

УДК 522.41:519.271

Л. Я. Халявина

Полтавская гравиметрическая обсерватория Национальной академии наук Украины
36029 Полтава, ул. Мясоедова 27/29

Дополнительные процедуры обработки наблюдений на призмной астролябии.

1. Уточнение средних моментов регистрации

Приведены результаты расширенного анализа наблюдений методом равных высот с призмной астролябией в Полтаве. Изучен информационный потенциал первичных данных наблюдений. Метод «рассеивания контактов» использован для воспроизведения картины сопровождения звезды в каждом акте ее регистрации. Для усреднения моментов регистрации разработан метод «опорных контактов», который эффективно исключает влияние погрешностей инструментального и личного характера, имеющих вид, наиболее доступный для формализации. Намечены подходы для изучения более сложных структур с целью идентификации доминирующих факторов искажений и оценивания их влияния.

ДОДАТКОВІ ПРОЦЕДУРИ ОБРОБКИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ НА ПРИЗМОВІЙ АСТРОЛЯБІЇ. 1. УТОЧНЕННЯ СЕРЕДНІХ МОМЕНТІВ РЕЄСТРАЦІЇ, Халявіна Л. Я. — Наведено результати розширеного аналізу спостережень за методом рівних висот на призмівій астролябії в Полтаві. Вивчено інформаційний потенціал первинних даних спостережень. Метод «розсіювання контактів» використано для відтворення картини супроводу зірки в кожному акті її реєстрації. Для усереднення моментів реєстрації розроблено та випробувано метод «опорних контактів», який ефективно виключає вплив похибок інструментального та персонального характеру, що легко формалізуються. Намічено підходи для вивчення складніших структур з метою ідентифікації домінуючих факторів спотворень та оцінювання їхнього впливу.

SOME COMPLEMENTARY PROCEDURES FOR REDUCING OBSERVATIONS WITH A PRISMATIC ASTROLABE. 1. THE REFINEMENT OF REGISTRATION MEAN MOMENTS, by Khalyavina L. Ya. — Some results of expanded data analysis derived with a prismatic astrolabe in Poltava are discussed. The information potential of initial observational data is studied. The method of the «contacts dispersion» is used for restoring the pattern of the maintenance of a star in every action of its registration. In the diversity of patterns, a few typical scenarios are recognized depending on dominant

factors of instrumental, atmospheric or personal origin. The method of «reference moments» is developed which is effective for elimination of some instrumental and personal errors. We outline some approaches to study of complex structures in order to identify dominant factors of distortions and to evaluation of their influences.

ВВЕДЕНИЕ

Общепризнано, что данные астрометрических определений координат, накопленные в прошлом веке, все еще являются ценным источником информации [10, 11]. Будущее наземной астрометрии обсуждается с 1997 г., ныне — в рамках специальной рабочей группы Комиссии № 8 МАС. Если в дискуссии 1997 г. имели место мнения о целесообразности сохранения астрономических определений координат в качестве дополняющей технологии [7—9], то в перечне возможных научных программ для наземной астрометрии, приведенных рабочей группой МАС в 2003 г. (<http://www.astro.ro/wg.html>), они не упоминаются.

В то же время классические наблюдения в условиях полной автоматизации процесса сбора, обработки и анализа первичной информации способны давать приемлемые результаты. Наша работа как раз посвящена результатам, полученным на призменной астролябии в Полтаве.

Исходной измеряемой величиной в наблюдениях на астролябии является момент пересечения звездой альмуkantарата 60° , который определяется как среднее арифметическое из 24 моментов времени, фиксируемых при движении микрометра, обеспечивающего сопровождение звезды. Принцип действия микрометра астролябии Данжона детально изложен в работе [2]. В дальнейшем изложении серию отсчетов времени, регистрируемых при наблюдениях звезды, будем для краткости называть «моментами регистрации». Можно ли улучшить результаты наблюдений на самом первом этапе обработки первичной информации при усреднении моментов?

Предпосылки для изучения вопроса таковы.

