

УДК 528.2

Обоснование нового метода определения движения среднего полюса и пунктов наблюдений

© Толчельникова С. А., 2011

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук,
г. Санкт-Петербург

mchubey@gao.spb.ru

Устанавливая системы координат λ , φ для изучения движений полюса и земных пунктов, астрономы и геодезисты по-прежнему используют координаты звезд (квазаров), отсчитываемые от небесных нуль-пунктов. Поясняется разработанный в статьях [1-3, 12] метод глобального уравнивания наблюдений на разных пунктах Земли с целью определения координат пунктов λ , φ и звезд $\hat{\alpha}$, $\hat{\delta}$, отсчитываемых от направления отвесной линии экваториальной обсерватории A с нулевой долготой. Показана связь движений полюса земли с наблюдениями в точке A и возможность использования ее в качестве исходного пункта международной астрономо-геодезической сети.

Проекция земного экватора, астрономо-геодезическая сеть.

Projection of the Earth's equator, astronomical-geodetic net.

*Посвящается памяти
Ефима Ильича Крейна,
геодезиста и астронома*

Введение

В 2010 г. вышла в свет монография «Гравиметрия и геодезия». Нельзя не отметить огромного труда ответственного редактора монографии Б. В. Бровара и его помощников, потребовавшегося для создания этой большой работы, которая, несомненно, будет способствовать преодолению процесса дифференциации науки, продолжающегося в настоящее время. Стремление к синтетическому подходу, отмеченное в предисловии ответственного редактора, проявилось в привлечении к участию в работе над книгой специалистов разных отраслей науки о Земле. Стремлением к взаимодействию специалистов разных отраслей руководствуется также редколлегия журнала «Геодезия и картография», о чем свидетельствуют, например, публикации, посвященные общим проблемам астрономии и геодезии.

В частности, в ряде статей М. И. Юркина обращала внимание на необходимость уточнения теории прецессии-нутации земной оси для исключения влияния ошибок этой теории на выводимые координаты полюса [13, 14]. Мы полагаем, что возможности астрономических наблюдений для решения этой проблемы еще не исчерпаны [11].

Для астрономии также важно решение вопроса, поставленного сотрудниками ЦНИИГАиК, об установлении Международной земной системы координат. В статье [11] эта тема обсуждалась, но выдвинутое там предложение об определении средних движений полюса и пунктов, не зависящих от вращения земной оси в пространстве, т. е. по отношению к звездам (квазарам), не было обосновано, в частности, вопрос о точности решения не рассматривался.

За четыре года, прошедших со времени сбора статей для монографии «Гравиметрия и геодезия», были опубликованы статьи [8–10] с обсуждением методов изучения вращения Земли. Это облегчает нашу задачу, позволяя существенно дополнить и уточнить изложенное в статье [11].

Историческая справка

До XX в. по астрономическим наблюдениям определяли вращение земной оси по отношению к двум нуль-пунктам небесной сферической координатной системы (СКС): полюсу Мира и точке весеннего равноденствия. Движением полюса стали называть второе движение той же оси относительно пунктов на земной поверхности. Такое разделение движения одной и той же оси вращения объясняется не только стремлением к краткости выражения. Полюсы, северный и южный, – это точки пересечения оси с конкретной поверхностью. У сферической поверхности небесной сферы радиус и центр неопределенные [8], следовательно, точки пересечения оси с такой поверхностью не могут быть однозначно определены, можно указать лишь направления, представленные значениями углов между осью и звездами (либо квазарами). Направления на звезды были сведены в СКС и задавались двумя углами – координатами, отсчитываемыми от небесного экватора, связанного с полюсом Мира δ , и от точки весеннего равноденствия α . Новая радио система ICRF также имеет небесные нуль-пункты.

