

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ГЕОДЕЗИИ, КАРТОГРАФИИ
И ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Научно-технический сборник

АСТРОНОМИЯ,
ГЕОДЕЗИЯ
И ГЕОФИЗИКА

МОСКВА
2018

УДК 528.2
ББК 22.6; 26.1; 26.2
А 91

А 91 **Астрономия, геодезия и геофизика:** Научно-технический сборник. — М.: Изд-во ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», 2018. — 236 с.: ил. 100. Цветная вклейка — 4 с.

ISBN 978-5-903547-23-4

Научно-технический сборник рассчитан на геодезистов, гравиметристов, астрономов, геофизиков, представляет интерес для научных работников, аспирантов, студентов и всех интересующихся науками о Земле.

Редколлегия сборника:
от Центра геодезии, картографии и ИПД:

д-р техн. наук *Б. В. Бровар*, канд. техн. наук *В. И. Зубинский*, д-р техн. наук *В. И. Кафтан*,
канд. техн. наук *Н. Л. Макаренко*, канд. техн. наук *Г. Г. Побединский*, канд. техн. наук
В. В. Попадъёв, канд. техн. наук *Л. И. Серебрякова*, канд. техн. наук *В. А. Таранов*, канд.
техн. наук *Л. И. Яблонский*

от сторонних организаций:

чл.-корр. *Ю. Н. Авсюк* (РАН), канд. физ.-мат. наук *О. Н. Галаганов* (ИФЗ РАН), канд.
физ.-мат. наук *В. Б. Дубовской* (ИФЗ РАН), чл.-корр. *С. М. Молоденский* (ИФЗ РАН), д-р
техн. наук *Ю. М. Нейман* (МИИГАиК), д-р техн. наук *В. Б. Непоклонов* (МИИГАиК), канд.
техн. наук *Л. В. Огородова* (МИИГАиК), д-р физ.-мат. наук *Г. М. Стеблов* (ИФЗ РАН),
канд. физ.-мат. наук *С. А. Толчельникова* (ГАО РАН), канд. техн. наук *А. П. Юзефович*
(МИИГАиК), д-р физ.-мат. наук *Н. А. Чуйкова* (ГАИШ МГУ)

УДК 528.2
ББК 22.6; 26.1;
26.2

ISBN 978-5-903547-23-4

© Коллектив авторов, 2018
© Издательство ФГБУ «Центр геодезии, картогра-
фии и ИПД», 2018

Посвящается памяти проф. Л. В. Огородовой

Содержание

Методика построения фундамента для астрономических и геодезических исследований до и после «революции в астрометрии XXI в.» (<i>Толчельникова С. А.</i>)	5
К вопросу о методе привязки небесных координат в радиодиапазоне. Радиоизлучение звёзд 1^m — 20^m (<i>Липовка А. А., Липовка Н. М.</i>)	37
Вертикальные движения поверхности земной коры по данным ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014 и их сравнительный анализ (<i>Чуйкова Н. А., Максимова Т. Г., Чеснокова Т. С., Грушинский А. Н.</i>)	78
Новое решение обратной задачи гравиметрии для планет земной группы и его проверка для Земли (<i>Чуйкова Н. А., Насонова Л. П., Максимова Т. Г.</i>)	90
Деформационные неоднородности при подготовке и разрядке сильных землетрясений (<i>Мельников А. Ю., Кафтан В. И.</i>)	114
Задача оптимального линейного оценивания, операторный подход (<i>Цыбанков И. В.</i>)	124
Геодезическая система координат 2011 года (<i>Попадъёв В. В., Ефимов Г. Н., Зубинский В. И.</i>)	139
Памяти Л. В. Огородовой	229

Методика построения фундамента для астрономических и геодезических исследований до и после «революции в астрометрии XXI в.»

Толчельникова С. А.¹

Обзор . . . развития методов определения координат в астрометрии представляет не только исторический интерес — он важен и для уяснения положения, сложившегося в этой науке в наши дни.

Е. П. Фёдоров

Введение

Несмотря на заявления о необходимости преодоления дифференциации науки, процесс обособления научных дисциплин *продолжается с ускорением*, свидетелями чего становятся астрономы и геодезисты XXI в. и те, кто использует результаты этих наук. Ускорению отчуждения между отраслями науки способствовала «революция в физике начала XX в.» [1]. Последствия «революции в астрометрии XXI в.» [2] ещё не вполне осознаны, и перспективы развития астрометрии необходимо обсуждать вместе со специалистами тех отраслей, которые с ней связаны [3, 4]. Таких наук не мало, если учесть, что астрометрия — это наука о измерении пространства и времени [5].

Пространство нетрудно измерить, если есть неподвижные тела, как, например, стены комнаты. На поверхности Земли также существуют тела, движения которых практически незаметны; из-за их незначительности эти движения обнаружили только в XX в. На небесной сфере долгое время искали неподвижную опору, пока не научились использованию проекций движущихся светил для измерения пространства Солнечной системы, затем Галактики и т. д. Необходимо было построить или установить системы координат для изучения движений тел в этих пространствах, и работа в этом направлении началась с установления сферических координатных систем (СКС). В XVIII в. главная СКС стала называться абсолютной. Она осталась фундаментом для всей позиционной астрономии, в которую входят кроме абсолютных также дифференциальные, или относительные, определения координат.

Коренные изменения в системе астрономии были произведены с начала XXI в., они отражены в решениях Международного астрономического союза (МАС). В монографии Х. Вальтера и О. Соверса [2] эти изменения характеризуются как разрыв с традицией предшествующего 300-летнего периода развития классической астрометрии. В книге нет анализа астрометрии упомянутого периода и не представлено мнение авторов о развитии астрономии до XVIII в.: предшествовал ли XVIII в. также разрыв с традицией предыдущих поколений или генеральная линия развития астрономии сохранялась вплоть до XXI в. Ответ на этот вопрос представлен в кратком очерке развития координатных систем (разд. 2). Полагаем, что сведения, приведённые в этом разделе, достаточны для сравнения революционного решения координатной проблемы с традицией построения СКС на протяжении не 300 лет, а нескольких тысячелетий.

Особенности развития и некоторые задачи астрометрии XVIII—XIX вв., а также XX в. рассмотрены соответственно в разделах 4 и 5. Целесообразно ли сохранение генеральной линии, или традиционного

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Россия, Санкт-Петербург, stolchelnikova@gmail.com

«королевского пути»¹ развития астрометрии? С целью дальнейшего обсуждения этого вопроса написаны разделы 6 и 7.

В течение последних 40 лет внимание астрономов сосредоточилось на техническом перевооружении астрометрии. Методическим проблемам не уделялось должного внимания, поэтому решение задач, сформулированных нашими предшественниками, не получило достойного развития и увеличилась разобщенность теоретиков и практиков. Изучение истории помогает понять, на чем было основано единство измерений в науках о небе и Земле, которое привело к созданию единой классической механики.

Развитию методов определения абсолютных координат, необходимых для изучения долгопериодических и вековых движений при использовании технических достижений XX в., посвящен раздел 7. В его второй части изложен новый метод изучения движений полюса и пунктов наблюдений относительно тела Земли, пояснённый ранее в статьях [6, 7]. Решение задачи требует участия геодезистов, его эффективность зависит от восстановления международного сотрудничества.

1. Основные установки «революции в астрометрии XXI в.»

Nothing will remain the same as it was before.

H. Walter, O. Sovers [2, с. 211]

Слова, вынесенные нами в эпиграф к этому разделу, отражают мнение не только авторов монографии [2], но и влиятельных специалистов в области радиоастрономии, а также некоторых астрономов — оптиков, активно участвовавших в подготовке «революции». Их стремление верно отражено в словах эпиграфа, однако изменить **всё** невозможно без изменения человека, который является «мерой всех вещей» (Протагор). В статье [3] был перечислен ряд неосуществлённых предложений, как, например, отказ от метода координат, которые предлагалось заменить дугами — непосредственно измеряемыми значениями угловых расстояний между проекциями. Мы ограничимся здесь перечислением тех основополагающих принципов новейшей астрометрии, которые связаны с революционной концепцией построения главной опорной СКС, а также декартовой системы — триады, необходимой для изучения пространственных движений тел.

Резолюцией Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (МАС) 1997 г. был утверждён переход астрономии и связанных с ней наук с 1 января 1998 г. от использования опорных каталогов серии FK на Международную небесную опорную систему ICRS (International Celestial Reference System). Начало этой триады находится в барицентре Солнечной системы, а оси направлены на координаты, связанные с радиоисточниками: квазарами и точечными радиогалактиками.

Установлена также опорная сферическая радиосистема ICRF (International Celestial Reference Frame), она не была представлена конкретным опорным радиокаталогом, но были предложены координаты 212 подходящих для астрометрии точечных радиоисточников, число которых к настоящему времени почти на порядок увеличилось. Из аргументов, выдвинутых для пояснения необходимости перехода на опорную радиосистему, три — относятся к успехам, которые считаются уже достигнутыми, четвертый и пятый — связываются с достижениями ближайшего будущего.

1. Объявленная точность измерений дуг — угловых расстояний между радиоисточниками — методами РСДБ характеризуется ошибкой $0,001''$, которая недостижима в оптической астрометрии, и одновременно с этим определяются координаты в автономной земной системе с ошибкой менее 10 мм [8, с. 15].

2. Опорные радиоисточники являются внегалактическими объектами, поэтому они не должны обнаруживать так называемых собственных движений. Следовательно, радиокаталог окажется практически вечным, а не «скоропортящимся продуктом», каким, по словам А. А. Михайлова [9], являются звёздные каталоги. Относительно координат такого радиокаталога, по мнению МАС, удобно будет определять угловые смещения проекций *всех объектов*, изучением движений которых занимаются астрономы и геодезисты.

3. Опорная триада ICRS связывается с релятивистской небесной механикой посредством учёта релятивистских поправок. Предполагается, что, после этого в эфемеридах небесных тел будет обеспечен миллисекундный уровень точности [10].

¹Выражение Х. Эйхгорна.

4. Считается, что ошибки, вызванные рефракцией радиоизлучения в атмосфере Земли, могут достигать $0,01''$, но по мере увеличения базы радиоинтерферометров они должны существенно уменьшиться [8, с. 30–38].

5. В. С. Губанов и А. М. Финкельштейн прогнозируют также значительное повышение точности радионаблюдений тел Солнечной системы в ближайшем будущем [10].

Переход на опорную радиосистему начал обсуждаться в 70-е годы прошлого века, и тогда препятствием считалось недостаточное количество радиозвёзд — источников, излучающих в обоих диапазонах волн: число радиозвёзд не превосходило 80, и они были неравномерно распределены по небесной сфере; к настоящему времени авторы насчитывают ещё меньше радиозвёзд [11]. Е. П. Федоров в работе «Общий взгляд на астрометрию» [12] привёл слова «одного американского астрофизика», который сказал: «Дайте мне полтора квазара, и я построю координатную систему». Это заявление объясняется тем, что для перехода от измеренных дуг к координатам математику не хватает трех чисел, на практике проблема выглядит иначе.

Установленная по решению МАС, связь ICRF с фундаментальной оптической системой основана на использовании экватора каталога FK5 (переведённого на среднюю эпоху наблюдений 1991,25) и динамического равноденствия (координат точки Весны, вычисленных по правилам небесной механики) на эпоху J2000.0. Связь, основанная только на общности экватора и нуля-пункта, не может обеспечить внутреннего согласия координат объектов двух СКС. Подобные решения свидетельствуют о том, насколько далеки радиоастрономы от исторической практики построения и связи координатных систем.

Заслуживает внимания ещё одно нововведение: в установленной вслед за триадой системе ICRF, как и в опорной барицентрической триаде ICRS, точки на сфере практически бесконечного радиуса заменяются направлениями трех осей, начала которых находятся в барицентре Солнечной системы. На эпоху установления сохранено традиционное направление координатных осей: ось x направлена в точку с координатами $\alpha = 0^h$, $\delta = 0^\circ$, ось y — в точку $\alpha = 6^h$, $\delta = 0^\circ$, ось z — в полюс $\delta = 90^\circ$.

Для сферической координатной системы с практически бесконечным радиусом и, следовательно, с неопределённым положением центра необходимое и достаточное число координат равно двум. Нуль-пунктам их отсчёта соответствуют два больших круга на сферической поверхности, которая должна быть гладкой, и поэтому третья точка на сфере не нужна. Два больших круга и одна из точек их пересечения одновременно задают две СКС.

В разделе 6 этой статьи мы обсудим влияние решения МАС на современную астрономию и геодезию. **Предварительно необходимо сравнить метод установления новой Международной опорной радиосистемы с тем способом определения каталожных координат звёзд, от которого теперь отказались, т. е. обратиться к истории.**

2. Краткая история сферических координатных систем (СКС)

Изучение относительных движений не требует неподвижной системы отсчёта.

Н. И. Идельсон

Рождение астрономии как науки не датируется началом наблюдений за положением небесных светил, которые производились задолго до этого. Можно представить, что первыми наиболее важными для человека были наблюдения восходов и заходов Солнца, дающего тепло и свет. Для этого у пещерного человека, сфера обитания которого ограничена горизонтом, была СКС, созданная самой Природой: линия горизонта служила большим кругом, от которого отсчитывались высоты, от горы или возвышенности на горизонте можно было отсчитывать азимуты — вторую координату. Вероятно, прошло немало времени до того, как поняли, что для определения начала сезонов и организации счёта времени необходимы также наблюдения восходов и заходов звёзд и Луны.

Двигаясь за пределы сферы обитания, человек убеждался, что высоты звёзд, отсчитанные от разных горизонтов, непрерывно изменяются. Народы северных стран, повествуя о начале своей астрономии, упоминают о придуманных ими названиях близполюсных созвездий и о неподвижной точке, вокруг которой вращается сфера звёзд. Эта точка до сих пор сохранила своё древнее название «полюс Мира». Полюсу Мира соответствует небесный экватор — большой круг, от которого отсчитывают

склонения δ ; вторую координату (часовой угол, t) отсчитывают от меридиана места — круга, ортогонального экватору и проходящего через полюсы двух больших кругов: зенит и полюс Мира. В своих лекциях по астрономии Гаусс утверждал: «Прежде главным для нас кругом был горизонт, теперь главным кругом является меридиан места» [13, с. 328]. Вместе с созданием первых инструментов для производства наблюдений возникло понимание того, что от зенита координаты отсчитываются точнее, чем от горизонта.

Нам трудно представить, как передавались сведения о наблюдениях и сколько веков потребовалось, чтобы найти точку на сфере более неподвижную относительно звёзд, чем полюс Мира, а именно полюс эклиптики, которую мы представляем теперь плоскостью движения центра тяжести системы Земля—Луна. Полюс Мира считался неподвижным не только относительно звёзд до тех пор, пока не обнаружили прецессии по δ , но и относительно Земли — пока не обнаружили изменения земных широт ϕ (XX в.). Полюс эклиптики считался неподвижным относительно звёзд вплоть до обнаруженных Тихо Браге (XVI в.) изменений эклиптических широт β .

Можно ли было признать зодиак — путь Солнца неподвижным относительно Земли? Наблюдения убеждали в том, что каждые сутки траектория Солнца изменяет свой наклон по отношению к горизонту и пересекает его в разных точках. Сначала «перенесли» на небесную сферу пояс зодиака, соответствующий годичным изменениям в положениях Солнца относительно горизонта, в пояс вошли те созвездия, которые в течение года проходило Солнце. Невозможность одновременных наблюдений Солнца и звёзд создавала трудности, о способах преодоления которых мы не будем напоминать. Очевидно, необходим был анализ изменений положений Солнца не только по отношению к горизонту (или зениту), но и по отношению к полюсу Мира, или небесному экватору, обнаружению которого способствовало то обстоятельство, что во время движения Солнца по нему на всей Земле день равен ночи. Отсюда происходит первоначальное название экватора — равноденственный круг.

