

УДК 520.25

## Исследование координатно-измерительных приборов ГАО АН УССР

В. Р. Дик, Н. В. Ледовская

Определены ошибки, возникающие вследствие несовершенства координатных систем приборов «Аскорекорд 3 DP» и «Аскорис». Оценена точность определения положения объекта в системе координат, а также влияние температурных эффектов на процесс измерения. Полученные значения отклонений от прямолинейности направляющих, их непрямоугольности, рэна, а также поправок к делениям шкал можно учесть автоматически в процессе измерения. Остаточная ошибка в измеренных координатах не превышает  $\pm 0.5$  мкм.

*THE INVESTIGATION OF THE COORDINATE-MEASURING DEVICES OF THE MAIN ASTRONOMICAL OBSERVATORY OF THE ACADEMY OF SCIENCES OF THE UKRAINIAN SSR, by Dick W. R., Ledovskaya I. V.*—The errors of measurements on the coordinate-measuring machines «Ascorecord 3 DP» and «Ascoris» are determined and discussed. The influence of temperature variations of environment on the results of measurements is estimated. Residual errors do not exceed 0.5  $\mu\text{m}$  when the errors of device are taken into account.

**Введение.** В измерительном центре ГАО АН УССР приборы «Аскорекорд 3 DP» № 271/76 и «Аскорис» № 883/80 используются для точного измерения координат небесных объектов на астронегативах. Механико-оптическое устройство приборов серии «Аскорекорд» фирмы «Карл Цейс Йена» подробно описано в [5] и существенно не изменялось. «Аскорекорд 3 DP» отличается от предыдущей модели наличием управляющей ЭВМ KSR-4100, что повлекло за собой некоторые изменения в электронике прибора. Преимущество использования ЭВМ KSR-4100 состоит в том, что уже в процессе измерения можно ввести поправки за погрешности прибора, а также проводить частичную обработку результатов. Компилятор программного языка INKA, однако, не входит в комплект прибора. Кроме того, он занимает большую часть памяти, объем которой составляет 4К байт, так что можно реализовать только небольшие программы. «Аскорис» отличается наличием ирисового микрофотометра, исследование которого не входит в данную работу.

Точность измерений координат с помощью приборов «Аскорекорд» зависит от ошибок измерений объекта, а также от ошибок, которые вносит сам прибор. Поэтому цель настоящей работы заключается в оценке погрешностей в координатах объекта, возникающих в процессе измерения, а также остаточных ошибок при учете этих погрешностей.

**Исследование координатной системы прибора.** Комплекс программ (ASCO-10 — ASCO-13), поставляемых заводом-изготовителем вместе с прибором, позволяет с минимальными затратами времени определять систематические погрешности прибора для автоматического их учета при измерении. При этом в измеренные координаты вводятся следующие поправки: 1) ошибки миллиметровых делений масштабных линеек; 2) отклонения от прямолинейности линии скольжения каждой направляющей объектной каретки; 3) отклонения от взаимной перпендикулярности прямых, приближенно изображающих линии скольжения направляющих; 4) проекционные погрешности, вызванные отклонениями от заданных увеличений объективов отсчетных микрометров (рэн). Влия-

ние относительной шкальной погрешности автоматически компенсируется учетом ошибок миллиметровых делений масштабных линеек.

Учет поправок проводится при использовании измерительной программы ASCO-03. Поправки, предварительно записанные на перфоленду, считываются после ввода программы. Ошибки определения поправок не вычисляются заводскими программами. Поэтому они получены отдельно: ошибка определения поправки за непрямолинейность направляющих — из двойного ряда измерений, ошибка поправки за неперпендикулярность — из рассмотрения распространения ошибок в формулах расчета, ошибка поправки за рэн — непосредственно из измерений.

*Ошибки миллиметровых делений масштабных линеек.* Эти ошибки для каждого миллиметрового деления со средней квадратичной ошибкой

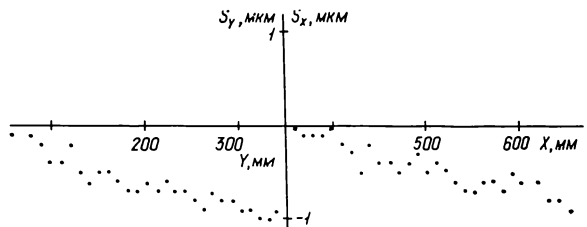


Рис. 1. Поправки к делениям шкал «Аскорекорда 3 DP»

$\pm 0.15$  мкм даны в протоколе исследований на заводе-изготовителе. На рис. 1 показаны ошибки каждого десятого деления масштабов  $X$  и  $Y$  для «Аскорекорда 3 DP». Для «Аскориса» они аналогичны. Видно, что при редукции измерений эти ошибки частично учитываются линейными членами вида  $ax$  и  $a'y$ . Остаточные отклонения от прямых — порядка  $\pm 0.15$  мкм. Следовательно, ввод поправок за ошибки делений шкал не влияет на точность определения положения объекта.

