

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

К. А. КУЛИКОВ

ДВИЖЕНИЕ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
1955

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

К. А. КУЛИКОВ

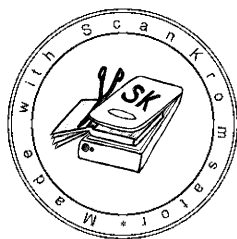
ДВИЖЕНИЕ ПОЛЮСОВ ЗЕМЛИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

МОСКВА 1956

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
академик В. Г. ФЕСЕНКОВ



Scan AAW

Введение

В нашей отечественной, а также и зарубежной литературе нет научно-популярных книг, излагающих вопросы изменяемости широт мест земной поверхности и движения полюсов Земли. Однако эти вопросы имеют большое теоретическое и практическое значение. В Советском Союзе их изучают десятки ученых, специальные научные учреждения и отделы учреждений. В международном масштабе движение полюсов по поверхности Земли более 50 лет находится под наблюдением специальной организации — так называемой Международной службы широты, в систему которой входит наша Китабская широтная станция имени Улуг-Бека.

Вопрос изменяемости широт мест земной поверхности и движения полюсов в настоящее время связан с другими науками, содействует их развитию и помогает решать родственные задачи, например, некоторые задачи внутреннего строения Земли. Многие молодые люди — учащиеся и студенты, желают ознакомиться с изучаемым явлением, но, к сожалению, рекомендовать им нечего. Специальные научные статьи и обзоры трудны по изложению и мало доступны; каждая научная работа, в основном, касается только исследуемого явления, а не всего комплекса вопросов, дающего общее представление о данном разделе астрономии.

Автор поставил перед собой скромную задачу — кратко изложить основные методы исследований движения полюса Земли и состояние науки о движении полюса Земли в настоящее время.

Изложению основной темы книги предшествуют три параграфа. В этих параграфах нет последовательного изложения какого-нибудь раздела астрономии, геометрии

или механики, а затронуты только понятия и термины, необходимые для усвоения главного вопроса — движение полюсов Земли.

Приношу глубокую благодарность члену-корреспонденту АН СССР профессору С. Н. Блажке, старшему научному сотруднику Полтавской гравиметрической обсерватории Е. П. Федорову и доценту Московского государственного университета П. Г. Куликовскому, внимательно просмотревшим рукопись и сделавшим ряд ценных указаний.

За все замечания, сделанные по поводу этой книги, буду очень признателен. Замечания можно посылать по адресу: Москва В-234, Ленинские горы, ГАИШ.

Автор

§ 1. Несколько строк из астрономии



Положение любого места на земной поверхности определяется двумя координатами: широтой и долготой. Астрономическая *широта* места — это угол между отвесной линией в этом месте и плоскостью земного экватора. Широта отсчитывается по меридиану в градусах от экватора к полюсу (от 0° до 90°). *Долготой* места называется дуга экватора от Гринвичского (нулевого) меридиана до меридиана места наблюдения. Долгота отсчитывается от Гринвичского меридиана на восток и на запад в градусах (0° до 180°). В зависимости от этого различаются западная долгота и восточная.

Расстояния от Земли до небесных светил самые различные. Светила, принадлежащие к солнечной системе (Солнце, большие планеты, кометы и др.), значительно ближе к Земле, чем светила, находящиеся за пределами нашей солнечной системы (звезды, различные туманности и прочие объекты).

Во многих задачах астрономии нет необходимости знать расстояния до небесных светил. Такие задачи удобнее решать, считая эти расстояния одинаковыми. Поэтому в астрономии введено понятие или геометрическое построение, называемое *небесной сферой*. Центром этой сферы является наблюдатель. Радиус небесной сферы принимается таким, чтобы все наблюдаемые нами светила находились внутри сферы. Тогда можно мысленно все небесные светила спроектировать на эту сферу и изучать, например, не изменение направления луча, идущего от светила, а движение светила по небесной сфере, что методически проще.

Рассмотрим некоторые основные круги и точки небесной сферы (рис. 1). Заметим, что через две точки

Рис. 1. Основные круги и точки небесной сферы.

О — центр небесной сферы; Z — зенит; P — полюс мира; PP' — ось мира; E, S, W, N — точки востока, юга, запада и севера; SZPN — небесный меридиан; A'EAW — небесный экватор; Υ — точка весеннего равноденствия;  — точка осеннего равноденствия; B'ΥB  — эклиптика; ΥC — прямое восхождение светила; CS — склонение светила.

зывается северным полюсом мира; противоположный ему — южным. Прямая, проходящая через оба полюса мира, называется *осью мира*.

Большие круги небесной сферы, проходящие через зенит и надир, носят название *вертикальных кругов* (или кругов высоты). Большие круги, проходящие через полюсы мира, — это *круги склонений* (или часовые круги).

Большой круг небесной сферы, проходящий через зенит и полюс мира, называется *небесным меридианом*. Когда светило в своем суточном движении пересекает небесный меридиан, говорят, что оно *кульминирует*; это происходит два раза в сутки. При наименьшем зенитном

Точки пересечения небесной сферы с воображаемой осью вращения Земли называются *полюсами мира*. Полюс мира, находящийся в области созвездия Малой Медведицы, на-

расстоянии светила бывает верхняя кульминация, при наибольшем — нижняя.

Большой круг небесной сферы, перпендикулярный к оси вращения Земли, называется *небесным экватором*. Небесный экватор делит небесную сферу на две полушеры или, как говорят, на два полушария — северное и южное.

Ближайшее к нам небесное тело, спутник Земли — Луна, кроме движения с востока на запад, происходящего от вращения Земли, имеет еще другое, свое собственное движение — перемещение среди звезд. Каждые сутки Луна передвигается на 13° навстречу суточному вращению небесной сферы, делая полный оборот в $27\frac{1}{3}$ суток. Луна проходит этот путь по так называемым зодиакальным созвездиям: Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей, Рыбы. Наблюдаемое перемещение Луны среди созвездий есть результат движения ее вокруг Земли.

Точно так же, среди этих же созвездий, в том же направлении, но своим путем, движется Солнце, проходя немного меньше одного градуса в сутки и совершая таким образом полный оборот по сфере в $365\frac{1}{4}$ суток. Этот видимый путь Солнца среди звезд называется *эклиптикой*. Движение Солнца среди звезд есть результат движения Земли вокруг Солнца.

Эклиптика пересекается с небесным экватором в двух диаметрально-противоположных точках. Одна из этих точек, в которой Солнце, двигаясь по эклиптике, переходит из южного полушария небесной сферы в северное, называется точкой *весеннего равноденствия* или точкой весны. Противоположная точка пересечения экватора и эклиптики есть точка *осеннего равноденствия*. Точки эклиптики, находящиеся на одинаковых расстояниях от точек весеннего и осеннего равноденствий, называются точками *солнцестояний*. Та из них, в которой Солнце бывает 22 июня, — точка летнего солнцестояния; противоположная ей, в которой Солнце бывает 22 декабря, — точка зимнего солнцестояния. В точке весеннего равноденствия Солнце бывает 21 марта, в точке осеннего равноденствия — 23 сентября.

Угол между плоскостями эклиптики и экватора называется *наклоном эклиптики к экватору*; он равен $23^\circ 27'$.

Две диаметрально-противоположные точки небесной сферы, одинаково удаленные от всех течек эклиптики, называются *полюсами эклиптики*. Северный полюс эклиптики находится в области созвездия Дракона. Вследствие неравномерности движения Земли по орбите, Солнце в течение года движется по эклиптике также неравномерно: зимой быстрее, чем летом.

Положение точки на небесной сфере, так же как и положение точки на поверхности Земли, определяется двумя координатами. Существуют различные системы координат на небесной сфере; наиболее распространенной и практически удобной является система, в которой координатами являются прямое восхождение и склонение светила. *Прямым восхождением светила* называется дуга небесного экватора от точки весеннего равноденствия до точки пересечения экватора с кругом склонения этого светила. *Склонение светила* — это дуга круга склонения от небесного экватора до светила.

Для определения этих величин имеются специальные астрономические инструменты; например, склонения светил получаются так называемыми вертикальными кругами, прямые восхождения — пассажными инструментами. Существуют инструменты, называемые меридианными кругами, которыми можно измерять обе координаты — прямое восхождение и склонение одновременно. При вычислениях координат учитываются ошибки инструментов (астрономические инструменты не абсолютно точны) и все астрономические факторы, искажающие результаты, из них в первую очередь *рефракция*.

Земля окружена атмосферой, которая простирается на высоту до тысячи километров. Лучи, идущие от светила, преломляются земной атмосферой, и светило мы видим не в том направлении, в котором оно действительно находится, а несколько выше. Это явление называется рефракцией. Наибольшего значения рефракция достигает у горизонта, где ее величина доходит до $0,6^\circ$ и даже более.

Для зенитных расстояний светил, не превосходящих 70° , рефракция подсчитывается по формуле:

$$\rho = 58''.3 \operatorname{tg} z',$$

в которой ρ — величина рефракции, z' — измеренное

зенитное расстояние. Исправленное за рефракцию зенитное расстояние светила будет:

$$z = z' + \rho.$$

Измеренные координаты светил, главным образом звезд, заносятся в особые списки, которые называются *звездными каталогами*.

Координаты звезд, вследствие целого ряда причин, не остаются постоянными, а меняются в зависимости от времени, места наблюдения и места светила на небесной сфере. Поэтому в звездных каталогах даются так называемые средние координаты звезд для начала некоторого определенного года, называемого эпохой или равноденствием каталога.

Область астрономии, одной из задач которой является составление звездных каталогов, называется *астрометрией*. Очень большая работа по составлению звездных каталогов, на протяжении более чем столетия, проведена Пулковской обсерваторией; создано около десятка первоклассных звездных каталогов.

§ 2. Несколько строк из геометрии

Сечение прямого кругового конуса плоскостью P , перпендикулярной оси конуса OC (рис. 2), есть окружность. Сечение прямого кругового конуса плоскостью Q , наклоненной к оси конуса OC на угол, отличающийся от прямого и больший, чем угол между осью и образующей, есть эллипс. Наибольший и наименьший диаметры эллипса называются осями эллипса; большая ось обозначается через $2a$, малая через $2b$.

Под *центральной сечением* тела, имеющего правильную геометрическую форму, мы понимаем сечение тела плоскостью, проходящей через его геометрический центр.

У шара любое центральное сечение плоскостью есть круг.

Если только одно центральное сечение тела плоскостью есть круг, а остальные сечения все эллипсы, то такое тело называется *эллипсоидом вращения*. Такое геометрическое тело можно получить, вращая эллипс вокруг одной

из его осей. Эллипсоид вращения может быть *сжатым* и может быть *вытянутым*. В первом случае вращение происходило вокруг малой оси, во втором — вокруг большой.

Если два центральных сечения тела представляют собой круги, а все другие — эллипсы, то такое тело называется трехосным эллипсоидом. У такого тела все оси разные. Наибольшую ось трехосного эллипсоида обозначают через $2a$, среднюю через $2b$ и наименьшую через $2c$. Все три оси взаимно перпендикулярны.

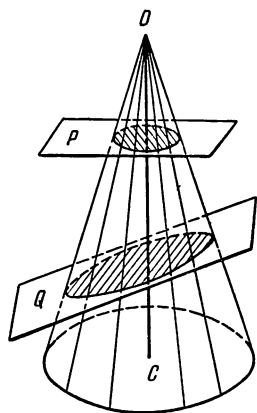


Рис. 2. Сечение конуса плоскостями.

§ 3. Несколько строк из механики

1. Понятие о мгновенной оси вращения. Вращение тела вокруг неподвижной оси — явление очень распространенное. Открывание и закрывание квартирной двери, вращение махового колеса, движение стрелок

стенных часов, вращение турбины, шпинделя токарного станка и т. д. — все это примеры вращения тела вокруг неподвижной оси. При этом вращении все точки тела имеют одну и ту же угловую скорость, но разные линейные или вращательные скорости. Чем дальше отстоит точка от оси вращения, тем больше ее скорость; точки, лежащие на самой оси, вращательной скорости не имеют. Значит, ось вращения тела есть геометрическая прямая, проходящая через те точки, скорость которых равна нулю. Это обычное, часто наблюдаемое нами вращение.

Однако есть вращение вокруг так называемой *мгновенной оси*, которое наблюдается не при обычном вращении, о котором шла речь, а при сложном движении, являющемся результатом сложения простых движений. Складывать можно как поступательные движения, так и вращательные. Так, например, движение человека по палубе идущего парохода, по отношению к берегу реки, будет сложным движением, так как оно складывается из движения человека по отношению к пароходу и из движе-

ния парохода по отношению к берегу. Качение колеса по прямолинейному участку пути есть также сложное движение, получающееся из поступательного движения (скольжение колеса, когда оно заторможено и не вращается) и вращательного движения (экипаж неподвижен, колесо вращается — буксует).

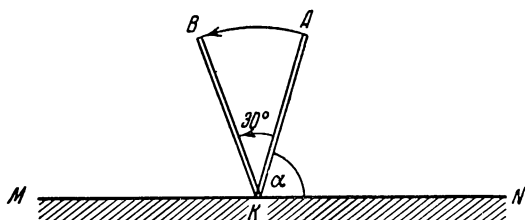


Рис. 3. При повороте стержня в плоскости чертежа около точки K происходит вращение стержня около оси, проходящей через точку K и перпендикулярной плоскости чертежа.

Возьмем стержень AK (рис. 3) и поставим его одним концом на плоскость MN под некоторым углом α к этой плоскости. Затем рукою повернем этот стержень, например, против часовой стрелки на угол 30° , около точки K . Это тоже будет вращение тела около оси, перпендикулярной к плоскости чертежа и проходящей через точку K .

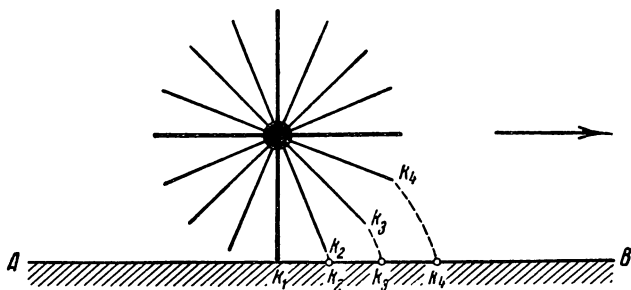


Рис. 4. Прерывное вращение около оси, проходящей через точки K_1, K_2, K_3 и т. д. и перпендикулярной плоскости чертежа.

Если с колеса снять обод и «покатить» оставшуюся втулку со спицами по плоскости AB (рис. 4), то колесо будет как бы «шагать», перескакивая с одной спицы на

другую. Когда колесо поворачивается на некоторый угол около конца спицы K_1 , оно вращается около оси, перпендикулярной к плоскости чертежа и проходящей через точку K_1 . Затем колесо будет опираться на конец следующей спицы K_2 , вращаясь около оси, перпендикулярной к плоскости чертежа, проходящей через точку K_2 и т. д. Значит, здесь происходит вращение около оси, но эта ось меняет свое положение; она последовательно проходит через точки K_1 , K_2 и т. д.

Аналогичная картина получится, если катить по плоскости колесо с ободом или обруч: ось вращения будет проходить через точку соприкосновения обода с плоскостью

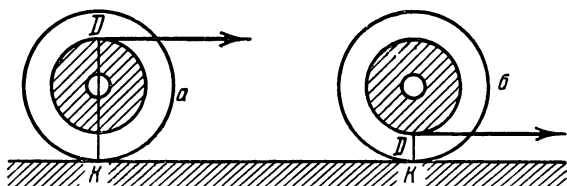


Рис. 5. Схема вращения катушки около мгновенной оси, проходящей через точку K .

и непрерывно менять свое положение на плоскости. Такая ось вращения, которая непрерывно меняет свое положение, называется *мгновенной осью вращения*.