Несмотря на невозможность одновременных наблюдений Солнца и звёзд, астрономы древности сумели выделить в поясе зодиака круг — траекторию годичного движения Солнца среди звёзд. Путешествующим по морю и по суше нужно было ориентироваться (определять положение и время) и по звёздам, и по Солнцу. Это помогло связать не только экватор, но и зодиак (эклиптику) с кругами на Земле: тропиками и полярными кругами. После определения зодиакального круга (эклиптики) как собственного движения Солнца по звездной сфере стал возможным вывод уравнения времени, воспроизведённого Птолемеем в «Альмагесте» [14].

Очевидно, соответствие небесных и земных кругов необходимо для путешествующих по морю и по суше и всем людям для определения времени. Связь небесных и земных кругов помогла определению положений климатических поясов, не потребовав путешествий от полюса до полюса, и создала возможность использовать координаты звёзд при геодезических измерениях. Вероятно, известны и более ранние измерения Земли, чем общеизвестные измерения Эратосфена, которые были бы невозможны, если бы небесные координаты Солнца не проектировались на сферу Земли — естественную для землян систему отсчёта.

С тем же основанием можно сказать, что земные круги проектируются на хрустальную (твёрдую) небесную сферу, вращающуюся относительно Земли вместе с неподвижными на ней звёздами, блуждающими планетами, а также Солнцем и Луной, двигающимися по своим кругам. Птолемей полагал, что звёзды вместе с небесной сферой движутся относительно равноденственного круга, считал неподвижным экватор и точки пересечения его с эклипстикой. Мнение Птолемея о неподвижности равноденственных точек было основано на его уверенности в постоянстве тропического года, хотя ещё жрецам Древнего Египта было известно о непостоянстве тропического года.

Коперник установил, что тропический год изменяется быстрее звёздного года. Он считал постоянными эклиптические широты звёзд; до обнаружения их изменчивости Тихо Браге ещё оставалось около 50 лет. Изменения эклиптических широт считались столь незначительными, что в эпоху Ньютона их влиянием на движения планет пренебрегали. На звёздной сфере ещё оставалась одна практически неподвижная точка и эклиптика — круг, связанный с ней.

Историки утверждают, что цивилизациям Древнего Египта, Вавилона и народа майя было известно предвращение равноденствия, для чего необходимы очень продолжительные (вековые) наблюдения за изменением положения точек пересечения двух небесных кругов относительно звезд. Предполагалось,

что равноденственные точки движутся по эклиптике. Богатое наследие древнейших цивилизаций было освоено и преумножено учёными Древней Греции. Например, греки уточняли те измерения, которые производили их предшественники: значение предварения равноденствий и угла наклона эклиптики к экватору ϵ . Они сумели с достаточной точностью определить неравную продолжительность сезонов для своей эпохи [15, с. 317]. Грекам античности были известны положения климатических поясов на сфере Земли. Об этом писал Птолемей, интересно упоминание Коперника о земных поясах в «De Revolutionibus» [16, с. 84–85].

Несомненно, астрономов античности интересовали вековые изменения климата, связанные с изменением угла между экватором и эклиптикой. Такие незначительные изменения, которые в дальнейшем обнаруживались по измерениям, не могли быть уверенно определены по наблюдениям того времени. Требуется длительные наблюдения, продолжительностью хотя бы в половину всего цикла, который, по современным представлениям, равен примерно 26 тыс. лет, чтобы уверенно определить изменения положений климатических поясов.

Итак, мы можем утверждать, что *три СКС, связанные по построению*, использовались в астрономии ещё за тысячелетия до нашей эры, и с описания трех СКС и вывода формул связи между ними начинались курсы общей астрономии и астрометрии вплоть до второй половины XX в. Высота полюса Мира над горизонтом равна географической широте места, или угловое расстояние между горизонтом и экватором равно $90^\circ - \phi$, потому что экватор является общим большим кругом для небесной и земной сфер. При изменении положения экватора *по отношению* к звёздам изменяются их склонения, а в случае изменений его положения по отношению к горизонтам, изменялись бы широты мест.

Вот как об этом писал Бируни в «Каноне Масуда»: «Расстояние зенита от небесного экватора называется широтой данного места, хотя правильнее было бы назвать его склонением, ибо широта города — расстояние его от линии экватора. А эта линия — подобие небесного экватора, тогда как расстояние от небесного экватора называется склонением» [17, с. 90]. Бируни пишет о том, что склонения пунктов — расстояния от земного экватора были названы широтами. Птолемей упоминает, что расстояния пунктов от земного экватора правильнее было бы назвать их склонениями [14].

От одной из общих точек равноденственного круга и зодиака (небесного экватора и эклиптики) отсчитываются прямые восхождения и эклиптические долготы. Бируни писал: «Среди небесных кругов есть такие, которые присущи только небу, а есть такие, которые общи для неба и Земли» [17, с. 86]. Вероятно, он считал зодиакальный круг присущим только небу, хотя можно предположить, что наклон этого круга к экватору Земли был определён примерно за тысячу лет до н. э., когда тропики Рака и Козерога получили свое название, соответствующее положению Солнца в этих созвездиях в те дни года, когда максимальные уклонения Солнца от небесного экватора достигали $23^\circ 26'$ к северу и к югу.

Ещё задолго до измерений координат созвездия, отличающиеся по конфигурации и яркости звёзд, были удобны для определения положений блуждающих светил по отношению к ним. Поскольку изменения эклиптических долгот l считались постоянными, а широты β — неизменяющимися, рисунки зодиакальных созвездий могли использоваться долгое время для изучения движений проекций планет. Когда же появилась координатная сетка, то в первые звёздные каталоги заносились эклиптические координаты звёзд, потому что система счёта времени была связана с движением Солнца.

Астрономы и астрологи Древнего Вавилона, зная о связи небесных кругов и запомнив координаты созвездий, умели определять точки пересечения зодиакального круга с горизонтом места наблюдения, чтобы определить дату, и отметив звезду, проходившую через меридиан, также время суток на момент какого-либо события, например рождения человека. Астрологам эти данные вместе с расположениями планет в созвездиях («звездных домах») необходимы были для составления гороскопов.

В нашу задачу не входит описание инструментов и способов, которые использовались для определения положений небесных кругов и светил в разные исторические эпохи. Очевидно, всех удовлетворяла возможность, производя измерения в горизонтальной СКС, перевести полученные координаты в другую систему, более удобную для изучения движений и определения времени. Такая возможность обеспечивалась связью между тремя СКС, о которой мы напомним. Формулы перевода координат из одной СКС в другую относятся к числу сведений, усваиваемых студентами с начала их обучения астрономии.

Целью астронома было сохранить для потомства неоспоримые факты: положения всех наблюдаемых светил относительно места своего наблюдения. Место наблюдения определялось *неподвижным* горизонтом, или зенитом. Наблюдаемые значения относительных положений фиксировались на определённый момент времени и позволяли определить положения небесных кругов по отношению к горизонту. Чтобы перейти к относительным *движениям* светил и кругов, необходима система счёта времени. Эта тема требует отдельного исследования. Мы не отступаем от принятого в астрономии порядка изложения, начинающегося с определения координат; вопрос исчисления времени рассматривается после этого.

Древнейшие системы времени создавались на основе сравнения периодов различных движений и явились очень давно, вероятно, когда ещё не было трех СКС. В письменных источниках, до нас дошедших, используется уже сложившаяся к тому периоду система счёта времени. Уточнённая Коперником система счёта времени легла в основу григорианского летоисчисления, в последующие века продолжалось уточнение относительных положений проекций светил и кругов, а также потребовались более точные *отсчёты времени без пересмотра всей системы.*

Переход от наблюдаемых относительных положений к относительным сферическим движениям и скоростям не только проекций светил, но и трех СКС позволяет **найти наиболее подвижный круг, или его полюс, что было бы невозможным, если бы сохраняли только два круга или один. Человечество неизбежно запуталось бы в постижении всего многообразия относительных движений.**

Мы упоминали о точках на небесной сфере, которые считались неподвижными в разные исторические эпохи, однако не было принципиальной необходимости в таких предположениях. Дальнейшая история это подтвердила, показав, что возможность определения относительных движений зависела, прежде всего, от продолжительности наблюдений; точность измерений координат имеет большое значение для изучения короткопериодических движений. Человечество постепенно убеждалось в том, что нет во Вселенной неподвижных ни кругов, ни тел, ни их проекций — всё движется, но с разными скоростями.

Итак, мы можем повторить слова эпитафии этого раздела или то, о чём неоднократно писали прежде: непосредственно из наблюдений определяются только относительные движения.

3. От относительных движений — к движениям абсолютным

Теперь рассмотрим то, что мы получили от Птолемея и других древних, а потом уже то, чему научили нас более позднее время и опыт.

Солнце, как бы восседавая на царском троне, правит обходящей вокруг него семьёй светил.

Н. Коперник

Тема статьи не требует описания перехода от движений проекций планет по небесной сфере к движениям тел в пространстве, но краткое напоминание о самом интересном периоде развития астрономии в эпоху Возрождения, когда была создана гелиоцентрическая система мира, необходимо для понимания *терминологии* и особенностей успешного развития позиционной астрономии XVIII—XIX вв.

Как известно, трудности средневековой астрономии были связаны с поисками объяснения второго вращения восьмой небесной сферы, т. е. объяснения предварения равноденствия вращением этой сферы относительно неподвижной Земли. Средневековые астрономы искали механическое объяснение движений сфер, с которыми связывались наблюдаемые светила, и в созданных ими моделях строения всей Вселенной число сфер, пустых и несущих планеты, увеличилось до многих десятков.

Разграбление Константинополя участниками крестового похода 1204 г. способствовало распространению античных рукописей в Западной Европе и становлению эпохи Возрождения. Освоение научного наследия античности придало мощный импульс развитию математики и астрономии. Коперник — один из титанов эпохи Возрождения охватил мысленным взором результаты счёта времени в течение двух тысячелетий: от эры Набонассара (747 г. до н. э.) и наблюдения, начиная с отражённых в «Альмагесте», до своего времени. Он по заслугам оценил труд Птолемея, использовал также наблюдения

арабских астрономов и более поздних европейских, а также свои наблюдения, чтобы распутать узел накопившихся проблем.

Выступив на закате античной культуры, Птолемей подвёл итог изучению видимых движений небесных светил и создал геоцентрическую систему, представленную таблицами движений (численной моделью), которые использовались для вычислений видимых движений Солнца, планет и Луны вплоть до конца XV в. При этом Птолемей не отразил всех исканий и результатов астрономов античной Греции, многие идеи которых не были им восприняты.

В отличие от «Альмагеста» Птолемея гениальный труд Коперника явился не только итогом развития астрономии предшествующих тысячелетий, но — зарёй нового периода развития астрономии и всех наук, связанных с ней. Целью новой астрономии стало изучение движений тел Солнечной системы в пространстве. Для доказательства гелиоцентрической теории Копернику пришлось реформировать (уточнить) систему счёта времени, а также объяснить видимые движения всех светил, исходя из присвоения Земле трёх движений: вращательного, орбитального и прецессионного [18].

Гелиоцентрическая теория Коперника не была доктриной, какой считали её некоторые авторы в XX в. Опираясь на факты наблюдений, Коперник пришёл к созданию гелиоцентрической теории строгим индуктивным методом, поэтому обнаружение годичных абберационных и параллактических смещений звёзд следовало бы называть не доказательствами этой теории, а её последующими подтверждениями [19, с. 200].

Используя отношения размеров деферентов орбит планет в античной теории их геоцентрических движений, Коперник определил значения расстояния планет от Солнца по отношению к радиусу орбиты Земли (*orbis magnus*). Расстояния, выраженные в астрономической единице (а. е.), астрономы используют до сих пор.

Визуальные наблюдения не позволяли обнаружить годичные параллактические смещения звёзд, но планеты — сравнительно близкие тела, и Коперник сумел выделить параллактическую часть в наблюдаемых движениях их проекций, считая оставшуюся часть собственными движениями проекций планет. В своих лекциях Гаусс начинает изложение системы Коперника с таких слов: «Учение о параллаксе составляет переход от сферической к теоретической астрономии (небесной механике — *C. T.*), ибо уже оно показывает, что не всякое место может быть центром мира» [13, с. 412].

Гелиоцентрическая теория устранила главное препятствие на пути перехода от механики Аристотеля, различной для земных и небесных движений, к единой механике Ньютона [20], которую мы называем теперь классической¹. Появился новый метод изучения движений — динамика и небесная механика, созданные Ньютоном и его последователями: астрономами и небесными механиками последующих поколений.

Аристотель считал силу причиной движения: сила мышц позволяет двигаться людям и животным, сила ветра и воды приводит в движение тела. В механике Ньютона сила является не причиной движения, а причиной его изменения [21, с. 12]. Движение имманентно присуще телам и частицам. Сила изменяет скорость тела, в частности, выводит его из состояния относительного покоя, изменяя скорость $v = 0$.

В теории Коперника планеты движутся относительно точки очень близкой к Солнцу. Ньютон сохраняет за Солнцем право на инерциальное, прямолинейное и равномерное движение [22]. Он называет **абсолютным движением, определяемое по силам взаимодействия и наблюдаемым относительным движениям**, поясняя, что относительных движений у каждого тела множество, но абсолютное движение **единственное, связанное с центром тяготения той конкретной системы тяготеющих тел, в которую входит тело**.

Наблюдения астрономов начиная с XIX в. обнаружили множество практически изолированных друг от друга систем тяготеющих тел (двойные и кратные звёздные системы, звёзды, окруженные планетами). Для каждой из перечисленных систем устанавливается отдельная система координат, первоначально связываемая с центром *проекции* наиболее массивного из тел; после определения масс звёзд в двойной системе возможен переход к движениям звёзд. В Галактике, где движутся звёзды и звёздные системы, изучение начиналось с определения наблюдаемых сферических движений проекций звёзд

¹Это единство утрачено в релятивистской механике [21, с. 13].

относительно Земли (Солнца). Аналогично происходило и в истории изучения Солнечной системы, но здесь наблюдались движения проекций планет, Солнца и Луны не только по отношению к Земле, но и по отношению к звёздам.

Для поиска центра обращений множества объектов, входящих в Галактику, была установлена галактическая СКС, и кинематические методы использовались для определения центра обращений в пространстве Галактики, т. е. абсолютных галактоцентрических движений, хотя движения определялись и продолжают уточняться не по силам взаимного тяготения. Идея установления одной СКС или изучения движений всех тел в одной триаде не могла быть плодотворной даже в мире, ограниченном Солнечной системой: Луна вращается относительно Земли, спутники — вокруг своих планет.

Земля была и остаётся системой отсчёта положений и скоростей для тел, движущихся по её поверхности, и присвоение телам присущих им индивидуальных движений с разными скоростями не вызывало и не вызывает возражений. В древности предполагали, что планеты движутся с разными скоростями по хрустальной небесной сфере, по её «звёздным домам». Почему же тела, движущиеся в пространстве, не должны иметь индивидуальных скоростей и для них в арсенале астрономии должны оставаться только относительные движения и скорости? Такое требование могло исходить только от физиков и философов, которым неведома ни история изучения движений в создаваемых (устанавливаемых) координатных системах, ни происхождение динамики [1, 21].

Итак, для изучения пространственных движений всех объектов, входящих в разнообразные системы тяготеющих тел, необходимо установить декартову СК (триаду), связанную с центром тяготения, определить расстояния от его начала до тел, используя единицу расстояний, подходящую для этой системы. Физики XX в., которые считали, что все движения можно определять по отношению к мировому эфиру, так же как их оппоненты, не были знакомы ни с практикой построения координатных систем, ни с аксиоматикой классической механики, чётко изложенной и пояснённой Ньютоном в «Математических началах натуральной философии» (философии естествознания, куда входит и физика) [20].

Физики ограничились чтением «Механики» Э. Маха, который, будучи узким специалистом в области механики, претендовал на решение вопросов философии (об этом см. [23]). Критикуя аксиоматику Ньютона, Мах обвинял создателя динамики в использовании нематериальных понятий (абсолютное пространство, время, движение). Мах не понимал, что в любой отрасли математики необходимы абстрактные (идеальные) понятия, создаваемые на основе всеобъемлющего обобщения исторического опыта. Вслед за Махом А. Пуанкаре, А. Эйнштейн и специалисты, усвоившие релятивистские представления, призывали к сохранению в арсенале физики и астрономии только относительных движений; дело дошло до утверждения о равноправии систем Птолемея и Коперника [19, с. 201].