- 1) Накоплены массивы первичной информации в электронном виде.
- 2) Разработаны новые методы усреднения отсчетов измерительных систем, учитывающие влияние коррелированных погрешностей [3].
- 3) Исследования погрешностей призменной астролябии, действующей в Полтаве, показали, что доминирующим их источником является система автоматизированного сопровождения звезды [1, 5], из-за чего и возникает взаимная зависимость искажений моментов регистрации.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ КАРТИНЫ РЕГИСТРАЦИИ ЗВЕЗДЫ

Для изучения погрешностей регистрации воспользуемся методикой, предложенной в монографии [3]. Будем оценивать величину искажений с помощью метода «рассеивания контактов», исследуя разности $\theta_i = t_i - t_i^*$, где t_i — реальные моменты регистрации прохождения звезды, а t_i^* — их предвычисленные значения, которые соответствуют идеальной регистрации. Исходя из особенностей регистрации большинства звезд на призменной астролябии (исключая южные вблизи меридиана), определим идеальные моменты t_i^* через характеристики контактного микрометра и азимут наблюдаемой звезды:

$$t_i^* = t_1^* + \tau(i - 1), \quad (1)$$

$$\tau = R(t^0)/(4 \cdot 15 \cdot \cos\varphi \cdot \sin A),$$

где величина τ соответствует «эталонному» значению интервала между соседними контактами регистрации данной звезды, φ — широта столба астролябии, A — азимут звезды, $R(t^0)$ — цена оборота винта микрометра. От значений θ_i легко перейти к поправкам зенитных расстояний:

$$\delta z_i = 15 \cdot \cos \varphi \cdot \sin A \cdot \theta_i \operatorname{sign}(A - 180^\circ). \quad (2)$$

Такой переход позволяет привести наблюдения всех звезд к одному масштабу, поскольку характеристики рассеивания моментов существенно различаются для звезд, наблюдаемых в разных азимутах. Эти поправки также характеризуют отклонения зенитного расстояния от «расчетной траектории» в каждый момент регистрации.

Практическая реализация этого метода требует некоторых уточнений. Во-первых, зенитные расстояния звезд в момент первого контакта из-за влияния кривизны альмукантарата неодинаковы в разных азимутах [2], поэтому предвычисленные моменты привязываются к среднему моменту регистрации t_m : $t_i^* = t_m + \tau(i - 12.5)$ (середина регистрации между 12-м и 13-м контактами). При этом сам средний момент искажен влиянием совокупности многих факторов. Во-вторых, для получения корректных значений t_i^* необходимо точное значение цены оборота винта микрометра и ее температурной зависимости. Эти характеристики, определяемые из наблюдений звезд, также искажены влиянием систематических погрешностей. Определяемые значения цены оборота $R(t^0)$ разнятся в зависимости от наблюдателя, сезона наблюдений, яркости звезды и т. д. (табл. 1).

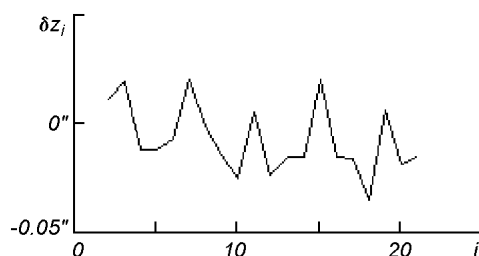
Названные обстоятельства указывают, что можно получить лишь картины относительных искажений зенитных расстояний, так как нуль-пункт массива $\{\delta z\}^{24}$ условен, а значение $R(t^0)$ не абсолютно.

Ввиду неустойчивости эмпирического параметра $R(t^0)$ невозможно определить универсальный эталонный интервал для большинства звезд, так как получаемые картины искажений маскируются на фоне значительных линейных трендов. Поэтому в качестве «эталонного интервала» мы испытали две таких величины. 1) Наиболее вероятное значение (медиана) интервала между соседними контактами регистрации $\tau = C = \operatorname{med}(t_i - t_{i-1})$, $i = 2, \dots, 24$, определяемое по каждому отдельному наблюдению k -й звезды. 2) Значение $\tau = C_1$, где C_1 — определенное в соответствии с формулой (1), на основе среднестатистического значения $R^{(k)}(t^0)$, оцененного по серии наблюдений конкретной k -й звезды. Использование значения $\tau = C$ наиболее рельефно, как показал последующий опыт, представляет картину относительных коррекций, выполняемых во время наблюдений звезды.

