

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1967

В. В. НЕСТЕРОВ, В. В. ПОДОБЕД

## ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В АСТРОНОМИИ

Все без исключения разделы астрономии в той или иной степени нуждаются в инерциальной системе координат. Приводимые примеры служат иллюстрацией этого положения. Так, закономерности движения, взаимодействие небесных тел, структура их комплексов, являющиеся предметом небесной механики и звездной астрономии, должны изучаться непременно в инерциальной системе координат, так же, как и вращение Земли, которым занимается астрометрия. Точные астрономические наблюдения в инерциальной системе координат призваны подтвердить или поставить под сомнение тонкие эффекты движений в гравитационном поле, предсказываемые теорией относительности.

В качестве инерциальной системы координат в астрономии используется средняя гелиоцентрическая экваториальная система координат заданной эпохи.

При решении различных задач применяются разнообразные системы координат, часто успех математического решения задачи зависит от удачного выбора системы координат. Однако все эти системы в конечном счете сводятся к указанной экваториальной системе, органически связанной с Землей и ее движением, которые являются основой современного задания высокоточной системы отсчета. Установление такой системы отсчета есть основная задача астрометрии. Сюда входят теоретическое установление средней точки весеннего равноденствия и среднего экватора эпохи, привязка полученной таким образом системы координат к небесным телам и определение числовых значений фундаментальных астрономических постоянных, необходимых как для указанной привязки, так и для практического использования полученной системы отсчета. Последнее особенно сложно ввиду сложности движения Земли и большого числа факторов, влияющих на него.

С точки зрения практического создания инерциальной системы отсчета и ее использования целесообразно из движений Земли выделить три категории: а) периодические движения системы вместе с наблюдателем, отличающие истинную систему от средней, т. е. многочисленные нутационные движения; б) движения наблюдателя относительно истинной системы отсчета, известные как явления колебания полюсов и неравномерности вращения Земли, годичной и суточной абerra-

ции, и в) медленные движения средней системы координат, т. е. лунно-солнечная прецессия и прецессия от планет.

Определение и учет всех этих движений позволяет связывать наблюдения с инерциальной системой отсчета.

Метод построения инерциальной системы координат заключается в определении и учете поступательно-вращательного движения Земли по наблюдениям небесных объектов.

В дальнейшем под словами инерциальная система координат будем понимать инерциальную систему отсчета, как ту или иную степень приближения к инерциальной системе координат.

Мыслимыми системами материальных тел для осуществления инерциальной системы являются: тела солнечной системы, звезды, внегалактические объекты. Эта классификация основывается на расстояниях объектов от Солнца и, по-видимому, может быть расширена дальше. Указанные группы объектов в некотором приближении являются изолированными материальными системами, занимающими ограниченную область пространства, центр инерции которых поэтому можно считать движущимся равномерно и прямолинейно.

Ориентируясь на тела солнечной системы (большие планеты), следовало бы строить инерциальную систему так. Написав уравнения, связывающие параметры вращения Земли с данными о фигуре и распределении масс Земли, и зная взаимные силовые функции Земли и планет, можно было бы изучить и учесть поступательно-вращательное движение Земли. Фактически в настоящее время ни числовые значения величин, входящих в уравнения, ни структура самих уравнений не являются в достаточной степени известными. Поэтому этот путь построения инерциальной системы не дает пока той точности, которая может быть достигнута иными средствами. По сути дела этим методом получается лишь значение прецессии от планет в предположении о корректности существующей теории.

Мгновенную экваториальную систему можно задать положениями некоторого числа звезд. Переход от этой системы к инерциальной затруднен наличием систематических движений звезд, к числу которых относятся: участие звезд во вращении Галактики, вызывающее необходимость знания для его учета параллаксов звезд и закона галактического вращения; эффект движения всей солнечной системы в пространстве, который приводит к видимому движению звезд относительно апекса и определенная коррелированность собственных движений звезд, искажающая результаты, получаемые в предположении об абсолютной случайности этих движений.

В настоящее время пока в отношении лунно-солнечной прецессии наибольшая точность достигнута именно по собственным движениям звезд.

