

УДК 520.8+520.257

О высокоточном определении координат естественных и искусственных тел Солнечной системы

Д. П. Дума, Н. И. Лаптенко, М. А. Мельников

Предлагается укомплектовать астрографы специальными камерами, в которых приемник излучения может отслеживать поочередно перемещение изображений звезд и интересующего нас объекта в фокальной плоскости телескопа. С помощью различных способов отслеживания можно накапливать излучение в одной точке приемника длительного время. Для обнаружения объекта, определения параметров его видимого движения и относительных координат на телескопе целесообразно установить телевизионную аппаратуру, ЭВМ и автономную службу времени, которая привязана к стандартным шкалам времени с точностью $(2-4) \cdot 10^{-3}$ с. Такой наблюдательный комплекс обеспечит получение угловых координат с точностью $0.2-0.5''$ для естественных и искусственных небесных тел со скоростями относительно звезд $0-200''/с$ до величин $14-17^m$ (на базе широкоугольного астрографа) и до $17-19^m$ (на базе двухмисского телескопа Максудова).

ON THE PROBLEM OF DETERMINATION OF THE HIGH PRECISION COORDINATES OF NATURAL AND ARTIFICIAL BODIES OF THE SOLAR SYSTEM, by Duma D. P., Laptenko N. I., Mel'nikov M. A.— It is suggested to equip astrographs with special radiation receivers tracking by turns the shift of the stars and other objects images at the focal plane of the telescope. Using the various methods for tracking it is possible to accumulate the radiation at one point of the receiver for a long time. To find the object and determine the parameters of its apparent motion and relative coordinates it is advisable to install at the telescope the television equipment, computer and autonomous time service tied to the standard time scales with an accuracy of $(2-4) \times 10^{-3}$ s. Such an observational complex will secure the obtaining of the angular coordinates with an accuracy of $0.2-0.5$ seconds of arc for the natural and artificial celestial bodies with the velocities of $0-200$ seconds of arc per second relative to the stars up to $14-17^m$ (using a wide-angle astrograph) and up to $17-19^m$ (using two-miscus Maksutov telescope).

В настоящее время требования к точности позиционных наблюдений естественных тел Солнечной системы с помощью оптических средств характеризуются следующими данными [1]:

| | |
|---|-----------|
| Солнце, Меркурий и Венера (дневные наблюдения) | 0.6—1.0'' |
| Верхние большие и избранные малые планеты | 0.2—0.6'' |
| Остальные малые планеты | 1.0—2.0'' |
| Кометы | 0.5—1.5'' |

Эти требования обусловлены различными яркостными, геометрическими и кинематическими характеристиками объектов, а также инструментальной базой, находящейся в распоряжении наблюдателей, и применяемыми методами получения и обработки координатной информации. Они фактически уже реализованы при наблюдениях всех упомянутых объектов.

Для искусственных небесных тел (ИНТ) в массовом порядке достигнута точность определения положений $1-2''$ [4], в экспериментальном порядке для геостационарных ИСЗ — около $0.5''$ [5, 6].

Таким образом, по-прежнему остается актуальной проблема высокоточного определения угловых координат большинства естественных и искусственных небесных тел (ЕИНТ), особенно слабых и быстро движущихся по орбите тел Солнечной системы.

По нашему мнению, существенного прогресса в решении этой проблемы можно добиться с помощью светосильных широкоугольных телескопов после дооборудования их специальными устройствами для отслеживания движения тел на интервалах времени от нескольких секунд до десятков минут и установки на них специальной службы времени для регистрации моментов начала и окончания отслеживания, привязанных к стандартным шкалам времени с точностью $10^{-3}-10^{-4}$ с [5]. Основная цель отсле-

живания заключается в построении на приемнике излучения точечных изображений поочередно для интересующего нас объекта и звезд так, чтобы полученные изображения не смещались по поверхности приемника продолжительное время. Это позволит накапливать излучение от объекта или звезды в течение определенного времени и обеспечит регистрацию слабых изображений. В частности, если в качестве приемника излучения выбрать фотопластинку, то при поочередном отслеживании объекта и звезд получим на астронегативе их изображения круглой формы и небольших размеров,

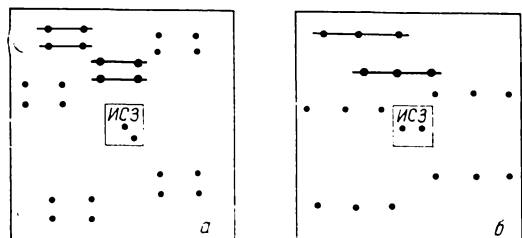


Рис. 1. Схематическое представление изображений звезд и ИСЗ на астронегативах: *а* — после сдвига пластинки по склону; *б* — без сдвига пластинки

которые измеряются с высокой точностью на координатно-измерительных машинах. Поскольку при поочередном отслеживании в принципе фиксируются две различные геометрические картины участка неба, необходимо позаботиться о том, чтобы методика обработки измерений звезд и объекта позволяла восстановить реальное положение объекта по отношению к звездам на фиксированный момент.

