

ИЗМЕНЕНИЕ ДОЛГОТЫ ПУЛКОВА И
ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

В.Л. Горшков, Н.В. Щербакова

На материале Пулковской базы данных классических определений параметров ориентации Земли (ПБД ПОЗ) [1] и данных международной службы вращения Земли (IERS) [3] исследованы изменения долгот обсерваторий, входящих в состав ПБД ПОЗ, и нерегулярные квазишестилетние вариации во вращении Земли. Изменение долготы Пулкова за период 1960-2000 гг. составило $d\lambda/dt = 0.51 \pm 0.19$ мсек/год. В качестве основного метода исследований применялся сингулярный спектральный анализ [4].

Исследование основано на наблюдениях всемирного времени (UT0-UTC) с помощью фотоэлектрических пассажных инструментов (ФПИ) Пулковской обсерватории (PUF, PUG, PUN) и других пунктов, имеющих в Пулковской базе данных исходных наблюдений на ФПИ [1].

$$UT0_i - UTC = (\alpha - \lambda - S_0)(1 - v) - (T - \lambda)$$

Здесь α - прямое восхождение наблюдаемой звезды (без нутации в прямом восхождении), S_0 - звёздное время в гринвичскую полночь, T - показания местных часов в момент регистрации, приведённые к атомной шкале времени и исправленные за все инструментальные редукции.

Наиболее существенные характеристики рядов наблюдений приведены в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики рядов наблюдений Пулковских ФПИ

	PUF	PUG	PUN
Продолжительность и ср.эпоха наблюдений	1959.69-1971.38 1966.63	1971.24-1985.34 1977.78	1971.78-2001.0 1986.94
Пропуски наблюдений	-	в 1983	в 1983 и в 1985
Количество вечеров	1075	1520	2787
Ср.кв.ош. ед. веса (мсек)	± 18.5	± 19.4	± 21.2
Поправка долготы (мсек)	- 3.4	5.0	- 5.4
Тренд долготы (мсек/год)	0.45	1.11	0.49

Все наблюдения были переработаны в системе каталога HiC с применением современного стандарта редуций [2] и численной эфемериды DE200/LE200. Для анализа трендов и долгопериодических вариаций в этих рядах наблюдений были вычислены отклонения всемирного времени (RT_i) от сводных данных параметров ориентации Земли (ПОЗ). Для этого использовались комбинированные по различным средствам определения ПОЗ данные EOP(IERS)C04 [3]. При этом в ПОЗ учитывались внутрисуточные приливные поправки согласно модели Рэя [2] и поправки за нутационные углы, так что:

$$RT_i = (UT0_i - UTC) - (UT1 - UTC) - (X \sin \lambda + Y \cos \lambda) \operatorname{tg} \varphi / 15 - d\text{Psi} \operatorname{cose},$$

где $UT1-UTC$, X , Y , $d\text{Psi}$ - ПОЗ, λ и φ - координаты инструментов, ϵ - наклон эклиптики к экватору.

На рис. 1 приведены нормальные точки, вычисленные на каждые 0,05 года для рядов RT_{PUF} , RT_{PUG} , RT_{PUN} , а также их линейная (LinFit) и полученная методом сингуляр-

ного спектрального анализа (SSAFit) аппроксимации. (Использовалась программная реализация SSA «Гусеница» [4], позволяющая в интерактивном режиме восстанавливать ряд по значимым главным компонентам). Для LinFit приведена также скорость тренда, которую можно интерпретировать как скорость изменения долготы инструмента. Средневзвешенная скорость изменения долготы Пулково (к востоку) по имеющимся рядам составляет $d\lambda/dt = 0.51 \pm 0.19$ мсек/год (в линейной мере $d\lambda/dt = 11.8 \pm 4.4$ см/год). Принятая модель движения литосферных плит NNR-NUVEL1A [2], основанная на современных средствах определения ПОЗ, для евроазиатской плиты даёт $d\lambda/dt = 0.1$ мсек/год (2-2,5 см/год). При том уровне ошибок искомой величины, который характерен для астрооптических наблюдений (имеется в виду определение, выполненные на классических инструментах, в дальнейшем АО ПОЗ), сходимость с современными определениями следует признать удовлетворительной. Ничтожно малую часть избытка можно объяснить постгляциологическим поднятием Фенноскандии, на восточных границах которого должны наблюдаться вековые изменения уклонения отвеса, совпадающие по знаку с наблюдаемыми уклонениями в рядах RT_i .