Если обычную катушку положить на плоскость, как это показано на рис. 5 (а), и потянуть за нитку в направлении стрелки вправо, то катушка покатится вправо. Если положить катушку, как показано на рис. 5 (б), и потянуть за нитку опять вправо, катушка покатится вправо, как и в первом случае. Это происходит потому, что вращение катушки в том и другом случае происходит около мгновенной оси, проходящей через точку K , и вращающий момент (произведение силы на плечо DK) имеет одинаковое направление.

В различных случаях сложного движения положение мгновенной оси вращения тела может меняться по-разному; так, в случае качения конуса по плоскости (рис. 6) мгновенной осью вращения является образующая конуса OK , соприкасающаяся в данный момент с плоскостью; она всегда проходит через одну и ту же точку тела O (вершина конуса). В случае вращения волчка (рис. 7) мгновен-

венная ось описывает в пространстве приблизительно коническую поверхность с вершиной в точке G .

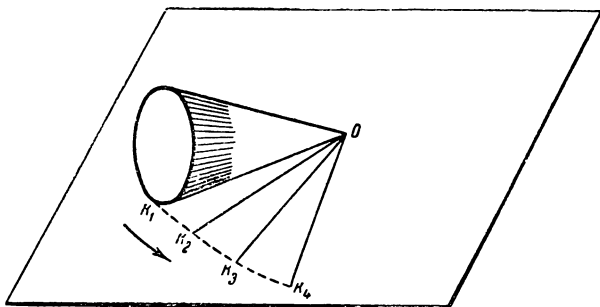


Рис. 6. Вращение конуса по плоскости.

Таким образом, в случае вращения тела около неподвижной оси, последняя не меняет своего положения в теле; мгновенная ось в разные моменты проходит через разные точки тела. В каждый данный момент она проходит через те точки тела, вращательные скорости которых в этот момент равны нулю.

2. Понятие об эллипсоиде инерции. На расстоянии l от оси z расположена материальная точка с массой m . Произведение массы точки на квадрат расстояния ее от этой оси называется *моментом инерции точки* относительно оси z .

Если имеется какое-нибудь тело и ось, то сумма произведений массы каждой точки этого тела на квадрат ее расстояния от этой оси называется *моментом инерции тела* относительно оси.

Возьмем какое-нибудь тело и проведем через любую из его точек неограниченное число осей. Можно определить моменты инерции этого тела относительно каждой оси; все они будут различны между собой. Иначе говоря, момент инерции

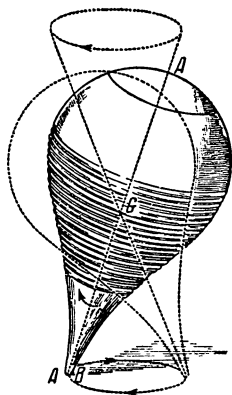


Рис. 7. Вращение волчка. Точка G почти неподвижна, а ось AGA описывает приблизительно конус с вершиной в точке G .

относительно каждой оси имеет свое значение. Например, если взять однородный трехосный эллипсоид, то моменты инерции этого эллипсоида относительно его осей будут:

$$J_a = \frac{1}{5} M (b^2 + c^2), \quad J_b = \frac{1}{5} M (a^2 + c^2),$$

$$J_c = \frac{1}{5} M (a^2 + b^2),$$

где a , b , c — полуоси трехосного эллипсоида, а M — его масса. Возьмем в теле какую-нибудь точку и проведем через нее прямую. На этой прямой в обе стороны от взятой точки в каком-нибудь масштабе отложим отрезки, равные единице, деленной на корень квадратный из момента инерции тела относительно этой прямой. Если сделать такое построение для большого числа прямых, проходящих через взятую в теле точку, то концы всех этих отрезков будут находиться на различных расстояниях от взятой в теле точки, так как каждой прямой соответствует свой момент инерции. Но концы этих отрезков расположатся на одной поверхности, которая будет иметь форму эллипсоида, какова бы ни была форма самого тела. В общем случае это будет трехосный эллипсоид, в частных случаях — эллипсоид вращения или шар.

Такой эллипсоид называется *эллипсоидом инерции* тела. Каждой точке тела соответствует свой эллипсоид инерции.

Если в качестве исходной возьмем не любую точку тела, а его центр тяжести, то в этом случае эллипсоид инерции называется *центральный эллипсоидом инерции*. Центральный эллипсоид инерции есть наибольший из всех возможных. Нужно ясно представить себе, что эллипсоид инерции есть условная, воображаемая поверхность или геометрический образ, наглядно иллюстрирующий изменение величины момента инерции тела относительно различных осей. Момент инерции тела относительно наибольшей оси эллипсоида инерции есть самый меньший из всех моментов инерции тела. Момент инерции относительно наименьшей оси эллипсоида инерции есть наибольший из всех моментов инерции.

Для центра шара или куба эллипсоид инерции будет шаром; для тела, имеющего форму эллипсоида вращения, эллипсоид инерции также будет эллипсоидом вращения.

Так, для сплюснутой Земли, допуская, что она симметрична относительно оси вращения и предполагая, что она всюду имеет одинаковую плотность или состоит из концентрических слоев различной плотности, эллипсоид инерции является также сплюснутым эллипсоидом вращения. Точки пересечения оси вращения с поверхностью Земли называются *полюсами вращения*. Точки пересечения наименьшей оси эллипсоида инерции с поверхностью Земли называются *полюсами инерции*.

Полюс вращения и полюс инерции могут совпадать, но могут и не совпадать.

Если в теле происходят деформации, перемещения масс, то будут изменяться моменты инерции, а значит, будет изменяться и эллипсоид инерции и направления его главных осей.

§ 4. Форма Земли

В глубокой древности представление людей об окружающей их природе, о явлениях, происходящих в природе, складывалось на основании непосредственных наблюдений без какого бы то ни было критического анализа. Человек воспринимал все так, как он видел. Поэтому и Землю он представлял себе плоской, какой в основном кажется ее поверхность, несмотря на отдельные на ней образования — горы, горные хребты, равнины, впадины, реки, озера и т. п. На протяжении тысячелетий складывалось и сложилось мнение о плоской форме Земли, с тем, что она где-то кончается, но до края Земли (до края света) пока никто еще не дошел. Такие взгляды на Землю сохранялись почти до начала нашей эры, не претерпев серьезных изменений.

Мысль о том, что Земля не плоская, возникла, вероятно, при путешествиях, когда люди стали преодолевать большие пространства. При движении, например, с севера на юг можно было видеть, что в южной части неба высота звезд над горизонтом увеличивается, то есть круги их суточных движений постепенно поднимаются над горизонтом. В северной части неба, наоборот, высота звезд уменьшается; круги их суточных движений постепенно опускаются под горизонт. Отсюда был сделан вывод, что Земля закруглена на север и на юг.

Закругленность Земли в восточном и западном направлениях доказывалась тем фактом, что светила восходят и заходят одновременно для всех жителей Земли. Сравнивая время, в которое на разных долготах Земли бывают видимы лунные затмения, люди установили, что чем дальше наблюдатель к западу, тем более ранний час он считает после заката Солнца. А так как в действительности лунное затмение происходит в одно и то же время для всей ночной половины Земли, то отсюда следует, что Солнце заходит тем позднее, чем далее мы подвигаемся к западу. Закругленность Земли во всех четырех направлениях указывала на то, что она имеет форму шара.

Наблюдая лунные затмения, люди видели, что граница тени Земли на Луне всегда имеет форму дуги круга. Это также наталкивало на мысль о шарообразности Земли.

Ученый древней Греции Пифагор из Самоса (в 571—497 гг. до н. э.), много в своей жизни путешествовавший, впервые высказал мысль о том, что Земля имеет шарообразную форму.

Об этом же писал Аристотель (384—322 гг. до н. э.). Он считал к тому же, что Земля не очень велика по сравнению с другими небесными телами. Другой древнегреческий ученый Архимед (287—213 гг. до н. э.), указывая на шарообразность Земли, в качестве доказательства ссылаясь на то, что поверхность воды в океанах в спокойном состоянии имеет шаровую форму.

Первое определение радиуса Земли как шара было произведено александрийским ученым Эратосфеном за 250 лет до н. э. Чтобы определить радиус Земли как шара, нужно, по крайней мере, в двух отдаленных друг от друга пунктах определить разность широт и измерить линейное расстояние между этими пунктами. Эратосфеном были выбраны Александрия и Сиена, разность широт которых была определена из наблюдений полуденных высот Солнца в день летнего солнцестояния. Зенитное расстояние светила (в данном случае Солнца), кульминирующего к югу от зенита, выражается формулой:

$$z = \varphi - \delta,$$

в которой φ — широта места наблюдения, δ — склонение светила.

Если одновременно измерить зенитное расстояние Солнца в полдень в двух пунктах, лежащих на одном меридиане, то разность этих зенитных расстояний будет равна разности широт этих пунктов. Написав два выражения:

$$z_1 = \varphi_1 - \delta,$$

$$z_2 = \varphi_2 - \delta$$

и вычтя почленно одно из другого, получим:

$$z_1 - z_2 = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Об учете рефракции, разумеется, в ту пору не могло быть и речи.

Будучи в Сиене в день летнего солнцестояния, Эратостен заметил, что в полдень бывает освещено дно глубоких колодцев; это значит, что там Солнце в полдень было в зените.

В этот же день и также в полдень (разумеется, другого года), он мог в Александрии измерить с помощью гномона (рис. 8) высоту Солнца над горизонтом и, вычтя ее из 90° , получить зенитное расстояние. Для Александрии оно оказалось равным $1/50$ части окружности или $7,2^\circ$.

Так могла быть определена разность широт Александрии и Сиены. То, что эти города лежат не на одном меридиане, существенного значения не имело. Расстояние между Александрией и Сиеной было определено по времени прохождения кара-

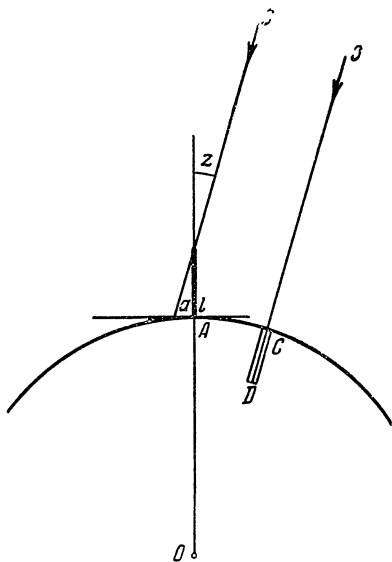


Рис. 8. Схема измерения зенитного расстояния Солнца. В Сиене (С) в полдень в день летнего солнцестояния Солнце бывает в зените; освещено дно (Д) глубокого колодца. В Александрии (А) зенитное расстояние Солнца в полдень этого же дня было измерено с помощью гномона l .

ванами этого расстояния. Оно получилось равным 5 000 греческих стадий. По этим данным был вычислен радиус Земли, который получился равным 39 700 стадий, что при величине стадии в 158,6 м соответствует 6 311 км. То, что полученная величина радиуса Земли была ошибочна больше чем на 50 км, для того времени значения не имело. Важна была принципиальная сущность метода, который основывался на представлении о шарообразности Земли и давал возможность оценить ее размеры. В дальнейшем радиус земного шара определялся Посидонием, Птолемеем, арабскими астрономами и др., и его значение все более уточнялось. Таким образом, представление о Земле как о шаре возникло до нашей эры и продержалось почти до середины XVIII века.

В 1735 г. экспедиция Парижской Академии наук произвела измерение радиуса Земли в трех местах, расположенных на одном и том же меридиане Земли (экватор, Париж, полярный круг), и установила, что Земля не шарообразна, а несколько сплюснута в направлении оси вращения. Из этих измерений полярный радиус получился равным 6 357 км, а экваториальный 6 378 км. С этого времени Землю по форме стали считать эллипсоидом вращения¹ или, как его еще называют, сфероидом.

В последние годы трудами советских ученых достоверно установлено, что Земля несколько сжата и по экватору и является трехосным эллипсоидом. Наибольший и наименьший радиусы экватора отличаются один от другого на 210 м.

По этим данным советских ученых, средний радиус экватора $a = 6\,378\,245$ м, полярный радиус меридиана $b = 6\,356\,863$ м. В действительности Земля по своей форме значительно сложнее даже трехосного эллипсоида. Она представляет собой фигуру, обладающую тем свойством, что в каждой точке ее поверхности отвесная линия совпадает с нормалью к поверхности. Такую поверхность образуют океаны в спокойном состоянии. Она называется геоидом. Поверхность геоида близка к поверхности трехосного эллипсоида соответствующих размеров и отклоняется от него в ту и другую сторону на величину, не превышающую 100 м. Над поверхностью геоида возвышают-

¹ Эллипсоид вращения — фигура, получающаяся от вращения эллипса около одной из его осей, в данном случае около малой оси

ся материки; однако местами поверхность материков бывает и ниже поверхности геоида. Если мысленно прорыть в материках узкие каналы, соединивши их с океанами, то поверхность воды в них также образует поверхность геоида. Поверхность океанов, как часть геоида, и материки образуют истинную физическую фигуру Земли.

§ 5. Прецессия и нутация

Если бы Земля была однородным шаром или шаром, состоящим из концентрических слоев однородной плотности, меняющейся от слоя к слою, то ее ось вращения сохраняла бы в пространстве всегда неизменное направление. Но, как мы уже видели, Земля есть сложное тело, которое имеет утолщение на экваторе. Сила притяжения Солнца действует на более близкую к нему часть экваториального утолщения сильнее, чем на более далекую. (По закону всемирного тяготения сила взаимодействия между притягивающимися телами прямо пропорциональна произведению масс этих тел и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, если расстояние между телами велико по сравнению с их линейными размерами).

Рассмотрим действие силы притяжения Солнца на Землю в момент летнего солнцестояния, когда ось вращения Земли и прямая, соединяющая Землю и Солнце, лежат в плоскости, перпендикулярной плоскости эклиптики. Вследствие того, что сила, действующая со стороны Солнца на более близкую к нему часть экваториального утолщения Земли, больше, чем сила, действующая на более далекую часть, их равнодействующая проходит не через центр Земли, а через более близкую к Солнцу точку A (рис. 9). Если приложить к центру Земли две равные силы F и F_2 , направленные одна к Солнцу, другая от Солнца, то сила F будет только удерживать Землю на ее орбите и никакого вращения не вызовет. Вращательное движение какому-нибудь телу сообщается по меньшей мере двумя силами, приложенными к этому телу в разных его точках. Эти силы должны быть равны, параллельны и направлены в разные стороны. Такая комбинация называется парой сил. В нашем случае силы F_1 и F_2 обра-

зуют пару. Эта пара поворачивает плоскость экватора около прямой пересечения плоскостей экватора и эклиптики, стремясь совместить ее с плоскостью эклиптики. Это действие всегда заставляет ось вращения Земли смещать-

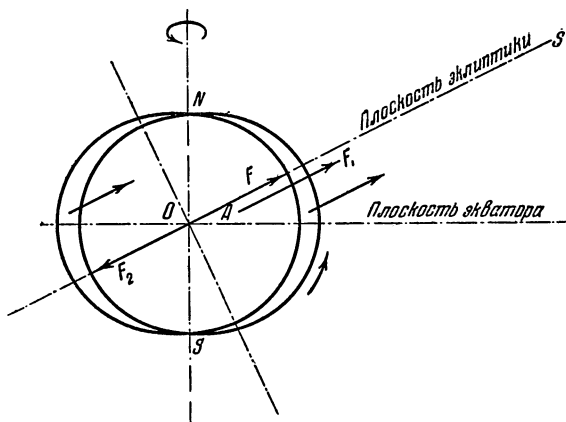


Рис. 9. Действие силы притяжения Солнца на Землю.

Равные силы F_1 и F_2 образуют пару, которая поворачивает Землю около оси, проходящей через центр Земли.

ся в одном направлении, независимо от того, где на эклиптике находится Солнце; в момент солнцестояния (зимнего или летнего), как показано на нашем рисунке, это действие наибольшее; оно равно нулю, когда Солнце находится в точках весеннего или осеннего равноденствий. В эти два последние момента равнодействующая двух сил, приложенных к экваториальному утолщению (к близкой к Солнцу части и к далекой), направлена по прямой пересечения плоскостей эклиптики и экватора и проходит через центр Земли.