С целью обнаружения периодических колебаний полюса была создана Международная служба широты (МСШ), и с 1899 г. начались регулярные наблюдения пяти станций. Опыт астрономов – организаторов МСШ – заслуживает внимания потому, что ими была отчетливо осознана необходимость установления международной земной СКС для изучения изменений координат полюса. Движения полюса определялись по наблюдениям за изменениями широт станций φ , начальные значения которых «были определены как можно точнее с использованием лучших каталогов склонений звезд» с целью установления Международного условного начала (МУН)». «МУН определяет полюс малого круга, проходящего через зениты станций эпохи 1903 г.» [5]. Проекция полюса – воображаемой точке на сфере – однозначно соответствует большой круг – небесный экватор. Еще в 1884 г. было принято единое начало отсчета долгот λ от меридианного круга в Гринвиче, и вопрос об установлении земной СКС был решен.

Для вывода координат полюса x_i, y_i по наблюдениям МСШ использовались текущие значения широт $\varphi = f(z, \delta)$, зависящие от измеряемых зенитных расстояний и вычисленных на момент наблюдений склонений звезд, которые до сих пор продолжают отсчитываться от небесного экватора. Небесный экватор подвижен относительно станций наблюдений и относительно звезд. Следовательно, при выводе изменений широт и движения полюса необходимо исключить из наблюдаемых величин (например, зенитных расстояний) изменения склонений звезд за период от начальной эпохи T_0 до момента наблюдения t_i , для этого используются «теоретические» поправки, вычисляемые на основе полуэмпирических численных моделей, учитывающих прецессию-нутацію оси [10, с. 9].

Еще Эйлером было отмечено, что наблюдений недостаточно для определения движения полюса в пространстве и по отношению к земной поверхности, поскольку наблюдения приводят к недоопределенной системе уравнений: число неизвестных, подлежащих определению, больше числа независимых уравнений [16, с. 204].

После того, как было установлено, что кроме периодических колебаний существуют нерегулярное движение полюса и движения самих станций, приводящие к неполярным изменениям их координат, число неизвестных увеличилось, и недоопределенность систем уравнений возросла. Исправить это было невозможно за счет разнообразия используемых инструментов и значительного увеличения числа станций, что произошло при организации других международных служб.

Для определения движения полюса и станций – обсерваторий – стали использовать наблюдения не только за изменениями широт, но и поправки часов, которые зависели от Всемирного времени нулевого меридиана с долготой, не изменяющейся из-за движения полюса. Для определения Всемирного времени требовался Фундаментальный звездный каталог с уточненным значением прецессии оси. Следовательно, изменения не только широт, но и долгот зависели от изменений небесных координат звезд.

Напомним, что начало отсчета долгот в XX в. перенесли на экватор, на продолжение гринвичского меридиана [4, с. 476], после чего нуль-пункт оказался в океане, следовательно, не отмеченным каким-либо репером. Изменения долгот и широт стали определять по отношению к средним координатам тех станций, которые в данный период времени считались наиболее устойчивыми.

Ошибки моделей, по которым учитывается прецессионно-нутационное вращение земной оси относительно звезд и квазаров, считаются существенным фактором, искажающим выводимое движение полюса. Об этом свидетельствуют попытки уточнения нутационных колебания земной оси по наблюдениям международных служб, созданных для изучения движения полюса. Выше упоминалось о невозможности точного решения двух этих задач по таким наблюдениям [16, с. 209].

Постановка задачи

Ставя задачу определения средних движений, мы предлагаем, во-первых, использовать наблюдения компактных радиоисточников с РСДБ для учета мгновенных колебаний земной оси и неравномерности вращения Земли при выводе средних координат звезд. Во-вторых, при выводе средних широт и долгот использовать данные наблюдений искусственных спутников Земли (GPS, ГЛОНАС и лазерные наблюдения), которые не зависят от изменений координат звезд и квазаров.

Координаты среднего полюса принято и целесообразно выводить по шестилетним наблюдениям, но использование точных способов учета колебаний мгновенного полюса позволяют сократить этот период, который, очевидно, не может быть меньше года. Предлагаемое решение задачи определения средних координат полюса и земных пунктов связано с существенным изменением методики обработки наблюдений.