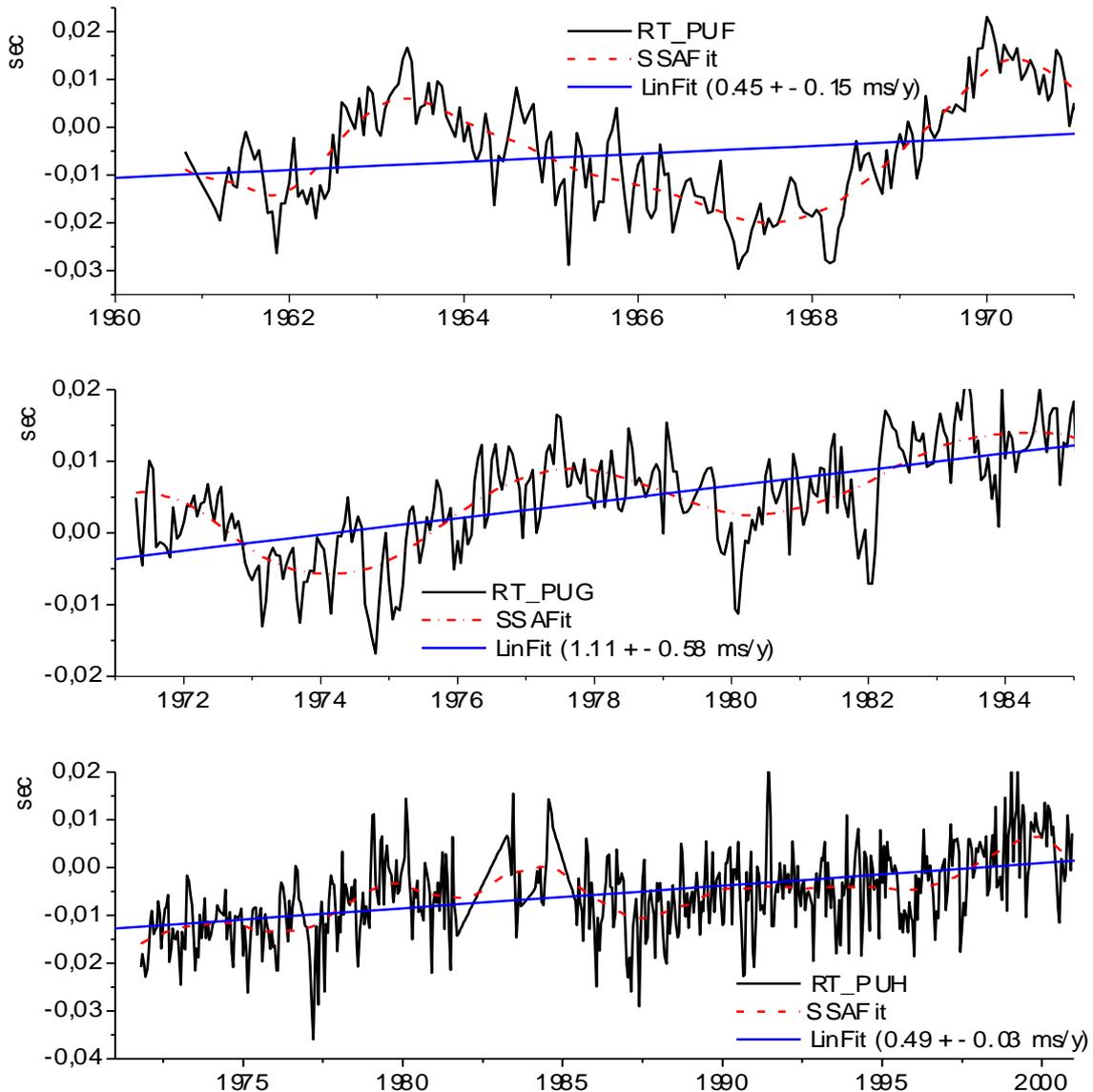


Рис. 1

В табл. 1 приводятся поправки к принятому значению долготы Пулковского меридиана для каждого из трех Пулковских пассажных инструментов на средние эпохи наблюдений. Приведенные соответствующими трендами на одну эпоху (1976.78), эти поправки составляют для PUG: +.0039s, для PUF: -.0012s, для PUN: -.0104s.

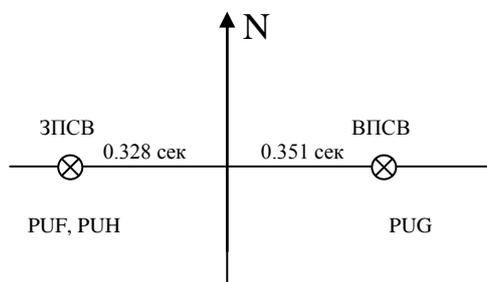


Рис. 2

Разность $PUN - PUF = +.009$ сек - в чистом виде ошибка определения долготы, т.к. инструмент PUN, заменивший PUF, установлен в той же точке на столбе павильона ЗПСВ (рис. 2). Эта разность, помимо случайной ошибки, присущей всем наблюдениям, вызвана, как будет показано ниже, наличием в рядах до 1986 года колебаний, имеющих негармонический характер. А именно: получаемая скорость изменения долготы существенно зависит от того, укладывается ли кратное число квазипериодов в используемой части ряда. Инструмент PUG расположен в павильоне ВПСВ симметрично ЗПСВ к востоку от Пулковского меридиана. Разность $(PUG - (PUF + PUN)/2) \approx 10$ мсек обусловлена, скорее всего, отклонениями отвесных линий, возникающими из-за неоднородного распределением пород в районе Пулковской горы, а также возможными устойчивыми рефракционными полями, образующимися в районе холмов.

В случае SSAFit все ряды восстановлены по первым трём главным компонентам, т.