4. Абсолютный метод определения координат и астрономия XVIII—XIX вв.

Для построения нашей теории мы имеем тем более вспомогательных средств, чем больший промежуток времени прошёл от предшествующих нам создателей этой науки, с найденными результатами которых можно будет сравнить те, которые вновь получены также и нами.

Н. Коперник

Наиболее существенными предпосылками для успешного развития астрономии рассматриваемого периода были научные и технические достижения трёх предшествующих веков.

1. Изобретение телескопов позволило уменьшить ошибки измерений, благодаря чему стали возможными определения прежде неуловимых изменений в движениях. Распространение морских хронометров и точных маятниковых часов в обсерваториях привело к упрощению определения времени

и долгот по отношению к портам приписки судов. Сложные хронометрические экспедиции предпринимались для наиболее точной связи долгот разных обсерваторий.

2. Перемещения наблюдателя в течение суток не отражаются на значениях эклиптических широт звёзд. **Учитывая потребности практики**, в звёздных каталогах стали публиковать вместо эклиптических экваториальные координаты звёзд. Кроме того, в XVIII в. начинается публикация астрономических ежегодников. Связь небесного и земного экватора всегда использовалась для определения широт φ , прямые восхождения звезд α использовались для определения долгот λ . С другой стороны, учёных интересовало уточнение вращения и обращения Земли, колебаний её оси, зависящих от притяжения Луной и Солнцем экваториального утолщения Земли. Уточнение движения платформы, с которой проводятся наблюдения, необходимо для уточнения сферических координат небесных тел, в первую очередь тел Солнечной системы.

Таковы причины перехода на публикацию экваториальных координат в каталогах, которые стали издаваться значительно чаще. **Решение практических и научных задач шло рука об руку.**

3. Обработка каталожных наблюдений значительно упростилась, поскольку вместо сложных уравнений с трансцендентными функциями стали решать линейные уравнения, определяя *поправки* к координатам звёзд в предыдущие эпохи.

4. Создание динамики привело к развитию аналитических методов небесной механики, доступным стал новый метод определения элементов орбит тел Солнечной системы по силам взаимодействия и начальным условиям — значениям координат и скоростей тел. Определение начальных условий требует обращения к наблюдениям в СКС.

5. Расширился круг людей, занятых решением задач астрономии, появились не только обсерватории при университетах, но и государственные обсерватории: Парижская, Гринвичская, Пулковская и Вашингтонская. Наряду с решением практических задач государственной важности, в обсерваториях решались методические и теоретические проблемы. Фундаментальная астрономия — так называлась точная наука, опирающаяся на нерасторжимость астрометрии и классической небесной механики, а также геодезии. Первый директор Пулковской обсерватории В. Я. Струве является примером соединения в одном лице астронома широкого профиля и геодезиста.

Метод наблюдений, который использовался для создания звёздных каталогов в этот период, назывался абсолютным, но до его изложения поясним *происхождение* термина «абсолютный» применительно к координатам звёзд. Оно объясняется стремлением на практике установить систему координат, необходимую для уточнения гелиоцентрических движений, *которые приближались бы по точности к тем идеальным, математическим движениям аксиоматики «Начал», которые Ньютон назвал абсолютными.* Название движений связано также с понятием «абсолютное пространство», которое в эпоху Ньютона соответствовало пространству Солнечной системы, и абсолютными стали называть каталоги, методы наблюдений и сферические координаты звёзд в каталогах, необходимых для решения научных и практических задач эпохи. Разумеется, всё, что связано с измерениями, не может быть математически точным [5], поэтому *необходимо сопровождать* значения измеренных величин и результатов значениями их ошибок.

Сферические координаты звёзд, дополненные единицей измерения расстояний и значениями изменений координат планет между эпохами наблюдений каталогов, создавали достаточно точное приближение к математическому пространству, в котором развивалась теория гелиоцентрических движений. Решение последней задачи получило наибольшее продвижение в рассматриваемые века.

Самыми известными являются абсолютные каталоги обсерваторий: Гринвичской, Пулковской и Вашингтонской. Некоторые расхождения в используемых инструментах и способах вывода координат в данном случае несущественны. Основная идея — общая: в меридиане устанавливались инструменты массивные, что придаёт им устойчивость, необходимую в течение длительного времени. Одновременно устанавливались меридианные миры для контроля устойчивости инструмента по азимуту, кроме того, некоторые параметры его установки сохранялись в уравнениях наблюдений и определялись вместе с искомыми поправками к координатам звёзд и Солнца из решения уравнений.

Абсолютным способом определялись координат ярких звёзд преимущественно в государственных обсерваториях. Координаты других звёзд приводились в систему абсолютного каталога с помощью

дифференциальных, или относительных, наблюдений. Объяснения происхождения термина *абсолютные* недостаточно для понимания преимущества абсолютных каталогов и методов по сравнению с относительными.

Определение относительных координат основано на использовании опорных звёзд с уже известными координатами либо координат места наблюдения. Измерения угловых расстояний по α и по δ между местами опорных и определяемых звёзд производятся за короткий промежуток времени, что позволяет «привязать» последние к опорным звёздам или распространить систему опорных звёзд на более слабые звёзды.

При абсолютных наблюдениях определялись поправки ко всем координатам наблюдаемых звёзд и склонениям Солнца, к широте места наблюдения и параметрам установки инструмента, включённым в уравнения наблюдений, а также поправка часов. **Абсолютные координаты звёзд называют также независимыми от их значений в каталогах прошедших эпох.**

Переход от определений координат к определениям их поправок поставил последние в зависимость от начальных значений координат, которые используются при вычислении разностей « $o-c$ », т. е. свободных членов, стоящих в правой части уравнений наблюдений. Однако искомые абсолютные координаты, которые являются суммой начальных значений и поправок, от использованных начальных значений не зависят, что можно проверить, внося небольшие изменения в начальные значения. *Абсолютное значение координаты* (сумма начального значения и поправки) не изменится, отсюда абсолютные координаты называют независимыми.

Для определения абсолютных склонений звёзд и широт измеряются зенитные расстояния одних и тех же звёзд, каждая из которых наблюдается в обеих кульминациях:

$$\left. \begin{aligned} |\varphi - \delta| &= z_{\text{в. к.}}, \\ 180^\circ - |\varphi + \delta| &= z_{\text{н. к.}} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Между разноимёнными кульминациями одной и той же звезды проходит 12 ч, за это время изменяются и установка инструмента, и атмосферные условия, что увеличивает ошибки результатов по сравнению с ошибками измерений угловых расстояний.

Звёзды, которые наблюдаются в двух кульминациях, мы называем главными, потому что по отношению к ним будет определено положение нового экватора для отсчёта широты места, которая используется для вывода склонений Солнца и звёзд, наблюдавшихся только в одной кульминации. Для этого служат формулы

$$\left. \begin{aligned} |\varphi - \delta_i| &= z_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \\ |\varphi - \delta_\odot| &= z_\odot. \end{aligned} \right\} \quad (4.1')$$

Здесь и далее мы не рассматриваем известной процедуры перехода от мгновенных значений координат звёзд к их средним значениям.

Для определения начала отсчёта прямых восхождений в абсолютном каталоге новой эпохи следует определять склонения Солнца из уравнений (4.1'). Оно два раза в году пересекает экватор, когда его склонение обращается в нуль. В момент весеннего пересечения экватора $\delta_\odot = 0$, и прямому восхождению Солнца также присваивается нулевое значение. Такова простая идея, лежащая в основе метода определения нуля-пункта на экваторе новой эпохи. Координаты Солнца связаны с углом ε между эклиптической и экватором следующим соотношением:

$$\operatorname{tg} \varepsilon \sin \alpha_\odot = \operatorname{tg} \delta_\odot.$$

Переходя к уравнениям в поправках, получим:

$$\Delta \alpha_\odot \cos \alpha_\odot \operatorname{tg} \varepsilon + \Delta \varepsilon \sin \alpha_\odot \sec^2 \varepsilon = \Delta \delta_\odot \sec^2 \delta_\odot. \quad (4.2)$$

В правой части уравнений (4.2) стоят полученные из решения уравнений (4.1') поправки склонений Солнца, которое наблюдали в течение нескольких лет, чтобы определять поправки прямых

восхождений Солнца $\Delta\alpha_{\odot}$ и угла $\Delta\epsilon$. Очевидно, наиболее выгодными являются наблюдения вблизи солнцестояний для определения $\Delta\epsilon$ и вблизи равноденствий — для определения поправки $\Delta\alpha_{\odot}$. В момент весеннего равноденствия $\Delta\alpha_{\odot} = \Delta A$. Эта поправка необходима для определения начала отсчёта прямых восхождений в каталоге новой эпохи, она является общей поправкой для всех звёзд.

Для каталога новой эпохи необходимо также уточнить прямые восхождения каждой наблюдаемой звезды, используя её прохождения через меридиан Большого пассажного инструмента (в Пулковке) или меридианного круга (в Гринвиче). **Для вывода неизвестных, входящих в уравнения (4.3), также необходимы главные звёзды, наблюдаемые в двух кульминациях:**

$$\left. \begin{array}{l} \text{в. к.:} \\ \Delta k \sin z + \Delta i \cos z - \Delta u \cos \delta_{\pi} + \Delta \alpha_{\pi} \cos \delta_{\pi} = \\ = (o - c)_T; \\ \text{н. к.:} \\ \Delta k \sin z' + \Delta i \cos z' - \Delta u \cos \delta_{\pi} + \Delta \alpha_{\pi} \cos \delta_{\pi} = \\ = (o - c)'_T. \end{array} \right\} \quad (4.3)$$

Уравнения (4.3) приведены к единичному весу, в правой части уравнений находятся разности моментов прохождений звёзд через меридиан, отмечаемых по часам и вычисленных по значениям прямых восхождений звёзд в каталоге предыдущей эпохи (начальным значениям). Через Δk обозначена поправка абсолютного азимута, Δu — поправка часов, Δi — поправка общего наклона оси инструмента, α и δ — координаты близполюсной звезды. Поправка Δi изменяет знак после перестановки горизонтальной оси инструмента на 180° , она определялась после перекладки оси, которая производилась не чаще чем через год в течение периода наблюдений, продолжавшегося около пяти лет. Надеялись на стабильность положения оси в течение столь продолжительного времени.

Возможность определения поправки абсолютного азимута появляется благодаря различию коэффициентов перед неизвестным Δk в уравнениях верхней и нижней кульминаций одной и той же звезды. Разделить неизвестные Δu и $\Delta \alpha$ невозможно, поскольку они входят во все уравнения с одинаковыми коэффициентами, но можно найти разности прямых восхождений звёзд, также звёзд и Солнца, и любых светил, наблюдавшихся в одни и те же сутки, пока поправка часов не изменялась.

С точкой весеннего равноденствия связан также отсчёт времени. Поэтому наблюдались прохождения через меридиан Солнца и звёзд широкого экваториального пояса, которые называли звёздами Маскелайна, или часовыми звёздами, с целью определения разностей

$$\Delta\alpha_{\odot} \cos \delta_{\odot} - \Delta\alpha_e \cos \delta_e = T_{\odot} - T_e, \quad (4.4)$$

где индекс e относится к звёздам экваториального пояса.

Моменты прохождений отсчитывались по часам, выставленным в соответствии с прямыми восхождениями в каталоге прошлой эпохи, что когда-то было необходимо для определения разности между истинным солнечным и звёздным временем, но в эпоху государственных обсерваторий хорошо известно без наблюдений.

Дневные наблюдения отягощены большими ошибками, поэтому от них отказались. Стали выравнивать цепным способом прямые восхождения звёзд, полученные в разные ночи, выравненные значения α принято называть абсолютными с точностью до постоянной поправки равноденствия ΔA . Для перехода к абсолютным прямым восхождениям, к выравненным прямым восхождениям звёзд добавляли общую поправку равноденствия ΔA , определённую по наблюдениям склонений Солнца из уравнений (4.2). **Ньюком заметил, что этот способ является единственным, воплощающим идею фундаментальных определений абсолютных прямых восхождений звёзд** [24, с. 320].

Мы не задерживаем внимание читателя на существовавших разногласиях в методах государственных обсерваторий, которые приводили к систематическим расхождениям координат в их каталогах, заметно превосходящим случайные ошибки результатов наблюдений в отдельных обсерваториях.

П. И. Яшнов отметил, что Пулковое является почти единственной обсерваторией, из наблюдений которой была выведена безусловно независимая система координат звёзд [25].

В момент весеннего равноденствия, когда $\delta_{\odot} = 0$ и $\alpha_{\odot} = 0$, истинное солнечное и звёздное время обращаются в нуль. Следовательно, уточнённые значения прямых восхождений, дополненные постоянной поправкой равноденствия ΔA , устанавливали «новый циферблат» на «небесных часах» всех обсерваторий, необходимый также для потребителей астрономического времени.

Кроме координат звёзд в абсолютных каталогах публиковались значения изменений их координат, скорости $\frac{\partial \alpha}{\partial t}$ и $\frac{\partial \delta}{\partial t}$, в период между двумя эпохами наблюдений. Информация была достаточной для небесной механики рассматриваемого периода: позволяла уточнять не только значения коэффициентов в моделях, описывающих движения планет и Луны, но и аналитические методы решения задач [26]. Наблюдатели этих веков, руководствуясь теорией, чётко представляли свою задачу — знали цель и метод своих поисков.

Из примеров опережающего развития теории наиболее известен вывод Ньютона о форме Земли, противоречащий представлениям сторонников Декарта о вытянутости Земли к полюсам. Две экспедиции Академии наук Франции, производившие геодезические измерения в двух полушариях, подтвердили справедливость выводов Ньютона.

Согласно закону всемирного тяготения, изменения в движениях Солнца, Луны по отношению к Земле должны были вызывать колебания в прецессионном движении земной оси. Увеличившаяся точность наблюдений позволила Брадлею обнаружить нутационные колебания в движении оси и связать их с периодом 19,6 года в движении Луны. Успев пронаблюдать половину периода, Брайлей завещал их продолжение Лакайлю. В этой связи отметим также динамическую теорию вращения Земли, которую развивали Деламбер и Эйлер. Выводы Эйлера предстояло проверить на практике в XX в.

Хотя основные достижения рассматриваемых веков связаны с усовершенствованием теории движений тел Солнечной системы и определением периодических движений Луны и земной оси с периодами в десятки лет и меньше, но сохранялось стремление к уточнению долгопериодических и вековых движений экватора и эклиптики. На основе абсолютных наблюдений уточнялось предварение равноденствия, зависящее главным образом от прецессии земной оси, и вековые изменения угла ϵ продолжали изучаться. Опольцер составил «Канон затмений Солнца и Луны» за период 2000 лет. Теоретиков интересовала проблема устойчивости Солнечной системы. Обнаруженные собственные движения звёзд также были вековыми движениями. **Отсюда понятно, почему необходимость сохранения преемственности в определении координат звёзд и счёте времени не вызывала сомнений в рассматриваемую эпоху.** Переход к публикации экваториальных координат в каталогах не повлиял на движения и связь небесных кругов, благодаря уточняемым значениям положения точки Весны и угла ϵ .

Сохранилась связь с локальными горизонтальными СКС благодаря единству небесного и земного экватора, и было обращено внимание на связь точки Весны с земными долготами. Определялась долгота меридиана, в момент пересечения которого Солнце проходило точку Весны. В литературе такой меридиан упоминается как *locus fictius observationis* — фиктивное место наблюдения. На этом меридиане в истинный полдень солнечное и звёздное время обращаются в нуль.

Успешное развитие астрономии этих веков привело к увеличению числа решаемых задач:

1. В Гринвичском каталоге 1888 г., а затем в абсолютных каталогах других обсерваторий, изменения координат звёзд $\frac{\partial \alpha}{\partial t}$ и $\frac{\partial \delta}{\partial t}$ разделили на вековое движение, вызванное прецессией, и собственные движения звёзд по двум координатам, μ и μ' , которые постепенно становились известными для многих звёзд. Изменение в каталогах было связано не только с потребностями новорождённой отрасли, названной звёздной астрономией. Пройдёт много времени до обнаружения *изменений* в собственных движениях проекций звёзд, но в Галактике звёзды движутся с разными скоростями, поэтому собственные движения звёзд по-разному искажают значения ΔA и $\Delta \epsilon$. Следовательно, движения экватора и эклиптики станут определяться точнее при возможности вывода собственных движений звёзд способом, не зависящим от определения прецессии и угла ϵ .