Земная ось, определяемая из астрономических наблюдений, еще не связана с центром Земли. Астрономы, по образному выражению Е. П. Федорова, «определяют места зенитов обсерваторий среди звезд», т. е. наблюдения служб Вращения Земли, как и астрономо-геодезические наблюдения проектируют, или продолжают направления отвесов в пунктах наблюдений на сферические места, заданные координатами звезд.

После установления международных начал (нуль-пунктов) для отсчетов координат λ и φ международные службы не изменили практику отсчета координат звезд. Поэтому изменения величин, измеряемых на станциях, зависят не только от движений нуль-пунктов земной системы координат λ , φ , но и от изменений координат звезд, а после «революции в астрометрии» – от вращений Земли и ее оси относительно квазаров [9].

Если бы удалось отсчитывать координаты звезд (квазаров) от проекций нуль-пунктов, закрепленных земными реперами, то влияние указанных выше вращений на измеряемые величины удалось бы исключить. Тогда искомые нами движения, получаемые из астрометрических измерений, зависели бы только от движений пунктов наблюдений относительно установленных земных реперов, отмеченных астрономическими инструментами. Возможность решение такой задачи появилась после освоения средств современной вычислительной техники. Прежде, чем перейти к предлагаемому методу уравнивания наблюдений, от которого зависит точность решения задачи, остановимся на связи между движением полюса и наблюдениями звезд в точке на земном экваторе с нулевой долготой.

Влияние движения полюса на изменения координат звезд $\hat{\alpha}$ и $\hat{\delta}$, определяемых в точке на экватора с нулевой долготой и широтой

Известные дискуссии XX в. о выборе начала для привязки геодезических сетей были связаны с обнаружением нерегулярного движения среднего полюса и переходом на МУН. А. А. Михайлов напомнил о высказывавшихся сожалениях по поводу невозможности зафиксировать начальное положение полюса с помощью астрономического инструмента, установленного на полюсе: «В докладе на Киевском пленуме Е. П. Федоров подчеркнул, что мы не можем вбить колышек там, где мгновенная ось вращения пересекает земную поверхность» [5, с. 614].

Действительно, льды Северного Ледовитого океана не пригодны для проведения стационарных наблюдений. Предпринятая попытка наблюдений за изменением широты непосредственно вблизи южного полюса не могла быть успешной, хотя бы потому, что антарктические льды подвижны. На полюсе невозможны определения долгот, которые, как показал опыт прошлого века, необходимы для изучения движений полюса, и способы определения широты теряют точность при наблюдениях вблизи полюса.

отсчитываемые от постоянного нулевого меридиана обсерватории \underline{A} , изменятся на $\varepsilon_y \operatorname{tg} \widehat{\delta}$, следовательно изменятся и $\widehat{\alpha}$.*

Если за период $T_1 - T_0$ средний полюс сместился на $\Delta y = \varepsilon_y$, то изменятся координаты $\widehat{\alpha}$: $\widehat{\alpha}_1 - \widehat{\alpha}_0 = \varepsilon_y \operatorname{tg} \widehat{\delta}$.

Такой способ определения смещения полюса по координате у практической ценности не представляет, поскольку ошибки наблюдений растут вместе с увеличением зенитных расстояний. Смещения полюса по координате у можно значительно точнее определить по наблюдениям за изменениями склонений, приведенных к точке зенита обсерватории \underline{B} , отстоящей по долготе от \underline{A} на 90° [11].

Перейдем к меридианным наблюдениям на разных пунктах Земли. Для приведения координат всех наблюдавшихся звезд к системе широты и долготы обсерватории \underline{A} необходимо наличие «зон перекрытия», т. е. чтобы звезды или часть звезд в каждой из зон наблюдались хотя бы на двух смежных по широте обсерваториях.

1. При этом условии представляется очевидной возможность приведения склонений к нулевой широте экваториальной обсерватории. Система уравнений, полученных по наблюдениям на всех пунктах, имеет однозначное решение при добавлении к уравнениям

$$\delta_i - \varphi_{i,k} = z_{i,k} \quad (1)$$

уравнений, полученных на обсерватории \underline{A} вида

$$\widehat{\delta}_i = z_{i,A}, \quad (2)$$

где k – номера обсерваторий; $k = 1, 2, \dots, K$; i – номера общих звезд, наблюдаемых хотя бы на двух соседних по широте обсерваториях.

