

СОПОСТАВЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ШИРОТЫ ПУЛКОВА С МЕЖДУНАРОДНЫМИ НАБЛЮДЕНИЯМИ ЗА 1904-2006 ГОДЫ

Миллер Н.О., Прудникова Е.Я.

Данная работа посвящена исследованию уникального ряда, который был получен из наблюдений широты на ЗТФ-135 в течение 102 лет. Анализ этого ряда позволяет исследовать поведение основных составляющих движения полюса и сравнить их со сводными рядами международных служб, построенными в разные периоды времени с помощью различных методов наблюдений и анализа наблюдательного материала. Были выделены и исследованы чандлеровская, годовая и долгопериодическая составляющие. В заключение приведено описание основных результатов анализа наблюдений широты в течение последних лет.

1. Введение

19 сентября 1904 года начались регулярные наблюдения широты на зенит-телескопе ЗТФ-135. Этот телескоп был сделан в мастерской Пулковской обсерватории механиком Г.А. Фрейбергом-Кондратьевым и стал образцом инструмента данного типа. Целью наблюдений на ЗТФ-135 стало изучение изменчивости широт Пулкова и определение постоянных абберации и нутации [1]. В 1941 году в связи с военными действиями телескоп был демонтирован. После окончания войны к сентябрю 1948 года инструмент был вновь установлен в Пулкове в новом павильоне, и на нем возобновились систематические наблюдения, которые были завершены 25 декабря 2006 года в связи с переходом на новые более точные способы определения ПВЗ. Вместе с тем, по завершению наблюдений получился уникальный ряд наблюдений широты на одном инструменте длиной более 100 лет. Этот ряд образован на основе семи программ наблюдений (таб. 1) В таблице введены следующие обозначения: N_p - общее число наблюдаемых пар, N_{pc} - количество пар текущей программы общих с парами предыдущей программы, δ - ошибка одного наблюдения.

Таблица 1.

Автор программы	Номер	Интервал наблюдений	Количество пар		δ
			N_p	N_{pc}	
Ф.Ф.Витрам	1	20.09.1904 – 28.02.1908	74	–	0.15''
Л.И.Семенов	2	22.03.1908 – 18.10.1915	69	52	0.15
Б.В.Нумеров, Н.В.Циммерман	3	17.10.1915 – 31.12.1928	106	12	0.20
В.К.Берг	4	01.05.1929 – 09.07.1941	106	11	0.18
Я.Е.Гордон	5	09.10.1948 – 18.01.1968	102	52	0.16
Л.Д.Костина	6	23.01.1968 – 29.12.1988	102	65	0.21
Л.Д.Костина	7	01.01.1989– 25.12.2006	102	63	0.21

При составлении первой программы невозможно было учесть как существование различных практических сложностей (таких, как наличие белых ночей и неравномерное

распределение ясной погоды в течение года), так и возникновение новых задач (например, изучение векового изменения широты). Поэтому только к 1929 году сложился классический тип широтной программы, состоящей из двенадцати двухчасовых групп и рассчитанной на двадцать лет (нутационный цикл). Одним из основных принципов стала преемственность программ с тем, чтобы как можно большее число пар наблюдалось как можно дольше.

Все описанные выше наблюдения были использованы В.П. Федоровым для вычисления координат полюса [2]. Федоров вычислил ряд координат полюса, обработав около 100 широтных рядов. В этот ряд были включены не только ряды наблюдений международной службы широты, но и наблюдения других независимых станций. Пулковские наблюдения широты вошли в этот ряд с наибольшими весами.

Для вычисления координат полюса C01 (IERS, <http://hpiers.obspm.fr/iers/eop>) использовались ряды наблюдений, полученные во многих обсерваториях мира, при этом применялись как различные методы наблюдений, так и различные методы обработки. В ряд C01 вошли наблюдения, выполненные с помощью оптических инструментов, дальнометров для лазерной локации Луны и спутников (LLR, SLR), радиоинтерферометров со сверхдлинными базами (VLBI), а также наблюдения, полученные с помощью космических навигационных систем GPS. С использованием новых методов точность получаемых астрометрических данных повысилась на три порядка [3]. Но, очевидно, что для исследования долгопериодических закономерностей изменения широты необходимо использовать как можно более длительные и однородные ряды наблюдений, выбирая такие методы анализа, которые наилучшим образом позволяют отделить полезный сигнал от шума. Уникальный по своей длительности и плотности ряд наблюдений широты Пулкова был получен на одном инструменте. Причём некоторые пары звёзд наблюдались на протяжении всей программы наблюдений.