Весьма рациональным следует считать такой подход к созданию отслеживающих систем, при котором компенсация движения объекта осуществляется не поворотом трубы телескопа, а лишь перемещением приемника излучения в его фокальной плоскости [5]. В основу конструкции отслеживающего устройства для широкоугольных телескопов можно положить следующие принципы.

1. При включенном часовом механизме и открытом затворе телескопа на фотопластинке (в дальнейшем для упрощения изложения в качестве приемника излучения будем рассматривать фотографическую пластинку) экспонируются изображения звезд и объекта, причем изображения звезд остаются неподвижными на пластинке, а изображение объекта перемещается по ней со скоростью, величина которой находится в прямой зависимости от скорости перемещения объекта по отношению к звездам и фокусного расстояния телескопа. После получения изображений звезд почти мгновенно начинает перемещаться фотопластинка так, что изображение объекта остается на ней неподвижным. Достигается это путем перемещения фотопластинки по двум координатам в фокальной плоскости телескопа. Время отслеживания выбирается с таким расчетом, чтобы на пластинке получилось качественное изображение объекта для дальнейшей обработки. За время экспозиции объекта изображения звезд перемещаются по пластинке на расстояния, которые определяются продолжительностью экспозиции и относительной скоростью объекта. Затем снова останавливается пластинка и получают изображения звезд. На этом заканчивается один цикл отслеживания звезда — объект — звезда. В итоге на астронегативе получится точечное изображение объекта и по два изображения каждой звезды в виде точек (слабые звезды) или «узлов» на следе звезды (яркие звезды), а с помощью внешних регистрирующих устройств будут зафиксированы моменты начала и окончания перемещений фотопластинки с необходимой точностью (например, 10^{-3} с).

При поочередном отслеживании можно выбирать разную продолжительность экспозиций для фотографирования звезд и объекта, что позволяет получать изображение объекта на фоне изображений как ярких, так и слабых опорных звезд. Последнее обстоятельство имеет немаловажное значение, так как для определения положения одного и того же объекта можно привлекать разные каталоги звезд, в том числе фундаментальные каталоги ярких и специальные каталоги слабых звезд. Отметим, что для уверенного распознавания объекта на пластинке необходимо получить по меньшей мере два его изображения. Это можно осуществить путем сдвига пластинки на несколько миллиметров, например по склону, и повторением полного цикла отслеживания звезда — объект — звезда или путем отслеживания объекта дважды по схеме звезда — объект — звезда — объект — звезда (без сдвига пластинки). Схематическое представление снимков дано на рис. 1.

Изложенный принцип реализуем на широкоугольных телескопах с фокусным расстоянием $F \geq 2$ м и диаметром объектива $D \geq 40$ см практически для всех высокоорбитальных ИСЗ, большинства особенных малых планет и некоторых комет, имеющих видимую скорость относительно звезд $v \geq 0.03''/\text{с}$. Реализация этого принципа на короткофокусных телескопах ($F \leq 1$ м) позволяет наблюдать только объекты со значительно большей скоростью по сравнению с отмеченной выше, так как за время экспозиции вследствие небольшого смещения объекта по отношению к звездам два изображения одной и той же звезды наложатся друг на друга, и высокоточная обработка такого астронегатива невозможна.

2. Для объектов с относительной скоростью $v \leq 0.03''/\text{с}$ на телескопах с $F \geq 2$ м целесообразно применять другой принцип наблюдений. Сначала осуществляется отслеживание перемещения изображений звезд и их фотографирование, а затем после сдвига фотопластины по одной из координат выполняется отслеживание изображения и фотографирование объекта. Отслеживание изображений звезд и объекта можно осуществить в обратной последовательности. Таким способом можно получить точечные изображения объекта и звезд, но для разных моментов времени. При фотографировании звезд и объекта необходимо впечатывать на астронегатив реперные метки, измерение которых позволит привести в единую систему координат измерения объекта и звезд. Подобный принцип уже использовался при наблюдениях Луны на фоне звезд [3].