Система уравнений (1) + (2) позволяет определить поправки склонений $\widehat{\delta}$, наблюдавшихся на всех пунктах, и разности средних широт, не зависящие от положений звезд. Следовательно, по наблюдениям в две эпохи можно определить изменения средних широт пунктов $\Delta\varphi_k = \varphi_k - \varphi_0$ между двумя периодами наблюдений.

2. Выше было показано, что определения координаты $\widehat{\alpha}$ по меридианным наблюдениям на экваторе неточны, поэтому их использование в качестве опорных на других широтах не выгодно. При последовательном приведении результатов наблюдений на пунктах в систему обсерватории \underline{A} ошибки значений $\widehat{\alpha}$ и разностей долгот будут возрастать по мере удаления от экватора.

Метод точного решения вопроса по обеим координатам рассмотрен в следующем разделе.

Метод уравнивания астрономических наблюдений

Главной частью предложенного метода является уравнивание наблюдений для определения средних координат звезд $\widehat{\alpha}$, $\widehat{\delta}$ и пунктов λ_k и φ_k ($k P A$), обеспечивающий возможность заранее рассчитать необходимые веса искомым координат, отсчитываемых относительно обсерватории \underline{A} и не зависящих от движений в небесной опорной системе.

Точность результатов зависит от используемых инструментов. В 1970–1980 гг. прошлого века наиболее точным методом наблюдений считался метод равных высот. Были изготовлены новые фотоэлектрические астролябии и циркумзениталы, например, в Китае, Франции и Японии. Пока функционировали международные оптические службы, определявшие вращение Земли, наблюдения с этими инструментами предназначались для повышения надежности их выводов.

С другой стороны, в те же годы авторами статей [2, 3] был усовершенствован метод равных высот, ориентированный на решение актуальной проблемы уточнения абсолют-

* Равные по весу значения $\widehat{\alpha} \cos \delta$ при $\delta = z$ изменятся на $\varepsilon_y \sin z$.

ных координат звезд. Была решена задача отдельного определения прямых восхождений и склонений с этими инструментами, а также изложен способ приведения прямых восхождений и склонений в систему одной обсерватории для последующей связи координат с небесным экватором и с точкой Весны по наблюдениям Солнца. Было показано, что такую обсерваторию выгоднее всего расположить на земном экваторе. Первоначально метод уравнивания был разработан для метода равных высот, используемого в наблюдениях с наиболее точными инструментами (см. [2, 3] и библиографию в них). Метод равных высот сложнее меридианного, который общеизвестен, благодаря простоте.

В СССР, при изучении вращения Земли значительная роль отводилась наблюдениям с малыми пассажными инструментами (ПИ) и зенит-телескопами. Поэтому в статье [12] был разработан способ решения задачи по наблюдениям с ПИ. Возможность использования всех инструментов международной службы для уточнения главной опорной СКС той эпохи была затем показана в ряде статей (см., например работу [7] и библиографию в ней).

Таким образом, предложенный метод уравнивания наблюдений применим к решению разных задач с инструментами разного типа [12, с. 74–76]. Общим положением является то, что неизвестные, подлежащие определению, разделяются на две группы: средние координаты звезд и пунктов, постоянные на весь период наблюдений, и переменные параметры, например, поправки к установке инструментов по зенитному расстоянию (в методе равных высот) и по азимуту (при наблюдениях прямых восхождений в меридиане).

Изменения параметров установки инструментов необходимо определять как можно чаще, поэтому решение разбивается на два этапа, первый из которых осуществим на той обсерватории (или в том пункте), где производились наблюдения. На втором этапе наблюдения всех пунктов объединяются в одну систему для решения, которое равнозначно совместному уравниванию по способу наименьших квадратов исходных уравнений наблюдений* на всех пунктах.