2. Астрономическое сообщество осознало необходимость международного сотрудничества для повышения эффективности научных исследований. Начало было связано с развитием мореходства и железных дорог. В 1884 г. был выбран общий нуль-пункт для отсчёта земных долгот, а вместо времени,

связанного с точкой Весны, *общеземным* временем стало среднее солнечное время Гринвичского меридиана, Greenwich Mean Time (GMT).

3. Вопрос об объединении абсолютных каталогов в сводный, фундаментальный, каталог вошел в повестку дня. Началось создание в Германии фундаментальных каталогов FK как международной опорной системы координат. Она в дальнейшем была представлена серией фундаментальных каталогов, которые создавались на основе абсолютных каталогов государственных обсерваторий. Критические замечания вызывал метод присвоения весов координатам разных обсерваторий при составлении сводного (фундаментального) каталога.

4. С появлением новых отраслей возникают новые задачи и повышаются требования к специализации исследователей. В эти века астрометрия и небесная механика оставались единой наукой — фундаментальной астрономией, что проявлялось в издании книг, излагающих систему астрономии, например трехтомного труда М. Ф. Хандрикова [27], а ранее двухтомной книги «Система астрономии» Дж. Гершеля [28].

Остановимся на разделении задач между астрометрией и геодезией.

Астрономы определяли по абсолютным наблюдениям каждой эпохи новые значения экваториальных координат звёзд и Солнца, или новые положения небесных кругов по отношению к звёздам и одновременно по отношению к отвесным направлениям в обсерваториях, проводивших абсолютные наблюдения. В XX в. астрономы стали учитывать влияние приливов на отвесные направления. Задачей геодезии было установление связи многих пунктов государственной сети с направлением отвеса в государственной обсерватории. Геодезисты определяли значения широт и долгот астропунктов по наблюдениям звезд. Координаты пунктов считались постоянными; будучи приведенными к направлению отвеса главной обсерватории, они позволяли установить ориентировку референц-эллипсоида.

Когда главную опорную СКС стал представлять фундаментальный каталог, возникла задача приведения многих звезд, называемых геодезическими, в систему фундаментального каталога. Казалось бы, это открывало путь к переходу всех стран на единый референц-эллипсоид. Фундаментальный каталог является сводным, зависящим от направлений отвесных линий на нескольких обсерваториях. Таким образом, однозначная связь земных и небесных координат была бы незначительно нарушена.

Исследователи XX в. получили богатое наследство, в которое, кроме достижений рассматриваемой эпохи, вошли и нерешённые задачи. Назовём некоторые из них.

1. Очевидно, от точности определения координат звёзд главной опорной системы зависит развитие всех отраслей астрономии и геодезии. Можно сказать, что определения абсолютных координат начались с полюсов и точность определения склонений звёзд падала по мере приближения к экватору, кроме того, в Южном полушарии абсолютные наблюдения не были проведены. Предстояло решить эту задачу в следующем веке.

2. Метод разделения определяемых по наблюдениям скоростей изменений координат $\frac{\partial \alpha}{\partial t}$ и $\frac{\partial \delta}{\partial t}$ на прецессию и собственные движения звёзд не удовлетворял исследователей.

3. Нерешённой осталась задача n тел, которая увлекала выдающихся математиков. Возможно, их поиски оказались бы более успешными, если бы они вместо использования метода инфинитозималий обратились к геометрическому методу «Начал» Ньютона [20].

4. Решение задачи n тел способствовало бы разделению определяемых значений предварения равноденствия ΔA на две части, зависящие от вращения экватора (прецессии земной оси) и от движения эклиптики, названного впоследствии «прецессией от планет». В середине XIX в. Дж. Гершель утверждал невозможность разделения движений точки Весны по экватору и по эклиптике без привлечения теории. Оба движения проявляются в движении точек равноденствия по отношению к звёздам. Ньюком писал о том же и предлагал решение в виде двух рядов, описывающих искомые движения. Он предупреждал, что ряды можно использовать только в течение одного века, затем, сохраняя периоды членов ряда, необходимо определять новые значения коэффициентов по новым наблюдениям [24].

5. В конце XIX в. перед наблюдателями встала задача проверки теории Эйлера о движении полюса в теле Земли, на которой мы остановимся в разделе 7.

5. Астрометрия XX в. и подготовка «революции в астрометрии»

There is no king's way in modern astrometry.

H. Eichhorn

Ближайший из прошедших веков кажется богатым событиями, которые происходили при значительно увеличившемся числе отраслей астрономии и ослаблении связи между ними. Отрасли мельчали, а специалисты становились все более «узкими». Если прежде фундаментальная *астрономия* включала астрометрию и небесную механику, то в XX в. фундаментальная астрономия разделилась на небесную механику и фундаментальную *астрометрию*, которые стали областями исследований разных специалистов.

Разделение развития науки по векам весьма условно: XX в. был одновременно и наследником прошлых веков, и пренебрегавшим этим наследием. Поэтому мы включили в этот раздел две части. В **первой** — мы упоминаем о том, что подробно описано в литературе и, как правило, занесено в копилку достижений века. Во **второй части** рассмотрим события, которые предшествовали преобразованиям, названным теперь «революцией в астрометрии начала XXI в.».

5.1. Первая часть

1. Плодотворным примером международного сотрудничества явилась организация Международного бюро времени (ВН) и Международной службы широты (МСШ, ILS), а также Международного астрономического союза (МАС). В 1905 г. начались наблюдения на пяти станциях МСШ. Не будем повторять известную историю организации международных служб с той же целью, но с другими названиями, при увеличившемся на порядок числе станций, проводивших наблюдения, также о переходе с Гринвичского меридиана на экваториальный «нуль-пункт» в океане [6]. Предположение о существовании периодических колебаний в движении полюса подтвердилось, обнаружили также неперiodические колебания и локальные изменения координат полюса. Отсюда возникли проблемы, которые мы обсудим в разделе 7.

2. После объединения служб времени и широты в Международную службу вращения Земли с целью определения поправок часов и широт, опираясь на известные значения прецессии и нутации земной оси, эти же наблюдения, исправленные найденными поправками, стали использовать для уточнения прецессионно-нутационного вращения оси и определения обнаруженной неравномерности осевого вращения Земли. Из замкнутого круга не было выхода.

3. Международная шкала, или система счёта времени, в XX в. изменялась несколько раз: на смену GMT пришло Всемирное время UT — Universal Time, затем эфемеридное время ET — Ephemeris Time, наконец, атомное время AT — Atomic Time. После этого пропала необходимость использования астрономических наблюдений с целью постоянной проверки хода обсерваторских атомных часов. В 70-е годы после проведения кампании Merit продолжение оптических наблюдений астрономов с целью изучения вращения Земли было признано нецелесообразным: неоперативным, менее точным и более дорогим, нежели получение тех же сведений по наблюдениям спутников и радионаблюдениям методами РСДБ.

4. В первую половину века необходимость проведения абсолютных определений координат не вызывала сомнений. Такие наблюдения использовались при создании каталога FK3, затем астрономы решали задачу распространения этой системы на более слабые звёзды с помощью относительных методов. Так, в СССР был составлен Каталог геодезических звёзд. Десятки обсерваторий разных стран участвовали в наблюдениях звёзд для компиляции относительного каталога AGK3R.

5. Отметим задачу, решению которой звёздные астрономы уделили много времени. В 1932 г. Н. И. Днепровский и Б. В. Герасимович предложили определять собственные движения (скорости) звёзд по отношению к проекциям галактик — наиболее удалённых объектов обзримой части Вселенной, которые практически не изменяют своих относительных положений на небесной сфере [29]. На фотопластинках были выбраны сферические и эллиптические изображения галактик, чтобы легче определить координаты их центров.

Необходимо было начать с уточнения координат галактик по отношению к фундаментальным звёздам. Эта работа выполнялась в два этапа, потому что не было достаточного числа фундаментальных звёзд на пластинках с галактиками. После приведения слабых звёзд в систему фундаментального

каталога, а затем приведения в их систему фотографических звёзд, стало возможным уточнение координат галактик.

Повторные наблюдения через 20–30 лет позволяли уточнить собственные движения звёзд μ и μ' путем определения разностей координат проекций звёзд и галактик, вызванных движениями первых по отношению к неподвижному фону изображений галактик. Подводя итоги работы, В. В. Подобед отмечал недостаточную точность метода, полагая главной причиной ошибок трудности, связанные с определением центров изображений галактик.

Необходимо подчеркнуть, что идея заключалась в определении собственных движений (скоростей) проекций звёзд, *но не затрагивала методики определения координат звёзд, их связи с движениями кругов и нуль-пунктов.*

6. Развитие техники в XX в. повлияло на оснащение инструментов и привело к автоматизации процесса наблюдений и вычислений, что существенно облегчило труд астрономов. Кроме того, начались лазерные наблюдения для определения расстояний до ближайших планет и Луны. Открывалась возможность наблюдений не только в оптическом, но и в других диапазонах волн, причём не только с Земли, но и с запускаемых спутников. В недрах радиоастрономии зародилась радиоастрометрия — новая отрасль астрометрии. **Освоение новых технических средств заняло много времени, отвлекая астрономов от решения методических проблем и освоения исторического наследия.**

5.2. Вторая часть

На заседании Астросовета в 1969 г. академик А. А. Михайлов выступил с докладом о кризисе астрометрии, который проявился в том, что точность меридианных наблюдений перестала расти, а работа астрономов в этой области «превратилась в рутину — подобие небесной канцелярии» [9]. С первой частью этого утверждения можно согласиться, поскольку предпринятые технические усовершенствования, уточнённый учёт влияния атмосферы и перенос инструментов в горные районы не привели к столь кардинальному увеличению точности наблюдений, какое произошло после перехода от визуальных наблюдений к телескопическим. Точность наблюдений все-таки повысилась за XX в., что позволило обнаружить неувидимые прежде малые изменения в движениях, а также движения с короткими периодами, по величине сопоставимые с ошибками наблюдений.

Рутинной составляющей невозможно избежать в работе, связанной с массовыми измерениями и их обработкой, однако для рассматриваемого периода (особенно для второй половины века) характерны отступления от традиционной рутины, вызванные стремлением *во что бы то ни стало* уменьшить ошибки *результатов* наблюдений. Отметим связанные с этим стремлением потери астрономии XX в.

Тенденция отхода от математически строгого решения координатной проблемы становилась всё отчётливее: абсолютные наблюдения стали заменяться *квазиабсолютными*, приводящими к зависимости координат нового каталога от их значений в какой-либо зоне каталога предыдущей эпохи. Например, в Пулковском квазиабсолютном каталоге склонений звёзд Южного полушария наряду с наблюдениями двух кульминаций близполюсных звёзд использовались опорные звёзды экваториальной зоны.

В отдельных обсерваториях при уравнивании наблюдений вводились новые параметры в уравнения, после чего система уравнений становилась недоопределённой и, чтобы её решить, использовались какие-либо ограничения на определяемые поправки координат. Например, приравнивались к нулю следующие суммы, распространяемые либо на поправки всех наблюдаемых звёзд, либо на звёзды некоторых областей:

$$\begin{aligned}\sum \Delta\alpha \cos \delta &= 0, \\ \sum \Delta\delta &= 0.\end{aligned}$$

По сути, нововведения способствовали перераспределению ошибок между разными зонами в каталоге предыдущей эпохи. Критике методов создания индивидуальных каталогов, предназначавшихся для включения в фундаментальный каталог, посвящены, например, статьи [30–32].

При компиляции каталога FK5 учитывались некоторые каталоги служб, которым для определения поправок часов или координат места нужны были координаты звёзд, затем решалась обратная

задача. Получался порочный круг, но использование таких каталогов могло способствовать *формальному* уменьшению ошибок в сводном каталоге, потому что наблюдения с инструментами служб точнее, чем с большими пассажными инструментами, вертикальным и меридианными кругами.

Значительные ошибки позиционных наблюдений Солнца и звёзд в дневное время были главной причиной замены наблюдений Солнца ночными светилами, орбиты которых наклонены к экватору, для *косвенного* определения точки Весны и поправки экватора. Напомним, что в абсолютном методе положение экватора определяется только *по абсолютным наблюдениям склонений звёзд, в систему которых приводится склонение Солнца*. От наблюдений Солнца не следовало отказываться, они необходимы не только для определения начала отсчёта прямых восхождений, но и для определения астрономического времени — продолжительность суток и тропического года связана с движением Солнца.

Международный астрономический союз (подчёркнём это) не принимал решения о методах определения координат, предназначавшихся для фундаментального каталога. Призыв В. В. Подобеда (1971 г.) «резко увеличить объём абсолютных наблюдений» [33, с. 64], как и в дальнейшем мнение, выраженное в статье [34], не были услышаны.

Если прежде движения планет определялись в системе абсолютных, затем фундаментальных каталогов, то теперь ориентировку экваториальной системы координат относительно звёзд стали определять по наблюдениям больших и малых планет. При такой замене невозможно избежать зависимости от эфемерид планет, в свою очередь зависящих от динамической теории их движений. В 1974 г. И. И. Ковалевский справедливо назвал последний фундаментальный каталог FK5 «гибридным», поскольку координаты звёзд оказались зависимыми от численной модели орбитальных движений планет, системы Земля—Луна и галактических движений проекций звёзд [35]. В те же годы в учебной литературе появляются дефиниции (определения), отличающиеся неопределённостью. Приведём пример из учебника Подобеда и Нестерова: «Для того, чтобы практически задать любую координатную систему, необходимо: 1) принять какую-либо определенную математическую систему координат, опирающуюся на природные явления, и *развить её теорию*, 2) реализовать эту систему координат, привязав её к реальным физически существующим небесным телам, и предусмотреть форму задания выбранной системы координат» [36, с. 69].

В решении Генеральной ассамблеи МАС 1976 г. уже достигнута определённость: на ассамблее была принята новая система астрономических постоянных и ряд резолюций с рекомендациями. Приведём одну из них [37, с. 12]:

«Резолюция 3: Фундаментальная система отсчёта.

Рекомендации

а. Фундаментальную систему отсчёта, определяемую положениями звёзд и их столетними изменениями, данными в каталоге FK5, привести в возможно близкое соответствие динамической системе отсчёта (т. е. определенной теории планетных движений)».

Очевидно, Леверье и Ньюком решали обратную задачу: они использовали каталожные (наблюдаемые) координаты звёзд, чтобы по определениям координат планет в системе каталога уточнить динамическую модель, а затем зависящие от неё эфемериды.

Если бы Коперник следовал приведённой рекомендации, он использовал бы полуторатысячелетние наблюдения для приведения их в соответствие с системой Птолемея, достаточно точной в течение десятка веков для предсказания *видимого*.

В 1989 г. на конференции МАС, посвящённой опорной системе для астрономии и геофизики, И. Ковалевский, И. Мюллер и Б. Колачек дали следующее определение фундаментальным и абсолютным каталогам, которые прежде называли независимыми: «Фундаментальные каталоги являются реализацией динамической системы отсчёта, основанной на движениях тел Солнечной системы» [38, с. 36].

Фундамент и возведённое на нем строение поменялись местами. Спрашивается, как же проверять эфемериды тел Солнечной системы, если они уточняются не по наблюдаемым координатам планет в системе каталога новой эпохи, а на основе динамической модели, зависящей от наблюдений прошлых лет и веков? Можно ли заметить эволюционные изменения в их движениях? В результате появились,

например, две точки весеннего равноденствия: каталожная и динамическая, причину расхождения между которыми авторы [8, с. 19] признают непонятной.