3. Для исследования объектов с очень малой скоростью и практически неподвижных по отношению к звездам необходимо иметь обычные кассеты, в которых пластинка остается неподвижной на протяжении всей экспозиции. В этом случае используется широко применяемый способ одновременного фотографирования звезд и объекта на фотопластинку [7, 9]. Вследствие незначительного смещения изображения объекта по отношению к изображениям звезд или короткой экспозиции для ярких объектов даже с быстрым движением на астронегативе получаются практически точечные изображения, измерения которых осуществляются с высокой точностью, а обработка измерений выполняется известными методами [2, 9].

На основании изложенного очевидно, что, применяя три способа наблюдений естественных и искусственных небесных тел, имеющих различную яркость и диапазон видимых скоростей относительно звезд от нуля до нескольких сотен секунд дуги в секунду времени, можно получить на приемнике излучения качественные точечные изображения объекта и окружающих его звезд. Последнее является одним из основных требований при высокоточных определениях положений тел Солнечной системы по отношению к звездам. Заметим, что рассмотренные в пунктах 1, 2 способы позиционных наблюдений позволяют накапливать излучение в одной точке на протяжении длительного времени. Следовательно, можно решить проблему определения координат большого числа слабых объектов, используя не только фотографическую пластинку, но и другие приемники излучения.

В ГАО АН УССР создан комплекс аппаратуры для фотографирования на двойном широкоугольном астрографе (ДША) ($D=40$ см, $F=2$ м) естественных и искусственных небесных тел с видимой скоростью перемещения их относительно звезд $v \geq 0.1''/\text{с}$, в котором реализован изложенный в пункте 1 принцип поочередного отслеживания звезд и объекта [5, 6]. Опыт работы на этом комплексе показал, что точность найденных положений геостационарных ИСЗ составляет около 0.8 и 0.5'' при использовании звезд из каталога SAO [14] и из каталога-атласа [12] соответственно. Она в несколько раз выше той точности для ИСЗ, которую обеспечивают специальные спутниковые установки [4].

Аппаратура для определения положений быстро движущихся объектов используется эффективно, если движение тел можно прогнозировать. При организации массовых высокоточных позиционных наблюдений ЕИИТ с неизвестными параметрами движения это осуществить нельзя. Поэтому необходимо иметь такой наблюдательный комплекс, который позволяет в ходе наблюдений обнаруживать объекты, определять их приближенные параметры движения, а затем отслеживать перемещение изображений объекта в фокальной плоскости телескопа.

По нашему мнению, конструктивными элементами комплекса аппаратуры для позиционных наблюдений ЕИИТ могут быть: фототелекамера (ФТК), состоящая из передающей телевизионной трубки (ПТ) с оптической системой или ПЗС-матрицы,

фотографической кассеты (ФК) или заменяющего ее широкопольного приемника для одновременной регистрации излучения от объекта и окружающих его звезд; многоцелевая ЭВМ; пульт управления (ПУ), который включает в себя видеоконтрольное устройство (ВКУ) и механизмы управления работой ФТК; накопитель информации (видеомагнитофон). ФТК имеет механизмы перемещения ПТ и ФК по двум координатам в фокальной плоскости телескопа и устанавливается на кассетную часть трубы телескопа.

Принцип действия такого инструментального комплекса может быть следующий. Телескоп наводится на исследуемую область неба, и включается его часовое ведение. С помощью механизмов управления на ПУ перемещают ПТ по полю зрения телескопа, чередуя перемещения с остановками ПТ. Во время остановки ПТ осуществляется поиск изображения объекта, который перемещается относительно звезд с заметной скоростью. Затем механизмами управления на ПТ подбирается скорость перемещения ПТ, соответствующая скорости перемещения изображения объекта. Эта скорость задается ФК, с помощью которой проводится фотографирование объекта, а после ее остановки — звезд. Моменты экспозиций объекта и звезд фиксируются специальным устройством и привязываются с высокой точностью к стандартным шкалам времени.