Луна находится ближе к нам и производит на Землю более сильное влияние, чем Солнце, стремясь совместить плоскость экватора с плоскостью лунной орбиты. Вследствие действия этих сил плоскость экватора действительно совмещалась бы с плоскостью эклиптики или занимала бы положение близкое к ней, если бы Земля не вращалась вокруг своей оси.

Скорости принято обозначать векторами; эти векторы складываются по правилу параллелограмма. Например, при движении лодки поперек реки ее скорость по отношению к берегу складывается из двух скоростей: вектора — скорости лодки и вектора — скорости течения воды (рис. 10). Точно так же можно обозначить векторами и складывать угловые скорости, причем вектор угловой скорости направляется вдоль оси вращения. В нашем случае мы имеем два вектора угловой скорости, которые расположены перпендикулярно друг к другу: один вектор направлен по оси вращения Земли к северному полюсу, другой, значительно меньший, меняет свое направление и величину, в зависимости от положения Солнца и Луны, по сложному закону. Его можно, в свою очередь, представить в виде суммы нескольких векторов, из которых один направлен в точку весеннего равноденствия. Если прибавить этот последний вектор к вектору угловой скорости суточного вращения Земли, то конец результирующего вектора в нашем случае расположится над чертежом; иначе говоря, ось суточного вращения Земли выйдет из плоскости чертежа и, вследствие непрерывного действия сил со стороны Солнца и Луны, будет медленно двигаться.

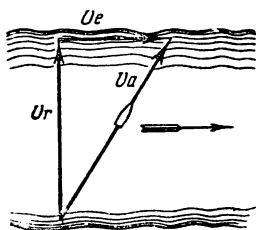


Рис. 10. Движение лодки поперек реки.

V_e — скорость течения воды,
 V_r — скорость лодки по отношению к воде, V_a — скорость лодки относительно берега.

По этой причине полюс мира вековым движением будет перемещаться вокруг полюса эклиптики с приблизительно постоянной скоростью с периодом примерно в 26 000 лет. Это движение носит название *лунно-солнечной прецессии*, а полюс, обладающий только одним этим движением, называется средним полюсом мира.

Плоскость лунной орбиты не сохраняет своего положения в пространстве и непрерывно поворачивается, причем наклон лунной орбиты к плоскости экватора меняется от $+18^{\circ}19'$ до $+28^{\circ}35'$. Солнце и Луна в своем движении бывают на различных угловых расстояниях от экватора. Совокупность всех этих условий создает возмущающую пару сил, которая заставляет истинный полюс мира со-

вершать периодические колебания по сложной кривой, по форме, близкой к эллипсу с центром в среднем полюсе, с периодами, равными периоду перемещения лунных узлов¹ по эклиптике (18,6 года), половине лунного месяца и т. д. Это движение полюса называется *нутацией*. Большая полуось этого так называемого нутационного эллипса направлена к полюсу эклиптики; она называется постоянной нутации и численно в угловой мере равна $9''21$.

§ 6. Движение полюса по поверхности Земли

В прецессионном и нутационном движении Земля поворачивается вместе с осью мира как одно целое. Но, кроме прецессии и нутации, Земля испытывает еще другое движение, присущее только ей — Земле, но не оси мира. Земля незначительно смещается относительно оси мира. Получается так, что ось мира, или ось вращения, в данный момент занимает не то положение в теле Земли, какое она занимала, например, сутки тому назад и через сутки будет занимать не то положение, которое занимает в данный момент. Иначе говоря, ось Земли является мгновенной осью вращения. Вследствие этого полюс Земли все время меняет свое положение, описывая кривую на ее поверхности. Значит, нужно твердо уяснить себе, что движение полюсов по поверхности Земли возникает от смещения Земли относительно оси вращения. В то время как земной полюс перемещается на поверхности Земли, направление оси вращения в пространстве изменяется только от прецессии и нутации; другими словами, перемещение земного полюса практически не влияет на положение полюса мира (рис. 11). Перемещение полюсов Земли по ее поверхности сравнительно невелико. Северный полюс движется против часовой стрелки вокруг своего среднего положения, описывая сложную спиралеобразную кривую, которая то закручивается, то раскручивается, не выходя пока что из квадрата со сторо-

¹ Плоскость орбиты Луны наклонена к плоскости эклиптики на $5^{\circ}8'40''$. Точки пересечения орбиты Луны с плоскостью эклиптики называются лунными узлами.

нами, равными 26 м. Стороны этого квадрата увеличились до 26 м только в 1952 г. До этого времени, в течение пятидесяти лет, стороны квадрата не превосходили 20 м. Соответственно движется и южный полюс Земли.

§ 7. Как определяется широта места

Наиболее просто определить широту места по наблюдениям полярной звезды. Полярная звезда очень яркая (2,15 звездной величины), и в астрономическую трубу, даже с небольшим увеличением, ее можно наблюдать в любое время суток. Наблюдения производятся в моменты верхней и нижней кульминаций, которые даются в астрономическом календаре. При наблюдениях измеряется зенитное расстояние Полярной звезды в верхней кульминации $z'_в$ и зенитное расстояние в нижней кульминации $z'_н$. Учтя влияние рефракции, получают зенитные расстояния, исправленные за рефракцию, а именно:

$$z_в = z'_в + \rho_в$$

$$z'_н = z_н + \rho_н,$$

где ρ — рефракция.

Тогда широта места наблюдения вычисляется по формуле

$$\varphi = 90^\circ - \frac{1}{2} (z_в + z_н).$$

Этот способ определения широты места неудобен тем, что требует много времени, так как наблюдения в верхней и нижней кульминациях разделены полусуточным интервалом. Кроме того, получив наблюдения в одной кульминации, нельзя быть уверенным в том, что удастся

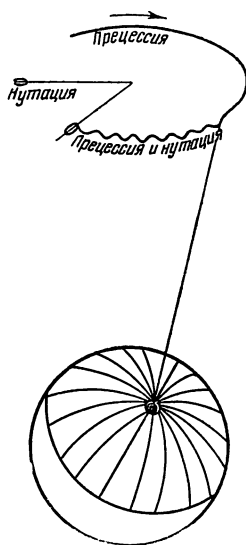


Рис. 11. Движение полюса Земли по ее поверхности.

Ось мира смещается только от прецессии и нутации. Земля смещается относительно этой оси.

получить наблюдение через полсуток, так как метеорологические условия могут измениться.

Другой распространенный способ определения широты места состоит в измерении зенитных расстояний звезд или Солнца в момент только верхней или нижней кульминации светила.

Если измерено зенитное расстояние звезды, кульминирующей к югу от зенита, то широта получается по формуле

$$\varphi = \delta + z_{\text{в}}.$$

Если измерено зенитное расстояние звезды, кульминирующей к югу от зенита, то широта получается по формуле

$$\varphi = \delta - z_{\text{в}}.$$

В случае наблюдений в нижней кульминации применяется формула

$$\varphi = 180^\circ - (\delta + z_{\text{н}}).$$

В этих формулах наблюденное зенитное расстояние предварительно исправляется на величину рефракции; склонение светила δ берется из астрономического календаря.

Трудно произвести наблюдения в момент, когда светило находится точно в меридиане. Поэтому описанный способ является неточным.

Для более точного определения широты места наблюдения (φ) применяют общеизвестную формулу сферической астрономии

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos (T - \alpha),$$

где T — показание часов в момент наблюдения. Координаты светила α и δ берутся из астрономического календаря, z — получается из наблюдений.

§ 8. Изменяемость широт

Движение полюса Земли изучается по наблюдениям изменяемости широт мест на земной поверхности.

Широта места на поверхности Земли не остается постоянной, она изменяется. Это изменение можно хорошо видеть на следующем примере. В табл. 1 показано изменение широты Пулковской обсерватории за три года.

причем каждое значение широты выведено из ряда наблюдений, полученных в течение примерно месячного интервала, так как одно значение широты, полученное из наблюдений одной ночи, может быть не очень точным и содержать некоторые ошибки.

В левом столбце таблицы приведены средние моменты месячных серий наблюдений, выраженные в сотых долях года. Во втором столбце—средние арифметические из всех отдельных значений широты по каждой серии наблюдений, выраженные в сотых долях секунды дуги. В третьем—число наблюдений в серии, из которых получены эти приведенные средние арифметические. Здесь нужно заметить, что среднее арифметическое из отдельных значений широты близко к средней широте, но не является таковой, как об этом будет сказано ниже.

Рис. 12 наглядно показывает изменение широты Пулкова в течение трех лет.

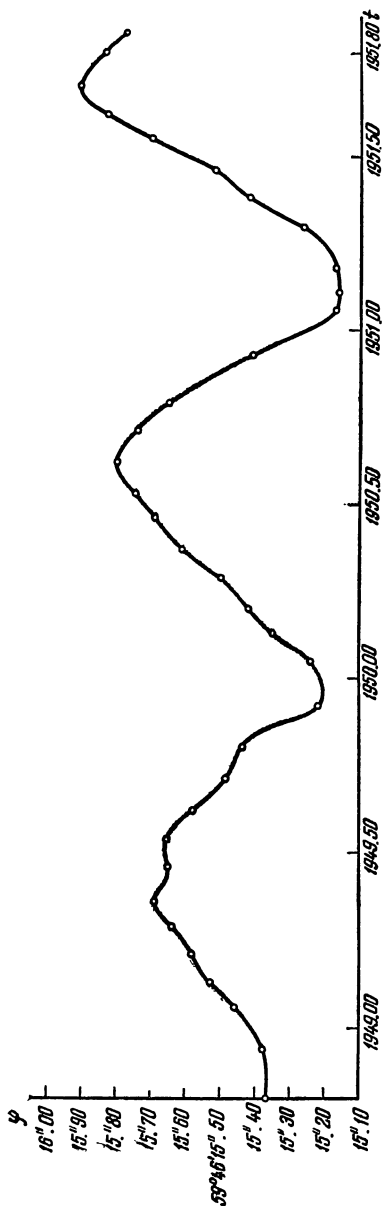


Рис. 12. Кривая изменения широты Пулковской обсерватории за три года (21. X. 1948—12. XI. 1951).

Таблица 1

Моменты времени	Широта Пулкова	Число наблюдений, из которых получена широта	Моменты времени через 0,1 долю года	Широты, снятые с кривой через 0,1 долю года
1948.80	59°46'15".37	111	1948.8	59°46'15".37
.94	.38	164	.9	.37
1949.06	.46	110	1949.0	.41
.13	.53	202	.1	.50
.21	.58	308	.2	.57
.29	.64	249	.3	.65
.36	.69	265	.4	.67
.46	.65	212	.5	.65
.54	.66	180	.6	.60
.62	.58	87	.7	.49
.71	.49	279	.8	.44
.80	.44	126	.9	.24
.92	.22	49	1950.0	.22
1950.05	.24	169	.1	.31
.13	.35	102	.2	.42
.20	.42	198	.3	.51
.29	.50	158	.4	.64
.37	.61	144	.5	.72
.46	.69	138	.6	.80
.53	.75	118	.7	.75
.62	.80	204	.8	.63
.71	.74	154	.9	.46
.79	.65	187	1951.0	.25
.93	.41	91	.1	.16
1951.06	.17	118	.2	.17
.11	.16	115	.3	.26
.18	.17	136	.4	.45
.30	.26	170	.5	.60
.38	.42	147	.6	.80
.46	.52	157	.7	.91
.55	.70	154	.8	.84
.62	.83	234	.9	.74
.70	.91	143	1952.0	
.80	.84	178	.1	
.86	.78	107	.2	

Изменение широты места есть изменение угла между отвесной линией и плоскостью экватора. А так как ось вращения Земли всегда перпендикулярна к плоскости экватора, то, следовательно, изменяется и угол между отвесной линией и осью мира. Эти изменения и дают воз-

возможность обнаружить и изучать движение полюса по поверхности Земли.

В конце прошлого века русский астроном С. К. Костинский вывел формулу, которая по изменениям широты места дает возможность исследовать движение полюса по поверхности Земли. Эта формула имеет вид:

$$\varphi - \varphi_{\text{ср}} = x \cos \lambda + y \sin \lambda,$$

где $\varphi_{\text{ср}}$ — средняя широта;

φ — широта в данный момент, так называемая мгновенная широта;

λ — западная долгота места наблюдения;

x, y — координаты мгновенного полюса относительно его среднего положения, или, как говорят, среднего полюса.

Эта формула является основной для получения координат полюса. Вывод ее прост. Пусть (рис. 13) O — среднее положение полюса, P — положение полюса в данный момент, т. е. положение мгновенного полюса, A — место, имеющее западную долготу λ , широта которого определяется. Если направить ось x по гринвичскому меридиану, а ось y — к западу от него, то, применяя к сферическому треугольнику AOP хорошо известную формулу сферической тригонометрии

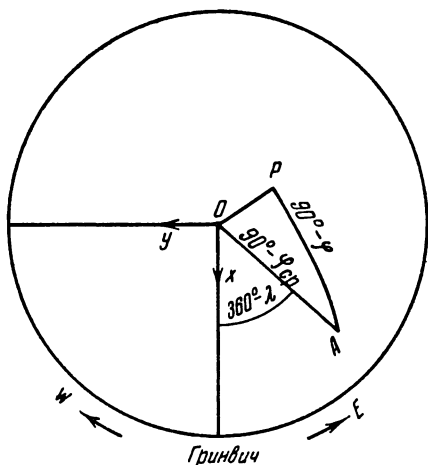


Рис. 13. Схема расположения истинного и среднего полюсов Земли.

O — средний полюс, P — истинный полюс, A — место на Земле с западной долготой λ .

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos A,$$

получим формулу С. К. Костинского.

Средним полюсом Земли в данный момент называется такое положение полюса, которому соответствуют средние широты в этот момент во всех точках земной поверхности.

В формуле С. К. Костинского две неизвестные величины x и y . Чтобы определить их, нужно иметь два уравнения, а для этого нужно вести наблюдения за изменением широт по крайней мере в двух пунктах. Наиболее выгодное решение задачи получается при разности долгот этих пунктов в 90° .

§ 9. Как установили изменимость широт

Полюс перемещается по поверхности Земли, но, как уже говорилось, это перемещение невелико, и кривая движения полюса не выходит из квадрата со сторонами 26 м. Поэтому это движение и было обнаружено только в конце XIX века, когда астрономические наблюдения достигли чрезвычайно высокой точности.

Однако о перемещении полюсов вращения Земли догадывались и раньше. Еще Ньютон, рассматривая вращательное движение Земли, пришел к заключению, что полюс вращения Земли должен перемещаться по ее поверхности. Он даже установил, что в случае вращения Земли по инерции это движение должно быть круговым. Свое рассуждение по этому вопросу Ньютон заканчивает так: «Но если где-нибудь между полюсом и экватором добавить некоторое новое количество вещества, собранного как бы в виде горы, то оно нарушит правильность движения шара и будет производить по его поверхности перемещение полюсов, которые будут описывать по поверхности шара круги около первоначального своего места». В конце XVIII века Л. Эйлер, считая Землю абсолютно твердым телом, изолированным в пространстве, теоретически доказал, что ось вращения Земли должна совершать движение в теле Земли. По исследованиям Л. Эйлера ось вращения в течение 10 месяцев должна описывать конус с очень малым углом при вершине. Но теория не могла окончательно решить этот вопрос. Теория, даже при правильных исходных положениях в данном случае могла дать только период изменения широты, а не амплиту-

ду, т. е. размах движения полюса. Величина амплитуды получается только из астрономических наблюдений.