*Отклонения от прямолинейности направляющих линеек.* Исследование формы направляющих линеек проводится с помощью эталонной пластины, на которой прочерчены две перпендикулярные прямые с делениями через каждые 10 мм. Измерения выполняются дважды (с поворотом пластины на  $90^\circ$ ), что позволяет вместе с поправками за непрямолинейность направляющих определить их неперпендикулярность. Предварительно на перфоленду набиваются и вводятся в машину поправки за ошибки делений эталонной пластины. Они определяются на заводе со средней квадратичной ошибкой  $\pm 0.1$  мкм. Для вычисления ошибок направляющих линеек измеряются 29 точек по координатам  $X$  и  $Y$ , через них методом наименьших квадратов проводятся прямые. Отклонения от этих прямых — ошибки, характеризующие непрямолинейность направляющих линеек. Точность определения таких ошибок зависит от точности наведения на штрихи эталонной пластины, которая, в свою очередь, зависит от типа шкалки измерительного прибора и выбранного коэффициента увеличения объективного микрометра; она также различна у разных измерителей. В случае «Аскорекорда 3 DP», на котором наведение осуществляется крестом нитей, можно добиться определения поправки за непрямолинейность направляющих со средней квадратичной ошибкой  $\pm 0.23$  мкм по координате  $X$  и  $\pm 0.30$  мкм по координате  $Y$ , в случае «Аскориса» (наведение проводится окружностью маленького диаметра) ошибки поправок не менее  $\pm 0.30$  мкм по  $X$  и  $\pm 0.40$  мкм по  $Y$ , могут достигать  $\pm 0.60$  мкм и больше. Определение поправок проводилось нами несколько раз. На рис. 2 показаны поправки за кривизну направляющих для «Аскорекорда 3 DP», полученные как средневзвешенные величины по нескольким рядам измерений. Эти ошибки составляют  $\pm 0.13$  мкм по  $X$  и  $\pm 0.16$  мкм по  $Y$ . Поправки к координате  $X$ , зависящие от  $Y$ , незначимы, а поправки к координате  $Y$  можно аппроксимировать функцией  $ax^2$ . Если такого члена нет в редукционных формулах, то непрямолинейность направляющей  $Y$  приво-

дит к систематическим ошибкам, которые достигают 1.5 мкм на края шкалы. Для «Аскориса» кривые аналогичны. Исследование кривизны направляющих «Аскориса» выполнялось в 1983 и 1986 гг. Существенных изменений в ходе кривых не обнаружено.

Отклонение от прямоугельности направляющих линеек. В ходе вычисления поправок за непрямолинейность направляющих определяется поправка за их непрямоугельность, а также поправка за непрямоугельность линий контрольной пластины. Последняя служит контролем вычислений, так как ее значение дается в заводских протоколах со средней квадратичной ошибкой  $\pm 0.2''$ . Средняя квадратичная ошибка

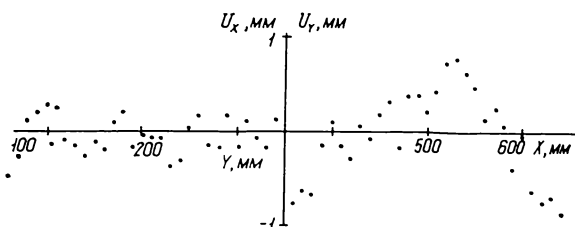
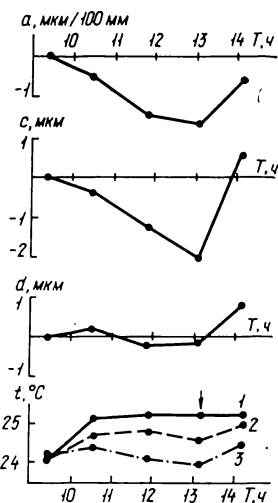