е. по компонентам, содержащим основную мощность рядов. Сингулярный спектральный анализ (SSA), в отличие от спектрального анализа, более подходит для исследования подобного типа рядов, поскольку позволяет выделять в них информативные, необязательно гармонические компоненты по степени их вклада в исследуемый ряд. В частности, применение SSA к рядам ПОЗ [5] позволило более строго и по реализации меньшей продолжительности выделить все компоненты в параметрах вращения Земли, чем метод, используемый для этого в IERS [3].

На рис.1 обращает на себя внимание, особенно в рядах RT_{PUF} и RT_{PUG} , наличие 5-7-летней вариации с постепенно затухающей амплитудой от 20 мсек до её исчезновения после 1986 года. В ряду RT_{PUN} эта вариация не имеет столь явного характера. Для контроля данные были пересчитаны с использованием АО ПОЗ из [6], а также с заменой каталога NiC на использовавшийся ранее KCB [7]. Как и следовало ожидать, столь значительные вариации не могут быть объяснены ошибками определения ПОЗ и опорных каталогов.

Величины RT_i характеризуют локальное поведение всемирного времени (или долготы) относительно некоторым способом усреднённого по всем станциям и способам определения его значения. Наиболее существенные каталожные и инструментально-рефракционные ошибки приводят к вариациям (систематическим ошибкам) сезонного или векового характера в RT_i , а не к обнаруженным долгопериодическим вариациям. В рядах, относящихся к более раннему периоду (в Пулкове до 1970 года), возможны неучтённые ошибки использовавшихся в то время часов и/или приёма стандартных сигналов времени, не превосходящие единиц миллисекунд и имеющие случайный характер.

