

АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНЕГО РЯДА ОПРЕДЕЛЕНИЙ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ВРЕМЕНИ В ОБСЕРВАТОРИИ БОРОВА ГУРА

1. Введение

Непрерывные определения местного астрономического времени по наблюдениям прохождения звезд через местный меридиан проводятся в Геодезическо-Геофизической Обсерватории Борова Гура Варшавского Института Геодезии и Картографии (ИГиК) с 1963 года. Наблюдения выполняются с помощью пассажного инструмента фирмы Zeiss Jena с фотоэлектрической приставкой.

Аппаратура, применявшаяся для этих определений, подвергалась постепенному совершенствованию. Основными часами вначале были кварцевые, которые корректировались по сигналам, передаваемым

по радио с помощью хроноскопа. Моменты прохождения звезд регистрировались цифровым хронографом. Задержка регистрирующей аппаратуры определялась каждый вечер наблюдений. В настоящее время основными часами является рубидиевый стандарт, привязываемый к координированному времени по радиосигналам осциллографическим методом.

С 1985 года моменты прохождения звезд через местный меридиан регистрируются на магнитофонной ленте, а прежняя пороговая методика заменена цифровым методом, благодаря чему исключается запаздывание аппаратуры. С 1986 года в комплекте

аппаратуры не было сделано изменений, что характеризует высокую надежность аппаратуры, и благодаря чему не было никаких скачков систематической погрешности, обычно имеющих место при смене аппаратуры.

Результаты определения величины $UT0 - UTC$ по каждой серии наблюдений в недельных наборах высылались вначале в Международное Бюро времени (BIH) в Париже, а позднее также во ВНИИФТРИ (Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений) в Москве и в Центральное Бюро международной службы движения полюса (IPMS) в Мизусаве (Япония). В настоящее время результаты наблюдений высылаются электронной почтой еженедельно во ВНИИФТРИ, где продолжается определение параметров вращения Земли по результатам астрометрических наблюдений 16-ти обсерваторий; передаются эти данные также в Главную Астрономическую обсерваторию Российской Академии Наук в Пулковке, где используются для целей каталогизации, а также в Астрономическую обсерваторию Китайской Академии Наук в Шанхае.

Текущие результаты определения астрономического времени ежегодно обрабатывались в ИГиК. Оценивались коэффициенты модели полугодовых и годовых изменений разницы между средним универсальным временем, определенным в Боровой Гуре $UT1^{BG}$, и средним универсальным временем BIH $UT1^{BIH}$.

Собранный наблюдательный материал, в особенности ряд наблюдений за последние 19 лет, является уникальным источником информации о поведении во времени астрономической долготы Обсерватории Борова Гура. Основным предметом настоящей работы является спектральный анализ многолетнего ряда наблюдений и сопоставление с данными международной службы параметров ориентации Земли (EOP – Earth Orientation Parameters).

2. Прежние определения астрономической долготы фундаментального пункта "Борова Гура"

В работе [1] после оценки всех доступных материалов с учетом их целостности и однородности с точки зрения наблюдений и вычислений, а также стабильности систематической ошибки полученных результатов, для анализа приняты результаты за

период 1986,0-2005,5, сгруппированные по сериям наблюдений¹. В этот период координаты звезд вычислялись в системе каталога FK5, а аппаратура и способ вычислений не изменялись. Учитывая то, что точность положения звезд в каталоге Hipparcos на порядок выше (примерно 20-кратно), чем в каталоге FK5, был выполнен пересчет результатов определения астрономического времени на систему каталога Hipparcos.

Первое определение астрономической долготы λ^{BG} фундаментального пункта Борова Гура² было выполнено в 1929 году. Тогда определялась разность долгот между этим пунктом и фундаментальным пунктом Парижской Обсерватории. Была получена величина

$$\lambda_{1929}^{BG} = 21^{\circ}02'12,12'' = 1^h24^m08,808^s$$

принятая как конвенциональная.