В данной работе выполняется исследование и сопоставление наблюдений ЗТФ-135 с изменением широты Пулкова, вычисленным из международных данных. Сопоставление производится с помощью классического Фурье анализа и сингулярного спектрального анализа (метод «Гусеница-SSA» [4]). Этот метод имеет хорошее разрешение, как по времени, так и по частоте и хорошо отделяет полезный сигнал от шума даже в очень зашумленных рядах. SSA позволяет получить, а затем исследовать трендовые, периодические, квазипериодические компоненты и ряд остатков.

2. Данные и их исследование различными методами

В работе исследуются изменения широты Пулкова, полученные из наблюдений на ЗТФ-135 (ряд FIZTF) и из сводных рядов ПВЗ международной службы вращения Земли EOP(IERS) C01 (ряд FIC01). Данные C01 использовались для сравнения с данными ЗТФ-135 в виде, приведённом к полярным изменениям широты Пулкова по формуле

$$\varphi - \varphi_0 = X_p \cdot \cos \lambda + Y_p \cdot \sin \lambda,$$

где φ_0 – среднее значение широты, X_p, Y_p – координаты мгновенного полюса относительно его среднего положения, λ - долгота станции наблюдения.

На рис.1 и в таб. 2 представлены результаты классического анализа Фурье рядов FIZTF (сплошная линия) и FIC01 (пунктирная линия) на всем интервале наблюдений с 1904 по 2006 гг. для диапазона периодов с 0.8 года до 1.3 года. По оси ординат отложена амплитуда, а по оси абсцисс период в годах, прямые линии – порог уровня шума, полученный при анализе ряда FIZTF. Для вычисления порога обнаружения сигнала в шумах использовались различные алгоритмы. На рис.2 прямые level1, level2 – уровни шума, вычисленные по алгоритму [5] с вероятностью 0.99 для рядов FIZTF, FIC01, соответственно, а прямые level2, level3 - по алгоритму [6] для этих же рядов. Из таблицы и рисунка видно

хорошее согласование частот годового и чандлеровского колебаний, полученных из разных рядов.

Спектральный анализ выделяет две области с максимальными частотами: чандлеровскую с периодом около 1.19 года и годовую – 1 год. Эти два периодических движения легко различаются в наблюдениях широты и многократно исследовались разными авторами [7]. Наличие годовой гармоник объясняется сезонными перемещениями воздушных и водных масс по земной поверхности. Чандлеровское колебание представляет собой квазигармоническое колебание сложной структуры и до сих пор вызывает дискуссии, как о структуре ряда, так и о физической интерпретации. В спектре чандлеровского движения полюса имеются два близко лежащих пика с максимальными амплитудами. В работе [8] было показано, что раздвоение пика ЧДП связано с изменением фазы на интервале 1924-1930 гг.