В связи с обнаруженными в пулковских рядах вариациями представляется целесообразным исследовать низкочастотные вариации в рядах наблюдений других обсерваторий, имеющих в нашей базе данных. К сожалению, далеко не все из них достаточно продолжительны и стационарны (в смысле дисперсии) и в них нет наблюдений до 1972 года.

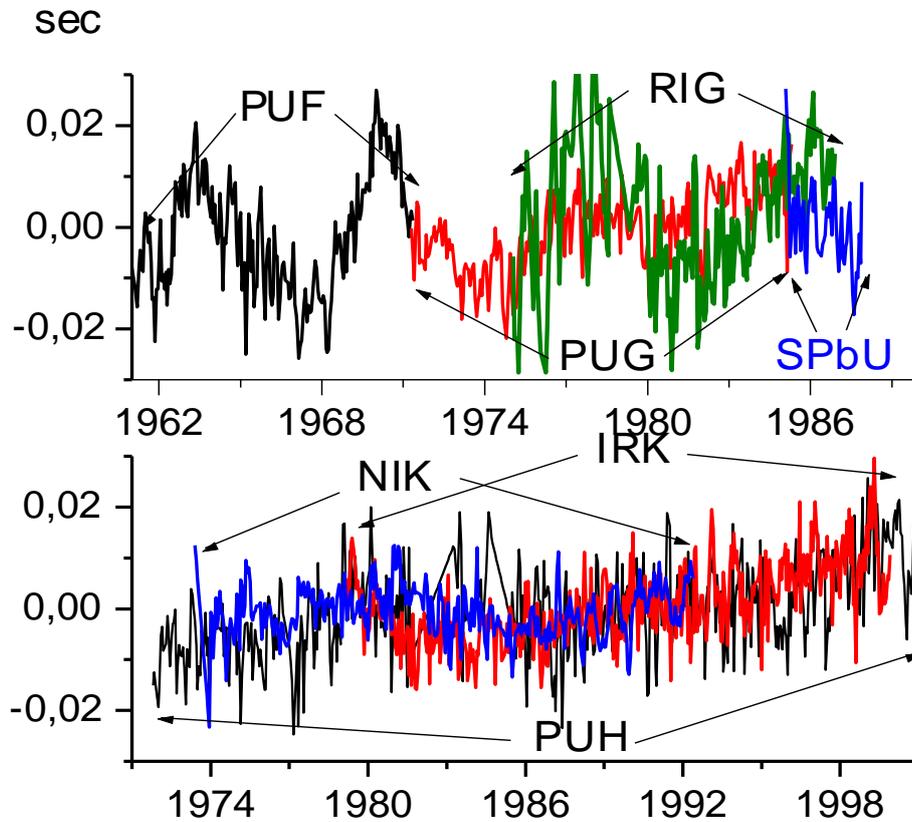


Рис. 3

На верхнем графике **рис. 3** совместно с пулковскими приведены соответствующие данные географически наиболее близких обсерваторий Рижского и Санкт-Петербургского университетов, на нижнем графике **рис. 3** - данные самых продолжительных рядов базы (Николаевской и Иркутской обсерваторий). Из всех рядов удалены средние значения и учтено движение евроазиатской плиты. Видно, что:

1. Все станции имеют восточный тренд, в среднем превышающий наблюдаемый с помощью современных средств определения ПОЗ ($d\lambda_{\text{IRK}} = 0.72$, $d\lambda_{\text{RIG}} = 0.81$, $d\lambda_{\text{NIK}} = 0.04$ мсек/год).
2. Достоверность значений $d\lambda$ ниже формальной ошибки ввиду наличия негармонической долгопериодической составляющей в рядах, искажающей оценку линейного тренда. Так, в рядах PUF, RIG, PUG, имеющих наибольшие амплитуды этих вариаций, при отсечении от рядов первого или последнего года наблюдений величины $d\lambda$ сильно меняются вплоть до изменения знака.
3. Регионально близкие наблюдения в целом подтверждают долгопериодические вариации RT, хотя уровень шумов, особенно в ряду RT_{RIG} (рижском), чрезвычайно высок.
4. На удалённых станциях, как и в данных RT_{PUN} , подобные вариации явно не выражены.
5. С 1986 года, когда в определении EOP(IERS) астрооптические средства перестали участвовать, вариаций, значимо превышающих уровень шумов, не обнаруживается.

Заметим, что до 1972 года шкала UTC периодически подгонялась линейными поправками к UT1, поэтому в редуцированных величинах UT1–UTC в этом интервале также должны наблюдаться некие вариации. С 1972 шкала UTC подгонялась к UT1 исключительно скачками в 1 секунду при достижении расхождения шкал не менее 0.8 секунд.

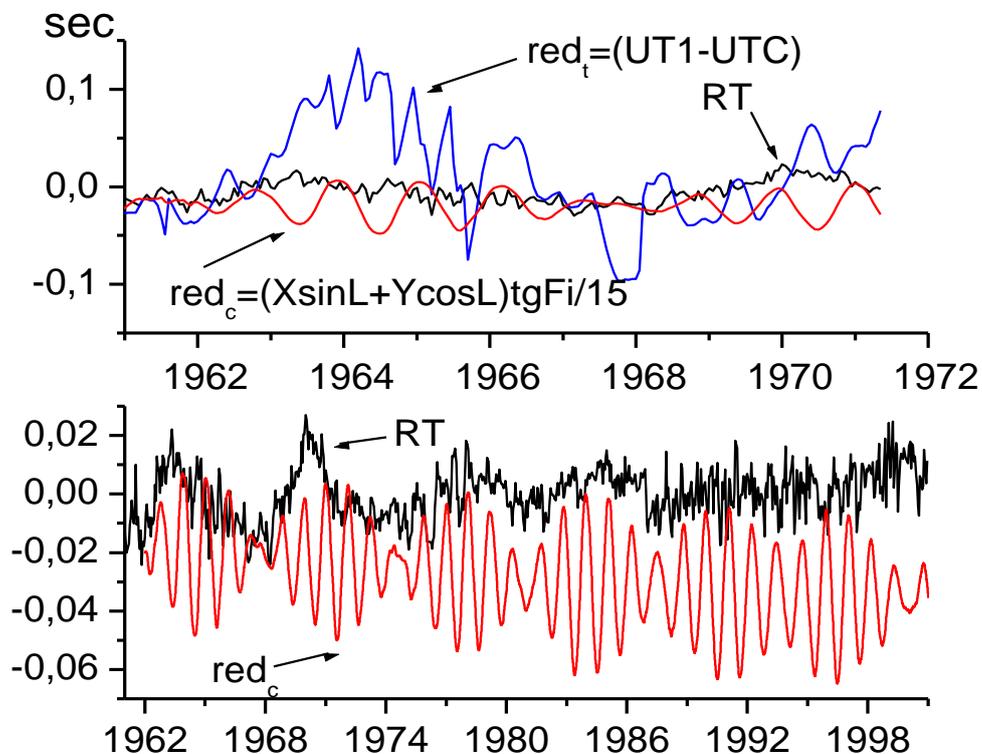


Рис. 4

На верхнем графике **рис. 4** для ряда RT_{PUF} приведены все использованные в редуциционной формуле (2) члены. Поскольку с 1972 года редуциционный член UT1–UTC представляет практически ежегодную «пилу» с амплитудой в 1 секунду, то внизу на этом же рисунке приведена редукция только за колебание полюса для Пулкова совместно с усреднёнными для наглядности данными из верхнего графика **рис.3**. Видна отчётливая коррелированность всех величин вплоть до 1986 года, причём ряд RT является как бы огибающей для ряда редукации за колебание полюса.