Повторно долгота λ^{BG} определялась в 1955-1959 гг.:

$$\lambda_{1959}^{BG} = 21^{\circ}02'12,06'' = 1^h24^m08,804^s$$

Ошибки первого определения (λ_{1929}^{BG}) неизвестны, однако предполагается, что они ниже $0,01^s$. Ошибка второго определения (λ_{1959}^{BG}) составляет $0,002^s$ [1].

Астрономическую долготу места расположения пассажного инструмента в Боровой Гуре λ_{ip}^{BG} с учетом расстояния между ним и фундаментальным пунктом по округлению до $0,001^s$

$$\lambda_{1929ip(c)}^{BG} = 21^{\circ}02'14,205'' = 1^h24^m08,947^s$$

было принято как конвенциональную при разворачивании определений астрономического времени в 1963 г.

В работе [1] показано, что после обработки почти двадцатилетнего ряда наблюдений $UT1^{BG} - UT1^{BIH}$ с использованием данных звездного каталога Hipparcos и исключения периодических погрешностей, получена долгота инструмента на эпоху 2005 года

$$\lambda_{2005ip}^{BG} = 1^h24^m08,9467^s,$$

которая очень близка к величине, определенной в 1929 году, несмотря на различие методик и совершенствование инструментальной базы.

¹ Наблюдательную серию образует группа звезд, наблюдаемых в течение одного вечера.

² Пункт на территории Геодезическо-Геофизической Обсерватории Борова Гура принят в межвоенный период как центральный пункт триангуляционной сети страны и как пункт приложения эллипсоида Бесселя системы „Borowa Góra”.

3. Анализ вариаций $(UT1 - UTC)^{BG} - (UT1 - UTC)^{BIN}$ на основе данных, полученных в Боровой Гуре в 1986,0–2005,5 гг.

Общезвестным является факт систематического замедления вращения Земли из-за приливного трения, проявляющийся в уменьшении разности $UT1 - TAI$. Приливные изменения скорости вращения могут быть представлены моделью, содержащей постоянное замедление и периодические компоненты. Оценки этих составляющих выполнялись многократно и послужили основанием для многочисленных гипотез глобального и космического масштабов (см. например, [2, 3, 4]), значение которых для геодинимических исследований можно оценить только с течением времени. Но усилия по накоплению, сохранению и корректной обработке экспериментальных данных ценны уже в настоящее время, так как позволяют «зафиксировать мгновение». Более того, регулярно выполняемый анализ накопленных данных может дать основания для пересмотра и совершенствования методов

измерений, развития новых направлений исследований.

Кроме приливных сил на неравномерность вращения Земли влияют перемещения воздушных и водных масс, образование и таяние снежного покрова, тектонические движения, а также деятельность людей.

Предметом настоящей работы является анализ вариаций $(UT1 - UTC)^{BG}$, определенных в Боровой Гуре, относительно аналогичной величины $(UT1 - UTC)^{BIN}$, публикуемой ВИН:

$$\Delta T = (UT1 - UTC)^{BG} - (UT1 - UTC)^{BIN}$$

Все упомянутые выше причины неоднородности вращения Земли в этой разности будут в значительной степени исключены и основными будут локальные факторы.

Массив данных ΔT за время 1986,0 – 2005,5 содержит 2474 наблюдения. Временной ряд с линейным трендом и гистограмма показаны на Рис.1.