Мы поясним метод на примере уравнивания меридианных наблюдений с ПИ. В используемых астрономами уравнениях наблюдений

$$a \sin z \sec \delta + (\Delta \alpha - \Delta u) = l \text{ с весом } p = \cos^2 \delta$$

заменяем поправку часов поправкой долготы обсерватории

$$a_j \sin z_i + (\Delta \alpha_i + \Delta \lambda) \cos \delta = l_{i,j} \quad p = 1. \quad (3)$$

После перехода на Всемирное атомное время две задачи – определение координат и измерение времени – приобрели относительную независимость. По крайней мере, эти задачи можно считать независимыми в течение периода, значительно превышающего прежний, принятый при использовании точных механических часов (XX в.). Следовательно, возражения против предложенной замены Δu на Δy , выдвигавшиеся астрономами в 1970–1980 гг. и задержавшие публикацию статей [2, 3, 12], стали заведомо несостоятельными.

В системе (3) Δy – поправка к принятому значению средней долготы пункта, считающаяся положительной к западу; индекс i – номер звезды; j – номер наблюдения группы звезд; a_j – азимуты отсчитываемые от точки севера.

Переходя от прямых восхождений, отсчитываемых от точки Весны, к координатам $\hat{\alpha}$, на каждом из пунктов заменяем постоянные на весь период наблюдений неизвестные одним:

$$(\Delta \hat{\alpha}_i + \Delta \lambda) \cos_i \equiv y_i$$

и получаем вместо системы (3) систему уравнений

$$a_j \sin z_i + y_i = l_{i,j},$$

где y_i – приведенная к экватору поправка прямого восхождения i -й звезды, искаженная влиянием принятой долготы пункта.

Как известно, наблюдения многих инструментов, участвовавших в Международных службах, производились по программам, состоящим из 12 групп. За время наблюдений каждой группы

* В геодезии принято называть аналогичные уравнения уравнениями погрешностей [6].

(2 часа) переменный параметр установки предполагался постоянным. Для вывода прямых восхождений использовался приближенный цепной метод, ошибкам которого посвящено много статей.

В работе [12] было показано, что система исходных уравнений имеет точное решение, если в группах, разделенных по времени на полгода, наблюдаются одни и те же звезды в разноименных кульминациях (нижней – н. к. и верхней – в. к.). Например, в группе № x наблюдается звезда № 1 в верхней кульминации, а звезда № 2 – в нижней, через полгода в группе № $x + 6$ звезда № 1 наблюдается в н. к., а звезда № 2 – в в. к. Звезды (с $\delta \approx 90^\circ$), наблюдаемые в двух кульминациях в противоположных группах, названы главными. Из анализа одноразовых наблюдений были получены выражения для весов p_a и p_y главных звезд, что послужило основой рекомендаций для составления программ наблюдений на разных широтах. Хотя веса неизвестных возрастают при включении главных звезд с большой разностью зенитных расстояний в верхней и нижней кульминации, наблюдения на $z > 45^\circ$ или 50° не рекомендуются [12, с. 67–71].

Поскольку одни и те же звезды наблюдаются несколько раз в разные ночи, общее число неизвестных зависит от числа звезд и пунктов наблюдений, а также числа определяемых значений азимута a_j , зависящего от числа групп, умноженного на общее число наблюдений. Хотя современные технические средства позволяют решать большие системы уравнений с множеством неизвестных, тем не менее, часто матрицы разбиваются на блоки, решаемые по отдельности, и добиваются практической эквивалентности совместному решению исходных уравнений наблюдений. В статьях [2, 3, 12] доказываются возможность точного решения исходных уравнений по способу наименьших квадратов при одновременном сокращении числа неизвестных путем использования преобразований Шрейбера, т. е. перехода к эквивалентным, биеквивалентным и т. д. уравнениям. Такие преобразования давно используются в геодезии и подробно описаны в книге [6].