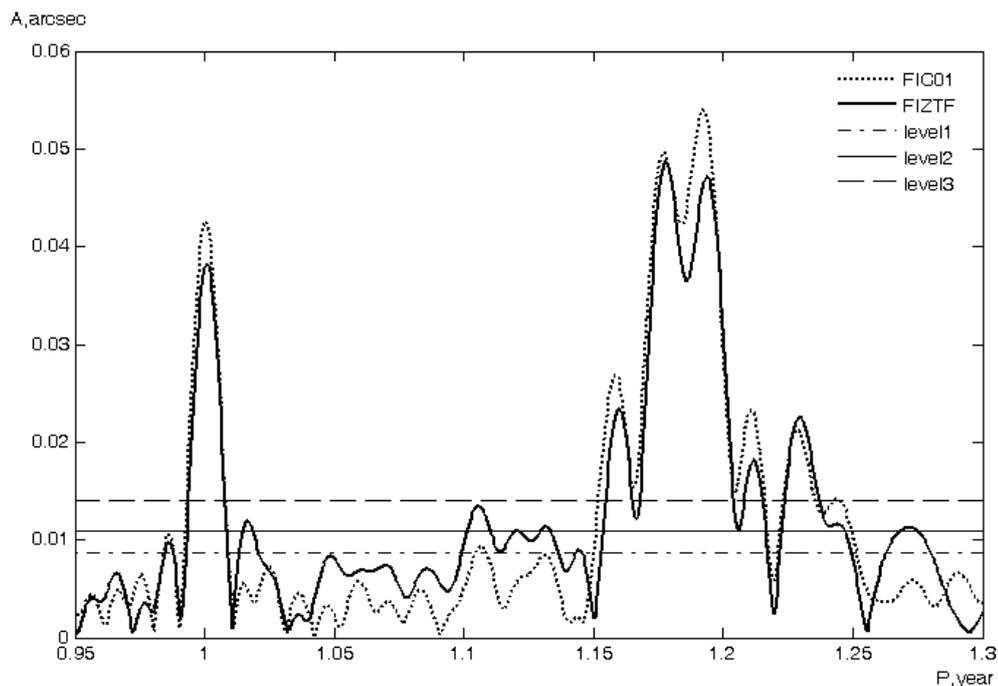


Рис.2.

Таблица 2. Результат Фурье анализа

№	FIC01		FIZTF	
	период (год)	амплитуда (arcsec)	период (год)	амплитуда (arcsec)
1	1.19	0.054	1.19	0.049
2	1.18	0.050	1.18	0.047
3	1.00	0.043	1.00	0.038
4	1.16	0.027	1.16	0.023
5	1.21	0.023	1.21	0.023
6	1.23	0.021	1.23	0.018
7	1.24	0.014	1.24	0.014
8	1.11	0.009	1.11	0.012

Таблица 3.

Изменение широты	FIZTF	FIC01
Вековое	1.9%	2.7%
Чандлеровское	55.4	70.6
Годовое	13.8	19.9

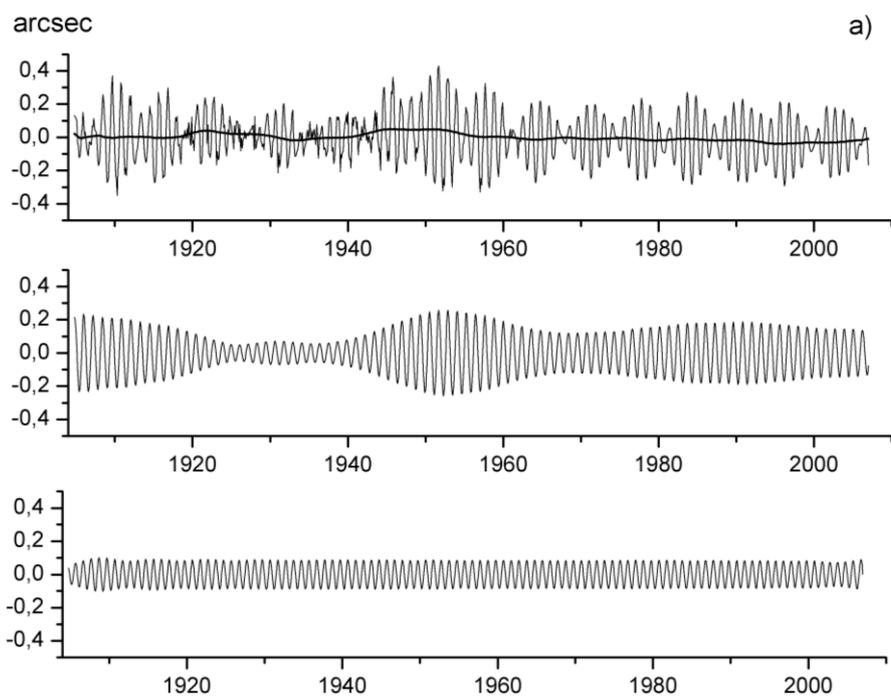


Рис.3.