Первая попытка в этом направлении была сделана пулковским астрономом Х. Петерсом в 1842—1843 гг. Исследуя свои наблюдения Полярной звезды, полученные на большом вертикальном круге, Петерс нашел небольшие изменения в широте, которые были согласны с периодом, предсказанным теоретически Л. Эйлером. Это была первая строго научная попытка проверить вывод Эйлера. Тридцать лет спустя эти исследования были повторены пулковским же астрономом М. Нюрен-ном, который для этой цели использовал наблюдения В. Я. Струве, Х. Петерса, Г. Гюльдена и свои собственные. Из всех этих наблюдений он получил результаты, совершенно сходные с результатами Х. Петерса. Более того, М. Нюрен установил, что наблюдаемая широта Пулкова, кроме периодических колебаний, имеет мед-ленное, как говорят теперь, вековое изменение.

Из указанных пулковских наблюдений были полу-чены для различных эпох следующие средние значения широты:

Х. Петерс 1843 г.	$\varphi_{\text{ср}} = 59^{\circ}46'18''.727$
Г. Гюльден 1866 г.	$\varphi_{\text{ср}} = 59^{\circ}46'18''.654$
М. Нюрен 1872— 1875 гг.	$\varphi_{\text{ср}} = 59^{\circ}46'18''.501$

Прогрессивное уменьшение широты здесь кажется несомненным; подобные результаты были получены и на других обсерваториях. Однако Земля не является абсо-лютно твердым телом, как это допускал в своих теоре-тических исследованиях Эйлер, а является телом дефор-мируемым. Для деформируемой Земли период движения полюса вообще был неизвестен. Поэтому, несмотря на высокую точность наблюдений, пулковские работы не решились окончательно вопроса об изменениях широты, так как наблюдения обрабатывались с предвзятой лож-ной идеей о 10-месячном эйлеровском периоде; но пул-ковские работы были первыми, положившими начало исследованию этого вопроса.

§ 10. От чего зависят изменения широты

Толчком к дальнейшему исследованию движения полюса послужила опубликованная в 1891 г. работа немецкого астронома Ф. Кюстнера, посвященная выводу постоянной аберрации.

Аберрация света появляется, когда наблюдатель перемещается по отношению к наблюдаемым светилам. В данном случае имеется в виду перемещение наблюдателя вместе с Землей вокруг Солнца. Вследствие этого при определении направления на светило приходится учитывать и скорость движения Земли вокруг Солнца и скорость света (последняя хотя и велика—299 790 км/сек., но является величиной конечной, и лучу света для прохождения некоторого отрезка пути требуется соответствующий промежуток времени).

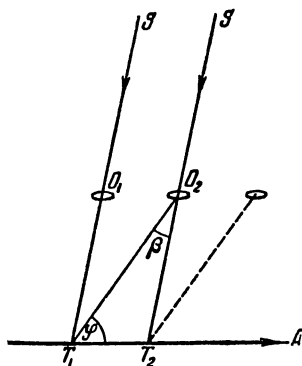


Рис. 14. Аберрация света.

Пока свет идет путь от объектива телескопа до его окуляра, т. е. проходит отрезок O_1T_1 , Земля пройдет путь T_1T_2 . Значит путь света в трубе телескопа изобразится отрезком O_2T_2 .

При астрономических наблюдениях луч света (рис. 14) в течение некоторого малого промежутка времени t проходит расстояние O_1T_1 , от объектива до креста нитей, который имеется перед окуляром каждого инструмента, предназначенного для измерения координат светил. За это время инструмент, вследствие движения Земли вокруг Солнца по ее орбите в направлении T_1A , переместится поступательным движением в положение O_2T_2 .

Поэтому изображение светила в фокальной плоскости объектива и окуляра не будет лежать на кресте нитей, а будет

смещено в сторону, противоположную направлению движения Земли. Чтобы изображение светила попало на крест нитей, нужно повернуть всю трубу в сторону движения Земли на угол $O_1T_1O_2$. Величина этого угла, или величина аберрации β , получается из решения треугольника $T_1O_2T_2$ и имеет выражение

$$B'' = 206\,264'',8 \frac{v}{c} \sin \varphi \text{ (в секундах дуги),}$$

в котором: $206\,264'',8$ — число секунд в радиане,

v — скорость движения Земли по орбите,

c — скорость света,

φ — угол между направлением трубы O_2T_1 и направлением скорости движения Земли вокруг Солнца, т. е. угол O_2T_1A .

Это явление называется годичной абберацией (так как оно происходит от годичного движения Земли вокруг Солнца), а величина $206\,264'',8 \frac{v}{c}$ — постоянной годичной абберации.

Из наблюдений, полученных на большом пассажном инструменте Берлинской обсерватории, Кюстнер нашел значение постоянной абберации $k = 20'',313$. Пулковский астроном Нюрен из наблюдений, сделанных в обсерватории, получил значение этой же величины $k = 20'',492$. Обе эти работы не вызывали никаких сомнений. Чтобы объяснить полученное расхождение двух значений постоянной абберации, пришлось допустить, что широты мест на земной поверхности периодически изменяются. Изменения широт, в свою очередь, можно объяснить движением полюсов Земли по ее поверхности (но можно, вообще говоря, объяснить и иначе). Все же после серьезных обсуждений этого вопроса ученые пришли к заключению, что полученное разногласие можно объяснить только в том случае, если допустить возможность изменений положения оси вращения в теле Земли в течение периода наблюдений. Однако такое предположение нужно было подтвердить наблюдениями.

Для этого были организованы наблюдения над изменениями широты в двух пунктах земного шара на меридианах, отличающихся по долготе на 180° .

Действительно, если взять два пункта M_1 и M_2 , расположенные по разные стороны от полюса, то изменение положения оси в теле Земли вызовет различное изменение широты в этих пунктах. Если в пункте M_1 широта уменьшается, т. е. угол φ_1 становится меньше, то в пункте M_2 широта увеличивается, т. е. угол φ_2 становится больше.

Учитывая это, было решено наблюдать изменение

широты на Берлинской обсерватории¹, с одной стороны, и в Гонолулу, на Гавайских островах в Тихом океане, с другой. Разность долгот Берлина и Гонолулу равна почти 180°.

Как только было получено достаточное количество наблюдений и вычислены широты, то действительно оказалось, что когда широта в Гонолулу уменьшалась на некоторую величину, то в Берлине она увеличивалась на такую же примерно величину, и наоборот.

Таким образом, было точно установлено, что изменение широт мест на земной поверхности обуславливается изменением положения оси вращения Земли в теле самой Земли. Этот факт нужно было подвергнуть тщательному исследованию.

§ 11. Цель изучения движения полюсов

Изучение движения полюсов Земли имеет большое теоретическое и практическое значение. Основными задачами широтных наблюдений можно считать изучение периодических и медленных (вековых) изменений широты, вывод постоянной нутации и изучение движения оси вращения в пространстве. Кроме этого, наблюдения изменения широт должны давать материал для разного рода астрономических и геофизических исследований. При колебании Земли относительно оси вращения меняет направление в пространстве отвесная линия, а, следовательно, зенит и небесный меридиан. Поэтому движение земных полюсов вызывает изменение географических координат на земной поверхности и влияет на результаты определения точного времени. С точным временем связаны определения прямых восхождений светил, долгот мест на земной поверхности и другие астрометрические задачи. Значит, точные астрометрические наблюдения нужно исправлять, учитывая движение полюса.

Со всесторонним изучением движения полюсов Земли связана не только астрометрия, но и другие науки, как, например, геодезия, геофизика, картография и т. п. Последняя, как известно, занимается составлением географических карт. Но составить карту земной поверхности или части ее с указанием взаимного расположения от-

¹ Кроме того, наблюдения велись в Праге и Страсбурге.

дельных населенных мест, дорог, рек, гор и т. д. возможно только при условии, когда известны средние широты и долготы некоторого числа пунктов, наносимых на карту. Из наблюдений же получаются мгновенные координаты, т. е. координаты для моментов наблюдений. Для перехода от мгновенных координат к средним нужно знать, как смещается полюс по поверхности Земли.

Кроме этого, изучение движения полюсов Земли дает нам очень важные данные для суждения о внутреннем строении Земли, что представляет большой интерес для геофизики и космогонии.

§ 12. Международная служба широты

В 1898 г. было организовано международное сотрудничество по исследованию движения полюса, получившее название «Международной службы широты». Эта организация состояла из Центрального бюро и шести небольших обсерваторий, которые получили специальное название — широтные станции. Эти станции были построены в северном полушарии на параллели $39^{\circ}8'$ вокруг всего земного шара в местах, наиболее подходящих с точки зрения метеорологических и сейсмических условий. Такими местами оказались следующие: Мицузава в Японии, Чарджуй в России, Карлофорте в Италии, Гейтерсбург в восточной части Северной Америки, Цинциннати в средней части Северной Америки, Юкая в западной части Северной Америки.

На всех станциях в этих местах были построены сходной конструкции наблюдательные павильоны (рис. 15, 16, 17, 18, 19, 20). Станции были оборудованы однотипными наблюдательными инструментами — зенит-телескопами.

Зенит-телескоп — астрономический инструмент, труба которого смонтирована на азимутальной установке, т. е. она может вращаться около вертикальной и горизонтальной осей (рис. 21). Для учета неточности нивелировки инструмента на продолжении горизонтальной оси (на рис. — справа от трубы) помещается уровень, ось которого перпендикулярна к горизонтальной оси. При помощи зажима уровень может быть жестко скреплен с

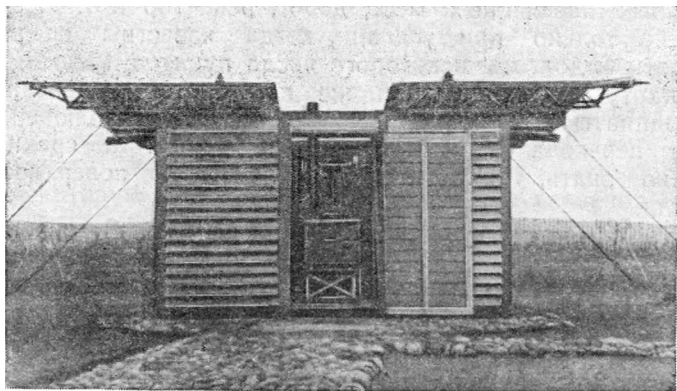


Рис. 15. Павильон широтной станции в Мицуаве (Япония).
Крыша павильона раздвигается влево и вправо.

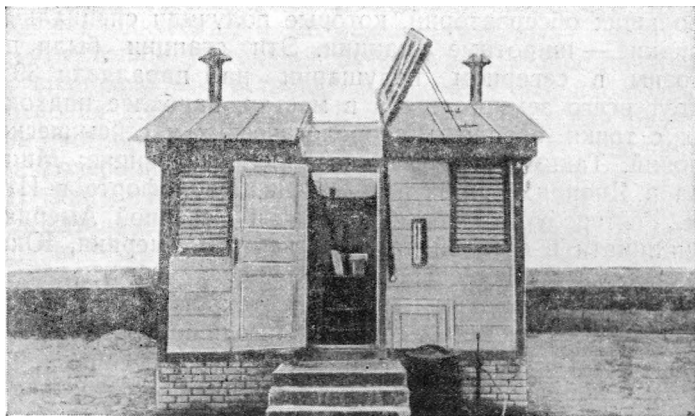


Рис. 16. Павильон широтной станции в Чарджуе (Россия).
Крыша павильона открывалась подобно люку.

трубой, тогда им можно контролировать положение трубы по отношению к отвесной линии. На окулярном конце трубы помещается окулярный микрометр (рис. 22). Он состоит из коробки, внутри которой находится рамка с натянутыми нитями, перемещаемая микрометрическим

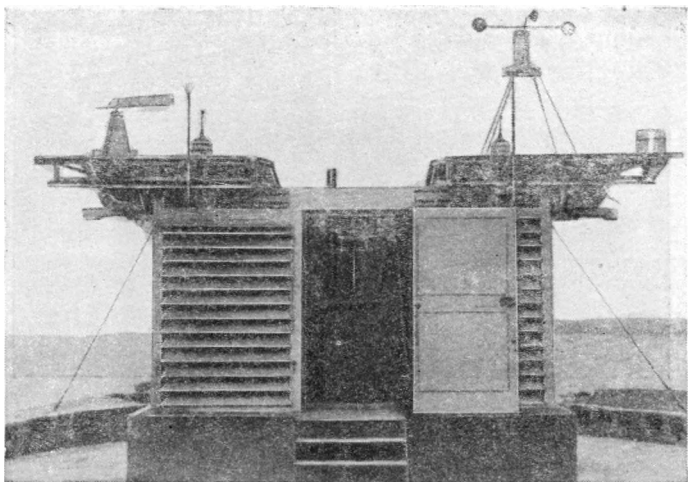


Рис. 17. Павильон широтной станции в Карлофорте (Италия).
Крыша павильона раздвижная.

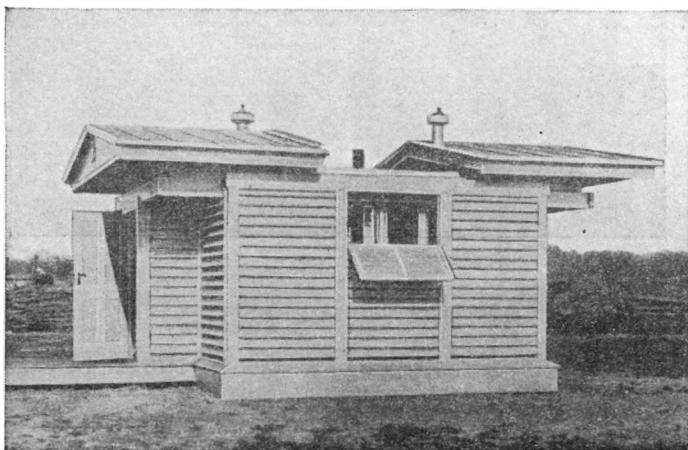


Рис. 18. Павильон широтной станции в Гейтерсбурге (США).
Крыша павильона раздвижная.

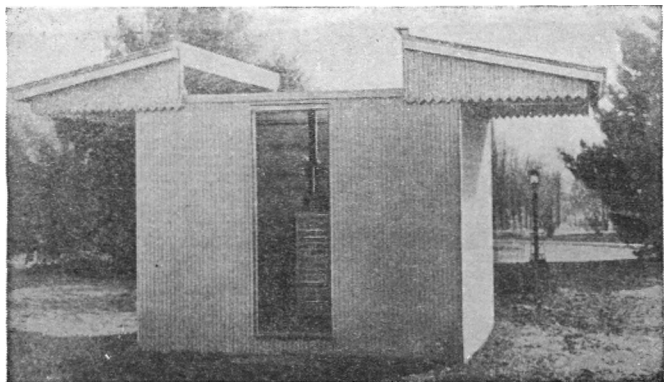


Рис. 19. Павильон широтной станции в Цинциннати (США).
Крыша павильона раздвижная.

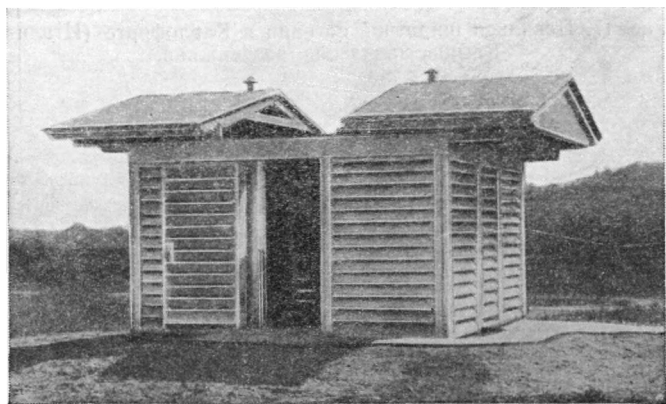


Рис. 20. Павильон широтной станции в Юкая (США).
Крыша павильона раздвижная.

винтом. Снаружи коробки на конце винта находится барабан с делениями, при помощи которого отсчитываются обороты и доли оборота микрометрического винта. Рамка *A*, на которую натянуты нити, движется по двум стержням, причем конец одного свободно держится в отверстии *B*. Это сделано для того, чтобы при непарал-

лельности этих стержней рамка все же была свободна. Стержень *С* служит только для держания пружины. Пружина *КК* все время давит на выступ *п*, прижимая гайку *т* к нарезам винта и самый винт к его упору *Н*.