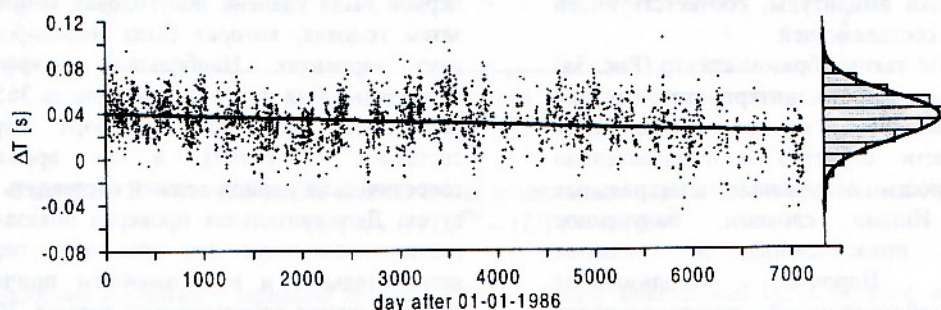


Рисунок 1. Временной ряд и гистограмма наблюдений ΔT в период 1986,0 – 2005,5. Время отсчитывается от 1 января 1986 г.

Временной ряд $(UT1 - UTC)^{BG} - (UT1 - UTC)^{BIN}$ характеризуется значительной неравномерностью отсчетов, от 0,03 до 166,87 суток (Рис. 2). Минимальный интервал между независимыми сериями составляет около часа, что имеет место при наблюдении двух групп звезд в течение одной ночи. Спектральный анализ такого ряда не может быть выполнен с использованием стандартных программных средств и методов для статистической обработки данных. Эти методы можно применять при условии предварительной интерполяции во временной области для получения равномерного шага по времени между отсчетами. Такой подход был использован, в частности, для анализа астрометрических наблюдений широты пункта обсерватории Варшавской Политехники в Юзефославе [5].

Из-за наличия в исследуемом ряду больших различий в шаге между наблюдениями и

существенных перерывов, использование интерполяции не гарантирует получения временного ряда, вполне соответствующего исходному. Более того, процесс интерполяции привносит в выходной ряд новую информацию, не содержащуюся во входном ряду, искажающую спектральные характеристики анализируемых данных.

В настоящей работе, также как и в [1], использована итерационная методика спектрального анализа [6, 7], пригодная для неравномерных временных рядов. Выполняется процедура «выбеливания» остатков, то есть последовательно моделируются и исключаются из исследуемого ряда отдельные периодические компоненты. Процедура повторяется до тех пор, пока остатки не станут случайным процессом (по определенному критерию), и будут иметь, соответственно, равномерный спектр, характерный для «белого» шума.

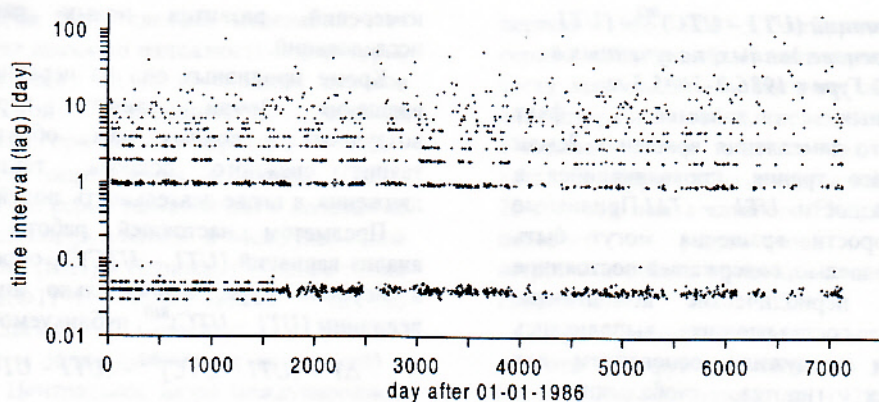


Рисунок 2. Распределение шагов между отсчетами во временном ряду $(UT1 - UTC)^{BG} - (UT1 - UTC)^{BIH}$

В интервале периодов от 2 до 5000 суток с шагом 1 сутки моделировались периодические временные ряды с единичной амплитудой и затем вычислялась их корреляция с временным рядом исследуемых данных при сканировании фазы в пределах $0-180^\circ$. Коэффициент регрессии, соответствующий максимальному коэффициенту корреляции, принимался в качестве оценки амплитуды, соответствующей спектральной составляющей.