На первом этапе уравнивания, т. е. отдельно на каждом пункте, последовательно исключаются неизвестные a_j , и после каждого исключенного неизвестного добавляется уравнение с отрицательным весом [6]. В рассматриваемом случае, поскольку неизвестное a_j входит только в одну группу наблюдений, один из блоков определителя нормальной системы уравнений является диагональной матрицей. Поэтому многие гауссовы суммы обращаются в нуль, облегчая объединение наблюдений, полученных по многократным наблюдениям одной и той же группы звезд, в одно уравнение. При этом определяются новые веса P для неизвестных a_j и y_i [12]. Упомянутые преобразования не только сокращают число неизвестных и уравнений для второго этапа решения задачи, но и позволяют представить значение исключаемого азимута в виде

$$a_j = L + K,$$

где L – значение азимута, вычисленное по координатам звезд исходного каталога и принятой долготы.

Значение L можно вычислить после каждого наблюдения группы, чтобы использовать изменение значений L для контроля [3, 12]. Второе слагаемое K может быть получено на втором этапе в результате совместного решения, объединяющего результаты всех пунктов, что позволит затем уточнить (привести в единую систему) значения азимута a_j при каждом наблюдении группы звезд. На втором этапе определяются средние координаты $\bar{\alpha}$ и долготы пунктов λ_k по отношению к постоянной нулевой долготе обсерватории \underline{A} .

Пусть для n звезд экваториальной зоны, наблюдаемых на нескольких широтах, получены значения $y_{i,k}$, которые становятся правыми частями уравнений в системе

$$\Delta \bar{\alpha}_i + \Delta \lambda_k = y_{i,k} \sec \delta_i \text{ с весом } P_{i,k} \cos^2 \delta_i. \quad (4)$$

На обсерватории \underline{A} для тех же звезд справедливы уравнения

$$\Delta \bar{\alpha}_i = y_{i,k} \sec \delta_i \text{ с весом } P_{i,A} \cos^2 \delta_i. \quad (5)$$

Систему уравнений (4) + (5) можно решить даже по наблюдениям общих звезд на двух пунктах, если на одном из них наблюдаются главные звезды, при тройном перекрытии веса прямых восхождений и долгот возрастают.

Несмотря на то, что на обсерватории \underline{A} невозможно наблюдать нижние кульминации звезд, в результате совместного уравнивания всех наблюдений можно добиться желаемого веса для

долгот λ_k и прямых восхождений $\hat{\alpha}$. Веса неизвестных получаются тем выше, чем больше пунктов на разных широтах и общих звезд, наблюдаемых на обсерватории \underline{A} и на пунктах*.

При расстановке пунктов по широтам необходимо учитывать, какие из неизвестных должны быть получены с наибольшим весом – координаты звезд $\hat{\alpha}$ по всему небу (астрономическая задача), либо долготы конкретных пунктов, представляющих интерес для геодезии. Это замечания относятся также к определению склонений $\hat{\delta}$ и широт, приводимых к нулевой широте обсерватории \underline{A} [3].

Приведенные к нулевой долготе значения прямых восхождений содержат нуль-пункт используемой шкалы времени (в настоящее время – атомной).

Вывод искомым движений полюса и пунктов

Для решения задачи необходимо объединить результаты определений долгот и широт, приведенных к отвесной линии обсерватории \underline{A} , проведенных в две соседние эпохи на всех пунктах, что приведет к системе уравнений

$$\left. \begin{aligned} (\Delta x \sin \lambda_k - \Delta y \cos \lambda_k) \operatorname{tg} \varphi_k + \Delta \nu_k &= \Delta \lambda_k \\ \Delta x \cos \lambda_k + \Delta y \sin \lambda_k + \Delta \nu' &= \Delta \varphi_k \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь $\Delta \lambda$ и $\Delta \varphi$ – изменения координат пункта между двумя эпохами, вызванные движением полюса Δx , Δy и собственными смещениями пунктов по долготе $\Delta \nu$ и широте $\Delta \nu'$ относительно обсерватории \underline{A} . Число неизвестных в системе равно $K + 2$, а число независимых уравнений K . Необходимо воспользоваться отсутствием смещений $\Delta \nu$ и $\Delta \nu'$ точки \underline{A} с постоянными нулевыми координатами λ , φ , что приводит второе из уравнений в системе (6) к виду

$$\Delta x = \Delta \varphi_A. \quad (7)$$

Аналогично на второй экваториальной обсерватории \underline{B} , отстоящей от \underline{A} на 90° по долготе, поскольку ее координаты приведены в систему \underline{A} в результате глобального уравнивания наблюдений двух периодов, получаем

$$\Delta y = \Delta \varphi_B. \quad (8)$$

Система уравнений (6) + (7) + (8) имеет однозначное решение.