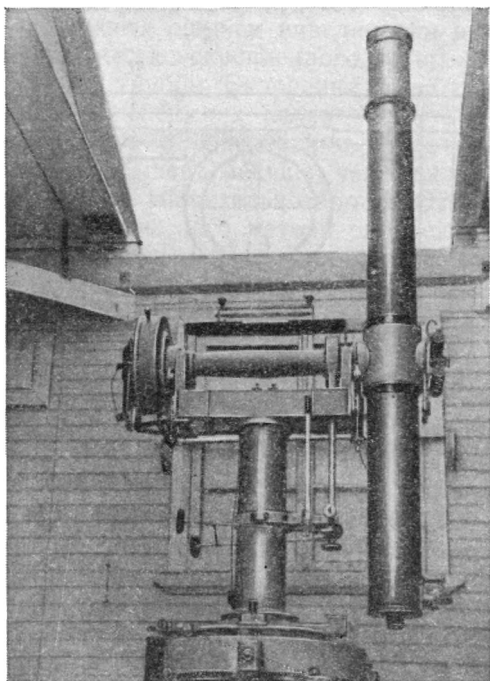


Рис. 21. Пулковский зенит-телескоп. Крыша павильона открыта.

Этим самым уничтожается так называемый мертвый ход винта. Трубу инструмента можно быстро поворачивать вокруг вертикальной оси на угол 180° . Зенит-телескоп предназначен для измерений малых зенитных расстояний или малой разности зенитных расстояний двух звезд. Этот инструмент был сконструирован для производства специальных наблюдений для получения широты места по способу, предложенному американским геодезистом Талькоттом.

Сущность способа Талькотта заключается в следующем: склонение звезды, кульминирующей в зените, равно широте места наблюдения. Полусумма склонений двух звезд, кульминирующих на одинаковом зенитном рас-

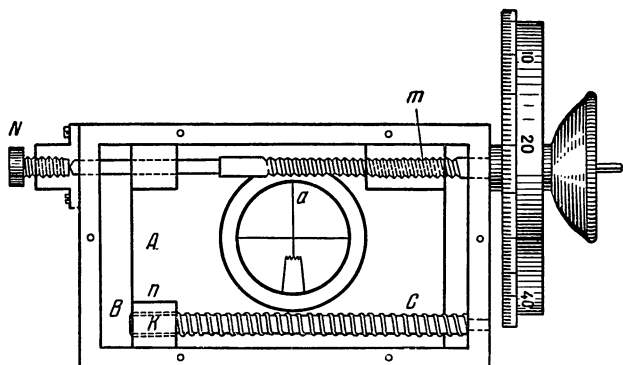


Рис. 22. Вращением барабана нить a наводится на одну звезду и при повороте зенит-телескопа на 180° — на другую. Разность отсчетов барабана, переведенная в угловые единицы, дает разность зенитных расстояний звезд.

стоянии к югу и к северу от зенита, также равна широте места. Невозможно подобрать две такие звезды с совершенно одинаковыми зенитными расстояниями в меридиане. Однако можно набрать значительное количество пар звезд с зенитными расстояниями в меридиане, незначительно отличающимися друг от друга ($10'$ — $15'$), и с близкими кульминациями.

Из наблюдений таких двух звезд (пары) широта вычисляется по формуле

$$\varphi = \frac{1}{2} (\delta_s + \delta_n) + \frac{1}{2} (Z_s + Z_n),$$

где δ_s , z_s — склонение и зенитное расстояние звезды, кульминирующей к югу от зенита;

δ_n , z_n — склонение и зенитное расстояние звезды, кульминирующей к северу от зенита.

В этой формуле разность зенитных расстояний двух звезд $z_s - z_n$ измеряется микрометром; нить микрометра наводится на первую кульминирующую звезду, затем

инструмент поворачивается вокруг вертикальной оси на 180° и наводится на вторую звезду пары. Разность отсчетов микрометра дает разность зенитных расстояний звезд пары; эта разность исправляется за рефракцию, вычисленную по особым таблицам. При наблюдениях звезд пары труба инструмента около горизонтальной оси не вращается; для учета ошибок нивелировки производятся отсчеты уровня, жестко скрепленного на время наблюдения пары с самой трубой. Склонения звезд пары δ_s и δ_n берутся из астрономических календарей.

Средняя ошибка в определении широты по методу Талькотта обычно бывает меньше, чем при других методах; наблюдения же значительно проще. Отличие метода Талькотта от классического метода определения широты по измеренным зенитным расстояниям звезд заключается в том, что в нем нет надобности измерять большие углы по отсчетам круга.

Систематические наблюдения на станциях Международной службы широты начались в 1899 г. и продолжаются по настоящее время.

За этот более чем 50-летний период времени в работе станций Международной службы широты было много изменений, вызванных различными обстоятельствами. Так, например, широтная станция в Чарджуе в 1919 г. была разрушена землетрясением, и Советское Правительство вместо нее в 1930 году на этой же широте построило новую широтную станцию в Кашка-Дарьинской области Узбекской ССР в поселке городского типа Китаб (рис. 23). Некоторые станции на разное время прерывали работу, потом опять возобновляли. Для изучения движения южного полюса Земли строились новые станции в южном полушарии, но действовали очень недолго. В настоящее время ведут работу станции Мицузава, Китаб, Карлофорте, Гейтерсбург и Юкая; кроме этого, работает станция в южном полушарии в Аргентине в г. Ла-Плата.

Из наблюдений звезд на этих станциях определяются широты мест и по изменениям этих широт выводится кривая движения полюса по поверхности Земли.

В 1903 г. вышел первый том трудов Международной службы широты, в котором дана обработка наблюдений за два с лишним года, включая целиком 1901 г. В этом томе приведена кривая, изображающая движение

полюса по поверхности Земли (рис. 24), а также приведены кривые колебания широт по всем станциям.

Впоследствии эти труды стали выходить систематически, причем в каждом томе давались результаты работы за несколько лет.

В настоящее время Международная служба широты не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ней

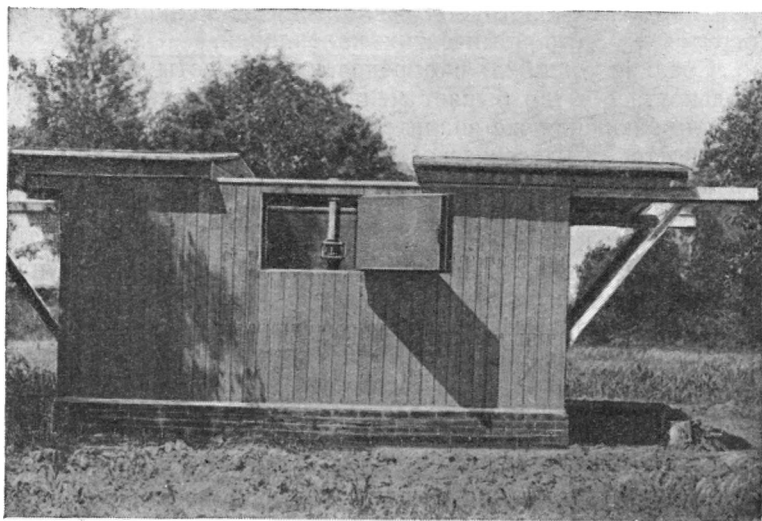


Рис. 23. Павильон широтной станции в Китабе (СССР). Раздвижная крыша открыта. В открытое окно виден зенит-телескоп.

наукой о движении полюса. Ее программа наблюдений, составленная в 1889 г., не позволяет производить всестороннее исследование движения полюса Земли, а дает возможность изучать только его периодическое движение. Звезды программы Международной службы широты подобраны на небе равномерно по всем часам прямого восхождения. Микрометром можно измерять разность зенитных расстояний, как мы уже сказали, если она не больше $10'$ — $15'$. С такими и обычно с меньшими разностями зенитных расстояний и подбираются звездные пары. Но дело в том, что разность зенитных расстояний звездных пар изменяется с течением времени от прецессии. Как мы

уже говорили, полюс мира прецессионным движением перемещается среди звезд по малому кругу, делая один полный оборот в 26 000 лет. Вследствие этого меняется расстояние звезд от полюса, т. е. изменяются их координаты, а также зенитные расстояния и разности зенитных

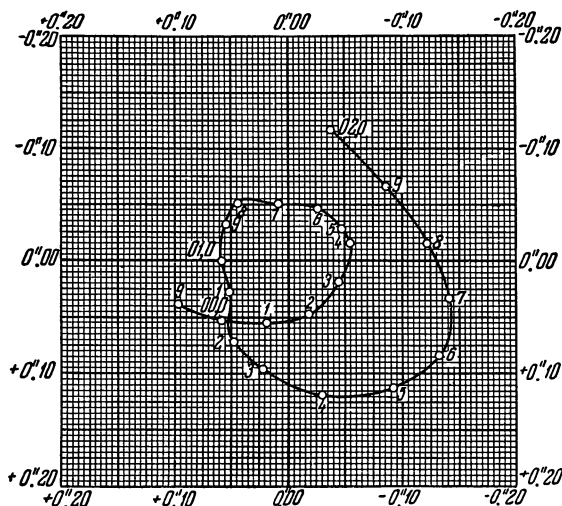


Рис. 24. Движение северного полюса Земли с 1899. 9 по 1902. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года.

расстояний. Значит, как только разность зенитных расстояний звезд пары увеличилась и ее уже нельзя измерять микрометром, пара выбрасывается и заменяется новой. В настоящее время в программе Международной службы широты первоначальных звездных пар уже почти не осталось; они все заменены новыми парами. Таким образом, эта программа не дает возможности наблюдать звездные пары в течение длительного периода. Она вполне удовлетворяет задаче изучения периодического движения полюса, но не позволяет вполне уверенно решать не менее важную задачу изучения векового движения его. Для этого нужны наблюдения одних и тех же звездных пар в течение более длительного периода наблюдений.

Такая программа разработана и испытана на практике нашими советскими астрономами на Полтавской гравиметрической обсерватории Академии наук УССР.

§ 13. Полтавская программа звездных пар

До сих пор при составлении программ широтных наблюдений, производимых по способу Талькотта, необходимо было соблюдение следующих основных условий: чтобы звезды равномерно располагались по прямому восхождению, зенитные расстояния их в меридиане не превосходили некоторого значения и чтобы разности зенитных расстояний звезд были невелики. По истечении некоторого интервала времени, часто менее 10 лет, отдельные звездные пары приходилось из программы выбрасывать, так как разности их зенитных расстояний вследствие прецессии изменились — увеличились и стали недоступны для измерения микрометром.

Выброшенные пары обычно заменялись новыми, и, кроме того, склонения и собственные движения всех остальных звезд программы также заменялись более точными из новых звездных каталогов. Хотя в старой и новой программах общие звезды и были, но связать эти программы безупречным образом было уже нельзя. Из рядов наблюдений, произведенных по таким программам, было невозможно или во всяком случае трудно определить вековое движение полюса и нутационное движение земной оси. Так было с программой Международной службы широты, в которой замена пар происходила четыре раза; так было и с программой, по которой наблюдали на пулковском зенит-телескопе.

Опыт составления программы, которая давала бы возможность наблюдать звездные пары в течение более длительного промежутка времени, был осуществлен на Полтавской гравиметрической обсерватории Е. П. Федоровым.

Изменение вследствие прецессии зенитных расстояний в меридиане у звезд с разными прямыми восхождениями происходит по-разному: есть звезды, у которых эти зенитные расстояния изменяются быстро; есть звезды с медленно меняющимися зенитными расстояниями. Чтобы программа наблюдалась как можно дольше, в нее нужно

включать именно звезды с медленно меняющимися зенитными расстояниями. Тогда и разности зенитных расстояний звездных пар также будут меняться медленно. Но зенитные расстояния звезд, наблюдаемых в меридиане, как уже говорилось ранее, связаны со склонениями формулами: $z = \varphi - \delta$, если звезда кульминирует к югу от зенита, и $z = \delta - \varphi$, если звезда кульминирует между полюсом и зенитом.

Таким образом, для программы, по которой можно было бы наблюдать более длительный период, нужно подбирать звезды с медленно меняющимися склонениями.

Прецессионное смещение полюса мира в каждый момент времени направлено к точке весеннего равноденствия. Значит, это смещение сильно изменяет склонения у звезд с прямыми восхождениями около 0 и 12 часов и почти не изменяет склонения у звезд с прямыми восхождениями около 6 и 18 часов. Поэтому в Полтаве для программы наблюдений на зенит-телескопах подбирались звезды, прямые восхождения которых заключены в пределах 5,5—6,5 и 17,5—18,5 часов. Кроме этого, учитывались и другие дополнительные условия. Чтобы по возможности исключить из полученных значений широт систематические ошибки, происходящие от неточного знания цены оборота винта микрометра, в программу включались звезды с малыми разностями зенитных расстояний. Бралась только такие пары, у которых полусумма склонений отличалась от широты не более, чем на одну минуту дуги, а изменение полусуммы склонений вследствие прецессии за 40 лет не превосходило бы двух минут дуги. Эти условия сильно ограничивали подбор звезд программы. В программу было включено 32 звездных пары, объединенных в четыре группы. В это число вошли также звездные пары с прямыми восхождениями 23,5—0,5 и 11,5—12,5 часов, т. е. с быстро меняющимися склонениями; это было сделано для того, чтобы иметь возможность следить за изменениями широты и получить данные для вывода ее периодических колебаний. Но для изучения медленных изменений широты используются только наблюдения двух групп с прямыми восхождениями 6 и 18 часов, которые, как указано, можно наблюдать без всяких изменений в течение десятилетий.

Кроме того, преследовались цели получения постоянной нутации.

Международная служба широты, а также все без исключения обсерватории, на которых велись наблюдения за изменениями широт, производили обработку материала по парам; это значит, что широта получалась по каждой отдельной паре. Полтавские астрономы отказались от получения широты по отдельным парам; они определяют среднее значение мгновенной широты сразу для нескольких пар (звена). Такой способ обработки материала уменьшил трудности в подборе звезд программы и значительно сократил время вычисления значений широты.

Полтавская программа дает возможность вести наблюдения одних и тех же звезд в продолжение не менее двух нутационных периодов (по 18,6 года каждый), т. е. около 40 лет. Программой предусматривается также рациональная обработка наблюдений.

Международная служба широты дает свои результаты (координаты полюса) иногда спустя годы после времени наблюдений. Так как данные о движении полюса, кроме теоретического, имеют большое практическое значение и нужны прежде всего астрономам и геодезистам для исправления результатов их астрономических наблюдений, то нужно, чтобы они получались значительно быстрее; между датой, для которой даются координаты полюса, и датой их опубликования должно проходить несколько дней, а не годы, как это было с данными Международной службы широты.

Полтавская программа имеет еще ряд преимуществ перед программой Международной службы широты, на которых мы здесь останавливаться не можем.

§ 14. Полярные и неполярные изменения широты

На рис. 12 приведена кривая изменения широты Пулкова в течение трехлетнего периода наблюдений. В любом месте Земли получится аналогичная кривая изменения широты, но только сдвинутая вдоль горизонтальной оси. На меридианах, лежащих по долготе один от другого на 180° , эти кривые будут как бы зеркальным отображением одна другой.

Во всех учебниках общей астрономии приводится график уравнения времени, т. е. график разности между средним и истинным временем в течение года. Этот график (на рис. 25 — жирная кривая) есть результат алгеб-

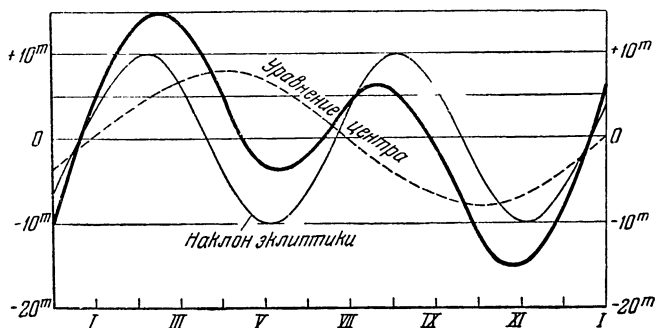


Рис. 25. График уравнения времени и его составляющих. Ординаты пунктирной и тонкой кривых для одних и тех же моментов, складываясь алгебраически, дают ординату жирной кривой.