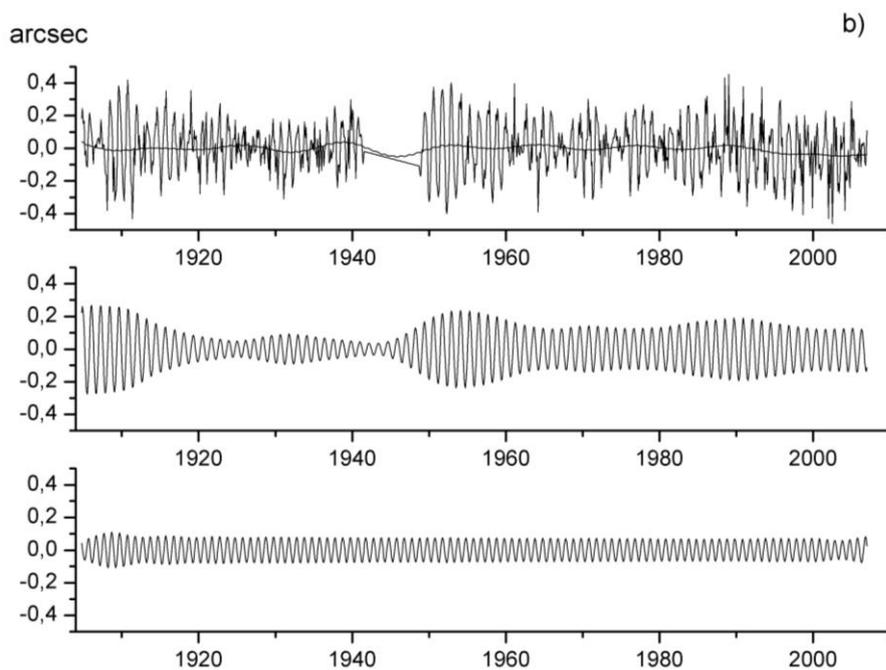


Рис.4.

На рис. 3,4 представлены ряды изменения широты (рис. 3 - FIC01, рис. 4 - FIZTF) и разложение их на главные компоненты методом SSA с длиной окна равной половине длины ряда за период 1904-2006 (верхний график – исходный ряд и тренд, средний - Чандлеровский компонент, нижний – годовой компонент). При использовании метода SSA компоненты определяются таким образом, чтобы первый из них давал максимально возможный вклад в суммарную дисперсию всех параметров. Выполняемое преобразование не меняет сумму дисперсий, а только перераспределяет ее так, чтобы наибольшая дисперсия

приходилось на первые компоненты. Таким образом, появляется возможность исключить из анализа компоненты, имеющие малые дисперсии.

В табл.3 приведен процент вклада каждой составляющей в исходный ряд. Вклад суммы основных компонент в исходный процесс составляют для ряда FIC01 ~93%, а для ряда FIZTF ~71%. Нужно отметить, что процент вклада всех исследуемых компонент ряда наблюдений на ЗТФ-135 меньше, чем для компонент международного ряда. Одним из объяснений этого может быть наличие более высокого шума на всем интервале наблюдений для ряда FIZTF (рис.2, 7).

При разложении SSA (длина окна равна половине длины ряда) на частоте чандлеровского колебания было выбраны 6 компонент. Графики этих компонент представлены на рис. 5, 6, а их основные характеристики в таб. 4. В таблице и на рисунках компоненты располагаются по проценту вклада в исходный ряд. В первом столбце таблицы указан номер компонента, во втором и шестом столбцах - процент вклада каждого компонента в исходный ряд, в третьем и седьмом - период, в остальных столбцах - значения средней и максимальной амплитуды выделенных компонент для ряда FIZTF и FIC01. Надо отметить, что периоды у выделенных компонент для разных рядов практически совпадают, хотя и имеется различное распределение энергии между компонентами.

Таблица 4. Компоненты ЧДП

№ Компо- ненты	FIZTF				FIC01			
	вклад %	период (год)	амплитуда (arcsec)		вклад %	период (год)	амплитуда (arcsec)	
			mean	max			mean	max
1	36.4	1.19	0.112	0.186	49.6	1.19	0.126	0.190
2	9.7	1.17	0.059	0.264	13.4	1.17	0.067	0.258
3	3.0	1.12	0.026	0.045	3.7	1.22	0.031	0.043
4	2.9	1.23	0.024	0.036	2.1	1.15	0.026	0.128
5	2.0	1.10	0.025	0.069	1.0	1.12	0.015	0.022
6	1.4	1.15	0.016	0.026	0.5	1.10	0.012	0.091

Использование метода SSA тем эффективнее, чем больше размерность исходной матрицы, которая зависит от длины ряда. Очевидно, что чем длиннее ряд наблюдений, тем больше информации скрыто в нем. В результате применения метода SSA к длинным рядам можно получать более точное представление значимых составляющих исследуемого ряда. В работе [9] были исследованы те же ряды на более коротком промежутке времени (1904 – 1941, 1948 – 1999). Чандлеровская составляющая для этих интервалов разделилась только на два компонента, а вклад их суммы в исходный ряд составил ~65-69%.