Практически едва ли возможно найти место на Земле для установки двух обсерваторий на широте, близкой к нулю и разделенных на 90° по долготе. Можно исследовать другие возможности расположения обсерваторий, но, безусловно, выгодно установить кроме \underline{A} обсерваторию в зоне, близкой к экватору и отличающейся по долготе от \underline{A} примерно на 90° . В таком случае ($\operatorname{tg} \varphi \approx 0$) разность долгот \underline{A} и \underline{B} будет практически не зависеть от движения полюса, а только от значения $\Delta \nu_B$, которое вместе с $\Delta \nu'_B$ определяется из уравнивания наблюдений, так как оба неизвестных входят в систему уравнений (6).

В предложенном методе уравнивания наблюдений каждого периода вместе с искомыми величинами определяются их средние квадратичные ошибки, поэтому каждому уравнению системы (6) + (7) + (8) соответствует вес, известный, благодаря значениям ошибок величин, определенных в два периода. Таким образом, появляется возможность вычисления искомым движений полюса и пунктов вместе с их средними квадратичными ошибками.

Кроме независимости искомым движений от движений небесных СКС, мы видим преимущество предлагаемого решения перед другими в том, что искомые движения определяются без использования каких-либо ограничений на движения пунктов относительно обсерватории \underline{A} , или от принятого начального положения полюса.

Заключение

Предложенный метод (в отличие от используемых в настоящее время) позволяет исключить ошибки в учете влияния вращений Земли и ее оси на определяемые движения среднего полюса

* В статье [12, с. 68] показана возможность определения азимута для интервалов менее двух часов.

и пунктов наблюдений. Для решения задачи мы ввели систему координат звезд $\hat{\alpha}, \hat{\delta}$, отсчитываемых от экваториальной обсерватории \underline{A} ($\Phi_A \beta 10''$), установленной на нулевом меридиане.

В астрономии наряду с главной СКС существуют специализированные системы, создаваемые для решения конкретных задач, например, галактическая СКС с координатами A, D . Система $\hat{\alpha}, \hat{\delta}$ представляет интерес для астрономии, потому что кроме эклиптики и небесного экватора появляется третий большой круг на небесной сфере, который является проекцией земного экватора. Очевидно, до тех пор, пока возможность изменений широт не рассматривалась, не было необходимости в разделении упомянутых двух экваторов.

Аналогично тому, как небесный экватор находят по абсолютным склонениям звезд, проекция среднего места земного экватора на сферу обнаруживаются по значениям склонений звезд $\hat{\delta}$, а также проектируемым на сферу широтам станций $\hat{\Phi}_k$. При этом использование координат $\hat{\alpha}, \hat{\delta}$ в качестве опорных при наблюдениях на пунктах, не принимавших участия в уравнивании наблюдений (например, на пунктах астрономо-геодезической сети), дает возможность приведения их координат λ, Φ к одному направлению.

«Наиболее просто можно установить связь координатной (геодезической, *С.Т.*) системы с Землей, назначив координаты некоторой точке земной поверхности («например, исходному пункту астрономо-геодезической сети»)), – пишет М. И. Юркина в [15, с. 117].