Подобные вариации в UT1-TAX (TAX - освобождённая от низкочастотных трендов шкала ТА1) обнаружены, но никак не прокомментированы в работе [6] (**рис. 5** из [6]). В работе [8] эти 6-7-летние вариации названы курьёзными и поставлена задача исследовать их природу – измерительные ошибки или реальный эффект. Заметим, что ПОЗ в [6] выведены исключительно из классических астрономических наблюдений на лучших инструментах, имеющих наиболее продолжительную историю. Видно, что подобные вариации наблюдаются в этом решении вплоть до конца реализации (1992 г.) и имеют амплитуду около 100 мсек.

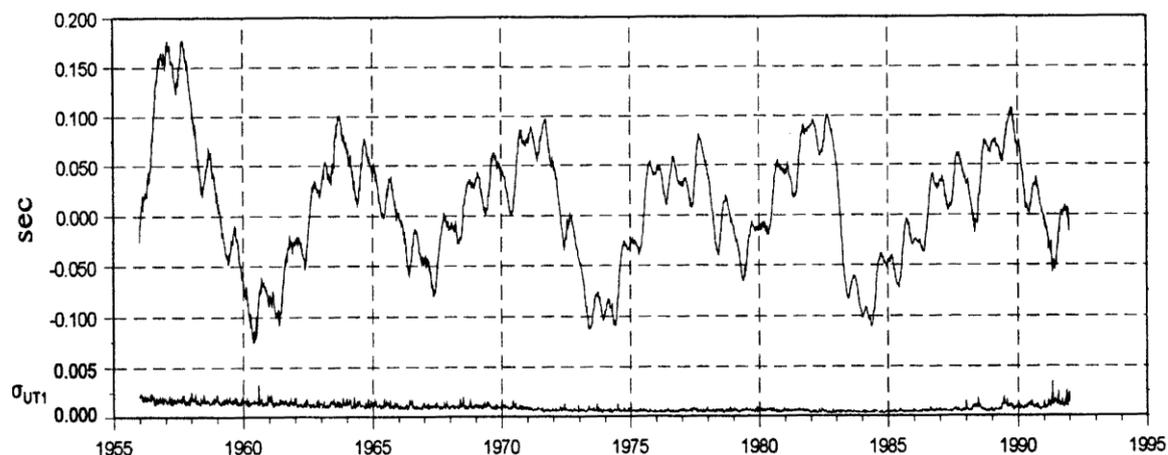


Рис. 5 UT1-TAX

В этой связи нами была предпринята работа по выявлению подобных вариаций в UT1-UTC в используемом в данной работе решении EOP(IERS)C04. Для этого по имеющимся в [3] разностям UTC - TAI был совершен переход к непрерывной шкале TAI и из полученной разности UT1-TAI снят линейный тренд (-0.8 сек./год). Полученный таким образом остаток UT1-TAI-LinFit и первая производная от него, представляющая вариации продолжительности суток (LOD, увеличена в 1000 раз), приведены на нижнем графике **рис. 6**. Вверху на том же рисунке из данных нижнего графика методом SSA извлечены компоненты, соответствующие искомым квазишестилетним вариациям в UT и LOD (увеличена в 100 раз).