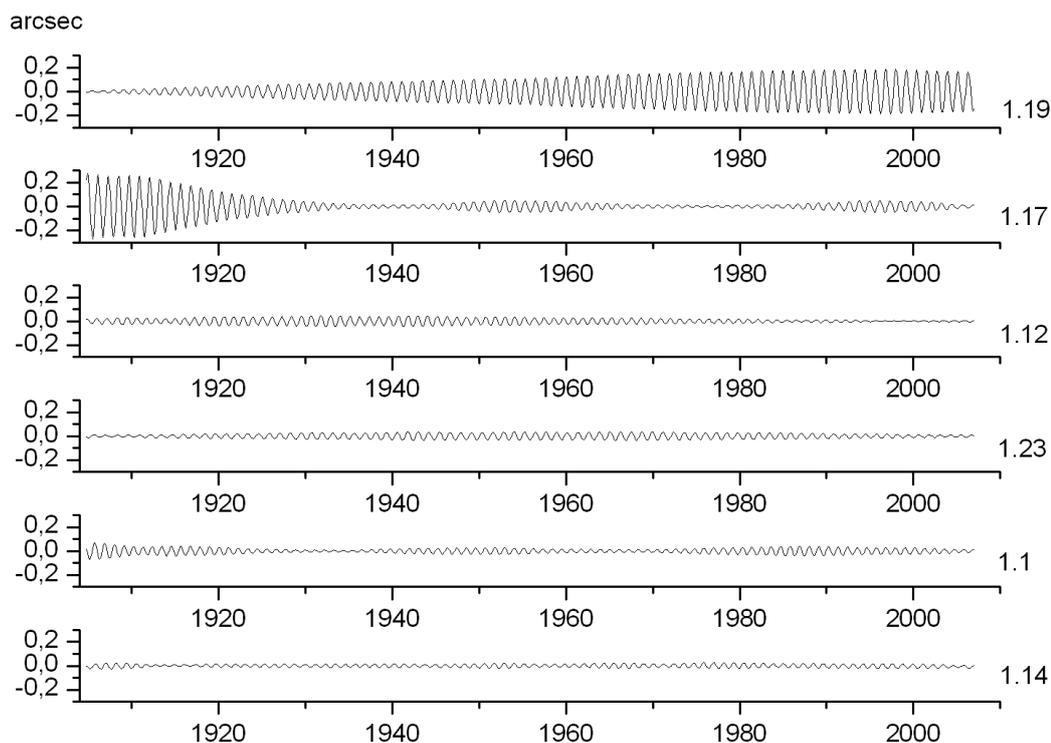


Рис. 5.