Рис. 2. Отклонения от прямолинейности направляющих объектной каретки «Аскорекорда 3 DP»

Рис. 3. Изменение коэффициентов  $a$ ,  $c$ ,  $d$  и температуры в зависимости от времени. Изменение температуры: 1 — корпуса прибора; 2 — пластинки; 3 — воздуха. Стрелкой обозначен момент отключения всех приборов



определения этих углов зависит от точности наведения на штрихи эталонной пластины. В наших измерениях эта величина находится между 0.2 и 0.5''. Сам угол составляет  $+1.1 \pm 0.1''$  для «Аскорекорда 3 DP» и  $-1.2 \pm 0.2''$  для «Аскориса» (средневзвешенное из нескольких серий измерений). Отклонение от прямоугельности направляющих линеек может сказаться только тогда, когда редукция измеренных координат к тангенциальным проводится методом четырех постоянных. Отклонение 1'' от прямого угла приводит к систематической ошибке линейного характера в координатах звезд, которая достигает всего 0.5 мкм на расстоянии 100 мм от центра пластинки.

Проекционные погрешности микрометров. Рэн, т. е. отклонения миллиметровых интервалов стеклянных шкал от 10 шагов соответствующих двойных спиралей, определяется как разность отсчетов при наведении нулевым витком спирали на один из миллиметровых штрихов шкалы и десятым витком на соседний штрих. Для выведения среднего значения рэна используются сравнения десяти миллиметровых интервалов шкалы, расположенных равномерно по каждой координате, с миллиметровым интервалом микрометра. Некоторые авторы [2, 6] приводят значения рэна в зависимости от координат  $X$  и  $Y$ . Но ошибка рэна является характеристикой измерительных микрометров, и поэтому не может зависеть от координат, если учесть поправки за деления шкал. Рэн определяется со средней квадратичной ошибкой менее 0.1 мкм. Найденные нами значения рэна  $R$  составляют  $-0.2$  мкм и  $-0.5$  мкм для «Аскорекорда 3 DP», 1.2 мкм и 0.1 мкм для «Аскориса» соответственно по координатам  $X$  и  $Y$ . Невозможность точно сфокусировать объективный микрометр «Аскориса» по координате  $X$  приводит к большому значению рэна. При измерениях с программой ASCO-03 поправка за рэн вводится путем умножения ее значения на отсчет микрометра, т. е. на дробную часть полного отсчета. Поскольку дробная часть координаты для совокупности измеряемых объектов —

случайная величина, то и ошибка рэн по отношению ко всем измерениям будет случайной величиной с равномерным распределением, которая принимает значения от  $-R/2$  до  $+R/2$  со средним абсолютным значением  $R/4$ . По сравнению с другими ошибками прибора только рэн по  $X$  для «Аскориса» может быть существенным. Если учитывать поправки за рэн при измерениях, то остаточная ошибка будет пренебрежимо мала.

**Ошибки окулярных микрометров.** Ошибки хода микрометров определялись при нулевом отсчете круговой шкалы путем измерения соседними витками спирали интервала на отсчетных линейках, приблизительно равного  $0.1$  мкм, т. е. расстоянию между витками [1]. Для «Аскорекорда 3 DP» значения ошибок выводились по шести сериям измерений, для «Аскориса» — по десяти сериям (ввиду нерезкого изображения штрихов линеек). Ошибки хода можно приближенно представить параболой. Максимальные их значения присущи средним виткам спирали и составляют  $0.26 \pm 0.16$  и  $0.21 \pm 0.09$  мкм по координатам  $X$  и  $Y$  соответственно для «Аскорекорда 3 DP» и  $0.79 \pm 0.16$  и  $0.30 \pm 0.13$  мкм по координатам  $X$  и  $Y$  для «Аскориса». Так как все отдельные ошибки одного знака, то после редукции измерений влияние их уменьшается вдвое. Следовательно, только для микрометра  $X$  «Аскориса» значение ошибок хода сравнимо с другими инструментальными ошибками.

Периодические ошибки микрометров обычно имеют максимальную амплитуду  $0.1$  мкм [3, 4]. В настоящей работе они не исследовались.