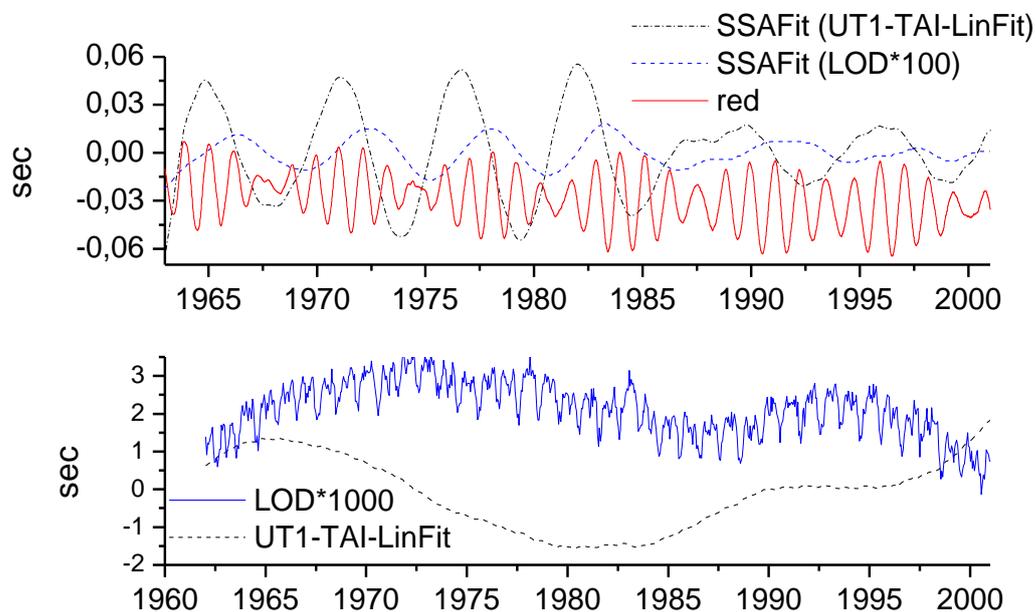


Рис. 6

Самыми мощными компонентами являются самые низкочастотные, так называемые декадные вариации, затем годовая и полугодовая составляющие, а следующими по мощности являются исследуемые 6-летние вариации. Декадные вариации принято считать обусловленными взаимодействием ядра и мантии, а сезонные – динамикой атмо-

сферы. На этом же графике воспроизведена, для сравнения, редуция за колебание полюса из нижнего графика на **рис. 4**. Видно, что:

1. Амплитуды и частично фазы исследуемых квазишестилетних вариаций UT1-TAI (и, естественно, LOD) после 1986 года изменились. Так до 1986 года амплитуда вариаций LOD составляла 0,10 - 0,15 мсек, а после незначительного сдвига фазы в 1986-1988 годах уже почти в три раза меньше. «Сбой» обнаруженной вариации может быть обусловлен переходом на «космические» средства определения ПОЗ, т.е. относительно центра масс Земли, а не относительно отвесных линий как в АО ПОЗ. Нельзя сказать, что величина амплитуды пренебрежимо мала. Например, в приливных вариациях LOD учитываются члены до 0,001 мсек [2], что задаётся современной точностью мониторинга скорости вращения Земли.
2. Вариации UT1-TAI на **рис. 6** имеют в два раза меньшую амплитуду, чем вариации UT1-TAX на **рис. 5**, что можно объяснить как особенностями формирования шкалы TAX в [6], так и использованием только избранных астрооптических средств определения ПОЗ.
3. Вариации $RT_i = UT1_i - UT1$ индивидуальных рядов, исследованные в данной работе, имеют до 1980 года приблизительно ту же фазу, что и вариации UT1-TAI-LinFit из EOP(IERS)C04, т.е. соответствующие вариации в сводном решении IERS занижены по амплитуде. Это может быть обусловлено сильным сглаживанием низкочастотной составляющей при сводной обработке, либо, что вероятнее, значительной шумовой составляющей в исходных рядах в тот период.
4. Заметна некоторая корреляция продолжительности суток с фазовыми соотношениями годового и чандлеровского движения полюса. В периоды их синфазности наблюдается рост продолжительности суток, а в противофазном их движении – вращение Земли ускоряется.