Таблица 1. Значения цены оборота винта микрометра, определенные для разных наблюдателей в разные сезоны

Наблюдатель	1998 г.	1999 г.	2000 г.
Звезда 111 (NFK5), $A = 90.4^\circ$, $m = 2.1^m$			
Борисюк	25.581" ± 0.018	25.756 ± 0.039	25.620 ± 0.015
Заливадный	25.698" ± 0.011	25.775 ± 0.014	25.698 ± 0.006
Кислица	25.736" ± 0.012	25.620 ± 0.023	25.581 ± 0.002
Халявина	25.620" ± 0.007	25.581 ± 0.008	25.620 ± 0.017
Звезда 1568 (NFK5), $A = 279.7^\circ$, $m = 4.0^m$			
Борисюк	25.750 ± 0.012	25.770 ± 0.023	25.789 ± 0.003
Заливадный	25.674 ± 0.012	25.750 ± 0.005	25.693 ± 0.013
Кислица	25.712 ± 0.006	25.712 ± 0.003	25.750 ± 0.004
Халявина	25.750 ± 0.007	25.712 ± 0.011	25.712 ± 0.010

Рис. 1. Картина относительных изменений зенитных расстояний δz_i в режиме автоматического сопровождения для азимута 10° ($\tau = C$)



Тестирование метода заключается в следующем. При отсутствии коррекций нет и относительных изменений зенитных расстояний. В этом легко убедиться, применив формулу (2) для данных, полученных при лабораторных исследованиях скорости привода. Результат испытаний привода в азимуте 10° приведен на рис. 1, откуда видно, что в режиме автоматического сопровождения амплитуды относительных погрешностей зенитных расстояний не превышают $0.05''$. Зубчатая структура искажений является следствием периодических погрешностей микрометра.

Совсем иная картина для реальных наблюдений. Изменения δz достигают иногда значений $1-2''$. При всем многообразии картин, воспроизводящих регистрацию звезд, обращает внимание типичность или структурная устойчивость процессов, характеризующих сопровождение звезды. Анализ множества примеров для вечеров с качественно различными условиями наблюдений позволил выделить и объяснить ограниченное количество сценариев. Наиболее характерные типы таковы.

А) **Инструментальный**. В условиях отсутствия атмосферной турбулентности преобладают коррекции для исправления скорости, задаваемой системой автоматического сопровождения. Поскольку отклонение скорости в данном азимуте постоянно, то исправления проводятся однонаправленно и чаще всего имеют вид ступенчатых и скачкообразных изменений (рис. 2, а). Это объясняется тем, что в процессе ведения звезды происходит накопление погрешности до некоторого порога, когда наблюдатель замечает ее влияние и быстро реагирует, ускоряя или притормаживая микрометр, чтобы исправить отсчеты времени. В таких случаях наиболее четко проявляются личные реакции наблюдателя, обусловленные спецификой восприятия совпадения звездных изображений.

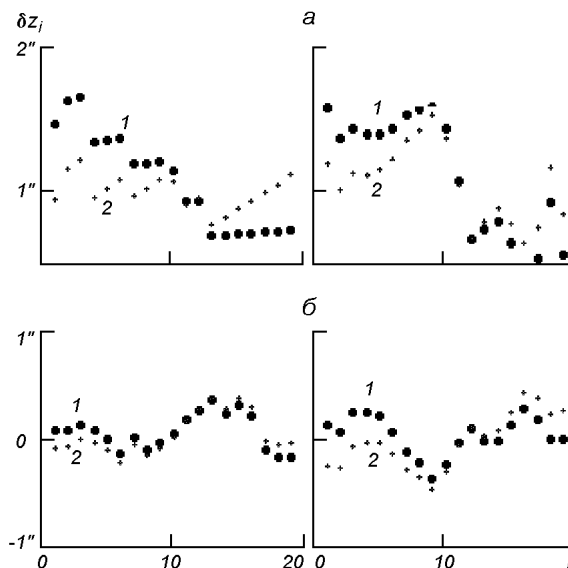


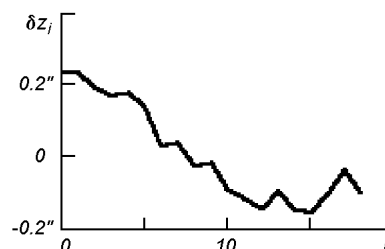
Рис. 2. Картины коррекций зенитных расстояний δz_i звезды NFK5 70 (гр. 7) с различными значениями эталонных интервалов (1 — C , 2 — C_1): а — без дрожаний 15 августа и 25 сентября 1998 г., б — при наличии дрожаний 6 августа и 8 октября 1998 г.