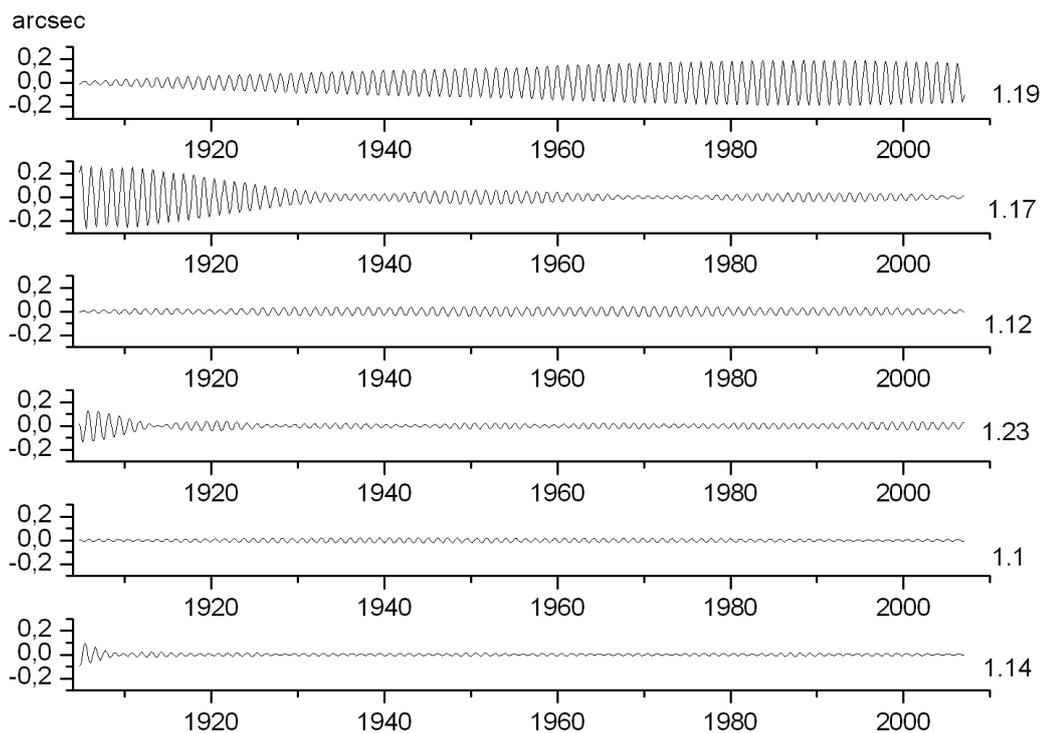


Рис.6.

Восстановленные ряды, представляющие собой сумму годовой, чандлеровской и долгопериодических составляющих исследуемых рядов и ряд остатков (разности между восстановленными и исходными рядами) приведены на рисунках 7 (FIC01) и 8 (FIZTF). Верхние рисунки – исходные ряды, средние - восстановленные с помощью SSA, нижние – ряд остатков. Для ряда остатков, полученного из международных наблюдений характерно уменьшение амплитуды с течением времени. Это связано с применением новых более точных методов наблюдений. И, наоборот, в конце ряда наблюдений ЗТФ-135 заметно

увеличение уровня шума. Это можно объяснить несколькими причинами. В связи с переходом на новые методы наблюдений исследователи перестали постоянно отслеживать различного рода инструментальные ошибки и регулярно выполнять профилактические действия (наблюдения шкальных пар, определение постоянных инструмента и т.д.). Кроме того, произошло ухудшение качества изображения, по-видимому, из-за загрязнения атмосферы и усиления подсветки города.

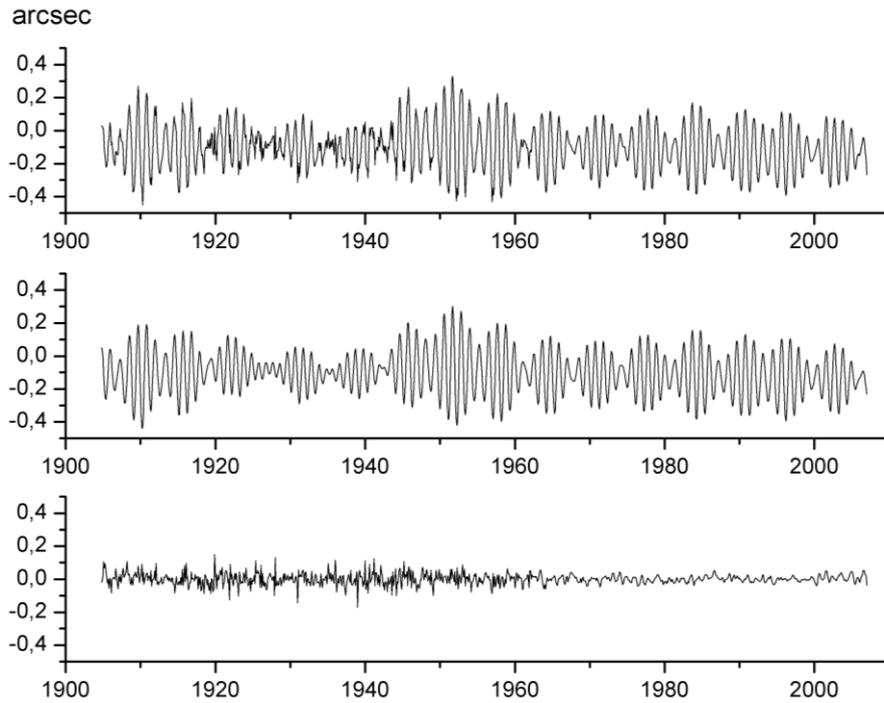


Рис.7.