раического сложения ординат двух кривых. Одна, пунктирная,—почти синусоида, имеющая в году один максимум и один минимум; она происходит от неравномерности видимого движения Солнца по эклиптике. Другая, тонкая сплошная кривая,—синусоида, имеющая в году два максимума и два минимума; она происходит от наклона эклиптики к экватору. Складывая алгебраически ординаты этих кривых для одних и тех же моментов времени, получаем жирную кривую — уравнение времени. Это уже не синусоида, но более сложная, периодическая кривая, повторяющаяся из года в год.

Кривая изменения широты места наблюдения есть результат действия ряда физических причин, связанных с внутренним строением Земли, с ее формой, с перемещением масс по поверхности Земли и внутри нее и т. п. Каждая причина в отдельности дает свою кривую; действуя все вместе одновременно, они, как в приведенном выше примере с «уравнением времени», складываются и дают сложную кривую изменения широты места наблюдения, приведенную нами на рис. 12.

Изменения широты разделяются на две группы: так называемые полярные изменения и неполярные. Полярными называются изменения, зависящие от движения полюса по поверхности Земли или, иначе говоря, от смещения оси вращения в теле Земли. Неполярные изменения происходят от других причин, не связанных с движением полюсов по поверхности Земли. Полярных изменений известно четыре, неполярных — два. Одно из полярных изменений имеет период в четырнадцать месяцев (428 суток) и носит название периода свободной нутации. Оно называется также периодом Чандлера, по имени американского ученого, открывшего его. Другое полярное изменение имеет период в один год и называется вынужденным колебанием полюса. Третье изменение имеет полугодовой период¹. Все эти три периодические изменения имеют разные амплитуды.

Если кривую наблюдаемой широты освободить от трех периодических полярных изменений широты, то на чертеже, где по оси абсцисс откладывается время, а по оси ординат — значения широты, получится кривая, указывающая, как с течением времени меняется средняя широта.

Метод получения средней широты был предложен А. Я. Орловым. По этому методу средняя широта вычисляется по формуле:

$$\varphi_{cp} = \frac{1}{20} [\varphi_0 + \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5 + 2 (\varphi_6 + \varphi_7 + \varphi_8 + \varphi_9) + \varphi_{10} + \varphi_{11} + \varphi_{12} + \varphi_{13} + \varphi_{14} + \varphi_{15}],$$

где φ_0 — широта в начальный момент периода, для которого вычисляется средняя широта;

φ_1 — широта через 0,1 года от начального момента,

φ_2 — широта через 0,2 года от начального момента и т. д.

Вычисленная таким образом широта не содержит в себе изменений с периодами в четырнадцать месяцев, годовым и полугодовым. Иначе говоря, это такая широта, которая получилась бы, если бы ось вращения Земли не совершала периодического движения в ее теле. Для по-

¹ О причинах полярных изменений см. в § 15.

лучения средней широты по формуле А. Я. Орлова нужно иметь, таким образом, 16 отдельных значений широт через каждую десятую долю года.

Однако широта наблюдается не через каждую десятую долю года, а как позволяют метеорологические условия. Поэтому поступают так: по полученным из наблюдений широтам строят график, т. е. кривую изменения широты, как это мы делали на рис. 12, и снимают с нее значения широт для каждой десятой доли года. В табл. 1 параллельно со значениями широт, полученными из наблюдений (второй столбец), приведены значения широт, снятые с кривой для каждой десятой доли года (столбец пятый).

Имея ряд наблюденных широт на интервал времени больший, чем 1,6 года, можно получить ряд средних широт, также на каждую десятую долю года последовательным смещением на одну десятую долю года значений широт, снятых с кривой изменения широты. Только число средних широт будет на 15 меньше, чем число широт, снятых с кривой. Значит, первое значение средней широты относится к моменту $t + 0,75$ года, где t — момент первого значения широты, снятого с кривой. Моменты остальных средних широт последовательно сдвигаются на одну десятую года.

Полученная средняя широта медленно меняется. Это изменение может происходить также от движения полюса и, кроме того, от причин, науке пока неизвестных.

Действительно, если взять две обсерватории, расположенные на одном меридиане Земли, то каковы бы ни были изменения, вызванные смещением полюса, они должны быть на обеих обсерваториях одинаковы.

Применяя свой метод к наблюдениям на обсерваториях Гринвичской и Карлофорте, лежащих почти на одном меридиане, А. Я. Орлов обнаружил, что средние широты их медленно меняются, но меняются по-разному. Если бы эти медленные изменения были одинаковы, то можно было бы сказать, что они происходят только от движения полюса, но только это не периодические колебания, а так называемые вековые изменения, которые мы не исключили из значений широт при исключении периодических. Но полученные медленные изменения широт Гринвича и Карлофорте имеют совершенно различный характер.

Приводим эти изменения, выраженные в сотых долях секунды дуги за 10,5 года.

Т а б л и ц а 2

Годы	Гринвич	Карлофорте	Гр.-Кар.
1917.0	— 1	— 7	+ 6
1917.5	0	— 7	+ 7
1918.0	0	— 7	+ 7
1918.5	0	— 5	+ 5
1919.0	+ 1	— 3	+ 4
1919.5	+ 1	— 2	+ 3
1920.0	+ 2	— 1	+ 3
1920.5	+ 4	+ 2	+ 3
1921.0	+ 2	+ 2	+ 2
1921.5	+ 1	+ 2	0
1922.0	+ 1	Наблюдений не было	
1922.5	0		
1923.0	— 2		
1923.5	— 4	— 13	+ 9
1924.0	— 5	— 13	+ 8
1924.5	— 4	— 14	+ 10
1925.0	— 3	— 14	+ 11
1925.5	— 1	— 13	+ 12
1926.0	— 1	— 14	+ 13
1926.5	+ 1	— 15	+ 16
1927.0	+ 4	— 14	+ 18
1927.5	+ 3	— 13	+ 16

Из этой таблицы видно, например, что широта Гринвича с 1924 по 1927 г. увеличивается, а Карлофорте — уменьшается. Такие изменения средней широты происходят не только от движения полюса, которое не исключается при исключении периодических членов, но от каких-то других причин. Медленные изменения средней широты, после исключения из нее периодических членов, повидимому, можно будет разложить на две составляющие. Одна составляющая зависит от движения полюса и называется полярной. Полярные изменения средней широты на разных станциях получаются по формуле

$$\varphi - \varphi_{\text{ср}} = x \cos \lambda + y \sin \lambda,$$

где x и y теперь уже составляющие векового движения полюса. Весьма вероятно, что x и y изменяются линейно,

и тогда полярные изменения широты разных станций также будут линейными, причем в точках, отстоящих на 180° по долготе, они будут иметь противоположные направления. То, что останется после выделения полярных изменений, будет медленным изменением средней широты, которое происходит не от движения полюса, а от каких-то других местных причин, пока что неизвестных. Эти изменения, разные для каждого места на Земле, и называются *неполярными изменениями*.

Вековое изменение средней широты невелико и за короткий промежуток времени его трудно обнаружить. На рис. 26 приведена кривая изменения средней широты



Рис. 26. Кривая изменения средней широты Пулкова, с 1949.5 по 1951.0.

Пулкова, вычисленная по данным табл. 1 (столбец пятый). Первое значение средней широты относится к моменту 1949,55 ($1948,8 + 0,75$), последнее к моменту 1951,15 ($1951,9 - 0,75$).

На графике видно, что, кроме остающихся колебаний, средняя широта Пулкова за рассматриваемый промежуток времени увеличивается. Это явление можно толковать, как вековое изменение средней широты, зависящее от движения полюса. Однако здесь нужно оговориться; не следует из нашего примера делать вывод относительно поведения средней широты Пулкова. Пример относится к весьма короткому интервалу времени; мы умышленно по оси ординат отложили $0'',001$ в одном миллиметре, чтобы сделать чертеж более наглядным.

Изменение средней широты приведено на рис. 27 по наблюдениям на трех станциях: Мицузава, Карлофорте и Юкая. Эта средняя широта вычислялась по непрерывным наблюдениям 44 пар программы Международной службы широты в течение 29 лет (1906—1934). Вычисления производились на Полтавской гравиметрической обсерватории. На рисунке по оси абсцисс отложены года, по

оси ординат — средние широты в сотых долях секунды дуги.

Вековое движение полюса можно выявить только из длительных рядов наблюдений одних и тех же звездных пар на нескольких широтных станциях, лежащих на одной и той же параллели.

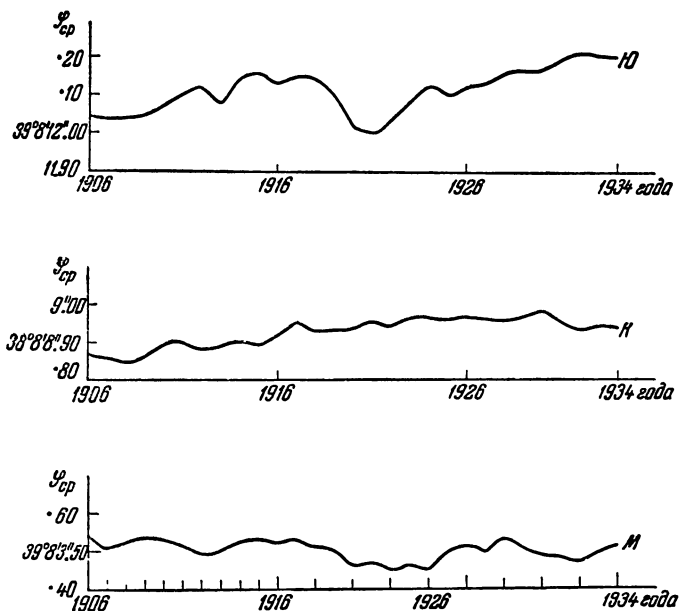


Рис. 27. Изменение средней широты Мицузавя (нижний график), Карлофорте (средний) и Юкая (верхний).

Для обнаружения векового движения полюса А. Я. Орлов использовал наблюдения за 51 год на трех станциях: Мицузавя, Карлофорте и Юкая. За этот период времени в Мицузаве было сделано 79 590 наблюдений, в Карлофорте 94 200 и в Юкае 84 882. Все эти в общей сложности 258 672 наблюдения были освобождены от изменений, зависящих от периодического движения полюса. Затем были получены средние широты. Но на этих широтных станциях за 51 год их работы программа наблюдений менялась трижды: в 1912, 1922 и 1935 гг. Поэтому трудность исследования состояла в том, чтобы все наблю-

дения свести к одной и той же системе склонений. После многих поисков и испытания разных вариантов А. Я. Орлову удалось найти простое решение этой задачи.

Эта, в основном законченная, очень трудоемкая работа привела к выводу, что полюс Земли движется вековым движением со скоростью $0'',004$ в год вдоль меридиана, расположенного на 69° к западу от Гринвичского.

В свете этих рассуждений приобретают особый интерес высказывания некоторых ученых о перемещениях климатических поясов Земли. В полярных странах геологи находят остатки растений и животных, свойственных теплему климату. Точно так же в странах умеренного пояса находятся следы обледенений. П. К. Штернберг считал, что «некоторые геологические эпохи, например, ледниковые, и трансгрессия¹ морей могут быть объяснены движением полюсов по поверхности Земли».

Результаты, полученные А. Я. Орловым при исследовании векового движения полюса, имеют большое научное значение, но их нельзя считать окончательными. Ученым еще не раз придется возвращаться к этому вопросу. Нужно получать новые длительные ряды однородных наблюдений (на зенит-телескопах, зенитных отражательных трубах), из которых можно определять вековое движение полюса, разрабатывать новые методы переработки старых рядов наблюдений, что вместе даст возможность еще более точно установить, как ведет себя полюс Земли в течение длительных интервалов времени.

Получаемое из наблюдений значение широты мест на земной поверхности зависит также от колебаний отвеса, вызываемых притяжением Луны и Солнца.

По закону всемирного тяготения все тела притягиваются друг к другу. Сила, действующая между телами, зависит от их массы и расстояния между ними. Эта сила вычисляется по формуле:

$$F = f \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где F — сила, m_1 и m_2 — массы тел, r — расстояние между этими телами и f — коэффициент пропорциональности, зависящий от принятой системы единиц измерений. Эта

¹ Трансгрессия — перемещение.

сила действует всюду: между Солнцем и Землей, Землей и Луной, Солнцем и любой звездой и между любыми двумя материальными частицами на Земле и во Вселенной. Если подвесить где-нибудь груз на тонкой бечевке, то на груз, кроме силы земного притяжения, будут действовать силы притяжения Солнца и Луны. Эти небесные тела будут притягивать груз к себе. Наибольшее притяжение груза Солнцем и Луной будет во время новолуния, когда силы со стороны Солнца и Луны действуют в одном направлении. С отклонением отвеса изменится и широта

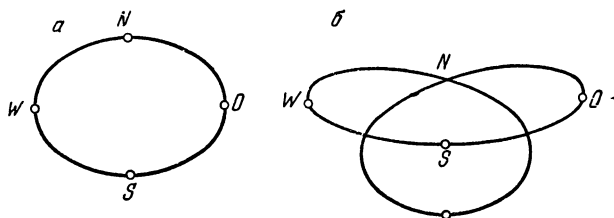


Рис. 28. Движение отвеса.

а) для наблюдателя на экваторе, когда склонение Луны равно нулю;
 в) когда Луна имеет склонение $+15^\circ$ и наблюдатель — широту $+30^\circ$.

места наблюдения, так как астрономическая широта места есть угол между отвесной линией и плоскостью земного экватора. Так как Солнце и Луна меняют свое положение по отношению к Земле, то и отвес будет смещаться в различных направлениях, и астрономическая широта места наблюдения будет изменяться.

Интересно отметить, что кривая на поверхности Земли, которую вычерчивает конец отвеса под действием притяжения Луны и Солнца, очень сложная. Форма ее зависит от положения наблюдателя с отвесом на Земле и от положения Луны и Солнца. В качестве иллюстрации на рис. 28 приведены две кривые, вычерчиваемые концом отвеса под действием притяжения Солнца и Луны. Первая кривая (эллипс) вычерчивается концом отвеса, когда Луна находится на небесном экваторе, а наблюдатель с отвесом на экваторе Земли; этот путь отвес проходит дважды в течение периода времени от одной верхней кульминации Луны до другой. Вторая — когда Луна имеет склонение $+15^\circ$, а наблюдатель находится в северном полушарии на

широте 30° ; в этом случае влияние Солнца не учитывается.

Колебания отвеса под влиянием Луны и Солнца невелики и не превосходят $0'',025$. Однако эти колебания вызывают грандиозные явления морских приливов, предсказание которых необходимо для мореплавателей. Существуют специальные приборы, так называемые горизонтальные маятники, при помощи которых исследуются колебания отвеса под влиянием лунно-солнечного притяжения; на рис. 29 приведена схема горизонтального маятника.

Маятники обычно устанавливаются дальше от моря или океана, чтобы перемещение приливных волн вблизи маятника не оказывало на него никакого влияния. Кроме этого, маятники устанавливаются в глубоких старых подвалах, чтобы устранить влияние колебаний температуры и местных колебаний почвы, происходящих от движения транспорта, работы двигателей и пр.

Как показали опыты, в новых подвалах, в которых еще не устоялась каменная кладка стен и фундамента, где кругом от перекопки нарушена устойчивость грунта, наблюдения с такими чувствительными приборами невозможны. Такие маятники установлены и работают на Полтавской гравиметрической обсерватории (маятники сконструированы в начале прошлого столетия профессором Харьковского университета Г. В. Левицким) и во многих других местах.