Внегалактические туманности представляются еще более подходящими для задания инерциальной системы. Они весьма удалены и могут считаться практически неподвижными в картинной плоскости, вследствие чего не возникают описанные выше трудности. Однако внегалактические туманности — весьма трудные для высокоточных наблюдений объекты, и хотя сейчас ведутся их массовые наблюдения, о результатах можно будет судить лишь в будущем.

Создание инерциальной системы можно разделить на три проблемы, каждая из которых решается в значительной степени самостоятельно, но решение одной из них обуславливает решение остальных. Ясно поэтому, что указанное разделение носит достаточно условный характер.

Первая проблема заключается в определении гелиоцентрической экваториальной системы средней эпохи наблюдений, задаваемой совокупностью положений некоторого числа звезд. Эта проблема включает в себя.

1. Получение положений (мгновенных) некоторого числа звезд. Редукция этих положений на основе существующей теории поступательно-вращательного движения Земли и с принятыми параметрами этой теории на начало избранного года, т. е. получение исходных каталогов положений звезд для разных эпох наблюдений, приведенных к центру Солнца с учетом параллакс звезд.

2. Объединение указанных исходных каталогов в единый фундаментальный каталог (тоже в рамках принятой теории), т. е. получение мгновенной экваториальной системы координат для средней эпохи наблюдений, а также изменений координат звезд, включающих прецессионные изменения и собственные движения. Подчеркнем, что в процессе создания инерциальной системы фундаментальный каталог эквивалентен экваториальной системе для некоторого момента, ибо он формируется в рамках принятой теории поступательно-вращательного движения Земли, т. е. включает ее ошибки.

Вторая проблема — определение этих ошибок, после учета которых фундаментальный каталог в процессе создания инерциальной системы становится средней экваториальной системой, обладающей лишь медленным вращением. Во вторую проблему входят:

1. Создание теории движения больших планет, Солнца и Луны и определение параметров этой теории.

2. Создание теории вращения реальной Земли и определение параметров этой теории.

Решение этой проблемы основывается на успехах небесной механики и требует проведения специальных астрономических и геофизических наблюдений.

Третья проблема связана с определением и исключением медленных вращений полученной системы для достижения ее инерциальности, состоит из.

1. Определения вековых изменений наклона и движения узла подвижной эклиптики относительно искомой неподвижной по взаимным возмущениям планет.

2. Определения постоянной лунно-солнечной прецессии по собственным движениям звезд, трудности которого были упомянуты выше.

В принципе на этом построение инерциальной системы завершается. Однако не следует забывать о сложном взаимном переплетении указанных проблем и о существенном влиянии ошибок наблюдений, валирующих иной раз существо дела.

Результаты влияния погрешностей наблюдений проявляются в виде систематических ошибок, которые удобно классифицировать следующим образом: 1) ошибки координат  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\delta$ , которые искажают геометрию координатной сетки. Чтобы уменьшить их, необходимо повышать точность методов наблюдений и совершенствовать способы выравнивания; 2) ошибки нульпунктов системы координат  $\Delta A$  и  $\Delta D$ , так называемые ошибки положения точки весеннего равноденствия и ошибка экватора. Они определяются по сопоставлению наблюдаемых положений тел солнечной системы с эфемероидными и 3) ошибки собственных движений  $\Delta\mu$ , которые можно ослабить, наблюдая смещения звезд относительно внегалактических туманностей.

Дадим некоторую картину состояния работ, выполняемых астрономами всего мира, по изложенным проблемам. Будем при этом акцен-

тировать внимание на развитии отечественных исследований, в особенности астрометрических исследований в Московском университете за последние десятилетия.

Основным достижением работ по созданию фундаментальных каталогов звезд явилось создание каталога ярких звезд *FK4*, принятого в качестве международной стандартной системы. Относительно малое число входящих в *FK4* звезд привело к необходимости распространить эту наиточнейшую систему как на большее число ярких звезд (*FK4 sup*), требуемых для проведения, в основном, геодезических работ, так и на слабые звезды (*AGK3R*), необходимые в качестве опорных для фотографических наблюдений.