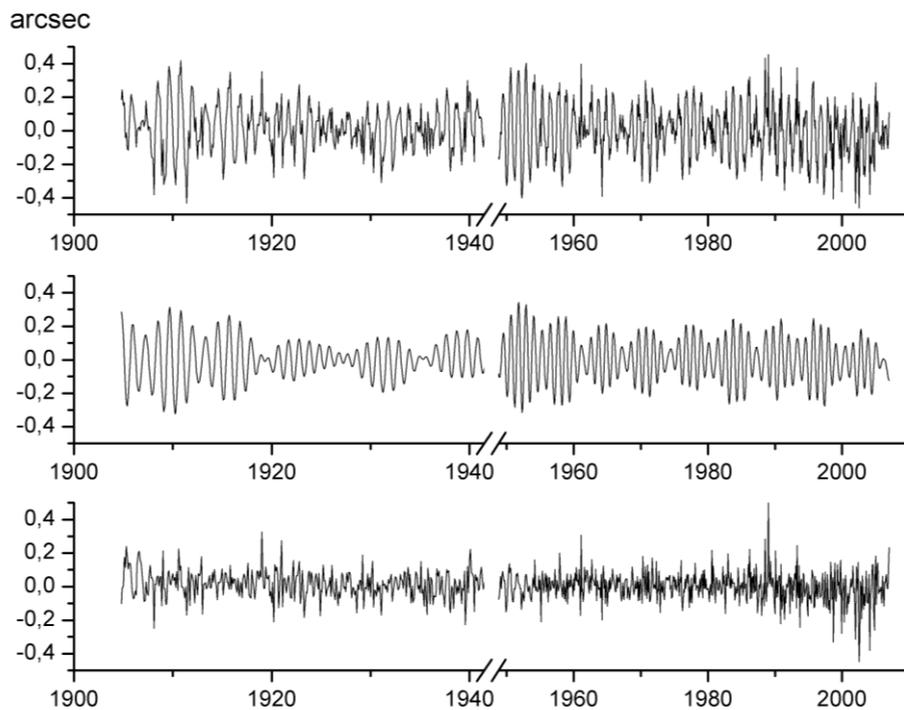


Рис.8.

3. Заключение

Из проделанной работы видно хорошее согласие изменяемости широт, полученной на ЗТФ-135 и вычисленной из международных данных. Кроме того, метод SSA позволяет исследовать ряды, имеющие пропуски в наблюдениях. Несмотря на продолжительный пропуск на интервале с 1941.5 по 1948.2 удалось выделить чандлеровский и годовой компонент почти без искажения информации (рис. 3-5). Из этого следует, что таким способом можно исследовать долгопериодические закономерности чандлеровского колебания, основываясь на длительных рядах наблюдений одной обсерватории, даже если в таких наблюдениях имеются пропуски.

Все исследования, проводимые с этим рядом, стали возможны только благодаря усилиям многих ученых. Особенность конструкции инструмента ЗТФ-135, созданного учёным-механиком Пулковской обсерватории Генрихом Андреевичем Фрейбергом позволил наблюдать на этом инструменте в течение 102 лет без капитального ремонта [10]. Одной из целей создания инструмента ЗТФ-135 было изучение изменяемости широты Пулкова. Усилиями 36 наблюдателей в течение 102 лет был получен длительный ряд наблюдений, который включает в себя около 170 тысяч наблюдений широты. Этот ряд, несмотря на достаточно сложные климатические условия, отличается высокой устойчивостью и однородностью, особенно в период с 1948 по 1994 годы. В статье [11] содержится обширная библиография работ, основанных на материале наблюдений на ЗТФ-135.

Перечислим некоторые результаты, полученные за последние годы с использованием вышеописанного ряда.

1. Короткопериодические изменения широты.

С помощью метода Диминга для неравномерных рядов из неполярных вариаций широты, свободных от сглаживания, т.е. не искаженных фильтрацией, были выделены короткопериодические колебания и сделаны оценки их возможной связи с атмосферными и геофизическими процессами [12,13]. Было выполнено определение комбинации чисел Лява $(1 + k - l)$ по суточным колебаниям отвеса. Полученный результат $\Lambda_{\text{пул}} = 1.21 (\pm 0.05)$ согласуется с принятым значением $\Lambda = 1.2$ [1], для модели нежесткой Земли.

Двумя способами (через полученную величину Λ и коэффициент Шида $l = 0.08$, а также через средний период чандлеровского колебания, полученный из наблюдений широты Пулкова, и равный 435 суткам) было определено число $k = 0.29$.

2. Значение широты центра круглого зала Пулковской обсерватории.

Было вычислено значение средней широты Пулкова по наблюдениям на различных инструментах. Средне взвешенное значение широты центра Круглого зала оказалось равным $59^{\circ} 46' 18'' 65 \pm 0.01$ [14].