Таким образом, широта места наблюдения на земной поверхности не остается постоянной, а изменяется от того, что ось вращения меняет свое положение в теле Земли (полярные изменения — периодические и вековые) и от того, что отвес не занимает неизменного положения вслед-

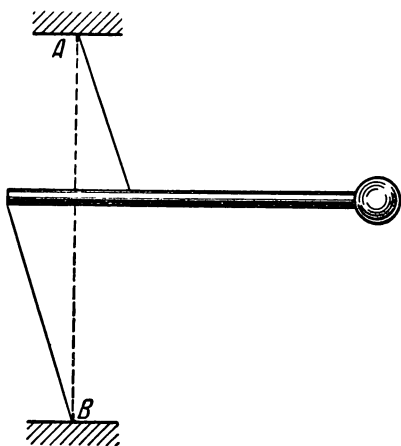


Рис. 29. Схема горизонтального маятника.

ствие действия на него Солнца и Луны. Кроме того, как мы уже говорили, существуют изменения широты, происходящие от причин, пока нам неизвестных (неполярные изменения широты).

§ 15. Широтные наблюдения на обсерваториях

Международная служба широты была создана для практических целей, именно для того, чтобы по наблюдениям на нескольких станциях, расположенных на одной и той же параллели, получать координаты полюса. Теоретические исследования в план ее работы не входили. Разумеется, таким положение долго оставаться не могло. Теория и практика неразрывно связаны между собою и необходимо дополняют друг друга. Естественно, теоретические исследования движения полюса также должны были развиваться. Этим вопросом занялись астрономические учреждения, не входящие в систему Международной службы широты, и отдельные ученые.

Первое место в этих исследованиях принадлежит русским ученым, которые еще до организации Международной службы широты поставили перед собой задачу изучить движение полюса. Но для этого нужно было иметь наблюдения, которые и были организованы в разное время в разных местах.

В апреле 1890 г. начались регулярные наблюдения в Пулковке на большом пассажном инструменте, установленном в первом вертикале. Широта места определялась по моментам прохождения кульминирующих близко к зениту звезд через восточную и западную части первого вертикала. По разностям этих моментов получалось зенитное расстояние в меридиане наблюдаемой звезды, по которому и вычислялась широта места. Последний 24-летний цикл наблюдений на этом инструменте (до 1941 г.) провел А. С. Васильев. Из всех наблюдений на пулковском пассажном инструменте в первом вертикале обнаружены суточные колебания широты с амплитудой $0''.16$. вызываемые, как считал Васильев, аномальной рефракцией.

Учесть эту рефракцию невозможно. Рефракция зависит от зенитного расстояния светила, от температуры и давления, т. е. в конечном счете от плотности воздуха. Формула для учета рефракции, учитывающая давление и

температуру воздуха, получена в предположении, что земная атмосфера от верхней границы до поверхности земли постепенно становится все плотнее и плотнее. В действительности этого нет. Около поверхности Земли и даже в павильоне, где происходят наблюдения, плотность воздуха быстро меняется, а следовательно, быстро изменяется и направление светового луча. Луч света отклоняется то в одну, то в другую сторону. От этого, например, происходит наблюдаемое нами мерцание звезд. Тем не менее, заключение Васильева о том, что значительное суточное колебание широты с амплитудой $0'',16$, обнаруженное во всех наблюдениях на пассажном инструменте в первом вертикале, вызывается аномальной рефракцией, встречает возражения и не может считаться окончательным.

Следует заметить, что П. К. Штернберг из наблюдений на пассажном инструменте в меридиане способом Талькотта получил среднюю широту Московской обсерватории (широту центра пассажного инструмента),

$$\varphi_{\text{ср}} = 55^{\circ} 45' 19'', 804.$$

После этого Штернберг тот же инструмент установил в плоскости первого вертикала и в течение 10 месяцев провел ряд наблюдений по способу Струве. Средняя широта получилась:

$$\varphi_{\text{ср}} = 55^{\circ} 45' 19'', 801.$$

Таким образом, на пассажном инструменте в меридиане и в первом вертикале получилось почти одно и то же значение средней широты, примерно с одинаковыми средними ошибками.

Новый этап в исследовании колебаний широты Пулкова начался в конце 1904 г. наблюдениями на специально для этой цели установленном зенит-телескопе (рис. 21).

Пулковский зенит-телескоп был изготовлен в мастерских обсерватории известным механиком Г. А. Фрейбергом-Кондратьевым. Простота конструкции этого инструмента, жесткость его установки, рациональное расположение отдельных частей и узлов выгодно отличают его от других подобных инструментов.

Первое время наблюдения велись только около полуночи по программе, похожей на программу Международной службы широты. Однако опыт скоро показал, что она не дает результатов, позволяющих решить многие важные вопросы. Поэтому в 1915 г. пулковские астрономы перешли на так называемую расширенную программу, по которой наблюдения велись всю ночь, как говорят, «от зари до зари». Тринадцатилетний ряд наблюдений по этой программе дал исключительно ценный материал, который уже послужил и, несомненно, еще долго будет служить для разного рода научных изысканий. В 1906 г., когда наблюдения на международных станциях полностью подтвердили существование предсказанного С. К. Костинским годового изменения широты, не зависящего от движения полюса (так называемого Z члена), Пулковская обсерватория организовала для изучения этого непольсного изменения широты и для некоторых других научных целей специальные наблюдения в Южной Африке, где был установлен один из инструментов обсерватории. Произведенные там в течение нескольких лет наблюдения показали, между прочим, что полюсные изменения широты одинаковы в обоих полушариях Земли — северном и южном.

Мощный пулковский зенит-телескоп позволил в течение долгого времени (с 1904 по 1917 гг.) наблюдать звезду δ Кассиопеи не только ночью, но также и днем. Результаты этих наблюдений послужили материалом для многих исследований и дали возможность в 1923 г. открыть в изменениях широты полумесячную волну, изучение которой играет важную роль при исследовании внутреннего строения Земли.

За все время наблюдений, с 1904 г. до настоящего времени, на Пулковском зенит-телескопе получено около 70 000 высокоточных определений широт; средняя ошибка одного определения широты $\pm 0'',17$.

В 1892 г. начались наблюдения на обсерватории Казанского университета, организованные проф. М. А. Грачевым. Эти наблюдения велись непрерывно на протяжении девяти лет и дали в высшей степени ценные результаты. По наблюдениям этой обсерватории была построена кривая изменения широты Казани, исследовано и установлено движение полюса за девять лет. Итогом работы

был капитальный труд М. А. Грачева «Аберрационное постоянное из казанских наблюдений широты и вероятнейшее значение его».

Ряд этих высококачественных наблюдений с 1897 по 1901 г. был использован Международной службой широты для получения координат полюса.

В 1892—1895 гг. П. К. Штернбергом проведен ряд наблюдений широты на Московской обсерватории. Главной целью его работы было, как говорил он сам, проследить, меняется ли широта Московской обсерватории или нет. Он установил, «что изменения широты Московской обсерватории в общем носят тот же характер, как и в других местах, но амплитуда этих изменений в 1892—1893 гг. значительно больше, чем это может дать движение полюса». Штернберг не дал объяснения этому факту, но предполагал, что причина его кроется в аномальной рефракции и в недостаточно хорошей и уверенной связи соседних групп звезд между собой.

Наблюдения производились Штернбергом по способу Талькотта на пассажном инструменте Бамберга. Для установки инструмента был сооружен специальный павильон, который и теперь с успехом используется Службой времени Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга (ГАИШ). Фундаментальный труд П. К. Штернберга «Широта Московской обсерватории в связи с движением полюсов» содержит подробное изложение вопросов, касающихся теории движения Земли, суточной нутации, истории изучения движения полюса по наблюдениям и объяснения причин, вызывающих изменения широт. В этом труде в обобщенном виде было изложено все то, что было достигнуто в вопросе изучения движения полюсов и изменяемости широт к началу 1900-х годов.

В 1895—1896 гг. Д. Д. Геденовым был проведен на зенит-телескопе ряд наблюдений широты Ташкентской обсерватории. Результаты обработки этого ряда дали ясно выраженное периодическое изменение широты, причем максимум широты приходился на август 1895 г., а минимум — на март 1896 г. Эти результаты, сопоставленные Альбрехтом с соответствующими результатами других обсерваторий, показали очень хорошее согласие с ними.

Несмотря на то, что в России были проведены длительные ряды широтных наблюдений и на материале этих наблюдений были выполнены отдельные крупные исследования, задача вычисления координат полюса оставалась неразрешенной. Отдельные ряды широтных наблюдений, полученные на различных обсерваториях, расположенных не на одной параллели, не давали возможности решить эту задачу. Координаты мгновенного полюса давались Международной службой широты.

Начавшаяся в 1914 г. первая мировая война нарушила связь широтных станций между собою, а некоторые из них совсем прекратили свою деятельность. Центральное бюро Международной службы широты уже не могло, как раньше, собирать наблюдения, вычислять координаты полюса и публиковать их. Астрономы и геодезисты остались вследствие этого без всяких сведений относительно движения полюса. Тогда и возникла в России мысль создать свою службу широты, независимую от Международной, но эта мысль не могла сразу осуществиться.

Вопрос об организации Службы широты в России был поставлен только после Великой Октябрьской социалистической революции.

§ 16. Советская служба широты

В 1917 г. профессор Казанского университета М. А. Грачев предложил организовать свою службу широты; это предложение в принципе возражений не встретило, но до практического осуществления доведено не было. Позднее украинские астрономы, во главе с А. Я. Орловым, предприняли более решительные действия; они предложили организовать на параллели $49^{\circ}36'$ три широтные станции, наблюдения на которых обеспечили бы получение координат полюса независимо от Международной службы широты. Параллель $49^{\circ}36'$ была выбрана потому, что на ней тогда кульминировали в зените две ярких звезды.

Проект организации такой службы широты был одобрен, но практически был осуществлен только частично; дело свелось в то время к сооружению Полтавской гравиметрической обсерватории. Для обсерватории в Полтаве

на краю города был получен дом, расположенный среди большого сада, в котором впоследствии были построены павильоны для зенит-телескопов и другие вспомогательные сооружения. Обсерватория вступила в строй действующих научных учреждений в 1926 г.

Деятельность Полтавской гравиметрической обсерватории в первые годы ее существования в основном была направлена на изучение силы тяжести на территории Украины, а также на определение изменений направления силы тяжести в одном и том же месте. Величины этих изменений зависят от упругих свойств Земли, от которых, в свою очередь, зависит и период движения земных полюсов.

В 1926 г. Полтавская обсерватория начала свои первые определения силы тяжести на Украине. Был гравиметрически изучен Донецкий бассейн район Роменской нефти, открыта Черниговская аномалия. В результате произведенных работ по определению силы тяжести была составлена подробная гравиметрическая карта Украины, пользуясь которой геологи и геодезисты сделали много полезных заключений.

В 1930 г. было закончено устройство специального подвала для наблюдений над изменениями направления силы тяжести с двумя взаимно перпендикулярными горизонтальными маятниками. Большие ряды наблюдений с этими маятниками позволили уточнить значение коэффициента, который характеризует средние упругие свойства Земли, и доказать, что отклонения отвеса почти в точности совпадают с фазами лунного приливного действия. Таким путем было доказано, что Землю с большой степенью приближения можно рассматривать как упругое тело, не имеющее вязких слоев.

После целого ряда опытов выработана новая программа наблюдений на зенит-телескопах, обеспечивающая получение материала, который годится для исследований не только периодических изменений широты, но и вековых.

Полтавская гравиметрическая обсерватория стала крупным научным центром по исследованию движения полюса Земли.

Следующим пунктом Советской службы широты является широтный отдел Пулковской обсерватории, где, как

уже говорилось выше, еще в 1904 г. был установлен мощный зенит-телескоп.

По первой программе до 1915 г., т. е. в течение одиннадцати лет, наблюдались сначала 74, а затем 69 звездных пар. После этого программу пришлось несколько изменить вследствие влияния прецессии на разность зенитных расстояний звезд, составляющих пары; кроме того, принимая во внимание новые возникшие задачи, было решено составить программу, которая бы, помимо основной задачи — определения широты места, давала возможность решить и остальные (определение постоянной аберрации, лунных и солнечных членов в широте и др.). По этой программе, включающей 106 звездных пар, наблюдения велись «от зари до зари» с 1915 по 1929 г. С 1929 по 1941 г. наблюдения велись по несколько измененной программе, только около полуночи, с таким расчетом, чтобы каждую ночь наблюдались две группы. В 1941 г. все наблюдения были прерваны, зенит-телескоп снят и эвакуирован.

В 1948 г. наблюдения на Пулковском зенит-телескопе были возобновлены и ведутся по настоящее время. Программа, состоящая из 93 звездных пар и 9 зенитных звезд, разделена на 12 двухчасовых групп, из которых в каждую ясную ночь около полуночи наблюдаются две группы. Из полученных наблюдений выводится кривая изменения широты Пулкова.

Программа, по которой ведутся наблюдения на Пулковском зенит-телескопе, составлена по типу программы Международной службы широты. Она вполне пригодна для изучения периодических изменений широты, но мало пригодна для изучения нутации и медленных изменений широты. Поэтому в настоящее время стоит вопрос о новой программе для Пулковского зенит-телескопа, которая более отвечала бы современным требованиям изучения движения полюса Земли.

Китабская широтная станция имени Улуг-Бека, входящая в Международную службу широты, ведет наблюдения по Международной программе, посылает их в Центральное бюро Международной службы широты и, кроме этого, использует их для научных исследований, например, для изучения изменения средней широты Китаба. Китабские широтные наблюдения используются также нашей Советской службой широты для получения координат по-

люса. В 1953 г. в Китабе на одном и том же зенит-телескопе проведены параллельно два ряда широтных наблюдений: по международной программе и по новой полтавской программе.

Особой заслугой Китабской широтной станции является то, что она непрерывно работает со дня ее основания. Даже в годы Великой Отечественной войны работа станции не прекращалась. Это было очень важно, так как из всех станций Международной службы широты непрерывно работали только Мицузава и Китаб, а остальные на различное время выходили из строя. Координаты полюса для этого времени выводились только по этим двум станциям; хотя по долготе Мицузава и Китаб расположены выгодно (разность долгот 78°), но большой точности значений x и y получить нельзя. Для получения совершенно надежных результатов нужно иметь хотя бы четыре широтных станции, расположенные на какой-нибудь параллели равномерно по долготе.

В 1946 г. начались плановые широтные наблюдения на зенит-телескопе с объективом в 90 мм и фокусным расстоянием 115 см на Астрономической обсерватории имени В. П. Энгельгардта близ Казани. Первое время наблюдения велись по расширенной программе от «зари до зари», но вследствие трудностей, связанных с обработкой большого числа наблюдений, от этой программы отказались. В 1950 г. перешли на программу, аналогичную полтавской. Она состоит из четырех двухчасовых групп по 8 пар в каждой. Каждая группа в свою очередь разделяется на два звена. В настоящее время вычисления организованы так, что широта получается на следующий день после наблюдений. Наблюдения используются для изучения изменений широты обсерватории и для получения координат полюса.

Наблюдения ведутся на Горьковской широтной станции, но они для получения координат полюса пока не используются.

Однако все наши советские широтные станции — Пулково, Полтава, Китаб и обсерватория имени Энгельгардта расположены в узком интервале долгот — всего 37° . Поэтому вычисление координат полюса x и y только по этим станциям не может дать всей желаемой точности.

Как видно из уже приведенной формулы С. К. Костинского

$$\varphi - \varphi_{cp} = x \cos \lambda + y \sin \lambda,$$

наиболее уверенные результаты можно получить по станциям, отстоящим одна от другой по долготе на 90° .