Большой вклад в дело создания фундаментальных систем был внесен советскими астрономами. Особого внимания заслуживают каталоги Пулковской обсерватории, которые, как показал А. А. Немиро, в отношении прямых восхождений являются определяющими при построении фундаментальной системы. Первая советская коллективная работа по созданию Каталога геодезических звезд под руководством Н. В. Циммермана подтвердила научные и творческие возможности обсерваторий СССР для выполнения грандиозного плана совместных работ программы Каталога слабых звезд (КСЗ). Первый этап такой работы в настоящее время близок к завершению и приобрел международный характер. Немалую роль сыграли в этих работах астрономы Московского университета. Первым каталогом, полученным в советское время из наблюдений на меридианном круге Репсольда, был Каталог геодезических звезд, составленный М. С. Зверевым и вошедший как один из наиболее точных в сводный каталог КГЗ.

Выдвинутая в 1932 г. пулковскими астрономами большая комплексная проблема по созданию Каталога слабых звезд была энергично подхвачена московскими астрономами. Под руководством М. С. Зверева, возглавившего в масштабе СССР выполнение всей этой работы, московские астрономы разработали программу наблюдений как Фундаментального каталога слабых звезд (ФКССЗ), так и основного списка КСЗ. Каталог ФКССЗ в Москве был пронаблюден М. С. Зверевым в 1940—1941 гг., однако его наблюдения были прерваны войной, после войны этот список был полностью перенаблюден в ГАИШ группой молодых астрономов под руководством В. В. Подобеда. Полученные при этом каталоги ФКССЗ-41 и ФКССЗ-56 оказались достаточно высокого качества. Наблюдения основного списка КСЗ, проводимые под руководством А. П. Гуляева, близки к завершению (всего около 25 тысяч наблюдений) и войдут в сводный каталог КСЗ.

За последнее время весьма развилась идея составления каталогов звезд на основе специализированных наблюдений. Теория таких каталогов, получаемых по наблюдениям служб времени, приобрела особое развитие благодаря трудам пулковских астрономов Н. Н. Павлова и А. А. Немиро. Первый такой каталог был создан в МГУ М. С. Зверевым на основе наблюдений Службы времени ГАИШ в 1943—1944 гг. в Свердловске. Большая интенсивность наблюдений во время МГГ и МГС позволила Н. С. Блинову составить каталог прямых восхождений звезд, использовавшихся для определения точного времени.

За последнее время внимание астрономов привлекла низкая точность координатной сетки прямых восхождений полярной области. Одним из лучших каталогов прямых восхождений звезд этой области оказался каталог, выполненный в ГАИШ А. П. Гуляевым.

Значительную роль сыграли астрономы МГУ в деле обобщения теории и методов фундаментальной астрометрии. Укажем на моногра-

фию П. И. Бакулина «Фундаментальные каталоги звезд» (1949 г.), обширную работу М. С. Зверева «Фундаментальная астрометрия» в «Успехах астрономических наук» (1950 г.), учебник В. В. Подобеда «Фундаментальная астрометрия» (1961 г.).

Активно занимались астрономы всего мира изучением поступательно-вращательного движения Земли и тел солнечной системы. Следует прежде всего отметить исследование американского ученого Вуларда по разработке теории вращения абсолютно твердой Земли и вычислению огромного количества коэффициентов нутационного разложения. Для изучения неправильностей вращения Земли дали и продолжают давать богатый материал наблюдения, выполняемые на разветвленной сети станций служб широты и служб времени. Широко проводятся наблюдения положений малых планет по выдвинутому в 1935 г. Брауэром плану для определения нульпунктов фундаментальной системы. Наконец, состоявшаяся в 1963 г. в Париже Международная конференция по фундаментальным постоянным подвела итоги многочисленных исследований (астрометрических, небесномеханических, геофизических, космических и др.) в этой области и предложила новую согласованную систему постоянных, утвержденную МАС в качестве международной.

Среди этих научных достижений велика роль советских астрономов. Можно сразу указать, что идея привлечения наблюдений малых планет для определения систематических ошибок фундаментальной системы была тщательно разработана Б. В. Нумеровым и М. Ф. Субботиным еще в 1932 г. Работы Н. С. Самойловой-Яхонтовой и В. И. Орельской подводят первые итоги этих, по-видимому, вполне успешных наблюдений.