Инструментальный комплекс с телевизионной аппаратурой можно использовать также для обнаружения объекта и определения его координат в реальном масштабе времени. В этом случае комплекс может работать так. Телескоп наводится на нужную область неба, и включается его часовое ведение. С помощью гида изображение ближайшей опорной звезды, координаты и собственные движения которой имеются в каталоге, совмещают с центром поля телескопа (оптическим центром). По командам с ЭВМ механизм перемещения кассеты устанавливает ПТ (ПЗС) так, чтобы центр ее фотокатода совпал с изображением опорной звезды. Координаты этого положения ПТ запоминаются в ЭВМ и являются началом отсчета при всех дальнейших операциях. Затем ПТ перемещают в фокальной плоскости телескопа на $3/4$ ее поля зрения и останавливают для обнаружения перемещающегося объекта на фоне звезд. В случае отсутствия изображения объекта ПТ опять смещают на $3/4$ ее поля и так до тех пор, пока на экране ВКУ не будет обнаружено изображение объекта, которое затем совмещается с центром фотокатода ПТ. Поскольку с помощью ЭВМ проводится определение координат ПТ по отношению к ее первоначальному положению на протяжении всей работы, можно найти координаты центра ПТ относительно опорной звезды, изображение которой совмещалось вначале с центром фотокатода ПТ. Момент снятия координатной информации регистрируется с помощью специальной службы времени и внешних устройств, а также вводится в ЭВМ.

Таким образом, при реализации описанного принципа наблюдений и соответствующей обработки измерений можно получить координаты естественного или искусственного быстро движущегося объекта по отношению к звездам в оперативном режиме.

Оценим точность определения координат ЕИИТ и пронизающую силу комплексов с телевизионной аппаратурой, созданных на базе двойного широкоугольного астрографа Цейса ДША ($D=40$ см, $F=2$ м), двухменискового телескопа Максудова ДТМ ($D=1$ м, $F=2.078$ м) и телескопа типа зонного астрографа ЗА ($D=20$ см, $F=2$ м).

Очевидно, что точность определения координат объекта при использовании фотопластины в качестве приемника излучения будет такой же, как для верхних больших и избранных малых планет ($\pm 0.2-0.6''$), если при отслеживании изображения звезд и объекта на астронегативе будут иметь круглую форму и размеры 30—100 мкм. Для режима работы в реальном масштабе времени точность координат ЕИИТ зависит от погрешностей измерения положения центров изображений звезды и объекта на фотокатоде ПТ, измерения расстояния между положениями центра ПТ при наведении на звезду и объект, случайной и систематической погрешностей положения опорных звезд, дисторсии объектива и, возможно, других факторов.

Погрешность измерения положения центров изображений (звезды и объекта) оценим, полагая, что размер фотокатода ПТ 24×24 мм, число строк развертки 1000; относительное отверстие, диаметр объектива и фокусное расстояние телескопов приведены выше. Как известно, диаметр дифракционного кружка (изображения) в фокальной плоскости телескопа определяется по формуле [8]: $D_n = 2.44 \lambda F/D$. В фото-

графических лучах $\lambda = 434 \cdot 10^{-6}$ мм для телескопа Максутова и широкоугольных астрографов диаметр изображения объекта или звезды $D_{\text{и}} = 0.002 - 0.005$ мм. В реальных условиях без принятия специальных мер для улучшения качества изображения его размеры существенно превышают отмеченные выше или сравнимы с размерами элемента разложения фотокатода $d = 0.024$ мм.

Рассмотрим случай, когда изображение попадает на несколько элементов фотокатода в центре трубки (рис. 2). Учитывая, что минимальная величина сигнала, которую можно зарегистрировать на элементе разложения, составляет не более 10 %

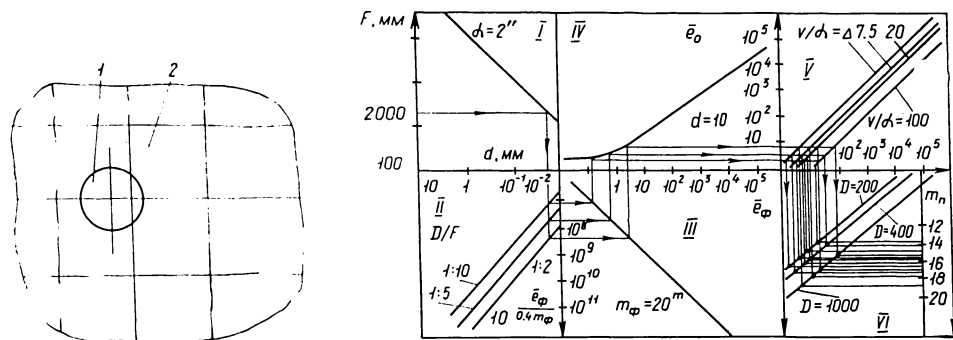


Рис. 2. Расположение изображения объекта 1 на элементах разложения фотокатода 2

Рис. 3. Номограмма для расчета проникающей способности телескопов ДША, ДТМ, ЗА с телевизионной аппаратурой

общей величины, а следовательно, и погрешность определения центра изображения будет не хуже 10 % размера элемента разложения, получаем погрешность определения координат центра изображения звезды или объекта $0.24''$.