Полученный таким образом спектр (Рис. 3а) не может быть строго интерпретирован как преобразование Фурье исходного ряда из-за неравномерности отсчетов и следовательно неортогональности полученных спектральных компонент. Иными словами, полученное спектральное представление не является однозначным. Впрочем, использование принципа приблизительной ортогональности позволяет оценить эту неоднозначность и свести ее до уровня неопределенности спектральных

компонент, определяемого наличием случайных погрешностей измерений.

На следующем этапе анализа были выбраны доминирующие спектральные составляющие, последовательное удаление которых реализовало процесс «выбеливания», а их сумма представляла собой цифровую модель исходного ряда. Из физических соображений первой была удалена полугодовая компонента, затем годовая, которая была моделирована в двух вариантах. Наибольший коэффициент корреляции был получен для периода 365 суток (напомним, что шаг перебора периодов составлял 1 сутки), в то время как теоретический период должен составлять 365,24 суток. Дополнительная проверка показала, что различие амплитуд для этих двух периодов незначительное и в дальнейшем принят для моделирования теоретический период. На этом основании также и для полугодовой компоненты был принят теоретический период 182,62 суток.

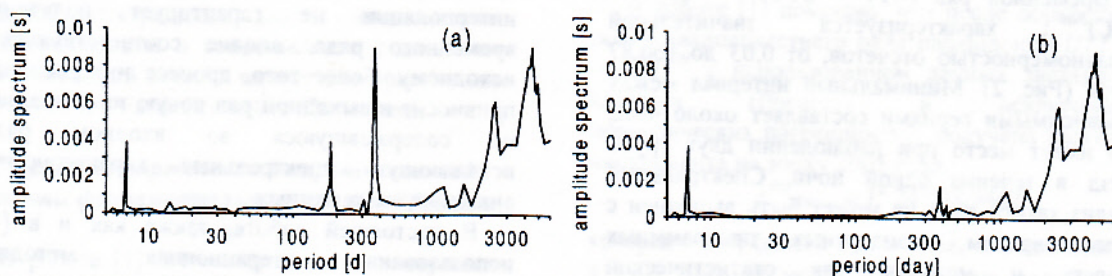


Рисунок 3. Исходный спектр (а) и спектр с удаленными годовой и полугодовой компонентами (б)

В показанном на Рис. 3б спектре с удаленными годовой и полугодовой компонентами явно проявляются компоненты с периодами 378 и 416 суток, которые также были включены в числовую модель ряда наблюдений, состоящую из суммы восьми периодических компонент :

$$\begin{aligned} X_7 &= -0,00228 \sin[2\pi (t - 1,2) / 7] \\ X_{182,625} &= 0,00358 \sin[2\pi (t - 20) / 182,625] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{365,25} &= -0,00842 \sin[2\pi (t - 2) / 365,25] \\ X_{378} &= 0,00392 \sin[2\pi (t + 16) / 378] \\ X_{416} &= 0,00171 \sin[2\pi (t - 37) / 416] \\ X_{2485} &= -0,00274 \sin[2\pi (t + 1275) / 2485] \\ X_{3250} &= 0,00311 \sin[2\pi (t + 1710) / 3250] \\ X_{4180} &= 0,00893 \sin[2\pi (t + 1080) / 4180] \end{aligned}$$

и линейного тренда

$$Y = -1,4390 \times 10^{-6} t + 0,03653$$

(время t в сутках с 1 января 1986г.)

Модельный временной ряд на равномерной сетке отсчетов показан на Рис. 4, а ряд остатков с гистограммой – на Рис. 5.