Следующий шаг связан с резолюциями МАС о необходимости внедрения общей теории относительности (ОТО). Идея о том, что новая координатная система, опирающаяся на релятивистскую динамику, должна быть положена в основу астрометрии, последовательно проводится в учебнике К. Маррея «Векторная астрометрия» [39]. С первой главы этой книги «Динамическая основа астрометрии» читатель приобщается к релятивистской физике, узнаёт о релятивистском уравнении движения и о мировой линии фотона, определяющей направление [39]. Такое определение направления до сих пор рекомендуют физики-теоретики [40], не демонстрируя, как связаться с этим направлением на практике. Фактически СТО, основанная не на математических, а на физических «постулатах», не способна заменить классическую небесную механику, и внедрение СТО и ОТО сводится к добавлениям в результаты наблюдений и в эфемериды малых поправок, которые минимизируют разности « $o-c$ », создавая *видимость* благополучия в течение некоторого интервала времени [21, с. 17–18].

Редактор перевода книги [39] и автор восторженного предисловия, Я. С. Яцкив утверждает, что Маррею «удалось полностью отказаться от введения понятия вспомогательная небесная сфера» [39, с. 5], он не заметил, что эту сферу автору все-таки пришлось ввести, начиная с десятой главы. Е. П. Федоров справедливо заметил, что «нематериальный геометрический образ небесной сферы сохраняется в астрономии до сих пор — мы имеем в виду воображаемую небесную сферу, которой пользуются при многих построениях» [12, с. 81]. Вместе с тем Федоров считал: «Первой задачей астрометрии должно быть определение *относительного* движения небесных тел в трехмерном реальном пространстве» [12, с. 75]. Сохраняя согласие с историей и классической астрономией, мы скажем, что *целью* астрономии является описание пространственных, *абсолютных* движений тел, которые являются вращениями в триадах с началом в разных центрах тяготения. *Первой задачей, решаемой на пути к этой цели*, были и останутся измерения *относительных* положений проекций небесных светил и земных направлений отвесных линий.

В течение XX в. сохранялись контакты между геодезистами и астрономами, например, совместно обсуждались трудности, связанные с обнаружением подвижности пунктов, и вопрос об отсчёте колебаний полюса от его среднего положения либо от Международного условного начала. Однако в МАС нет геодезической комиссии, геодезия и гравиметрия входят в собственный международный союз. Упомянутая выше рекомендация Генеральной ассамблеи, воплощённая в практику, способствовала потере эмпирической, определяемой только по наблюдениям, связи небесного экватора с зенитами обсерваторий, следовательно, и с земным экватором, а также связи зодиакального круга (эклиптики) — с тропиками. Не удивительно, что геодезисты предпочитают решать свои задачи, не обращаясь к астрометрии [4], эмпирическая связь с которой на практике теряется и в исторической литературе XX в. не отражена.

В конце XX в. отсутствовал общий план развития фундаментальной науки из-за разобщённости теоретиков и практиков, что способствовало ослаблению связи между специалистами смежных отраслей, решающих общую задачу, и снижению эффективности научной работы. Отношение физиков-теоретиков к историческому идейному наследию заразило астрономов простотой «революционного» решения. Астрономическая элита решила начать с чистого листа.

Создала ли революция в астрометрии начала XXI в. жизнеспособную Систему астрономии?

Обсуждению этого вопроса посвящён следующий раздел.

6. Последствия революции в астрометрии начала XXI в.

Всякое действительное разрешение есть распутывание накопившихся затруднений. Распутать же не могут те, которые не познали узла.

Аристотель

Резолюция МАС о замене традиционной Международной небесной опорной системы координат радиосистему была принята астрономическим сообществом, главной целью которого стало уменьшение ошибок наблюдений за счет освоения новых технических средств. В защиту перехода на радиосистему выдвинули аргументы, приведенные нами в разделе 1.

Космические проекты, которые предназначаются для решения задач астрометрии, также привлекают обещаниями беспрецедентного повышения точности наблюдений (в будущем — перехода на микросекундный уровень) и определения координат огромного числа слабых звёзд.

Перспективы развития постреволюционной астрометрии обсуждались на пленарных докладах конференции «Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI в.». Участники конференции пришли к единодушному мнению о принятых МАС резолюциях: *фундамент создаётся средствами радиоастрономии, и космическая астрометрия вытесняет наземную*. Обсуждая космические проекты, А. В. Кузьмин, К. В. Куимов и А. Э. Наджип пишут: «Эксперимент HIPPARCOS ярко продемонстрировал потенциал космической астрометрии, практически обесмыслил любые дальнейшие усилия по решению задач фундаментальной астрометрии наземными средствами» [41, с. 60]. Они не встретили возражений от выступавших на упомянутой конференции. Астрономы оставляют наземной оптической астрометрии вспомогательную роль: «распространение системы HIPPARCOS на более слабые звёзды, быстрое реагирование на случай открытия неожиданных явлений, обеспечение задач космической астрометрии, например, создание входных каталогов для космических проектов» [42, с. 100] и т. п. В. В. Витязев в разделе своей статьи «Есть ли будущее у НОА» (НОА — наземная оптическая астрометрия) утверждает, что «по крайней мере до запуска второго астрометрического спутника существует ряд содержательных задач, которые вполне можно реализовать средствами НОА» [42, с. 99].

Второй астрометрический спутник Gaia был запущен в 2014 г., и астрономам обещаны координаты миллиарда звёзд до 20^m . Остались ли теперь содержательные задачи у НОА? Новый фундамент астрономии устанавливается не на промежуток времени между запускаемыми спутниками, а всерьёз и надолго, следовательно, астрономам необходимо знать методику решения задач в системе новой астрометрии, а также отраслей науки, использующих её результаты.

Напомним, от чего отказались организаторы новой астрономии. Х. Вальтер и О. Соверс назвали систему координат ICRS революционной потому, что *«впервые в истории общепринятая координатная система более не связана с равноденствием и с эклиптической плоскостью»* [2, с. 165]. К. Маррей был уверен, что сохранится эклиптика, определяемая по наблюдениям малых планет или другим *динамическим способом, опирающимся на последнюю, самую революционную из физических теорий*. Он предполагал, что *экватор не потребует в качестве круга фундаментальной системы* [39, с. 299]. Оба мнения означают отказ от определения положений равноденственных точек.

Во все века от движения точки Весны относительно экватора и относительно звёзд зависели соответственно продолжительность тропического и звёздного годов. С изобретением атомных часов и создания шкалы АТ практическое значение ещё сохранили за шкалой UT1, связанной с предполагаемой неравномерностью осевого вращения Земли, и, по-видимому, считается, что астрономы освободились от всех забот, относящихся к исчислению времени. Время стало очень сложной проблемой, оказавшейся в ведении физиков-теоретиков, к сожалению незнакомых с измерениями пространства и времени¹ [43, 44].

В конце прошлого века некоторых астрономов радовала возможность «отказаться от точки весеннего равноденствия как фундаментальной в астрометрии» (например, Х. Эйхгорна) и «приход времени, когда можно будет убрать со сцены Солнечную систему» (П. Вайнман) (см. об этом в [12, с. 95–96]). Пока мечта Вайнмана не осуществилась — главную опорную триаду ICRS связали с барицентром Солнечной системы. Процедура её установления (establishing) заключалась не только в связи направления осей системы с радиоисточниками, но и в использовании ряда «рафинированных моделей, удовлетворяющих требованиям СТО и ОТО» [2, с. 36–39].

К сожалению, возможность наблюдений из барицентра Солнечной системы не была предусмотрена. Наблюдатели на Земле увидят объекты установленной опорной системы вращающимися, следовательно, им придется учитывать вращения изучаемых объектов относительно радиоисточников при сохранении необходимости уточнения численных моделей всех вращений, в которых они участвуют, по отношению к осям внегалактической системы.

¹В СТО вводится мнимое время (величина не измеряемая) и требуется сокращение времени в соответствии с относительной скоростью тел, в ОТО время зависит от гравитационного поля. Поэтому число шкал времени увеличилось. Стивен Хокинг утверждает, что до Большого Взрыва не существовало ни пространства, ни времени. От скольких забот избавились бы физики-теоретики, если бы они жили в то время!

Например:

1. Исследователям, которые продолжают заниматься изучением вращений земной оси по наблюдениям, придётся учитывать множество вращений по отношению к осям ICRS, каждое из которых нуждается в уточнении. В статье [45, с. 27] показано, что предложенные в этом веке решения задач, связанных с двумя вращениями земной оси, приводят к перераспределению ошибок между параметрами математических моделей, описывающих искомые движения.

2. Требование привязки координат земных пунктов к радиоисточникам невыполнимо для геодезии, что показано в статьях [4, 46]; неудивительно, что геодезисты занимаются пока решением задач, не связанных с использованием координат новой главной опорной системы. Решение вопроса о точности согласования радио- и оптической системы необходимо, причём следует привести координаты радиоисточников в оптическую (звёздную) систему, а не наоборот, как полагают некоторые радиоастрономы, утверждающие более высокую точность главной опорной радиосистемы.

3. Очевидно, вращения звёзд в пространстве Галактики и спутников относительно своих планет будут изучаться не в триаде ICRS. По-прежнему численные модели и аналитические теории будут создаваться для уточнения *абсолютных* движений тел и частиц в триадах с началом в центрах, к которым тяготеют конкретные тела или частицы (также слои Земли). Однако **непосредственно по наблюдениям невозможно установить связь между триадами, подобную связи между небесными кругами сферических СК, установленную в глубокой древности, которую астрономы с XVII до середины XX вв. определяли в каждую новую эпоху, проводя абсолютные наблюдения.**

4. Отказ от «небесных» кругов, движущихся относительно звёзд, лишает астрономов возможности определения угла ϵ и предварения равноденствия по наблюдениям. Изменения угла между экватором и эклиптической издавна интересовали астрономов. В начале XX в. зависимость климата от значений угла ϵ исследовал М. Миланкович [47]. Предварения равноденствия в XVIII—XIX вв. определялись с целью *уточнения* регулярной прецессии и прецессии от планет. История астрономических наблюдений до начала нашей эры склоняет к мнению об изменяемости значения «*постоянной*» прецессии.

Если согласиться с тем, что задачи астрономии ограничиваются *координатно-временным обеспечением современных потребителей*, то понятно, почему долгопериодические и вековые движения тел Солнечной системы перестали интересовать астрономов. Из такого представления о роли астрономии, вероятно, исходили те, кто в конце прошлого века инициировали и принимали судьбоносные не только для этой науки решения.

Вернёмся теперь к полученному позиционной астрономией взамен того, от чего она отказалась.

1. Установленной опорной триаде соответствует сферическая небесная система ICRF, которая, в отличие от прежней опорной СКС, представлена не вращающимися началами: экватором и нуль-пунктом, а зафиксированными и признанными практически постоянными направлениями на внегалактические радиоисточники, которые *«находятся в покое по отношению к Вселенной»* [2, с. 137]. Предполагается, что лишь в неопределённо далеком будущем потребуются поддержание, или обновление (maintaining, updating), установленной системы с помощью приближённого, статистического метода, при котором «оси ICRF останутся фиксированными в пространстве, тогда как положения опорных радиоисточников могут быть исправлены» (см. [2, эпилог], перевод на русский язык приведён в статье [3]).

2. Метод перевода радиоизмерений с РСДБ в координаты изложен в монографии [2], он заключается в учёте двух сдвигов по α и по δ всех координат радиоисточников с целью приведения к экватору каталога FK5 и динамическому равноденствию J2000. Используя собственные движения звёзд, определённые спутником HIPPARCOS, каталог был переведён на эпоху 1991.25 в радио- и оптическом каталогах. При учёте только сдвигов по двум координатам, *общих для всех* радиоисточников, внутренние расхождения между координатами каталогов неизбежны.

3. О созданной Международной земной опорной системе ITRF, которая часто подвергается процедуре обновления (updating), написано в статье [45, с. 25]. Земная система ITRF автономная, не связана по построению с ICRF, поэтому для определения её движений относительно ICRF необходим учёт большого количества поправок.

4. Для перевода дуг, измеренных спутником HIPPARCOS, в координаты использовалось более 1000 опорных звёзд из каталога FK5, поэтому каталог HIPPARCOS распространяет систему FK5 на более слабые звёзды, но трудно сказать, насколько он точнее, потому что точность измеренных дуг нельзя признать равной точности координат. Создан сводный каталог FK6, полученный в результате странного соединения каталогов FK5 и HIPPARCOS, точность координат в которых, как полагают, отличается на два порядка. Каталог FK6 не может считаться продолжением серии фундаментальных каталогов и должен носить другое имя, например HFK5R (R — «relative»).

5. В программу измерений дуг спутника HIPPARCOS были включены *слабые* звёзды, отождествлённые с радиоисточниками (радиозвёзды), однако о незначительности их числа писали и в 70-е гг. [48], и в настоящее время. Поэтому идентичность систем координат каталога HIPPARCOS и радиокаталогов, включая ICRF, вызывает сомнение.

Радиоастрономы А. А. Липовка и Н. М. Липовка нашли путь решения задачи, опираясь на достаточное число звёзд на анализируемых площадках, ошибки координат которых не превосходят $0,3''$. Запатентованный ими способ заключается в сравнении *координат* светил из радио- и оптического каталогов, попадающих на площадки размером $1 \times 1^\circ$. Для пояснения способа заметим, что решаемая авторами задача похожа на известные астрономам определения координат нового объекта на фотопластинке или ПЗС-матрице среди опорных звёзд. На виртуальные площадки, которые анализируются А. А. Липовкой и Н. М. Липовкой, попадают координаты одиночных радиоисточников, которые считаются отождествлёнными со звёздами, и оптические координаты звёзд, число которых достаточно для приведения координат радиоисточника в систему звёздного каталога [49].

Выполняя такую работу, авторы получают координаты радиоисточников, значительно отличающиеся от их координат в радиокаталоге. Использование полученных разностей по прямому восхождению и склонению позволяет исправить ориентировку площадки. В результате на площадках было обнаружено от 4 до 14 совпадений оптических и радиоисточников, т. е. оказалось, что все *яркие* звёзды на 14 площадках, проанализированных авторами, излучают в радиодиапазоне, в том числе и жёлтые карлики, как наше Солнце.

Таким образом, А. А. Липовка и Н. М. Липовка закрыли проблему «empty field», возникшую из-за того, что квазары и объекты, считавшиеся радиогалактиками, попадали в «пустое поле», где нет звёзд. Авторы устранили парадокс, заключавшийся в том, что ранее среди жёлтых карликов, как наше Солнце, излучающее в радиодиапазоне, никто не находил радиозвёзд [49]. Они обнаружили переменные звёзды, излучение которых в радиодиапазоне также оказалось переменным, что является дополнительным подтверждением правильности отождествлений. Авторы показали, что ошибки оптических координат звёзд существенно меньше, чем ошибки радиокоординат, одновременно указав некоторые источники ошибок радионаблюдений [50].

Для астрометрии наиболее важным результатом исследований А. А. Липовки и Н. М. Липовки является отождествление звёзд — светил нашей Галактики — с радиоисточниками, которые до сих пор считаются внегалактическими объектами. Предполагая квазары внегалактическими объектами, астрономы опирались на ошибочные значения расстояний. Продолжив исследования, начатые авторами, и убедившись, что квазары — это объекты нашей Галактики, можно ли будет надеяться на то, что радиоисточники послужат «неподвижным абсолютном на краю Вселенной», который задолго до организаторов «революции в астрометрии» искали астрономы средних веков?

Число нерешённых вопросов будет возрастать, пока остаются вне внимания методические проблемы, порождённые «научными революциями». Безусловно, необходима привязка радиокоординат к оптической СКС, но астрометрия, переведённая на рельсы радиоастрономии, обрывает связь с наблюдениями прошлых эпох, отказывается не только от определения долгопериодических и вековых движений, но и от решения **актуальных** задач, которые астрономы унаследовали от прошлого века. Одну из них называет Витязев, перечисляя задачи НОА. Это «проблема построения динамической системы отсчёта (так называемое «фиктивное» движение точки весеннего равноденствия)» [42, с. 99].

Мы полагаем, что несовпадение каталожного и динамического равноденствий вызвано многочисленными отступлениями от абсолютного метода определения координат в каталогах XX в. и ошибками теорий (моделей), влияющими на эфемериды. Нельзя оставить без внимания связь наблюдаемого (каталожного) значения предварения равноденствия с системой счёта времени, с проблемой, которую

начали обсуждать ещё в 30-е гг. XX в. вместе с появлением большого эмпирического члена в теории движения Луны.

