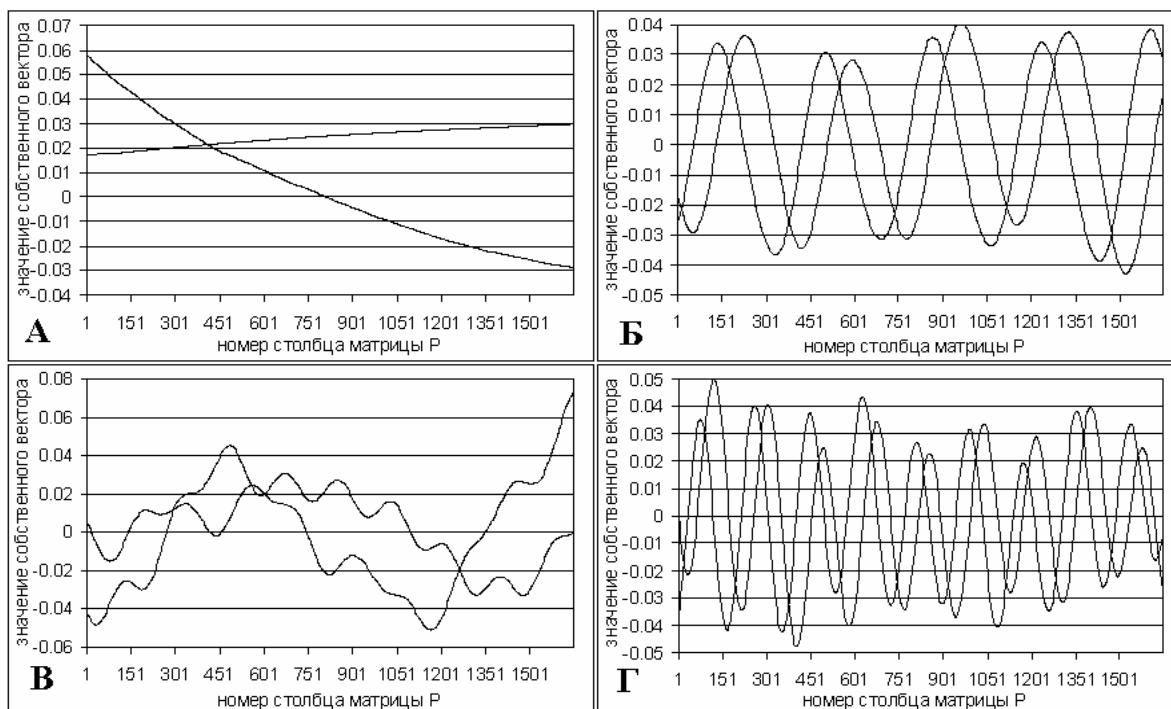


Рис. 3. Собственные векторы корреляционной матрицы

Результаты фильтрации можно видеть на рис. 4-6. Тренд отклонения длительности земных суток от эталонных представлен на рис. 4. На 01.01.1997 г. взято $\delta P = -0,38180291$ с.

Первая сезонная гармоника с периодом 1 год приведена на рис. 5. В отличие от обычного Фурье-анализа, «Гусеница» позволила обнаружить изменение амплитуды и фазы годовой гармоники. Вторая сезонная гармоника с периодом 0,5 года приведена на рис. 6. Обращают на себя внимание флуктуации амплитуды с непостоянным периодом 2,5-3 года.

Изменение фазы $\varphi(t)$ первой и второй гармоники с течением времени приведено на рис. 7. В 1999 г. фаза первой гармоники увеличилась, а второй – уменьшилась, далее фаза первой гармоники начала уменьшаться, а второй – увеличиваться в 2003 г.

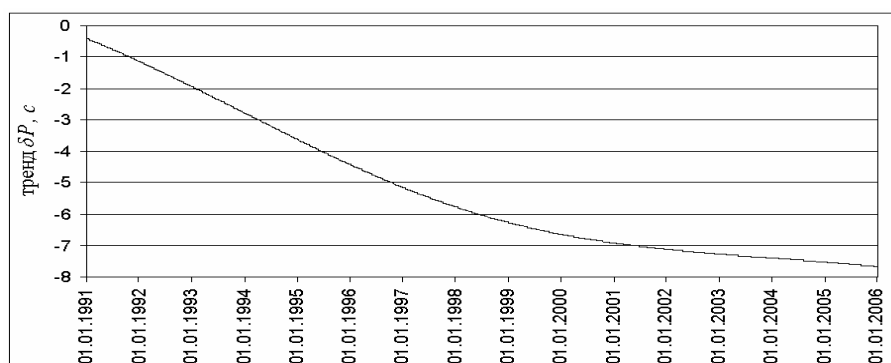


Рис. 4. Тренд отклонения длительности земных суток от эталонных δP , период с 1991 по 2006 гг.