Б) Хаотический. При наличии атмосферной турбулентности возникают структуры, имеющие другие, более разнообразные формы. Но и в этих множествах по своей повторяемости выделяются несколько классов. Кроме тривиальных флуктуаций измеряемого зенитного расстояния вокруг невозмущенной траектории, часто отмечаются ситуации, в которых смещения зенитного расстояния имеют характер сингулярных возмущений [4, с. 217]. Они заметно искажают измеренное положение звезды. Примеры таких коррекций представлены на рис. 2, б.

Также аномальными значениями измеренных зенитных расстояний отмечены состояния «чрезмерного выхода из равновесия», когда коррекции ведутся в одном направлении с аномальной интенсивностью, но полного исправления положения звезды не достигается.

Статистика относительных коррекций для многих звезд указывает на преимущественно инструментальное влияние, что подтверждает наличие систематического тренда (рис. 3). Этот тренд сохраняет форму для звезд в близких азимутах, что закономерно из-за азимутальной зависимости скорости микрометра.

Рис. 3. Тренд относительных искажений зенитных расстояний для звезды NFK5 70, за сезон 1998 г.



Таким образом, метод «рассеивания контактов», позволяет воспроизвести адекватную картину относительных коррекций, выполняемых во время наблюдений каждой звезды на астролябии. Каждая картина несет информацию о доминирующих источниках искажений. Как практически использовать эту информацию для улучшения результатов наблюдений? Такую возможность мы рассмотрели для самого характерного типа коррекций — инструментального.

МЕТОД «ОПОРНЫХ КОНТАКТОВ» ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ СРЕДНИХ МОМЕНТОВ

Анализ типичных видов коррекций, обусловленных инструментальными погрешностями, показывает, что самым простым способом исправления среднего момента регистрации является назначение соответствующих весов всем 24 отсчетам времени. Очевидно, что при нормальных условиях наблюдений и при адекватной реакции наблюдателя наиболее достоверными являются контакты, которые следуют за выполнением коррекции. Они отмечаются резким скачком интервала регистрации или относительного значения изменения зенитного расстояния (рис. 2, а). Поэтому такие контакты будем считать «опорными» и назначать таким моментам наибольший вес при определении среднего. Они будут служить основными точками при моделировании неискаженного процесса регистрации. Пусть контакт с номером k является опорным. Формулу (1), согласно которой регистрация моделируется как линейный процесс, перепишем для случая произвольного k -го контакта:

$$t_i^* = t_k^* + \tau(i - k), \quad (3)$$

где t_k^* — значение опорного отсчета. Таким образом, достаточно знать точное значение одного опорного момента и эталонного интервала, чтобы получить модель невозмущенной регистрации.

Как отмечалось выше, эталонный интервал является довольно неустойчивым параметром. Поэтому другим важным допущением при воспроизведении модели идеальной регистрации является положение об оценке эталонного интервала. Используемые нами оценки $\tau = C$ и $\tau = C_1$, как показал опыт, не всегда адекватны. Поиск решений показал, что в качестве оценки эталонного интервала лучше брать медиану множества приведенных интервалов между всеми взаимными контактами: $C_2 = \text{med}\{\Delta t_{ij}\}$, где $\Delta t_{ij} = (t_i - t_j)/(i - j)$, $i = 1, \dots, 24$, $j = 1, \dots, 24$, $i \neq j$, которых имеем 276 вместо 23 соседних. Этот подход основан на предположении, что при наблюдениях в условиях спокойной атмосферы и тщательном выполнении коррекций большинство контактов взаимно согласованы.

Основные составляющие алгоритма вычисления среднего момента регистрации с учетом опорных контактов таковы.

1. Определение опорных контактов. Это такие контакты, которые следуют за очередной коррекцией, отмеченной скачком в значении изменений зенитного расстояния, вычисленных по формуле (2). Пороговым значением скачка считаем изменение зенитного расстояния на величину $\delta z = 0.15''$. Контакт, следующий за «скачком», можно считать опорным.

2. Согласование опорных контактов. В общем случае их количество превышает 2. Необходимо определить наиболее достоверное значение t_k^* . Для этого, используя оценку эталонного интервала, приводим все опорные контакты к одному моменту и определяем робастное среднее из приведенных моментов, значение которого и применяем в модели (3).

3. Назначение весов реальным контактам. На последнем этапе проводим сравнение реальных измерений с моментами, которые дает моделирование идеальной регистрации. Если расхождения зенитных расстояний, отвечающих этим контактам не превышают $0.1''$, то для вычислений среднего берем реальный момент (вес = 1), в противном случае заменяем его на соответствующий момент опорной прямой (3) (вес = 0).