В оперативном режиме определения координат можно использовать звезды из фундаментальных или специальных каталогов, поэтому влияние погрешностей положений звезд можно свести к минимуму. В частности, погрешность положений звезд в случайном и систематическом отношении для существующей системы ФК4 сейчас составляет около $0.2''$, а для нового каталога ФК5 по прогнозным оценкам не будет превышать $0.05''$ на эпоху наблюдения [13]. Для широко используемых каталогов АГКЗ и SAO только случайные ошибки в положениях звезд достигают 0.2 и $0.5''$ [13].

Точность измерения расстояния между положениями центра ПТ при наведении на звезду и объект определяется конструкцией механизмов перемещения и качеством отсчетной системы. Если последние изготовлены на основе микрометрических винтов (как, например, в камере для наблюдений ИСЗ [5, 6]), то основным источником погрешностей будут ходовые и периодические ошибки, которые у качественно изготовленных винтов составляют $0.003 - 0.006$ оборота на интервале $25 - 50$ оборотов и $0.001 - 0.002$ оборота соответственно [10]. Следовательно, на расстоянии 2° от центра пластинки за счет ходовых и периодических ошибок винтов погрешность в определении координат достигает $0.3 - 1.2''$. Оценки суммарных погрешностей, с которыми можно реализовать определение положений ЕИИТ в оперативном режиме, даны в табл. 1. Расчет проникающей способности мы проводили по методике [11] на основании номограммы (рис. 3), полагая размеры изображений $\alpha = 20$ мкм $= 2''$, пороговую чувствительность передающей трубки типа суперортикон $\gamma = 10^{-5}$ лк и фоновую засветку неба $m_{\text{ф}} = 20^m$. По графику I для заданного фокусного расстояния F телескопа и известного размера турбулентного диска изображения звезды α находился линейный диаметр изображения d на фотокатоде приемника света, по графикам II и III получалось среднее число фотоэлектронов $\bar{e}_{\text{ф}}$ в зависимости от размера относительного отверстия D/F и яркости фона неба $m_{\text{ф}}$, а по графику IV — среднее число фотоэлектронов \bar{e}_0 в изображении. С помощью графика V полученное значение \bar{e}_0 переносится на график VI, где по диаметру входного отверстия телескопа определялась проникающая способность $m_{\text{п}}$. В табл. 2 приведены оценки $m_{\text{п}}$ для объектов с разными угловыми скоростями v . На основании опыта работы с отслеживающей системой и данных табл. 2 очевидно, что использование телевизионной аппаратуры на средних и

Таблица 1. Оценки погрешностей определения положений ЕИНТ в оперативном режиме на разных расстояниях от центра пластинки без учета (верхняя строка) и с учетом (нижняя) дисторсии, ходовых и периодических погрешностей

| Расстояние от центра пластинки, град | Инструмент | | |
|--------------------------------------|------------|-------|-------|
| | ДША | ЗА | ДТМ |
| 1 | 0.58" | 0.56" | 0.56" |
| | 0.34 | 0.33 | 0.33 |
| 2 | 1.67 | 1.00 | 0.96 |
| | 0.38 | 0.35 | 0.35 |
| 2.5 | 2.92 | 1.34 | 1.22 |
| | 0.45 | 0.36 | 0.36 |

Таблица 2. Оценки проникающей способности m_{II} для ДША и ДТМ

| $v, "/s$ | ДША | ДТМ |
|----------|-------------------|-------------------|
| 0 | 17.0 ^m | 19.5 ^m |
| 15 | 16.5 | 19.0 |
| 40 | 15.0 | 18.0 |
| 200 | 14.5 | 16.8 |

крупных широкоугольных астрографов позволит обнаруживать и отслеживать довольно слабые ЕИНТ с широким диапазоном видимых скоростей относительно звезд.