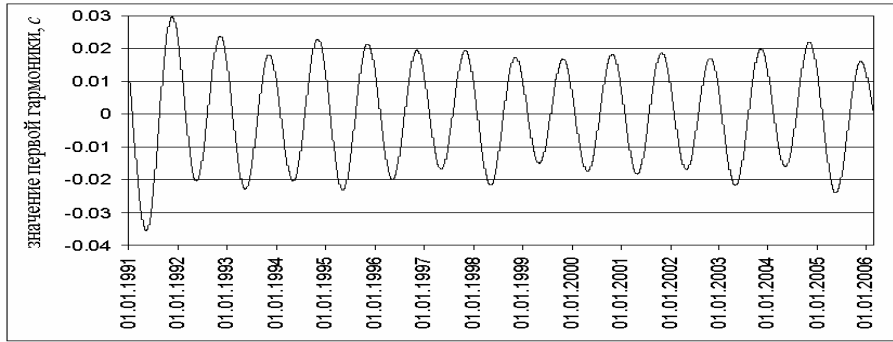


Рис. 5. Первая гармоника отклонения длительности земных суток от эталонных δP период с 1991 по 2006 гг.

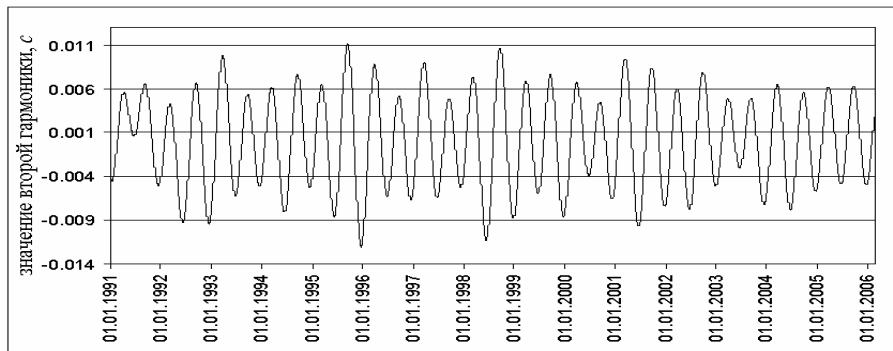


Рис. 6. Вторая гармоника отклонения длительности земных суток от эталонных δP , период с 1991 по 2006 гг.

Изменения фазы за период 1997 – 2005 гг. достигают 15° . Так как частота – это производная фазы по времени, то можно утверждать, что скорость вращения Земли в период 1997 – 2004 гг. изменялась заметным образом. С начала 2004 г. фазы первой и второй гармоник претерпевают незначительные изменения, с этого времени скорость вращения Земли стабилизировалась.



Рис. 7. Изменение фазы годовой (первой) и полугодовой (второй) гармоник с 1997 по 2005 г.

Применение сингулярного спектрального анализа позволило выделить компонент с периодом около 28 суток (рис. 8).

Это соответствует периоду наиболее интенсивного приливного возмущения, вызываемого Луной. Сравнение рис. 2 и рис. 8 показывает, что даже после вычитания из исходного ряда приливных гармоник, найденных согласно методике IERS, в составе δP остаются приливные члены, имеющие тот же порядок, что и вычисленные приливные гармоники.

Полученные данные позволяют уточнять параметры вращения Земли, строить новые модели сезонных вариаций длительности земных суток, исследовать с новых позиций влияние различных факторов на вращение Земли. Установлено, что принятая в настоящее время методика расчета приливных колебаний не вполне удовлетворительна.

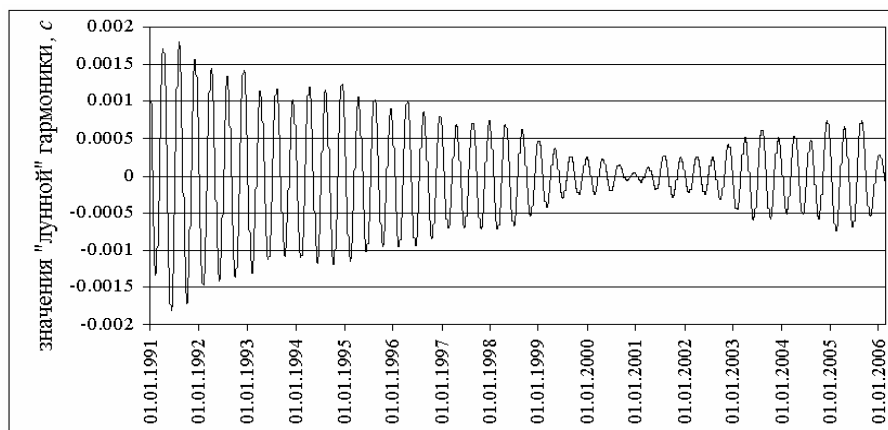


Рис. 8. Некомпенсированные приливные колебания

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоренков Н.С. Физика нестабильностей вращения Земли / Н.С.Сидоренков. – М.: Наука, 2002. – С. 384.
2. <http://quasar.ipa.nw.ru>.
3. <http://hpiers.obspm.fr>.
4. <http://maia.usno.navy.mil>.
5. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» /Д.Л. Данилов и А.А. Жиглявский (ред.). – СПб: Изд-во СПб. ун-та, 1997. – С. 308.
6. <http://www.gistatgroup.com>.

TESTING THE EARTH NONUNIFORM ROTATION BY SINGULAR SPECTRUM ANALYSIS

A.A.Baskova, V.B. Kashkin

The Earth rotation series were studied with singular spectrum analysis. A trend and seasonal variations were evaluated, the amplitude and phase fluctuations of annual semi-annual oscillation were determined. It was found that standard procedure of estimation the zonal tides in the Earth non-uniform rotation is inaccurate.