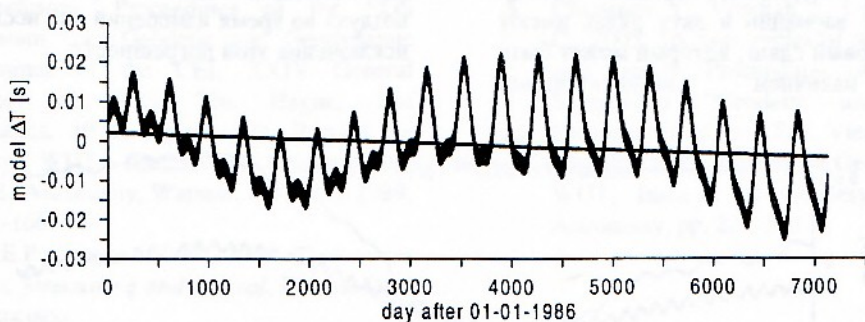


Рисунок 4. Модельные вариации $(UT1 - UTC)^{BG} - (UT1 - UTC)^{BIN}$

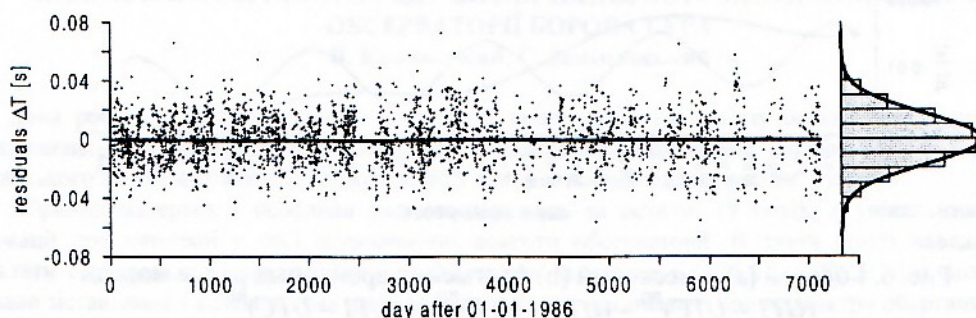


Рисунок 5. Остатки после исключения модельных вариаций из временного ряда $(UT1 - UTC)^{BG} - (UT1 - UTC)^{BIN}$

Исключение модельных вариаций привело к уменьшению на 14% разброса в массиве данных, а СКО ряда уменьшилось с $0,02012^s$ до $0,01728^s$. Полученная величина СКО дает оценку средней ошибки единичной серии наблюдений, которая в полтора раза больше, чем средняя оценка по внутренней сходимости ($0,0107^s$), полученная в процессе первичной обработки наблюдательных данных [1]. Причина такого различия, в частности, состоит в том, что модель содержит чисто периодические компоненты и не учитывает приливные эффекты с переменными амплитудами и фазами. Дальнейшее совершенствование модели является предметом работ, выполняемых в настоящее время.

4. Сопоставление с наблюдениями международной службы вращения Земли

Исследуемые в настоящей работе результаты наблюдательного эксперимента по измерению «двойной» разности $(UT1 - UTC)^{BG} - (UT1 - UTC)^{BIN}$ в значительной мере свободны от эффектов многих причин неоднородности вращения Земли. Очень существенным, однако, является то, что данные о разности $(UT1 - UTC)^{BIN}$, доступные, например в Интернете на

сайте International Earth Rotation and Reference Systems Service <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/products/combined/eopcomb.html> являются сглаженными во временной области. С другой стороны, данные, полученные при астрономических наблюдениях долготы, в настоящей работе не сглаживались, поэтому в исследованных «двойных» разностях можно попытаться обнаружить вариации с периодом несколько суток. Как видно из представленных выше результатов спектрального анализа, такие вариации с периодом 7 суток и были выделены.

На Рис. 6а показан фрагмент временного ряда $(UT1 - UTC)^{BIN}$, который содержит годовую и полугодовую периодические компоненты, а также достаточно хорошо видимые в 2-х и 4-х недельные приливные вариации с переменной фазой, прослеживаемые и на месячном фрагменте (Рис. 6б). На этих рисунках показан также модельный ряд для наблюдений в Боровой Гуре, представляющий вариации с периодами и фазами, постоянными на интервале 1986,0 – 2005,5. Из Рис. 6б видно, что, образно говоря, Земля замедляет свое вращение в четверг и снова разгоняется к понедельнику.