Заключение. В настоящее время имеется возможность реализовать точность определения угловых координат 0.2—0.5" для ЕИНТ до 17—19^m, в том числе имеющих заметное видимое движение по отношению к звездам. Для этого можно использовать широкоугольные телескопы с $F \geq 2$ м, дооборудовав их специальными камерами с механизмами отслеживания перемещения изображения в фокальной плоскости телескопа и реперными метками, телевизионной аппаратурой (ПЗС) и специальной ЭВМ для обнаружения объекта, определения параметров перемещения и последующего отслеживания изображения, широкопольными высокочувствительными приемниками излучения (типа фотографической пластинки) для одновременной регистрации положений звезд и объекта, а также службой времени для регистрации моментов измерения координат в какой-либо стандартной шкале времени. Возможность отслеживания перемещения изображения позволяет накапливать излучение длительное время в одном месте на приемнике, что является одним из основных требований при наблюдении перемещающихся относительно звезд слабых объектов и при измерении с высокой точностью их относительных координат.

Таким образом, успешное решение проблемы высокоточного определения координат ЕИНТ связано с созданием или модернизацией светосильных длиннофокусных телескопов для позиционных наблюдений. Каждый такой телескоп должен иметь набор штатной аппаратуры, которая устанавливается на нем и используется при наблюдениях в зависимости от параметров видимого движения естественного или искусственного объекта. Внедрение этой аппаратуры требует разработки новых методик позиционных наблюдений и их обработки. Реализация такого подхода к наблюдениям обеспечит повышение в несколько раз точности определения большого числа небесных тел с помощью наземных оптических средств.

1. Батраков Ю. В., Дума Д. П., Извеков В. А., Медведев Ю. Д. Требования к наблюдениям тел Солнечной системы и их обоснование // Проблемы астрометрии.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984.— С. 56—60.
2. Беллев Ю. А., Плогин Г. А. Результаты наблюдений малой планеты Икар на менисковом астрографе Максудова в Чили // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулково.— 1971.— № 189/190.— С. 164—175.
3. Быстров Н. Ф., Ризванов Н. Г. О новом методе фотографирования Луны со звездами на отдельных пластинках // Тр. Казан. гор. астрон. обсерватории.— 1973.— № 39.— С. 156—175.
4. Георгиев Н. И., Масевич А. Г., Кленецкий Б. М., Татевян С. К. Использование наблюдений искусственных спутников Земли для геодезии.— София: Изд-во Болг. АН, 1979.— 275 с.
5. Дума Д. П. Проблема определения высокоточных координат искусственных небесных тел фотографическим способом // Астрон. журн.— 1984.— 61, вып. 1.— С. 184—190.
6. Дума Д. П., Иващенко Ю. Н., Шокин Ю. А. Опыт определения высокоточных координат геостационарных ИСЗ с помощью широкоугольного астрографа и специальной кассеты // Кинематика и физика небес. тел.— 1986.— 2, № 2.— С. 86—88.
7. Курс астрофизики и звездной астрономии / Под ред. А. А. Михайлова.— М.: Наука, 1973.— Т. 1.— 608 с.

8. *Максутов Д. Д.* *Астрономическая оптика.*— Л.: Наука, 1979.—395 с.
9. *Малые планеты* / Под ред. Н. С. Самойловой-Яхонтовой.— М.: Наука, 1973.—359 с.
10. *Подобед В. В.* *Фундаментальная астрометрия.*— М.: Физматгиз, 1962.—340 с.
11. *Телевизионная астрономия* / Под ред. В. Б. Никонова.— М.: Наука, 1984.—272 с.
12. *Шокин Ю. А., Пономарев Д. Н., Евстигнеева Н. М.* *Каталог-атлас опорных звезд для телевизионных определений угловых координат стационарных объектов // Задачи современной астрометрии в создании инерциальной системы координат.*— Ташкент: Фан, 1981.— С. 191—203.
13. *Яцкив Я. С., Губанов В. С.* *Об основных координатных системах, применяемых в астрометрии и геодинاميке // Геодинамика и астрометрия.*— Киев: Наук. думка, 1980.— С. 110—120.
14. *Smithsonian star catalogue.*— Washington: Smithsonian Inst., 1966.— Vol. I—IV.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию 23.11.87,
после доработки 01.02.88

Научные конференции

XI ЕВРОПЕЙСКАЯ РЕГИОНАЛЬНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ МАС

Конференция состоится 3—9 июля 1989 г. в Пуэрто-де-ла-Крус (о. Тенерифе, Канарские о-ва, Испания). Научная программа: Солнце и звезды солнечного типа; строение и эволюция звезд; строение и эволюция галактик; активные галактики и космология; межзвездная и межгалактическая среда; астрономические инструменты.