Безусловно, это довольно жесткий метод назначения весов реальным контактам. Он иногда приводит к значительному весу (до 75 %) опорных контактов. Но применение этой довольно упрощенной процедуры при вычислении средних моментов позволило убедиться в принципиальной правильности данного подхода.

Некоторые результаты применения метода опорных контактов приведены ниже. В табл. 2 даны примеры вычислений координат с применением средних моментов, полученных обычным методом и с учетом опорных контактов (*). Подобраны вечера, когда влияние атмосферных эффектов минимально.

Приведенная выборка показывает улучшение сходимости координат, особенно поправок времени, заметное стирание личных разностей, общее уменьшение систематической разности определения времени, которая характерна для полтавской астролябии. Эта разность обусловлена несколько завышенным значением базовой скорости микрометра [1].

В табл. 3 приведены значения систематических поправок UT0—UTC и широты, определенных для нескольких групп в разные годы с использованием метода опорных контактов. Данные табл. 3 убедительно показывают, что метод опорных контактов хорошо обнаруживает и исключает систематическую часть определения времени. Это подтверждают результаты наблюдений за 2003 г., когда путем внедрения специального синтезатора

Таблица 2. Значения поправок UT0—UTC и широты, полученных при разных методах усреднения моментов регистрации

Дата, август 1998	Наблюдатель	UT1 - UTC	UT1 - UTC*	$\Delta\varphi$	$\Delta\varphi^*$
01	1	-0.0448 ^s	-0.0700 ^s	0.739''	0.731''
06	2	-0.0521	-0.0662	0.507	0.521
08	1	-0.0520	-0.0693	0.714	0.695
10	1	-0.0564	-0.0843	0.681	0.628
11	3	-0.0717	-0.0825	0.701	0.695
12	4	-0.0737	-0.0763	0.791	0.762

частоты для регулировки базовой скорости микрометра, получено значение $\delta(UT) = -0.0110^s$, что согласуется с приведенными многолетними данными. Чувствительность метода в отношении систематических поправок широты несколько ниже, хотя данные табл. 3 о поправках $\delta\varphi$ вполне соответствуют данным, приведенным в работе [6, табл. 8].

Таким образом, использование метода опорных контактов при определении среднего момента пересечения звездой альмукантарата реально улучшает результат, когда доминирующим источником искажений является инструмент.

Что касается процессов, в которых преобладают хаотические изменения искажений, обусловленные турбулентностью атмосферы, то они подлежат дальнейшему изучению. Для значительной части наблюдаемых картин с «хаотическими» коррекциями характерно наличие не менее двух множеств опорных контактов, рассредоточенных по зенитному расстоянию на значительные расстояния ($> 0.5''$), и соответствующих им ветвей устойчивого сопровождения. Также заметны аномалии оценок эталонных интервалов C и C_2 . Какие из устойчивых участков регистрации обусловлены атмосферными искажениями, а какие соответствуют равновесному состоянию атмосферы? Можно ли из множества 24 контактов выделить такой момент t_i , при котором истинное значение зенитного расстояния звезды $z^*(t_i)$ совпадает с измеренным $z(t_i)$, т. е. $|z(t_i) - z^*(t_i)| = \min$?

Мы полагаем, что ответ можно найти, проводя комплексный анализ всей наличной информации. Необходимо установить соотношения между всеми реальными параметрами процесса регистрации, которые получены: а) из инструментальных исследований искажений скорости микрометра; б) из совместного анализа звезд, наблюдаемых в близких азимутах, о цене оборота микрометра; в) из устойчивости метрологических характеристик сопровождения звезды, характеризующих доминирующие источники искажений. Взаимное согласование этих параметров должно сузить «корридор» решений о выборе опорного контакта. Полученный результат легко проверить, анализируя отклонения высот звезды, соответствующих оценкам

Таблица 3. Оценки систематических поправок UT0 - UTC $\delta(UT)$ и широты $\delta\varphi$, полученные с использованием метода опорных контактов

Год	G3 (12—14 ^h)		G4 (14—16 ^h)		G5 (17—19 ^h)		G7 (23—01 ^h)	
	$\delta(UT)$	$\delta\varphi$	$\delta(UT)$	$\delta\varphi$	$\delta(UT)$	$\delta\varphi$	$\delta(UT)$	$\delta\varphi$
1991	—	—	-0.0138 ^s	0.006''	-0.0118 ^s	0.022''	—	—
1992	-0.0102 ^s	0.030''	-0.0121	0.010	-0.0076	0.011	-0.0106 ^s	0.015''
1998	-0.0079	0.008	-0.0096	-0.007	-0.0106	-0.001	-0.0110	-0.014
1999	-0.0061	0.008	-0.0050	-0.016	-0.0068	-0.021	-0.0070	-0.004
2000	-0.0080	-0.011	-0.0078	-0.018	-0.0078	-0.004	-0.0079	-0.008

среднего момента, полученных для различных моделей возмущений сопровождения звезды.