При количественном сопоставлении временных рядов $(UT1 - UTC)^{BG} - (UT1 - UTC)^{BIN}$ и $(UT1 - UTC)^{BIN}$ было показано совпадение фаз полугодовых вариаций в обоих рядах. Годовые вариации в двух рядах имеют небольшой фазовый сдвиг, который может быть объяснен наличием незначительных

погрешностей аппаратуры, порождаемых сезонными изменениями температуры. Запланирована дальнейшая обработка наблюдательных данных с учетом температуры воздуха во время измерений для исследования и исключения этой погрешности.

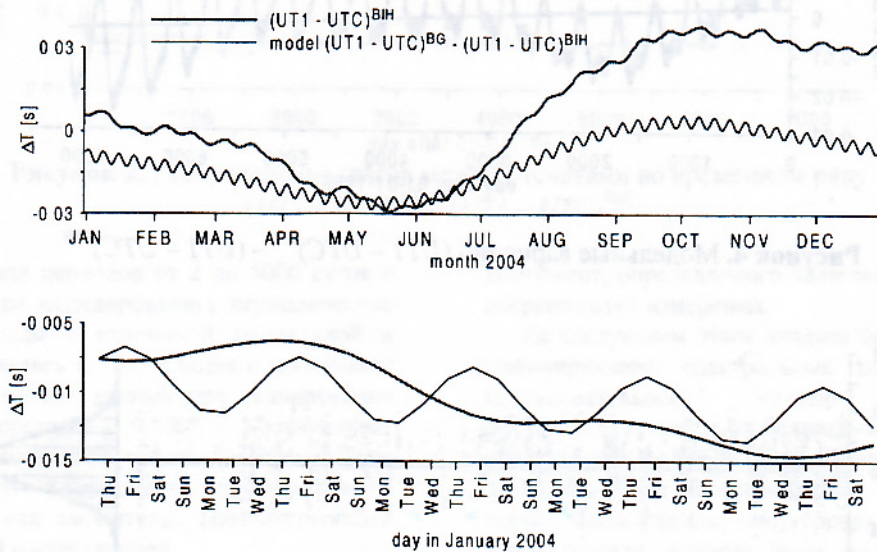


Рис. 6. Годовой (а) и месячный (б) фрагменты временных рядов модели $(UT1 - UTC)^{BG} - (UT1 - UTC)^{BIN}$ и $(UT1 - UTC)^{BIN}$

5. Выводы

Спектральный анализ данных наблюдений, несмотря на значительный уровень помех в результатах измерений астрономической долготы, дал возможность выделить 8 периодических составляющих. В спектре наиболее четко выделены недельная, полугодовая и годовая компоненты, обнаружены составляющие в чандлеровском диапазоне периодов. Наибольшая по амплитуде компонента с периодом 11,4 года (4180 суток) характерна для эффектов изменений солнечной активности. Компонента в диапазоне 6-7 лет (2485 суток) может быть связана с локальными вариациями направления отвесной линии [8]. Для линии в спектре с периодом 8,9 лет (3250 суток) в доступной литературе не нашлось физической интерпретации. Недельные вариации также не удалось связать с какими-либо астрономическими или геофизическими процессами и остается только соотнести их с недельным ритмом человеческой деятельности. О подобных вариациях существуют упоминания в некоторых публикациях скорее популярного характера, но авторам не удалось найти научную ссылку. Разумеется, отмеченный факт должен быть проверен по различным независимым наборам данных, что и составляет, в частности, предмет дальнейших исследований авторов.

Следует подчеркнуть, что выборочные эффекты и помехи в исследованных данных наверняка смещают спектральные оценки и могут приводить к появлению артефактов, поэтому в данной работе попытки интерпретации сведены к минимуму.