Отказаться от вращающихся небесных кругов — значит разрубить узел проблем, связанных с определениями координат и времени, что, разумеется, проще, чем распутать узел накопившихся проблем. Астрономическая общественность склонилась к тому, чтобы разрубить узел.

Отмечая согласие зарубежных и отечественных астрономов в том, что определения абсолютных координат более не потребуются, Витязев пишет: «Отказ от очень трудоёмких абсолютных методов с их узкой направленностью и переход на относительные методы измерений изменяет по существу направленность оптической астрометрии» (выделено В. В.) [42, с. 98].

Направленность абсолютных, фундаментальных, наблюдений нельзя признать узкой, но Витязев прав в том, что НОА направляется на решение частных задач, которые можно решить за короткое время, а решение главной задачи — создание опорной системы доверено *относительным* методам. Это касается как радиокоординат, так и определений оптических координат по измерениям дуг из космоса. Измеренные дуги зависят не только от стабильности направления оси вращения космического телескопа, но и от направления оси, которое не связано с отвесными направлениями на Земле. Эмпирическая связь многих тысячелетий между астрономией и геодезией обрывается [4, 44]. Это приводит к снижению эффективности научных исследований не только в упомянутых науках, но и в отраслях, связанных с ними.

7. Развитие методики определения абсолютных координат (середина XX — начало XXI в.)

Что же касается утверждений, относящихся к вечности или промежутку времени, значительно большему, чем охваченный этими наблюдениями, то мы предоставляем их другим людям, которые продолжают их, руководствуясь любовью к науке и истине.

Птолемей «Альмагест», с. 80

7.1. Первая часть

Во второй половине XX в. появляются каталоги звёзд, полученные по наблюдениям служб времени и широты, убеждавшие, что ошибки наблюдений с малыми пассажными инструментами, астролябиями и зенит-телескопами меньше ошибок больших вертикальных кругов, пассажных и меридианных инструментов, использовавшихся для фундаментальных определений координат. Это было отмечено ещё А. Копфом в 1936 г. [51]. Позднее А. А. Немиро и Н. Н. Павлов писали: «Точность наблюдений на пассажных инструментах службы времени при соблюдении некоторых условий может значительно превзойти точность наблюдений на больших пассажных инструментах, как в отношении случайных, так и систематических ошибок» [52]. Это же стремились продемонстрировать авторы статей [53, 54].

Уменьшение ошибок координат, которые определялись службами, объясняется тем, что постоянство установки инструмента и атмосферных условий здесь требовалось только в течение наблюдения группы звёзд, обычно продолжавшегося два часа, и отсутствием разделённых кругов, ошибки отсчёта которых значительны. Кроме того, в уравнение наблюдений с астролябиями и малыми пассажными инструментами входит только один параметр, зависящий от установки инструмента и атмосферных условий, подлежащий определению вместе с координатами. Несмотря на это, для проведения абсолютных наблюдений продолжали использовать и создавать большие инструменты: были построены, например, Большой пассажный инструмент и вертикальный круг М. С. Зверева для Пулковской экспедиции в Чили, также горизонтальный меридианный круг «Магис» для Пулкова, который так и остался не использованным на практике.

Непригодность инструментов служб для фундаментальных определений объяснялась тем, что с ними определялись поправки часов и широт при использовании координат звёзд, ранее определённых в системе опорного каталога, следовательно, новое место полюса Мира, а также нуль-пункта на небесном

экваторе не определялось — инструменты служб позволяли уточнить только разности прямых восхождений и склонений звёзд. Поэтому не удивительно, что точность результатов наблюдений с ними почти достигала точности относительных определений координат, и наблюдения с астролябиями использовались при составлении каталога FK5 с целью уменьшения его внутренней ошибки.

Пионерская роль в определении **абсолютных склонений звёзд** из параллельных наблюдений с двумя разными инструментами, участвовавшими в службах, принадлежит геодезисту и пулковскому астроному Е. И. Крейнину¹. Предложенные им три способа [55] вошли в зарубежную монографию [56], под влиянием одного из них во Франции были созданы астролябии с разными углами призмы, предназначенные для наблюдений Солнца.

В 1969 г. Е. И. Крейниным и автором был предложен микрометрический способ наблюдений вблизи экватора Земли с целью определения абсолютных склонений звёзд экваториальной зоны, где ошибки склонений были наибольшими [57]. Для вывода абсолютных склонений звёзд зоны $-10'' \leq \delta \leq +10''$ и широты места $|\varphi| \leq 10''$ следует наблюдать зенитные звёзды в меридиане и составленные из них азимутальные пары в первом вертикале. Искомые склонения звёзд и широта места наблюдения определяются из уравнений

$$\left. \begin{aligned} |\Delta\delta_1 - \Delta\varphi| &= l_1, \\ |\Delta\delta_2 - \Delta\varphi| &= l_2, \\ \Delta\delta_1 + \Delta\delta_2 + 2 \sin z \Delta\varphi &= l_3. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Трёх независимых уравнений достаточно для определения трёх неизвестных, поэтому авторам в статье [58] удалось избежать использования приближенного цепного метода уравнивания склонений. В статье [58] приведены список 100 звёзд и азимутальных пар программы наблюдений, предварительная оценка точности определения абсолютных склонений и широты места, исходя из ошибок инструментов тех лет, а также перечислены поправки, необходимые в то время для перехода от мгновенных координат к их средним значениям.

Метод, названный М. С. Зверевым *методом Крейнина—Мурри* [59], получил положительный отклик более чем в десятке статей, например в [60, 61]. С одобрения Астросовета был принят план экспедиции на экватор сроком на 3—5 лет с целью решения задачи, но состоялась только рекогносцировочная поездка в 1974 г. на средства, выделенные АН СССР. Было выбрано место для экспедиции в высокогорной Кении, что позволило составить программу наблюдений, которую можно было выполнять с одним или двумя инструментами [62].

Одновременно продолжалось обсуждение возможного влияния боковой рефракции на наблюдения азимутальных пар на зенитных расстояниях, не превышавших 60° , и авторами метода был предложен способ учёта этой ошибки [63]. Позднее была показана возможность учёта влияния также ошибки микрометра на результаты наблюдений при увеличении числа используемых инструментов на экваторе и совместном уравнивании наблюдений [64].

Распространение системы склонений, полученных на экваторе, на другие области неба стало актуальной задачей. Для её решения звёзды, включенные в экваториальную программу, стали наблюдать в некоторых обсерваториях в СССР; У. Зандиг предложил для этой цели фотографический метод. Авторы экваториального метода предложили использовать проводившиеся наблюдения с астролябиями, установленными в Ричмонде и Сан-Паулу, для расширения зоны уточняемых абсолютных склонений [65].

В этой связи следует отметить заслуги А. Данжона, усовершенствовавшего астролябии и предназначавшего эти инструменты для определения координат звёзд; однако без использования широты и долготы астролябии удавалось определять только некоторую комбинацию прямых восхождений и склонений звёзд. Данжон показал, что астролябиям с углом $z = 30^\circ$ доступны наблюдения во всех зонах, кроме близполюсных, составляющих 2% небесной сферы.

Статьи европейских исследователей, как и перечисленные выше предложения, были направлены на уточнение склонений в фундаментальном каталоге, но не реформировали методику наблюдений и со-

¹Ефим Ильич Крейнин (1909—1981), астроном-геодезист, работал в геодезии после окончания ЛГУ, с 1950 по 1971 г. сотрудник Пулковской обсерватории.

ставления фундаментального каталога. Исторически сложившаяся практика определения абсолютных координат опиралась на наблюдения на широтах, превышающих средние. Самой северной была Пулковская обсерватория, выделявшаяся по точности определения абсолютных склонений звёзд; в Южном полушарии позднее такая задача была поставлена для обсерватории Мельбурна ($\varphi = -37^\circ 49'$).

Предложения Крейна и автора были направлены на определения абсолютных координат звёзд, начиная с широкой экваториальной зоны [65], опираясь на микрометрический способ наблюдений на экваторе [58]. Развитие метода равных высот в статьях [66, 67] показало возможность использования астролябий для определения абсолютных координат на почти всей небесной сфере, кроме 2% зоны у полюсов. При этом для вывода абсолютных α необходимы наблюдения Солнца с астролябиями, которые в то время создавались для этой цели. Систематические наблюдения с солнечной астролябией к 1980 г. уже проводились во Франции в высокогорной обсерватории CERGA вблизи г. Грасса. Отметим, что наиболее выгодными пунктами для наблюдений Солнца (определения поправки равноденствия и угла ϵ) являются широты вблизи тропиков, поскольку там звёзды экваториальной зоны оказываются главными.

Вплоть до программы Merit для наблюдений методом равных высот создавались новые астролябии и циркумзенталы, в том числе фотоэлектрические, например, в Японии и Китае. В СССР задача уточнения абсолютных координат звёзд ещё продолжала интересовать некоторых астрономов в 80-е гг., на Западе уже были готовы отказаться от абсолютных методов. После подведения итогов программы Merit пропал интерес к определениям абсолютных координат и организации наблюдений на земном экваторе, а также к упомянутым инструментам. В планах Пулковской обсерватории также произошли изменения, но решение некоторых задач удалось опубликовать.

Обоснованию метода определения **абсолютных склонений и прямых восхождений, отсчитываемых от нуля-пункта земных долгот**, по наблюдениям методом равных высот с астролябиями, уравниваемых совместно с наблюдениями на экваторе методом Крейна—Мурри, посвящены статьи [66, 67].

Запишем уравнение, получаемое по наблюдениям с астролябиями, которое отличается от традиционно используемого только заменой поправки часов Δu на поправку средней долготы обсерватории:

$$\Delta z_{j,k} \pm \sin q_{i,k} \cos \delta_i (\Delta \alpha_i - \Delta \lambda_k) + \cos q_{i,k} \Delta \delta_i + \cos A_{i,k} \Delta \varphi_k = l_{i,j,k}. \quad (7.2)$$

Здесь через A обозначен азимут звезды, отсчитанный от точки севера, q — параллактический угол звезды, i — номер, присвоенный звезде, j — номер, присваиваемый каждому наблюдению группы, k — индекс обсерватории. Верхний знак перед вторым членом уравнения (7.2) соответствует западному прохождению звезды через альмукуантарат, нижний — восточному прохождению.

Предлагая метод, авторы использовали достижения XX в.: во-первых, атомное время и результаты наблюдений служб, отслеживающих ПВЗ, во-вторых, вычислительную технику, позволяющую использовать способ наименьших квадратов для решения системы с большим числом неизвестных и уравнений.

На первом этапе обсуждения метода авторы встретились с отрицанием корректности замены Δu на $\Delta \lambda$, которая требовалась только на период наблюдения программы (около трёх лет), что привело к отказу в публикации статьи в Известиях ГАО. Напомним, что в то время в ежегодниках использовалось эфемеридное время, и возражавшие считали атомное время подлежащим постоянному контролю по астрономическим наблюдениям. В результате две статьи были напечатаны в Сборнике Ленинградского отделения ВАГО [66] и в Киеве [67]. Затем в Известия ГАО была принята статья, поясняющая предложенный метод уравнивания на примере определения прямых восхождений звёзд с малыми пассажирами инструментами [68].

Вернёмся к уравнению (7.2), которое необходимо преобразовать для предложенного решения координатной проблемы. Используя формулы для параллактического угла q и азимута A в параллактическом треугольнике, получаем:

$$\cos A = \frac{(\sin \delta - \sin \varphi \cos z) \cos z}{\sin z \cos \varphi \cos z} = \frac{\sin \delta \cos z - \sin \varphi (1 - \sin^2 z)}{\sin z \cos \varphi \cos z}, \quad (7.3)$$

$$\cos q = \frac{\sin \varphi - \cos z \sin \delta}{\sin z \cos \delta}. \quad (7.4)$$

В формуле (7.3) числитель и знаменатель умножены на $\cos z$, что позволяет, используя формулу (7.4), получить следующее выражение для $\cos A$:

$$\cos A = \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} z - \cos q \frac{\cos \delta}{\cos \varphi \cos z} \quad (7.5)$$

и представить последний член уравнения (7.2) в виде

$$\Delta \varphi \cos A = \Delta \varphi \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} z - \Delta \varphi \cos q \frac{\cos \delta}{\cos \varphi \cos z}. \quad (7.6)$$

Преобразованные таким образом уравнения (7.2) целесообразно решать в два этапа, для этого проводим замену переменных:

$$\left. \begin{aligned} (z) &= \Delta z + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} z \Delta \varphi, \\ y &= \cos \delta (\Delta \alpha - \Delta \lambda), \\ x &= \Delta \delta - \frac{\cos \delta}{\cos \varphi \cos z} \Delta \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

Первое выражение из (7.7) отличается от искомой поправки к значению угла призмы астролябии z_j на величину, не изменяющуюся на протяжении наблюдений программы. Значения прямых восхождений и склонений на первом этапе обработки наблюдений остаются связанными соответственно с поправками к долготе и широте места наблюдения.

Уравнения (7.2) с новыми переменными имеют вид

$$(z_j) \pm \sin q_i y_i + \cos q_i x_i = l_{i,j}. \quad (7.8)$$

На первом этапе каждая обсерватория решает эти уравнения по своим наблюдениям, определяя неизвестные (z_j) для каждого двухчасового наблюдения группы звёзд, а также значения y_i и x_i для каждой звезды. **Для того, чтобы система (7.8) имела решение, необходимо включать в программы наблюдений главные звёзды, наблюдаемые вблизи элонгаций ($q = 0$); на практике достаточно выполнения условия $-0,03'' < \cos q < +0,03''$ [67, с. 62].** Уравнения (7.8) для главных звёзд приобретают вид

$$(z_j) \pm y_i = l_{i,j}. \quad (7.9)$$

Выбору главных звёзд на разных широтах посвящена статья [69]. При совместном решении уравнений (7.8) и (7.9) в одной обсерватории предложено использовать преобразования Шрейбера [70], чтобы упростить решение, исключив множество неизвестных (z_j) , которые входят только в одно наблюдение двухчасовой группы звёзд, тогда как поправки координат звёзд повторяются в наблюдениях одной и той же группы в разные ночи, а также входят в разные группы. Полученные уравнения, называемые эквивалентными, объединяются в биэквивалентные, которые составлены по всем наблюдениям данной группы и также не содержат неизвестных (z_j) . После определения искомых значений x_i и y_i из решения биэквивалентных уравнений определяются исключённые неизвестные (z_j) .

Переход к поправкам искомых неизвестных $\Delta \alpha$ и $\Delta \delta$, а также значениям угла призмы астролябии z_j осуществляется на втором, централизованном этапе. Необходимым условием для определения координат звёзд на централизованном этапе обработки наблюдений является наличие зон перекрытия между астролябиями, т. е. звёзд, которые наблюдаются хотя бы на смежных по широте астролябиях.

Объединяя уравнения, полученные в всех обсерваториях, получаем системы уравнений:

$$\cos \delta_i (\Delta \alpha_i - \Delta \lambda_k) = y_{i,k} \quad (7.10)$$

и

$$\Delta\delta_i - \frac{\cos\delta_i}{\cos\varphi_k \cos z_k} \Delta\varphi_k = x_{i,k}, \quad (7.11)$$

где $k = 1, 2, \dots, K$, $i = 1, 2, \dots, I$.

Системы (7.10) и (7.11) не содержат одинаковых неизвестных, поэтому решаются по отдельности. Если хотя бы в одной из обсерваторий проводятся абсолютные наблюдения, то совместное уравнивание наблюдений всех обсерваторий позволяет определить абсолютные координаты звёзд и привести координаты пунктов в эту же систему.

Очевидно, системы решаются и также становятся избыточными, если принять для одного из пунктов наблюдений $\Delta\lambda_k = 0$ и $\Delta\varphi_k = 0$. Обозначим поправки к прямым восхождениям, приводимым к нулевой долготе, через $\hat{\alpha}$, чтобы отличить от абсолютных прямых восхождений α ; аналогично склонения, приводимые к началу отсчёта широт, обозначим через $\hat{\delta}$. Можно привести координаты звёзд в систему координат φ и λ обсерватории А, как это сделано в статье [67, с. 68–69].