ВЫВОДЫ

1. Методика «рассеивания контактов», модифицированная для наблюдений на равных высотах, позволяет воспроизвести картину коррекций зенитных расстояний звезды за время ее регистрации. Эта информация позволяет судить о качестве наблюдений каждой звезды и служит дополнительным источником при назначении весов отдельным наблюдениям.

2. Метод опорных контактов, разработанный для наиболее типичных скачкообразных коррекций, характерных для наблюдений на астролябии в Полтаве, позволяет уменьшить влияние систематических погрешностей на этапе получения среднего момента наблюдений. Апробация этого метода для рядов наблюдений показала улучшение результатов в систематическом отношении.

3. Однотипные модели погрешностей наблюдений на равных высотах должны уступить место гибким алгоритмам, определяющим тип и характер искажений, полученных из анализа процесса сопровождения звезды.

1. *Гожий А. В., Халявіна Л. Я. та ін.* Вивчення часових змін напрямку сили тяжіння, нутаційного руху земної осі, параметрів обертання Землі на основі регулярних астрометричних спостережень за зміною координат // Звіт НДР / Держ. реєстр. № 01010002431, — Полтава, 2000.—Т. 1.—85 с.
2. *Гино Б., Дебарба С.* Способ равных высот в астрономии. — М.: Наука, 1978.—200 с.
3. *Губанов В. С.* Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии. — С.-Петербург: Наука, 1997.—318 с.
4. *Малинецкий Г. Г.* Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. — М.: УРСС, 2002.—255 с.
5. *Халявіна Л. Я.* О систематических деформациях альмукантарата в наблюдениях с призменной астролябией Полтавской гравиметрической обсерватории // Кинематика и физика небес. тел.—1999.—15, № 2.—С. 177—188.
6. *Халявіна Л. Я., Кислиця Е. Н., Борисюк Т. Е., Заливадний Н. М.* Обновленная версия широтного ряда наблюдений на призменной астролябии в Полтаве // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 4.—С. 372—382.
7. *Debarbat S.* Ground-based astrometric observations in the space era: The case of the Danjon astrolabe // Journees 1997: Systemes de reference spatio temporals. Reference systems and frames in the space era: present and future astrometric programmes / Eds J. Vondrak, N. Capitaine, Pragua, 22—24 September, 1997. — Pragua: Astronomical Institute of Academy of Science of the Czech Republic, 1998.—P. 194—196.
8. *Chollet F.* Astrometrie au sol. Cas des astrolabes // Journees 1997: Systemes de reference spatio temporals. Reference systems and frames in the space era: present and future astrometric programmes / Eds J. Vondrak, N. Capitaine, Pragua, 22—24 September, 1997. — Pragua: Astronomical Institute of Academy of Science of the Czech Republic, 1998.—P. 216—217.
9. *Stavinschi M.* Is there a future for the classical astrometry? // Journees 1997: Systemes de reference spatio temporals. Reference systems and frames in the space era: present and future astrometric programmes / Eds J. Vondrak, N. Capitaine, Pragua, 22—24 September, 1997. — Pragua: Astronomical Institute of Academy of Science of the Czech Republic, 1998.—P. 189—193.
10. *Vondrak J., Pesek I., Ron C., Cepek A.* Earth orientation parameters 1899.7—1992.0 in the ICRS based on the HIPPARCOS reference frame // Publ. Astron. Inst. Acad. Sci. Czech R.—1998.—87.—P. 1—56.
11. *Vondrak J., Ron C.* An improve optical reference frame for long-term Earth rotation studies // Journees 2002: Systemes de reference spatio temporals. Astrometry from ground and from Space, Bucharest, 25—28 September, 2002. — Bucharest: Astronomical Institute of Romanian Academy, 2003.—P. 49—55.

Поступила в редакцию 13.08.04