Сеть советских служб времени и служб широты, входящая в ГАИШ, имеет вполне самостоятельное значение и распространяет наблюдения международной сети на восточное полушарие, связывая их. Основополагающее значение при изучении движения полюсов имеют труды А. Я. Орлова — основателя Полтавской обсерватории. Благодаря усилиям В. П. Щеглова успешно работает международная широтная станция в Китае. Весьма высокого уровня наблюдений и их анализа достигли советские службы времени и стали одними из лучших в мире. Здесь в первую очередь следует отметить работы Н. Н. Павлова, В. Э. Брандта, М. С. Зверева и А. А. Немиро.

Многое сделали астрономы СССР и по проблеме определения фундаментальных постоянных. Здесь и обзор Н. И. Идельсона системы постоянных, и работы Е. П. Федорова по уточнению нутационных коэффициентов, и определение Н. А. Поповым параметров почти суточной нутации, и полярная труба А. А. Михайлова, специально предназначенная для определения постоянной годичной аберрации, и исследование различных характеристик движения и фигуры Луны в работах Ш. Т. Хабибуллина, А. А. Нефедьева, А. А. Яковкина и Х. И. Поттера.

Не остались в стороне от этих важных проблем и астрономы Московского университета. Организованные Е. Я. Бугославской и выполняемые Т. П. Пережогойной фотографические наблюдения малых планет проводятся на уникальном в СССР широкоугольном астрографе и отличаются высокой точностью. На этом же инструменте Б. И. Козаренко по наблюдениям Луны с камерой Марковича и со специальной кассетой с заслонкой было выполнено определение поправки эфемеридного времени. В работах К. А. Куликова, посвященных анализу пулковских рядов наблюдений широты, были получены поправки постоян-

ных нутации и годичной aberrации. Монографии К. А. Куликова «Изменяемость широт и долгот» (1962 г.) и «Фундаментальные постоянные астрономии» (1956 г.), описывающие и обобщающие методические вопросы и достижения мировой науки, являются фактически единственными в мире по данным разделам. Большое научное значение имеет докторская диссертация М. С. Зверева, заложившая основы современного подхода к анализу астрометрических наблюдений.

Как показывает практика, определение поправки постоянной лунно-солнечной прецессии производилось всякий раз при составлении каждого нового фундаментального каталога. После появления в свет работ Орта изучение вращения Галактики и движения всей солнечной системы стало неотъемлемой частью анализа собственных движений звезд и определения постоянной прецессии. Дальнейшее развитие эти идеи получили в работах Моргана, Высотского и др. С этим же непосредственно связана привязка собственных движений звезд к внегалактическим туманностям для получения их в единой абсолютной системе, получившая в настоящее время широкое применение. Напомним, что собственные движения звезд КСЗ также должны быть привязаны к внегалактическим туманностям.

Фотографические наблюдения внегалактических туманностей по программе, составленной Г. Н. Неуйминым и П. Г. Куликовским, были начаты в СССР с 1939 г. на Пулковской, Московской и Ташкентской обсерваториях, чему весьма способствовали плодотворные исследования А. Н. Дейча и Н. В. Фатчихина. В ГАИШ был составлен дополнительный список звезд около туманностей и в настоящее время ведутся наблюдения на двух астрографах, начатые Е. Я. Бугославской и К. Н. Яхонтовым. Следует отметить также работу Д. К. Каримовой по микрометрическим наблюдениям внегалактических туманностей для вывода постоянной прецессии.

Среди работ, посвященных определению постоянной прецессии из анализов собственных движений звезд, исследования астрономов МГУ занимают особо важное место. Такова работа В. Г. Фесенкова, К. Ф. Огородникова и Н. Н. Парийского, выполненная в 1935 г. на материале каталога Ауверса—Брадлея с привлечением всех самых современных данных. Эта работа не утратила своего научного значения и поныне.

В заключение этого весьма краткого обзора отметим живое участие астрономов МГУ в создании почти всех новейших астрометрических инструментов в СССР: широкоугольного астрографа, нового меридианного круга, широкоугольного зенит-телескопа и фотографической зенитной трубы.