**Точность определения положения объекта в системе координат.** Для наведения на объект и тем самым фиксирования его положения в системе координат служит шкалка, находящаяся в поле зрения измерительного микроскопа. Шкалка «Аскорекорда 3 DP» изготовлена в Опытном производстве ГАО АН УССР и представляет собой систему концентрических окружностей, пересеченных крестом. Шкалка «Аскориса» изготовлена н/п «Карл Цейс Йена» вместе с прибором. Она похожа на шкалку «Аскорекорда 3 DP», но не имеет креста. Диаметры концентрических окружностей обеих шкалок даны в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Отклонения центров окружностей шкалки «Аскорекорда 3 DP» от креста нитей

Номер окружности	Диаметр, мкм	$\Delta X$ , мкм	$\Delta Y$ , мкм
1	201	1.2	1.5
2	407	1.9	1.8
3	610	1.4	1.8
4	814	1.8	1.7
5	1019	1.8	1.9
6	1223	1.7	1.9

Таблица 2. Отклонения центров окружностей шкалки «Аскориса» от центра первой окружности

Номер окружности	Диаметр, мкм	$\Delta X$ , мкм	$\Delta Y$ , мкм
1	56	—	—
2	105	-0.4	-0.1
3	204	-0.2	-0.1
4	416	-0.1	-0.1
5	621	-0.2	-0.1
6	825	-0.4	-0.7
7	1029	-0.1	-0.5
8	1233	0.0	-0.1

Случайная ошибка наведения на объект определялась по 50 наведениям на каждую из восьми звезд ( $8-16^m$ ) и трех галактик. Испытания проводились дважды двумя разными измерителями. Ошибка наведения находится в пределах  $0.7-2.5$  мкм в зависимости от размера и качества изображения. Мы не нашли статистически значимого отличия в точности наведения для двух шкалок разного типа и для двух различных коэффициентов увеличений окулярного микрометра. Случайные ошибки наведения оказались в основном одинаковыми у двух разных измерителей.

Систематические ошибки наведения исключаются наведением на объект при разных положениях реверсионной призмы, но возможны

еще систематические ошибки, которые вносят шкалки. Если центры концентрических окружностей систематически смещены относительно визирного креста, то может вноситься ошибка типа уравнения яркости. В таблицах 1 и 2 приведены результаты исследования шкалок, которые проводились путем наведения креста нитей (для «Аскорекорда 3 DP») и первых окружностей на маленькую метку. Ошибка одного значения составляет  $\pm 0.3$  мкм.

Следует отметить, что центры концентрических окружностей отклонены от визирного креста шкалки «Аскорекорда 3 DP».

**Исследование температурных эффектов.** В некоторых случаях в повторно измеренных координатах одних и тех же объектов можно заметить систематически значимые изменения, достигающие нескольких микрометров. Для детального исследования этого эффекта измерялись восемь чернильных меток (по две в каждом углу пластинки) во время реальных измерений. Раздельные по времени ряды измерений меток приводились друг к другу методом четырех постоянных:

$$x_2 - x_1 = ax + by + c; \quad y_2 - y_1 = ay - bx + c,$$

где  $x$  и  $y$  — отсчитанные от центра пластинки координаты меток;  $x_2$ ,  $x_1$ ,  $y_2$ ,  $y_1$  — координаты меток в различных рядах. Остаточные отклонения системы уравнений после решения методом наименьших квадратов заключены в интервале от  $\pm 0.4$  до  $\pm 0.9$  мкм; ошибки коэффициентов  $a$  и  $b$  составляют от  $\pm 0.10$  до  $\pm 0.25$  мкм/100 мм; ошибки коэффициентов  $c$  и  $d$  — от  $\pm 0.15$  до  $\pm 0.35$  мкм.

Отмечаются следующие закономерности: 1. Коэффициент  $a$  (масштабный) получается всегда отрицательным, пластинка как бы сжимается; 2. Значимые коэффициенты  $b$  (поворот пластинки) могут возникнуть тогда, когда пластинка ориентировалась перед измерениями. В некоторые моменты поворот происходит не плавно, а скачкообразно; 3. Линейные сдвиги центра пластинки (коэффициенты  $c$  и  $d$ ) чаще всего имеют одинаковый характер. Бывают случаи, когда сдвиг по одной из координат не происходит вовсе.

Подобные сдвиги вряд ли можно объяснить расширением жестких упоров [2], так как они слишком короткие, чтобы дать заметный эффект. Скорее всего повышение температуры по-разному сказывается на пластинке и на стеклянных масштабных линейках.