Настоящая работа выполнена в рамках исследований по теме S01 „Problemy geodezji i geodynamiki” в Институте Геодезии и Картографии в Варшаве как продолжение работ, проведенных по исследовательскому проекту Комитета Научных Исследований Nr 5 T12E 031 22 в 2002–2003 гг.

Литература

1. Kryński J., Moskwiński M., Zanimonskiy Y. M. *Analiza wieloletniego ciągu wyznaczeń czasu obrotowego w Borowej Górze*, Prace Instytutu Geodezji i Kartografii, Warszawa, 2005, T. LI, z. 109, pp. 1-30.
2. Иванов В. В., *Периодические колебания погоды и климата*, УФН. Том 172, №7, июль 2002 г. С. 777-811.
3. Abarca del Rio R., Gambis D., Salstein D., Dai A. *Solar activity and Earth rotation variability*, Journal of Geodynamics, 2003. Volume 36, Issue 3, pp. 423-443.
4. Шмуратко В. И. *Межгодовой спин-орбитальный резонанс Земли*, Доповіді

- Национальної академії наук України, 2005, № 9, С. 133-139.
5. Kruczyk M., Rogowski J.B., Vondrák 1999, *Preliminary results of astrometric observations in Józefów*, Proceedings of the EGS Symposium G4 „Geodetic and Geodynamic Programmes of the CEI, XXIV General Assembly of EGS, The Hague, The Netherlands, 19-23 April 1999, Reports on Geodesy, WUT, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, Warsaw, No 4(45), 1999, pp. 161-166.
6. Box G.E.P., Jenkins G. M., 1976, *Time series analysis, forecasting and control*, Holden Day, San Francisco.
7. Nuttall A.H., Carter G.G., 1982, *Spectral Estimation Using Combined Time and Lag Weighting*, Proc. IEEE, Vol. 70, September 1982, pp. 1115-1125.
8. Chapanov Y., Vondrak J., Gorshkov V., Ron C., 2005, *Six-year cycles of the Earth rotation and gravity*, Proceedings of the EGU G9 Symposium “Geodetic and Geodynamic Programmes of the CEI”, Vienna, Austria, 25-30 April 2005, Reports on Geodesy, No 2(73), WUT, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, pp. 221-230.

АНАЛІЗ БАГАТОРІЧНОГО РЯДУ ВИЗНАЧЕННЯ АСТРОНОМІЧНОГО ЧАСУ В ОБСЕРВАТОРІЇ БОРОВА ГУРА Я. Криньський, Є. Занімонський

Дана робота є продовженням і розвитком вишукувань по аналізу багаторічних астрономічних спостережень, які виконується з 1963 року геодезично-геофізичною обсерваторією Борова Гура Варшавського Інституту Геодезії і Картографії з використанням пасажного інструменту.

Зібраний матеріал, і особливо ряд спостережень за останні 19 років, є унікальним джерелом інформації про виміряні у часі астрономічні довготи обсерваторії. В даній статті наведені основні результати спектрального аналізу ряду спостережень за період з 1986,0 – 2005,5. Для аналізу змісту виконано зіставлення з незалежними даними міжнародних організацій про параметри обертання Землі.

ANALYSIS OF A LONG-STANDING SERIES OF ASTRONOMICAL TIME DETERMINATION AT BOROWA GORA OBSERVATORY J. Kryński, Ye. Zanimonskiy

The paper presents the continuation and extension of research on the analysis of long-standing series of astronomical observations conducted since 1963 with the passage instrument at Borowa Gora Geodetic-Geophysical Observatory of the Institute of Geodesy and Cartography, Warsaw.

Retained observational data, in particular data series from last 19 years contains the unique information on time variation of astronomical latitude of Borowa Gora Observatory. Results of a complex spectral analysis of a long-standing rotational time data series from 1986.0-2005.5 are presented and discussed in the paper. Characteristics of differential effects estimated and modelled for Borowa Gora Observatory was compared with the respective one based on the BIH data.