В статье [67] приводятся сведения о весах, необходимых для такой расстановки астролябий по широтам, которая позволит определить координаты звёзд $\alpha \cos \delta$ и δ с примерно одинаковой точностью по небесной сфере, а также координаты пунктов наблюдений, приведённые в единую систему.

Наблюдениям с малыми пассажными инструментами для решения аналогичной задачи, касающейся только прямых восхождений звёзд и долгот, посвящена статья [68]. В уравнения наблюдений с этими инструментами входит только один параметр, азимут инструмента, причем главными звёздами являются не близполюсные, как для больших инструментов, а близзенитные [68]. Устойчивость инструмента также требуется только в течение наблюдений одной группы звёзд продолжительностью не более двух часов. Отсылаем читателя к статье [68], в которой приведена информация, необходимая для составления программ наблюдений на разных широтах, при уравнивании наблюдений в два этапа, эквивалентном совместному уравниванию наблюдений всех обсерваторий по способу наименьших квадратов.

Отметим также, что для определения абсолютных склонений кроме экваториального метода существовала возможность использовать предложение Крейнина об использовании двух астролябий с разными углами призмы, установленных в одном пункте [55, 71]. В статье [71] показана возможность решения задачи для одного полушария. Однако приведение координат звёзд в систему координат экваториальной обсерватории является наиболее эффективным решением, создающим одинаковые возможности для двух полушарий Земли. Международное сотрудничество астрономов, организованное в XX в. с целью определения движения полюса и времени, вплоть до последних десятилетий века позволяло надеяться на сохранение сотрудничества также при решении координатной проблемы, что нашло отражение в статьях [34, 54].

Задача определения периодического движения земной оси относительно тела Земли (движения полюса) оказалась сложнее, чем предполагал Эйлер. Во второй части мы вернемся к проблеме, пояснённой на упрощённом примере традиционных меридианных наблюдений в статьях [6, 7]. Теперь мы можем опереться на пояснённую здесь методику, изложенную в цитированных статьях.

7.2. Вторая часть

Предположение о возможности изменений широт, вероятно, возникало у астрономов античности, поскольку вопрос связан с изменениями климата. Бируни писал в томе «Геодезия», который входит в «Канон Масуда»: «Следует постоянно следить за широтами, иначе города могут достичь губительных местностей, что погубит их» [72, с. 105]. Астроном XV в. Доменико Мария Навара, проводивший в Италии наблюдения вместе с Коперником, предполагал, что с античной эпохи широты средиземноморских городов увеличились на 1° . Коперник в «De Revolutionibus» исходил из постоянства широт.

Начиная с XX в. астрономы приступили к систематическим наблюдениям с целью определения периодического движения полюса, предсказанного Эйлером в теории твердотельного вращения Земли. Они зафиксировали положение полюса Мира на начало наблюдений, приняв постоянные значения для земных широт пяти станций МСШ. Постоянное начало отсчёта земных долгот было установлено ещё в конце XIX в. Ещё в XIX в. пулковский астроном Петерс, анализируя свои наблюдения с Большим вер-

тикальным кругом, обнаружил изменения широт, но не опубликовал результатов без подтверждения их дополнительными наблюдениями.

Как известно, изменения склонений звёзд, определяемые по измерениям их полярных расстояний в разноимённых кульминациях, свидетельствуют о движении земной оси относительно звёзд. Измеряемые угловые расстояния звёзд относительно местного зенита (отвесного направления) изменяются не только из-за движения земной оси относительно звёзд, но также из-за движения оси в теле Земли. Определяемые широты, будучи функциями измеренных зенитных расстояний и склонений звёзд, которые отсчитываются от подвижного небесного экватора, оказываются зависимыми от прецессионно-нутационного движения оси. Поэтому определить изменения широт, зависящие только от движения оси по отношению к Земле, к отвесным направлениям, было невозможно без учёта прецессионно-нутационного движения, т. е. без использования численной (теоретической) модели этого движения.

Теория движения земной оси относительно звёзд часто уточнялась за последние десятилетия, и в определяемых изменениях широт сохранялась зависимость от ошибок учёта прецессии и нутации. Только на станциях МСШ можно было по измеренным зенитным расстояниям определить склонения звёзд, отсчитанные от Международного условного начала, используя зафиксированное значение начальной широты станции. В таком случае на изменяющиеся значения широт станций не влияло бы движение земной оси относительно звёзд. Прямые восхождения звёзд можно отсчитывать не от движущейся точки весеннего равноденствия, а от нулевого меридиана, от которого отсчитаны современные долготы пунктов. Как же отсчитать широты всех станций наблюдений от зафиксированного земного экватора, или полюса, отстоящего от него на 90° ?

Современная вычислительная техника позволяет определять склонения и прямые восхождения всех наблюдаемых звёзд в системе координат, связанных с направлением отвеса в одной точке, обозначим её буквой А. Присвоив точке А постоянные *земные* координаты λ_0 , φ_0 и при этом условии уравнивая координаты звёзд вместе с координатами пунктов наблюдений, Международный центр получит поправки долгот и широт многих пунктов, которые не зависят от прецессионно-нутационного движения земной оси. После проведения двух циклов наблюдений центр получит возможность определить изменения долгот и широт, зависящие только от движения полюса в теле Земли, и «собственные движения» пунктов по отношению к отвесному направлению в пункте А (см. далее уравнение (7.12)).

Коперник писал: «Мы всегда должны помнить, что получаемым в движении Земли кругам и полюсам соответствуют такие же круги на небе, как мы часто говорим, с ними мы будем иметь дело и здесь». Слова Коперника справедливы до тех пор, пока есть уверенность, что земные пункты неподвижны относительно Земли или земная кора не движется относительно оси Мира. Если же у пунктов есть движения по земной сфере, общая часть которых отражается на изменениях координат полюса, то появляется вторая причина изменений координат пунктов. Чтобы, не используя значений прецессионно-нутационного движения земной оси, определить движения полюса, необходимо по наблюдениям звёзд «спроектировать» на небесную сферу *неподвижный земной экватор, или полюс, или точку на экваторе с постоянными координатами*. На небесной сфере место новой координатной системы будет определяться координатами звёзд $\hat{\alpha}$, $\hat{\delta}$. Так обозначили мы прямые восхождения и склонения звёзд, приведённые в систему координат обсерватории А ($\lambda_A = 0$, $\varphi_A = 0$).

Чтобы установить связь полученной проекции земной системы (координат звёзд $\hat{\alpha}$, $\hat{\delta}$) с экваториальной (абсолютной) СКС, необходимо и достаточно одной общей точки А на широте, которая в начальную эпоху близка к нулю [58]. Склонения звёзд будут отсчитываться от принятого постоянного значения широты станции А:

$$\hat{\varphi}_A = \varphi_0 = \text{const},$$

прямые восхождения — от начала отсчёта земных долгот:

$$\hat{\lambda}_A = \lambda_0 = \text{const}.$$

Связать начало отсчёта долгот и широт необходимо с тем пунктом, где проводятся наблюдения, а не с экваториальной точкой в океане, где нет связи с отвесным направлением (об этом см. [6]).

Можно в начальную эпоху определить расстояние точки А от принятого нулевого меридиана, чтобы отсчитывать долготы от точки А.

Точка А — общая для экваториальной и земной СКС, спроектированной на небесную сферу; её координаты изменяются в экваториальной и эклиптической системах, но в земной системе остаются зафиксированными в начальную эпоху. Поскольку полюс Земли отстоит от экватора на 90° , установка инструмента на экваторе заменяет тот кольшек на полюсе, забить который хотелось астрономам прошлого века [6].

Наиболее простая и точная для инструментов конца XX в. схема наблюдений представлена в статье [67], где рассмотрен метод уравнивания наблюдений с весами и анализируются веса результатов, переводимых в их ошибки вместе с определением ошибки единицы веса.

Возражение о недостаточности одного пункта для привязки земных координат к нему, поскольку там может произойти землетрясение, война и т. п., небезосновательно, но надо учесть, что широты всех пунктов, где проводятся наблюдения, связываются с широтой п. А, а долготы — с долготой п. А, и поэтому при необходимости другой пункт сможет заменить прежнее начала отсчёта. Однако целесообразно в пределах более широкой экваториальной зоны установить для наблюдений пункт В, отстоящий по долготе от точки А примерно на 90° . Использование координат звёзд $\hat{\alpha}$, $\hat{\delta}$, не связанных с небесными началами: нуль-пунктом и экватором, позволяет привести направления отвесов на пунктах наблюдений к направлению отвеса в одной точке А, что не препятствует сравнению разных пунктов, включая А, по их устойчивости.

Во вторую и последующие эпохи определяются координаты звёзд $\hat{\alpha}$, $\hat{\delta}$ и вместе с ними координаты $\hat{\lambda}$, $\hat{\phi}$ всех пунктов, кроме А. При этом значения *изменений* широт, полученных вместе с абсолютными склонениями звёзд и вместе со значениями $\hat{\delta}$, будут различными:

$$\hat{\phi}_k - \hat{\phi}_A \neq \phi_k - \phi_A. \quad (a)$$

Разности, стоящие в левой части, зависят от смещений пунктов относительно меридионального направления отвеса в точке А; общая часть смещений отражается на координате полюса x .

Изменения долгот пунктов, полученных вместе с абсолютными прямыми восхождениями звёзд и вместе с координатами $\hat{\alpha}$, также будут различными:

$$\hat{\lambda}_k - \hat{\lambda}_A \neq \lambda_k - \lambda_A. \quad (b)$$

Разности, стоящие в левой части, зависят от смещений пунктов относительно уклонения отвеса точки А в направлении первого вертикала, общая часть которых изменяет координату полюса y .

Запишем теперь известные уравнения, которые позволяют определить изменения средних координат полюса по наблюдениям¹:

$$\left. \begin{aligned} \Delta x \sin \lambda_k - \Delta y \cos \lambda_k + \Delta v_k &= \Delta \lambda_k, \\ \Delta x \cos \lambda_k + \Delta y \sin \lambda_k + \Delta v'_k &= \Delta \phi_k, \\ \Delta y \cos \lambda_A &= \Delta \lambda_A, \\ \Delta x \cos \lambda_A &= \Delta \phi_A, \quad k = 1, 2, \dots, K. \end{aligned} \right\} \quad (7.12)$$

Определение кроме смещений среднего полюса также собственных движений пунктов Δv и $\Delta v'$ возможно при отсчёте смещений от пункта А, что позволяет включить в систему (7.12) два последних уравнения, не содержащих собственных движений пункта А. Число неизвестных в системе окажется равным числу независимых уравнений.

¹В статьях [6, 7] автором допущена ошибка в записи первого уравнения системы (7.12), которая была правильной до тех пор, пока началом отсчёта долгот оставался Гринвичский меридиан. После перехода к началу на экваторе уравнение соответствует записанному здесь.

Уравнения (7.12) записаны в привычной для астрономов форме, когда все движения рассматриваются по отношению к полюсу. Решающее преимущество пункта А в том, что он, в отличие от полюсов, пригоден для проведения наблюдений — определения обеих координат звёзд.

Разности, стоящие в правой части неравенств (а) и (б), зависят не только от движения оси в теле Земли, но и от прецессионного вращения её оси. Поэтому открывается возможность использования различия в движениях звёзд в двух системах координат для уточнения модели, описывающей прецессионно-нутационное движение земной оси по наблюдениям. Эта задача относится к астрометрии, так же как исследование наблюдений Солнца методом равных высот с целью разделения движения точки Весны на две составляющие: движение по экватору и по эклиптике, опираясь только на ряды наблюдений Солнца в двух системах координат: «земной» $\hat{\alpha}_{\odot}$, $\hat{\delta}_{\odot}$ и «небесной» α_{\odot} , δ_{\odot} .

Решение задач, требующих продолжительных, вековых, наблюдений, не интересует современных астрономов. Техническая цивилизация приучает народы к жизни сегодняшним днём. Умудрённые историческим опытом, астрономы прошлого умели жить ради будущего, что нашло отражение в словах Коперника: «Течение светил и вращение звёзд может быть определено точным числом и приведено в совершенную ясность только с течением времени и после многих произведённых ранее наблюдений, которыми, если можно так выразиться, это дело передаётся из рук в руки потомству» («De Revolutionibus», 1543 г.).

Заключение

Целью обращения автора к истории астрономии является пояснение необходимости **сохранения и развития** абсолютного метода определения координат в арсенале фундаментальной науки. Наблюдатели далеких веков, не имевшие представления о **Строении Мира**, описывали «не мудрствуя лукаво» то, что они видят на сферической поверхности небесной сферы. **Их гениальность проявилась в создании способа сохранения и передачи фактов — изменяющихся Картин Мира в виде наиболее компактном и удобном для современников и потомков.** Они установили три связанные по построению вращающиеся сферические координатные системы (СКС), положения которых по отношению к звёздам и Солнцу можно было найти в любую эпоху, так что наблюдатели последующих эпох получали возможность обнаружить новые положения опорных кругов по отношению к этим светилам и друг к другу, а также к пунктам на Земле. Координаты Луны и других блуждающих светил, а впоследствии и внегалактических источников также становились определяемыми в экваториальной, эклиптической и горизонтальной СКС из любого пункта.

Постреволюционная астрометрия отвергает опыт нескольких тысячелетий, отказываясь от определения *наблюдаемых* положений экватора и эклиптики, связанных с отвесами в пунктах наблюдений, т. е. от абсолютного метода определения координат. *В арсенале астрономии остались только относительные методы*, которые, даже при высокой точности измерения угловых расстояний, до сих пор не позволили определить координаты звёзд, *не зависящие от исходных данных — значений координат эпохи наблюдений середины XX в.*

Предложенный теоретиками переход на изучение вращений тел относительно трёх осей барицентрической системы ICRS, *минуя стадию изучения движений их проекций*, вероятно, заинтересовал бы тех, кто изучает движения планет, при возможности наблюдений из центра Солнца. С таким же успехом можно рекомендовать наблюдения из центров Галактики и Земли соответственно для изучения вращений звёзд и смещений земных пунктов.

Отрицание абсолютного метода связано с тем, что 300-летний способ меридианных наблюдений звёзд не привёл к требуемой точности координат в фундаментальном каталоге. В 70-е гг. прошлого века Е. И. Крейниным и автором данной статьи было предложено математическое развитие метода равных высот с целью его использования для определения абсолютных координат звёзд [66, 67].

Авторы предлагали повысить точность определения абсолютных координат по крайней мере на порядок за счёт использования наиболее точных инструментов того времени, технических и организационных возможностей эпохи, нового микрометрического способа определения абсолютных склонений с земного экватора [58], а также нового способа уравнивания наблюдений по всей небесной сфере [67, 68, 73], эквивалентного решению уравнений наблюдений во всех обсерваториях по способу наименьших квадратов.

Эффективность методики определяется тем, что потери в точности измерений углов при выводе координат звёзд фундаментального (абсолютного) каталога и одновременно координат пунктов, принимавших участие в наблюдениях, сводятся к минимуму за счёт устранения систематических ошибок, возникавших на каждом из этапов обработки обсерваторских наблюдений и на этапе объединения их результатов при выводе координат фундаментального каталога. Предложенный метод уравнивания наблюдений направлен на вывод равноточных координат звёзд небесной сферы, а также пунктов — участников наблюдений за счёт рациональной организации работы: расстановки пунктов (обсерваторий или станций) и выборе звёзд их программ. Рациональная организация приводит к сокращению общего объёма труда.

На протяжении тысячелетий астрономические наблюдения расширяли возможности изучения движений небесных светил для будущих поколений и одновременно создавали так называемое координатно-временное обеспечение для потребителей своей эпохи. По мере развития технических средств для хранения и счёта времени, а также измерений углов и расстояний, уменьшалась необходимость частых обращений к астрономическим наблюдениям. С другой стороны, развитие классической небесной механики, использовавшей наблюдения прошедших эпох, обеспечило возможность перехода к эфемеридам, с точностью прогнозов, не достигнутой ни в одной другой отрасли знаний. Поэтому современные потребители координат и времени не скоро почувствуют свою зависимость от фундаментальных наблюдений. Эта особенность текущего века позволяет предположить, что достаточно будет один раз в столетие проводить тщательно спланированную международную кампанию с целью одновременного определения координат звёзд, абсолютных и связанных с началом отсчёта земных долгот и широт, а также координат пунктов наблюдений.