Таким образом, начав с исследования возможных ошибок в рядах Пулковских наблюдений, с помощью SSA была показана реальность квазишестилетних вариаций в скорости вращения Земли, представленной в сводном решении EOP(IERS)C04. Исходя из вышеприведённых данных, нельзя, к сожалению, сделать однозначных выводов относительно природы обнаруженных вариаций. Исключая из рассмотрения внешние возмущения нутационного характера (ввиду нерегулярности процесса), возможны следующие предположения:

1. Некорректность формирования ряда UT1-UTC в период функционирования только АО ПОЗ (с 1956 до 1985 года). Ввиду разностной природы этого ряда любая из составляющих его шкал времени может быть ответственна за эти вариации.
 - а. В основе шкалы UTC лежит атомная шкала TAI, в которой подобные вариации вряд ли возможны. Единственным, но маловероятным (в виду большой амплитуды обнаруженных вариаций и именно такой их периодичности) фактором их возникновения в TAI могут являться неучтённые атмосферные задержки в пространстве радиосигналов. (Например, в зависимости от солнечной обусловленности состояния ионосферы).
 - б. При формировании сводной шкалы UT1 была использована некорректная модель учёта систематических ошибок станций. Следует заметить, что некоторая неоднородность вообще присуща решению АО ПОЗ ввиду нестабильного состава станций, что, однако, не должно приводить к обнаруженным вариациям, а, скорее, к скачкам в шкале.

2. При формировании сводной шкалы UT1 не были учтены или сильно сглажены реальные вариации локальных отвесных линий, что, однако, маловероятно ввиду глобальности обнаруженного явления.
3. Помимо аperiодических декадных вариаций в скорости вращения Земли существуют квазипериодические вариации, возбуждаемые взаимодействием внутренних оболочек Земли.

Последнее предположение представляется более вероятным при некоторых предположениях относительно свойств границ раздела внутренних слоёв Земли. Подробнее этот вопрос рассмотрен в работе [9].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Горшков В.Л., Миллер Н.О., Персиянинова Н.Р., Щербакова Н.В.. 1997, «Пулковская база данных астрометрических служб ПБЗ», Baltic Astronomy, vol.6, N2, 1997, Proceedings of Pulkovo Colloq.(2-9 Jul.1997)
2. McCarthy D. IERS Conventions (1997). IERS Technical Notes №21, 1996.
3. IERS Annual Reports 1962-2001 (<http://hpiers.obspm.fr/>)
4. Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. (ред.), 1997, «Главные компоненты временных рядов: метод “Гусеница”», СПбГУ, 308 с. (<http://vega.math.spbu.ru/>)
5. Горшков В.Л., Миллер Н.О., Персиянинова Н.Р., Прудникова Е.Я., 2000, «Исследование геодинимических рядов методом главных компонент», Изв. ГАО, № 214, с 173-180.
6. Vondrak J., Pesek I, Ron C., Sepec A., 1998, «Earth orientation parameters 1899-1992 in the ICRS based on the HIPPARCOS reference frame», Publ. Astr. Inst. Acad. Science of Czech Rep. № 87.
7. Павлов Н.Н., Афанасьева П.М., Старицын Г.В., 1971, «Сводный каталог служб времени СССР», Тр. ГАО, т.78. с.59-98.
8. Yaya P., Bizouard Ch., Ron C., 1999, «Determination of the long period nutation terms from optical astrometry and VLBI data», in «Motion of celestial bodies, astrometry and astronomical reference frames», Journees 1999 & IX Lohrmann-Kolloquium, p. 233.
9. Горшков В.Л., Воротков М.В., «Динамика движения полюса и долгопериодические вариации скорости вращения земли», см. настоящий сборник.

CHANGE OF THE PULKOVO LONGITUDE AND LONGPERIODIC VARIATIONS OF THE EARTH ROTATION

V. Gorshkov, N. Shcherbakova

SUMMARY

The behaviour of the longitudes of observatories presented in the Pulkovo data base [1] and irregular quasi-6 year variations of the Earth rotation velocity were investigated by the singular spectral analysis (SSA) [4]. The linear trend of the Pulkovo longitude was $d\lambda/dt = 0.51 \pm 0.19 \text{ msec/y}$ for 1960-2000. The Pulkovo data base of classic determinations of EOP and data of IERS [3] were used.