Полагаем, что система $\hat{\alpha}, \hat{\delta}$ окажется полезной для геодезии, так как позволит связать уклонения отвесных линий на многих пунктах с составляющими η и ξ уклонения отвеса от нормали к референц-эллипсоиду в пункте \underline{A} . Исходя из простоты перехода от \underline{A} к координатам полюса, а также оценки точности определения искомым величин, можно утверждать, что экваториальная обсерватория является наиболее выгодным исходным пунктом Международной астрономо-геодезической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крейнин Е. И., Толчельникова-Мурри С. А. Метод равных высот – резерв фундаментальной астрометрии. Сб: Астрометрия и небесная механика / Проблемы исследования Вселенной: Вып. 7. – М.-Л.: изд. АН СССР, ВАГО, 1978. – С. 216–224.
2. Крейнин Е. И., Толчельникова-Мурри С. А. Определение однородных по точности координат звезд в единой системе из наблюдений с астрометриями // Астрометрия и астрофизика. – 1981. – № 44. – С. 60–70.
3. Крейнин Е. И., Толчельникова-Мурри С. А. Учет аномальной (боковой) рефракции при абсолютных определениях склонений экваториальных звезд микрометрическим способом // Изв. ГАО. – 1977. – № 195. – С. 37–42.
4. Михайлов А. А. О вековых изменениях географических координат // Астрономический журнал. – 1968. – Т. 45. – В. 3. – С. 473–477.
5. Михайлов А. А. О приведении астрономических определений широты, долготы и азимута к единой эпохе // Астрономический журнал. – 1970. – Т. 47. – Вып. 3. – С. 613–618.
6. Пранис-Праневич И. Ю. Руководство по уравнивательным вычислениям триангуляции. – М.: Геодезиздат, 1956. – 363с.
7. Толчельникова С. А. Земная сферическая система координат, определение движений среднего полюса и земных пунктов / Гравиметрия и геодезия. – М.: Научный мир, 2010. – С. 45–54.
8. Толчельникова С. А. Об изучении прецессионно-нутацонного вращения Земли в теории и по наблюдениям // Геодезия и картография. – 2010. – № 4. – С. 3–11.
9. Толчельникова С. А. О взаимодействии астрометрии и геодезии в области изучения вращения Земли (взгляд астронома) // Геодезия и картография. – 2009. – № 8. – С. 21–29.
10. Толчельникова С. А. Особенности изучения движений в координатных системах, построенных по наблюдениям бесконечно далеких светил // Геодезия и картография. – 2008. – № 6. – С. 11–17.
11. Толчельникова С. А. Перспектива развития оптической службы вращения Земли // Проблема построения координатных систем в астрономии. – Л.: изд. АН СССР, ВАГО, 1989. – С. 176–183.
12. Толчельникова-Мурри С. А., Крейнин Е. И. Определение абсолютных прямых восхождений с малыми пассажными инструментами // Изв. ГАО. – 1980. – № 198. – С. 66–77.
13. Юркина М. И. Об одном сомнении Эйлера по поводу определения вращения Земли и небесных тел // Науч.-техн. сборник по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии «Физическая геодезия». Кн. 2. – М.: изд. ЦНИИГАиК, 1996. – С. 226–233.
14. Юркина М. И. О поправках за прецессию и нутацию // Геодезия и картография. – 2010. – № 5. – С. 12–15.
15. Юркина М. И. Теория Молоденского и ее дальнейшее развитие // Гравиметрия и геодезия. – М.: Научный мир, 2010. – С. 95–119.
16. Юркина М. И., Толчельникова С. А. Леонард Эйлер и изучение вращения Земли / Леонард Эйлер. К 300-летию со дня рождения». – СПб.: Нестор-История, 2008. – С. 201–211.

Summary

Astronomers have been using the coordinates of stars (or quasars) in studies of motions of the Earth's pole and terrestrial points although the terrestrial coordinate system – λ, Φ – was already established. The method is explained of global solution of the equations of observations from different places on the Earth in order to obtain the mean coordinates λ, Φ and those of stars – $\hat{\alpha}, \hat{\delta}$, – linked to the direction of the plumb line of equatorial observatory \underline{A} with zero longitude. The relation is shown between motions of the Earth's pole and observations from point \underline{A} , and possibility of using it as an initial point of International astronomical-geodetic net. ■