«Научные революции» в теоретической физике XX и в астрометрии начала XXI в., не внося какого-либо вклада в координатно-временное обеспечение потребителей, затормозили развитие фундаментальной астрономии на целый век.

Выполнение решений МАС о переходе на главную опорную радиосистему и отказ от абсолютных методов разрушит охраняемый в течение тысячелетий эмпирический базис, общий для астрономии и наук о Земле. Отрицание абсолютных методов лишает астрономов возможности не только изучения долгопериодических и вековых движений, но и решения актуальных задач, поставленных ещё в XIX в.

Эмпирический фундамент единой науки, астрономии и геодезии, восстанавливается и укрепляется при решении координатной проблемы методом, предложенным Е. И. Крейниным и автором данной статьи, позволяет *по наблюдениям* решать задачи, рассмотренные в разделе 7.2.

В любой отрасли науки, не только такой древнейшей, как астрономия, родившаяся вместе с арифметикой и геометрией, следует обращаться к истории для восстановления связи времён, преемственности идей, методов и мировоззрений. Иначе невозможно поднять уровень образования и повысить эффективность исследований в области точного естествознания, **утвердить науку как развивающуюся Систему знаний. «Формой, в которой существует истина, может быть лишь научная система её», — писал Гегель.**

Современная наука, утратившая общий эмпирический фундамент, превращается в собрание разрозненных сведений. Учащийся должен запомнить информацию, не связанную ни общей основой, ни взаимозависимостью; популяризируются искажения истории науки и мнений великих учёных прошлого для того, чтобы легче было их критиковать [1].

Точка зрения автора статьи на источник знаний противоречит мнению, господствующему в современной литературе, где проводится идея о бесполезности поиска источника знания в наблюдениях [74]. «Я не верю в концепцию, согласно которой наука начинается с наблюдений, из которых далее посредством процесса обобщения, или индукции, выводятся теории», — пишет К. Поппер [75, с. 114].

История астрономии говорит нам, что тьма средневековья рассеивалась по мере усвоения античного наследия: Коперник и Тихо Браге считали свои наблюдения продолжением наблюдений астрономов прошлых веков. Индуктивный метод был необходим не только для обобщения результатов наблюдений, но и для создания новых методов, например динамики, — Ньютон, как известно, справедливо утверждал, что «стоит на плечах гигантов».

Предпочтение переворотов («научных революций») постижению логики развития науки приводит к необходимости действия методом «проб и ошибок», что дорого обходится потерей труда и времени. Великий астроном Востока Бируни Абу Рейхан (X в.) писал: «Люди ныряют за крупинками какой-нибудь науки и надеются овладеть ею, не исходя из её основ и начал, и они запутываются в ней».

В заключение автор благодарит В. В. Попадъёва, инициатора обсуждения проблемы взаимодействия астрометрии и геодезии, за содействие в написании статьи.

Библиография

1. Толчельникова С. А. К вопросу о роли классического наследия для фундаментальных исследований. Геодезия и картография, 2011, № 7, с. 2–8.
2. Walter H. G., Sovers O. J. *Astrometry of Fundamental Catalogues*, 2000, Berlin, Springer, 231 p.
3. Толчельникова С. А. Международная небесная опорная система координат ICRS и революция в астрометрии. Геодезия и картография, 2002, № 9, с. 13–20.
4. Popaduev V. V., Tolchelnikova S. A. Some common problems in geodesy and astrometry after establishment of ICRF. In: *Recent development and problems in ground-based and space astrometry. Journees 2014, Pulkovo observatory, Observatoire de Paris*, p. 28–31.
5. Толчельникова С. А. Специфика подхода к понятиям пространство и время в математике и в астрономии. В сб.: *Проблемы пространства и времени в современном естествознании*. СПб.: ТРЦ РАН, 1991, с. 25–55.
6. Толчельникова С. А. Земная сферическая система координат, определение движения среднего полюса и земных пунктов. В кн.: *Гравиметрия и геодезия*. М.: Научный мир, 2010, с. 45–54.
7. Толчельникова С. А. Обоснование нового метода определения движения среднего полюса и пунктов наблюдений. Геодезия и картография, 2011, № 3, с. 3–11.
8. Губанов В. С., Финкельштейн А. М., Фридман П. А. *Введение в радиоастрометрию*. М.: Наука, 1983, 279 с.
9. Михайлов А. А. Кризис астрометрии. Доклад на заседании Астросовета АН СССР 26 мая 1969 г. Препринт АН СССР.
10. Губанов В. С., Финкельштейн А. М. Основные тенденции и проблемы фундаментального координатно-временного обеспечения. Пленарные доклады конференции «Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века», Труды ИПА, вып. 6, 2000, с. 3–13.
11. Hui N., Rui W. Optical positions of 55 radio stars from astrolabe observations from the Yunnan Observatory. *Yunnan Observatory, Academia Sinica, China. Astron. & Astroph.*, 2002, № 382, 1062–1066.
12. Федоров Е. П. *Общий взгляд на астрометрию. Геодинамика и астрометрия*. Киев: Наукова думка, 1980, с. 74–109.
13. Гаусс К. Ф. Лекции по теоретической астрономии, записанные Купфером. Собр. Трудов акад. А. Н. Крылова, т. 6, М.-Л., АН СССР, 1936, с. 229–452.
14. Птолемей К. *Альмагест*. М.: Наука, 1998, 671 с.
15. Идельсон Н. И. *История календаря*. В кн.: *Этюды по истории небесной механики*. М.: Наука, 1975, с. 308–411.
16. Коперник Н. *О вращении небесных сфер*. М.: Наука, 1964, 654 с.
17. Бируни Абу Рейхан. *Канон Масуда. Избранные произведения, т. 3. Геодезия*. Ташкент: ФАН, 1966, 363 с.
18. Толчельникова С. А. Вращение земной оси относительно Солнца и относительно звёзд. Геодезия и картография, 2010, № 9, с. 17–26.
19. Толчельникова-Мурри С. А. Коперник и восприятие его идей в XX веке. В сб.: *Памяти академика А. Н. Крылова*. СПб, 2013, с. 197–215. См. также Геодезия и картография, 1998, № 11–12.
20. Ньютон И. *Математические начала натуральной философии*. М.: Наука, 1989. 688 с.
21. Толчельникова С. А. Научная революция в физике и классическое наследие. Геодезия и картография, 2014, № 6, с. 8–19.
22. Толчельникова С. А. Инерциальная система координат и единство сил инерции и тяготения. В сб.: *Пространство. Время. Тяготение*. СПб.: ТЕССА, 2003, с. 437–450.
23. Толчельникова С. А., Калиберда В. С. К Критике «Механики» Э. Маха с позиции астрономии. *Клио*, 2004, № 3 (26), с. 120–124.
24. Newcomb S. *A Compendium of Spherical Astronomy*, 1906, N.-Y., Macmillan, 444 p.
25. Яшнов П. И. Абсолютные определения прямых восхождений звёзд. *Л.*, 1932, 32 с.
26. Идельсон Н. И. Закон всемирного тяготения и теория движения Луны. В кн.: *Этюды по истории небесной механики*. М.: Наука, 1975, с. 205–272.
27. Хандриков М. Ф. *Система астрономии (в трёх томах)*. Киев: тип. Фрица, 1875–1879.

28. Гершель Дж. Очерки астрономии (в двух томах), в переводе А. Драусушова, 1861. М.: Катков и Ко, 1862, 744 с.
29. Герасимович Б. П., Днепровский Н. И. Звёздная астрономия и фундаментальная система положений звёзд. Астрометрическая конференция в Пулковской обсерватории, 1932, Л., 1933, с. 137—151.
30. Толчельникова-Мурри С. А. К вопросу об определении абсолютного азимута. Вестн. ЛГУ, серия «Математика, механика, астрономия», 1980, вып. 19, с. 89—94.
31. Стрелкова И. А., Толчельникова-Мурри С. А. Анализ нескольких способов определения прямых восхождений звёзд. Вестн. ЛГУ, 1984, серия «Математика», вып. 7, с. 95—102.
32. Tolchelnikova-Murri S. A. On the Problem of Classifying Modern Methods for the Right Ascension Determination. Bull. De l'Obs. de Belgrade, 1986, N 136, p. 20—23.
33. Подобед В. В. Инерциальная система координат и некоторые задачи астрометрии. В кн.: Системы координат в астрометрии. Ташкент: ФАН, 1971, с. 58—64.
34. Толчельникова-Мурри С. А. Перспективы развития оптических служб вращения Земли. В сб.: Проблемы построения координатных систем в астрономии. Л., ГАО АН СССР, 1989, с. 176—183.
35. Kovalevsky J. Some Problems Related to the Definition of Reference Systems — Proceedings of IAU Colloquium № 26, 1974, Warsaw, Poland, p. 123—132.
36. Подобед В. В., Нестеров В. В. Общая астрометрия. М.: Наука, 1975. 551 с.
37. Абалякин В. К. К предстоящей реформе астрономических ежегодников. В сб.: Проблемы исследования Вселенной. М.-Л., АН СССР, ВАГО, 1978, с. 108—122.
38. Kovalevsky J., Muller I., Kolarczek V. Reference Frames in Astronomy and Geophysics, 1989, Dordrecht Boston London, 474 p.
39. Маррей К. Э. Векторная астрометрия. Киев: Наукова думка, 1986, 326 с.
40. Koreikin S., Froimsky M., Kaplan G. Relativistic celestial mechanics of the Solar system. General Relativity and Gravitation, 2011. John Wiley and sons, 860 p.
41. Кузьмин А. В., Куимов К. В., Наджип А. Э. Космическая астрометрия: От миллисекунд к микросекундам. Пленарные доклады конференции «Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века». Труды ИПА, вып. 6, 2000, с. 60—66.
42. Витязев В. В. Системы отсчёта и будущее наземной астрометрии. Пленарные доклады конференции «Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века». Труды ИПА, вып. 6, 2000, с. 93—101.
43. Толчельникова С. А. Расстояния и время: математические, измеряемые и выражаемые через скорость света. Геодезия и картография, 2015, № 9, с. 8—16.
44. Толчельникова С. А. Синхронизация движущихся часов и парадокс времени. Геодезия и картография, 2016, № 6, с. 8—17.
45. Толчельникова С. А. О взаимодействии астрометрии и геодезии в области изучения вращения Земли. Геодезия и картография, № 8, 2009, с. 21—29.
46. Попадъёв В. В., Толчельникова С. А. К вопросу о замене главной оптической системы координат на радиосистему. Геодезия и картография, 2015, № 2, с. 13—19.
47. Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебания климата. М.-Л.: ГОНТИ, 1939. 260 с.
48. Кумкова И. И. Связь радио- и оптической систем координат. В сб.: Проблемы построения координатных систем в астрономии. Л.: АН СССР, 1989, с. 137—144.
49. Липовка А. А., Липовка Н. М. Радиоизлучение скопления галактик A1716 и группы звёзд. Астрофизика, 2013, т. 56, вып. 2.
50. Липовка А. А., Липовка Н. М. Проблемы привязки радионеба к оптическому небу. История и перспективы. Геодезия и картография, № 10, 2013, 2—7.
51. Korf A. Star Catalogues, Especially those of Fundamental Character. George Darwin Lecture, 1936, v. 96, № 8, p. 714—730.
52. Немиро А. А., Павлов Н. Н. Влияние систематических ошибок звёздных каталогов на определение неравномерности вращения Земли (Доклад на симпозиуме по вращению Земли и атомным стандартам). АЖ, 1959, т. 36, № 5.
53. Толчельникова-Мурри С. А., Туренко В. И., Измайлов Р. С., Литкевич Н. Г., Симоненко В. Д. К проблеме организации позиционных наблюдений с оптическими инструментами службы вращения Земли. Изв. ГАО, 1994, с. 84—91.
54. Саджакова С. Н., Толчельникова-Мурри С. А. К проблеме выбора методики наблюдений и международного сотрудничества в области фундаментальной астрометрии. В сб.: Проблемы построения координатных систем в астрономии. Л.: ГАО АН СССР, 1989, с. 79—87.
55. Крейнин Е. И. Абсолютное определение склонений звёзд с инструментами, не имеющими точных разделённых кругов. АЖ, 1968, т. 45, вып. 2, с. 447—455.

56. Дебарба С., Гино Б. Метод равных высот в астрономии. М.: Наука, 1979, 142 с.
57. Крейнин Е. И., Мурри С. А. Абсолютные определения склонений экваториальных звёзд микрометрическим способом. Труды 18 Астрометрической конференции СССР. Л.: Наука, 1972, с. 133—141.
58. Крейнин Е. И., Мурри С. А. Определение абсолютных склонений экваториальных звёзд из микрометрических наблюдений вблизи экватора. АЖ, 1973, т. 50, вып. 3, с. 606—614.
59. Зверев М. С. О методе Крейнина—Мурри абсолютного определения склонений. АЖ, 1970, т. 47, вып. 6, с. 1300—1307.
60. Михайлов А. А. Об определении точки экватора при наблюдении склонений звёзд. АЖ, 1973, т. 50, вып. 6, с. 1280—1283.
61. Михайлов А. А. О точности определения абсолютных склонений экваториальных звёзд из наблюдений на земном экваторе. Письма в АЖ, 1976, т. 2, № 9, с. 455—457.
62. Толчельникова-Мурри С. А., Варин М. П. Программа наблюдений экваториальной экспедиции Пулковской обсерватории. Изв. ГАО, 1977, № 195, с. 67—73.
63. Крейнин Е. И., Мурри С. А. Учёт аномальной рефракции при абсолютных наблюдениях склонений звёзд микрометрическим способом. Изв. ГАО, 1977, № 195, с. 37—42.
64. Толчельникова-Мурри С. А. Модификация метода Крейнина—Мурри. Изв. ГАО, 1991, № 207, с. 25—30.
65. Крейнин Е. И., Мурри С. А. Построение системы склонений звёзд с помощью астролябий. Современные проблемы позиционной астрометрии. Труды 19 Астрометрической конференции СССР. М., 1974, с. 236—240.
66. Крейнин Е. И., Толчельникова-Мурри С. А. Метод равных высот—резерв фундаментальной астрометрии. В сб.: Астрометрия и небесная механика. М.-Л.: ЛО ВАГО, 1978, с. 216—224.
67. Крейнин Е. И., Толчельникова-Мурри С. А. Определение однородных по точности координат звёзд в единой системе из наблюдений с астролябиями. Астрометрия и астрофизика, 1981, № 44, с. 60—70.
68. Толчельникова-Мурри С. А., Крейнин Е. И. Определение абсолютных прямых восхождений с малыми пассажными инструментами. Изв. ГАО, 1980, № 198, с. 66—77.
69. Толчельникова-Мурри С. А. Выбор главных звёзд при наблюдениях с астролябиями на разных широтах. Изв. ГАО, 1988, № 205, с. 21—25.
70. Пранис-Праневич И. Ю. Руководство по уравнительным вычислениям триангуляции. М.: Геодезиздат, 1956, 363 с.
71. Крейнин Е. И. Выбор оптимальных условий для абсолютных определений склонений звёзд с астролябиями. АЖ, 1986, т. 63, вып. 3, с. 589—596.
72. Беруни Абу Рейхан. Канон Масуда. Избранные произведения, т. 5, ч. I. Ташкент: ФАН, 1972, 612 с.
73. Крейнин Е. И., Толчельникова-Мурри С. А. О раздельном и совместном решении систем уравнений в астрономии. Изв. ГАО, 1982, № 200, с. 72—79.
74. Поппер К. Ницета историзма. М.: Прогресс, 1993, 86 с.
75. Поппер К. Об источниках знания и незнания. Вопросы истории естествознания и техники, 1992, № 3, с. 5—30.