На рис. 3 показаны изменения коэффициентов  $a$ ,  $c$ ,  $d$  и температуры в зависимости от времени. Так как температуру линейных шкал измерить непосредственно нельзя, то измерялась температура металлического корпуса прибора. Прибор нагревается даже при почти постоянной температуре воздуха в помещении, которая поддерживается кондиционерами. Между двумя последними измерениями меток все приборы, в том числе и кондиционеры, отключались. Температура пластинки принимает среднее между температурами корпуса и воздуха значение. Чтобы объяснить наблюдаемое «сжатие» пластинки на 1 мкм/100 мм и больше, надо предположить, что масштабные линейки нагреваются сильнее, чем металлический корпус. Разность температур пластинки и линейной шкалы должна составлять примерно  $1^\circ\text{C}$ .

Полученный материал не позволяет объяснить, почему сдвиги пластинки в одних случаях составляют доли микрометра, в других — несколько микрометров. Следует отметить, что характер сдвига пластинки не изменяется после того, как она заложена в прибор, но может быть существенно другим при новой закладке. Поэтому в случае больших сдвигов пластинку в прибор следует заложить заново и измерения повторить. Во избежание поворотов рекомендуется не ориентировать пластинку в приборе перед началом измерений, а выполнять ориентировку численно после.

**Краткие выводы.** Имеющийся комплекс программ, как уже отмечалось, позволяет проводить автоматический учет погрешностей при-

бора. Это приводит к тому, что остаточная ошибка в измеренных координатах составляет  $\pm 0.5$  мкм и меньше. В противном случае на измерения могут влиять только ошибки непрямолинейности направляющих линеек, но и они учитываются путем введения соответствующих членов в редуцированную модель. Следует обратить внимание на то, что измерения звезд разного диаметра крестом нитей и концентрическими окружностями визирной шкалки «Аскорекод 3 DP» приведут к систематическим ошибкам в положениях порядка 1 мкм. Точность измерений определяется в основном случайными ошибками наведения, которые зависят прежде всего от вида и качества изображений и слабо зависят от других факторов. Исследование температурных эффектов наводит на мысль, что сдвиги пластинки во время измерений происходят вследствие разности температур пластинки и масштабных линеек. Рекомендуется исследовать подобные сдвиги до начала и контролировать их во время измерений, так как они могут достигать нескольких микрометров и уменьшать тем самым точность определения положений объекта.

1. Блажко С. Н. Курс практической астрономии.— М.: Наука, 1979.—432 с.
2. Иванов Г. А., Герц Э. А. Исследование координатно-измерительной машины «Аскорекод» ГАО АН УССР // Астрометрия и астрофизика.— 1979.— Вып. 38.— С. 68—72.
3. Кириченко А. Г., Кудак К. А., Стародубцева О. Е., Ужва Т. В. Исследование координатно-измерительной машины «Аскорекод Е-2» и личных ошибок наведений // Вестн. Киев. ун-та. Астрономия.— 1983.— Вып. 25.— С. 91—94.
4. Крулов А. Г. Исследование инструментальных ошибок точных измерительных машин Института астрофизики // Бюл. Ин-та астрофизики АН ТаджССР.— 1982.— № 71.— С. 36—39.
5. Фелькамм Г. Аскорекод — точный координатно-измерительный прибор с автоматической регистрацией // Йен. обозрение.— 1967.—12, № 6.— С. 327—333.
6. Marek G. Die Genauigkeit der Koordinatenmessung mit dem ASCORECORD // Vermessungstechnik.— 1969.—17, N 10.— S. 381—385.

Центр. ин-т астрофизики АН ГДР, Потсдам,  
Глав. астрон. обсерватория АН УССР, Киев

Поступила в редакцию 15.04.87,  
после доработки 28.05.87

## Научные конференции

### СИМПОЗИУМ МАС № 138 «СОЛНЕЧНАЯ ФОТОСФЕРА: СТРУКТУРА, КОНВЕКЦИЯ, МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ»

Симпозиум состоится в Киеве 15—20 мая 1989 г. Научная программа: конвекция и динамика фотосферы; тонкая структура; крупномасштабная структура; вращение и меридиональная циркуляция; глобальные характеристики солнечной цикличности; генерация магнитных полей; динамика и эволюция магнитных полей; потоковые трубки; электрические токи в солнечной фотосфере; модели фотосферы; солнечно-звездные связи.