3. Нерегулярные изменения широты.

Нерегулярные изменения широты, которые заключаются в том, что широта места наблюдения скачком увеличивается или уменьшается, могут быть связаны с резким отклонением отвесной линии. Одной из причин этого явления может быть воздействие сильных землетрясений. Для анализа был использован ряд сейсмических событий Национального геофизического центра данных (Colorado USA, World Data Center A), в котором охватывается весь интересующий нас период. Каждому сейсмическому событию ставились в соответствие 5 ближайших дней наблюдений. Обнаружено наличие пиков, отстоящих от момента землетрясения на 0.3 суток, что может говорить о возможной реакции изменения широты на сейсмический процесс.

4. Медленные изменения широты.

Была сделана оценка изменения средней широты Пулкова за 100 лет. Кроме главного тренда, были обнаружены две гармоники, близкие к периодам солнечной активности (с периодами 20.48 г. и 10.23 г.). Эти гармоники сопоставлялись с рядом чисел Вольфа и рядом интенсивности космических лучей. Возможная взаимосвязь этих гармоник с солнечной активностью может быть объяснена воздействием солнечной активности на характер температурных инверсий в атмосфере [15].

Литература

1. Куликов К.А. Изменяемость широт и долгот. 1962., М., 400 с.
2. Федоров В.П., А.А.Корсунь, С.П.Майор, Н.И.Панченко, В.К.Тарадий, Я.С.Яцкив. Движение полюса Земли с 1890 по 1969. 1972. Киев. С. 264.
3. Ковалевский Ж. Современная астрометрия. Фрязино. «Век-2». 2004. С. 480.
4. Данилов Д.Л., Жиглявский А.А. (ред.). Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница». СПбГУ. 1997. С. 308.
5. Витязев В.В. «Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов». СПбГУ. 2001. С. 48.
6. Солонина А.И., Арбузов С.М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в Matlab. Спб. 2008. С. 816.
7. Moritz H., Mueller I. Earth rotation. New York. NY 10017. 1987. P.617.
8. Федоров Е.П., Яцкив Я.С. О причинах кажущегося “раздвоения” периода свободной нутации Земли. Астрон. журн. №.4. 1964. С.764-768.
9. Горшков В.Л., Миллер Н.О., Персиянинова Н.Р., Прудникова Е.Я. Исследование геодинамических рядов методом главных компонент. Изв. ГАО. № 214. 2000. С.173-180
10. Наумов В.А. Особенность конструкции зенит-телескопа ЗТФ-135. Изв. ГАО. № 217. 2004. С. 543-545.
11. Л.Д.Костина, Н.О.Миллер, Н.Р.Персиянинова, Е.Я.Прудникова, И.А.Зыков, В.В.Хохлов. 90 лет зенит-телескопу Фрейберга-Кондратьева. Основные научные результаты. Изв. ГАО № 210. 1996. С.121-130.
12. Н.О.Миллер, Е.Я.Прудникова. «Приливные вариации из столетнего ряда наблюдений широты на ЗТФ-135 », изв. ГАО №217, с.415-419.,2004.
13. Н.О. Миллер, Е.Я.Прудникова, Е.А.Литвиненко, Н.В.Соколова (БШЛ ОРИГ). Исследование приливных вариаций, полученных по наблюдениям широты. Изв. ГАО РАН №218, 2006,с.238-245.
14. В.А.Наумов, Е.Я.Прудникова. Широта Пулковской обсерватории по наблюдениям на зенит-телескопах ЗТФ-135, ЗТЛ-180 и на большом вертикальном круге. Изв. ГАО №218. 2006. С.245-247.
15. Н.О.Миллер, Е.Я. Прудникова. Исследование медленных изменений широты Пулково по наблюдениям на ЗТФ-135 за 100 лет. Изв. ГАО №217. 2004. С.409-414.

INVESTIGATION OF THE PULKOVO LATITUDE FOR 1904-2006.

Miller N.O., Prudnikova E.J.

Summary

The unique set of the observation was investigated in this paper. The time series was obtained with zenith-telescope ZTF-135 during 102 years. This analyze permits to investigate the behavior of the main component of the Polar movement and to compare them with series IERS. The different analyze methods were applied to the observations made during the whole interval 1904-2006. The Chandler wobble, annual, and long-periodical components were studied, and residual set was obtained. The description of the basic results of the analysis of the latitude observation within last years is given in the conclusion of the article.