Если, например, взять одну станцию, лежащую на меридиане Гринвича, другую западнее на 90° , то формула С. К. Костинского (при $\lambda=0$ и $\lambda=90^\circ$) примет вид:

$$(\varphi - \varphi_{cp})_0 = x,$$

$$(\varphi - \varphi_{cp})_1 = y.$$

Это значит, что изменение широты на Гринвичском меридиане сразу дает координату x , а на меридиане, западнее его на 90° , сразу можно получить координату y . Безразлично, на каких меридианах будут расположены станции, лишь бы разность долгот между ними составляла 90° , — решение задачи будет уверенное. Если же взять широтные станции, лежащие на двух близких меридианах, то коэффициенты в двух уравнениях перед неизвестными x и y будут мало отличаться друг от друга, и решение задачи будет неуверенное. Поэтому для полноценной работы Советской службы широты нужно иметь, по крайней мере, еще одну широтную станцию где-нибудь в восточных районах СССР.

Следует отметить, что в последнее время советский ученый А. Я. Орлов разработал метод для приближенного определения координат полюса по данным широтных наблюдений только одной обсерватории. Этот метод позволяет также приближенно предвычислять координаты полюса на короткий промежуток времени вперед, используя для этого предшествующие наблюдения.

В методе А. Я. Орлова годовое колебание полюса считается известным, а относительно четырнадцатимесячного (свободная нутация) допускается, что на коротких промежутках времени его можно считать происходящим по кругу. По этому методу в настоящее время на Полтавской обсерватории организовано срочное вычисление приближенных координат полюса для нужд геодезии и службы времени. Для этого используются широтные наблюдения Полтавы, Китаба, Пулкова и Казани.

§ 17. Движение северного полюса Земли за 63,5 года (1891,5—1955,0 гг.)

Международная служба широты при определении координат полюса не исключает медленные изменения сред-

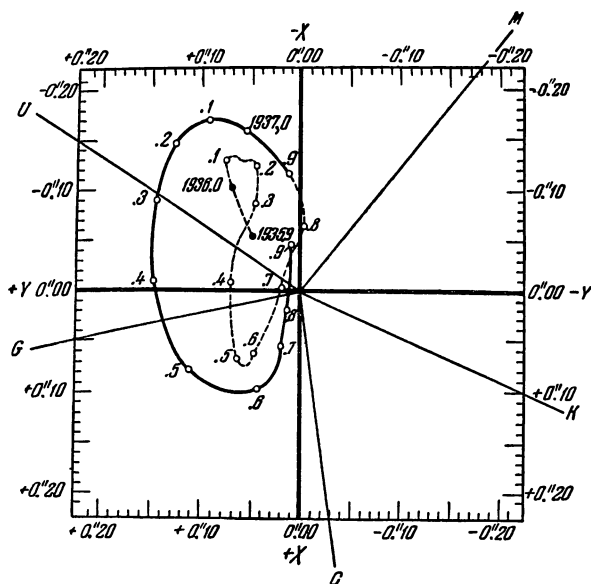


Рис. 30. Кривая движения полюса за два года (1935,9—1937,9) по данным Международной службы широты. Лучи, идущие из среднего полюса на буквы М, U, G, С и К, означают меридианы: Мицузавы, Юкаи, Гейтерсбурга, Карлофорте и Китаба.

них широт и это с течением времени искажает картину движения полюса. На рис. 30 приведена кривая движения полюса по результатам Международной службы широты за два года (1935,9—1937,9), где ясно видно смещение всей кривой движения полюса относительно его среднего положения.

Из значений широт, полученных на всех широтных станциях и на обсерваториях, ведущих широтные наблюдения, а именно: Мицузава, Китаб, Карлофорте, Гейтерсбург, Цинциннати, Юкая, Пулково, Полтава, Казань,

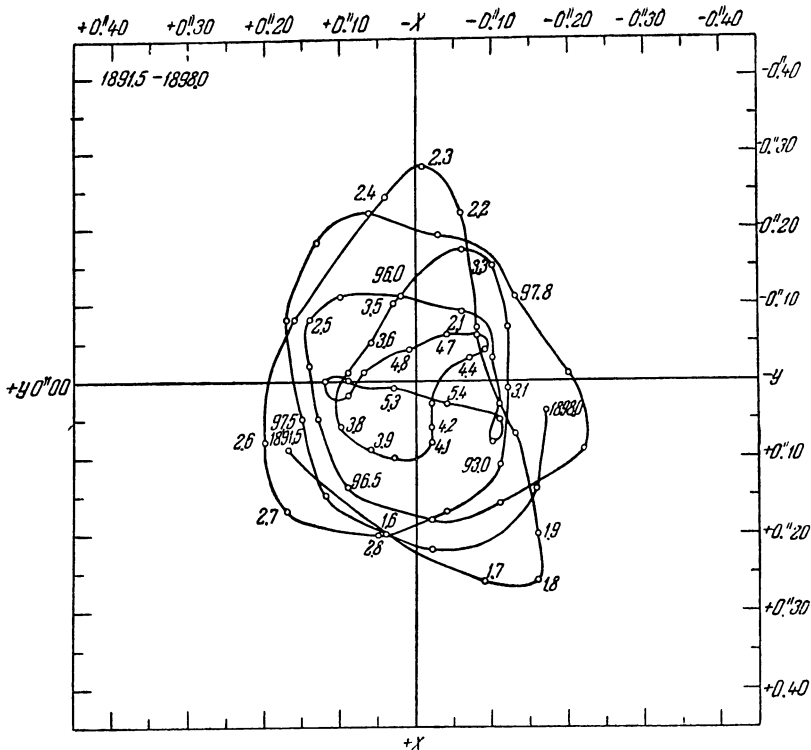


Рис. 31. Кривая движения северного полюса Земли с 1891. 5 по 1898. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

Вашингтон, Гринвич, Аделаида и Ла-Плата, А. Я. Орлов вычислил координаты полюса за период с 1891,5 по 1955,0. (С 1952 г. координаты полюса вычисляются на Полтавской гравиметрической обсерватории Академии наук УССР). Из наблюдений предварительно исключались медленные изменения средней широты, поскольку они вызываются главным образом не движением полюса, сама же средняя широта вычислялась ранее описанным методом А. Я. Орлова. Координаты полюса за последние годы вычислены только по нашим советским широтным наблюдениям. Ниже на одиннадцати графиках приводится кривая движения полюса за 63,5 года (рис. 31—41).

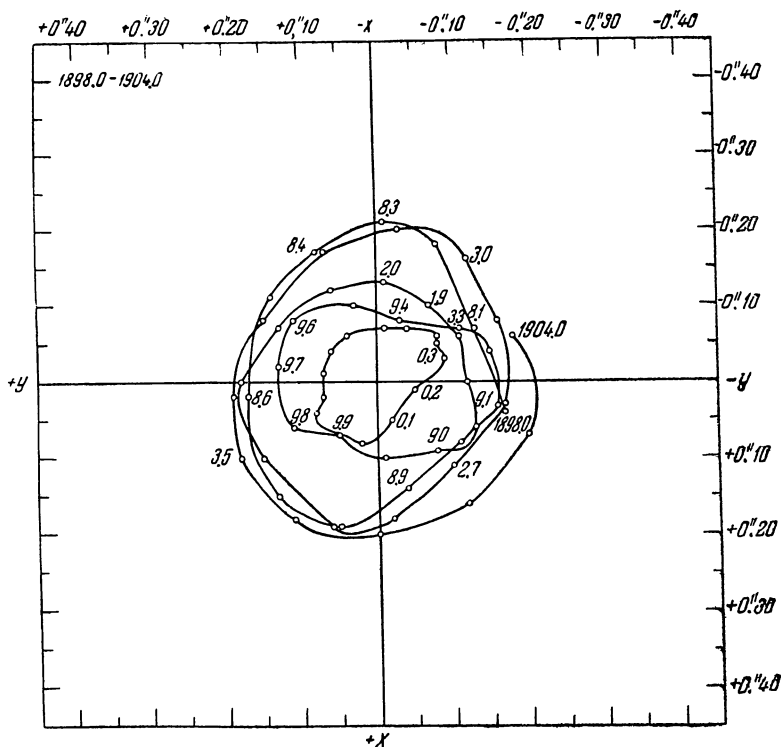


Рис. 32. Кривая движения северного полюса Земли с 1898.0 по 1904. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

Эта кривая, в основном, есть результат сложения трех движений полюса с разными периодами: четырнадцатимесячного, годового и малозаметного полугодового. Каждый рисунок (кроме последнего) содержит кривую за шесть лет; так интервал взят потому, что в шесть лет шесть раз укладывается годовой период и пять раз четырнадцатимесячный. Интересно отметить, что амплитуда колебания полюса все время меняется, и интервал между максимальными или минимальными амплитудами, как это видно из графиков, получается равным около 40 лет.

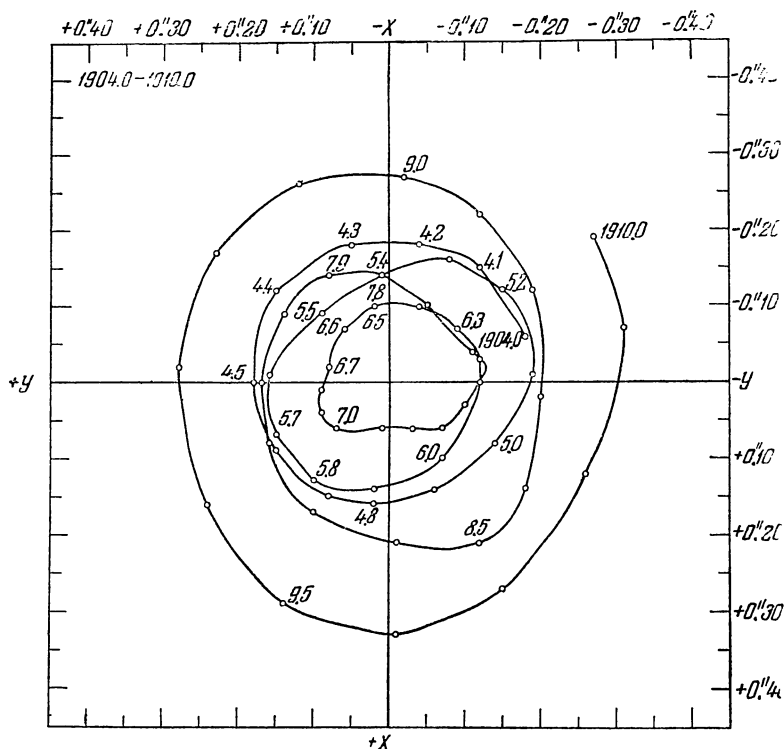


Рис. 33. Кривая движения северного полюса Земли с 1904. 0 по 1910. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

Так, хорошо выраженные максимумы амплитуды были в 1910 и 1952 гг. Если отбросить наблюдения за первые два года (1891,5—1893,5), как менее точные, чем последующие, то можно считать минимумом амплитуды 1894 год. Второй ярко выраженный минимум падает на 1935 год.

С 1952 г. амплитуда колебания полюса начала уменьшаться; но это не значит, что она будет уменьшаться непрерывно, может произойти и временное увеличение амплитуды. Минимум же ее должен наступить, примерно, через 15—20 лет.

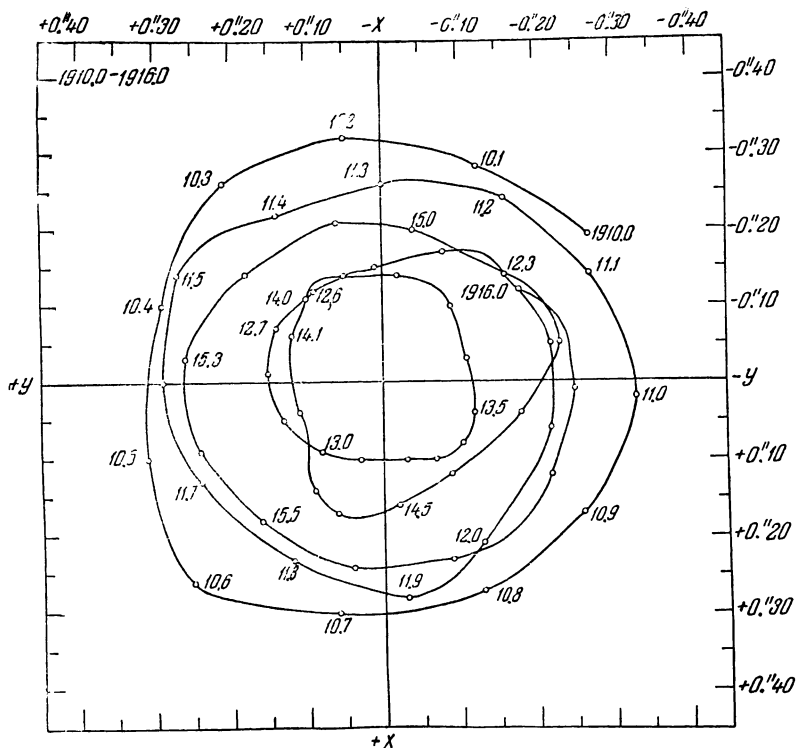


Рис. 34. Кривая движения северного полюса Земли с 1910. 0 по 1916. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

§ 18. Причины, вызывающие движение полюсов Земли

По современным представлениям движение мгновенного полюса вращения Земли по ее поверхности объясняется несовпадением оси вращения Земли с наименьшей главной осью инерции.

Если бы Земля была абсолютно твердым телом и в начальный момент движения ее ось вращения совпадала с наименьшей главной осью эллипсоида инерции, то она совпадала бы с ней и в дальнейшем, и никакого движения полюсов по поверхности Земли не было бы. Л. Эйлер, принимая Землю за абсолютно твердое тело, допустил,

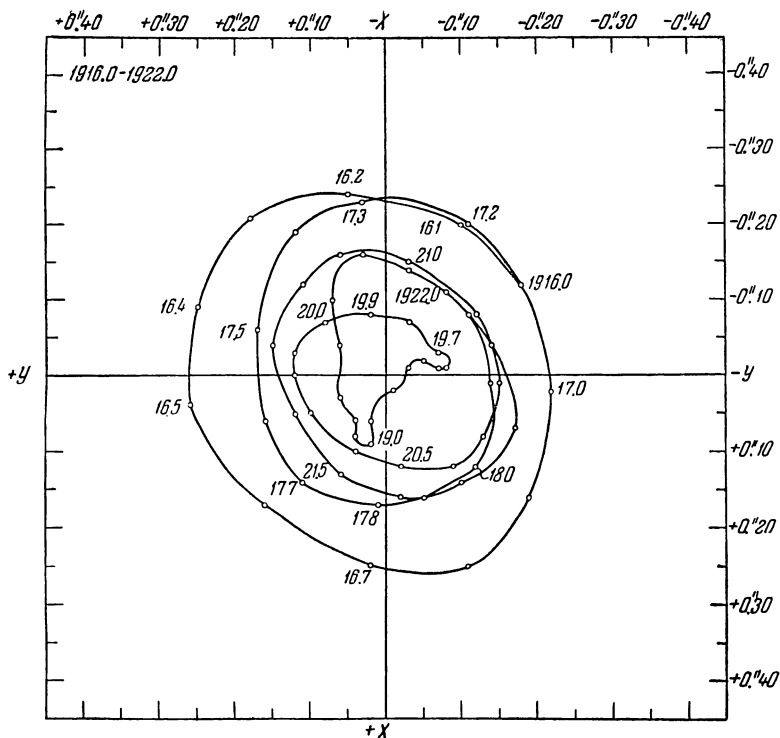


Рис. 35. Кривая движения северного полюса Земли с 1916. 0 по 1922. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

что в какой-то момент времени ось вращения Земли не совпадала с наименьшей осью эллипсоида инерции земного шара. В этом случае получается, что в дальнейшем ось вращения Земли будет описывать внутри Земли поверхность кругового конуса, двигаясь вокруг наименьшей главной оси инерции с периодом в 305 суток. Вследствие этого движения полюс вращения описывает около полюса инерции на поверхности Земли небольшой круг.

В действительности продолжительность периода движения полюса вращения вокруг полюса инерции зависит от упругих свойств Земли. Земля не абсолютно твердое тело и по форме, как это теперь достоверно известно,

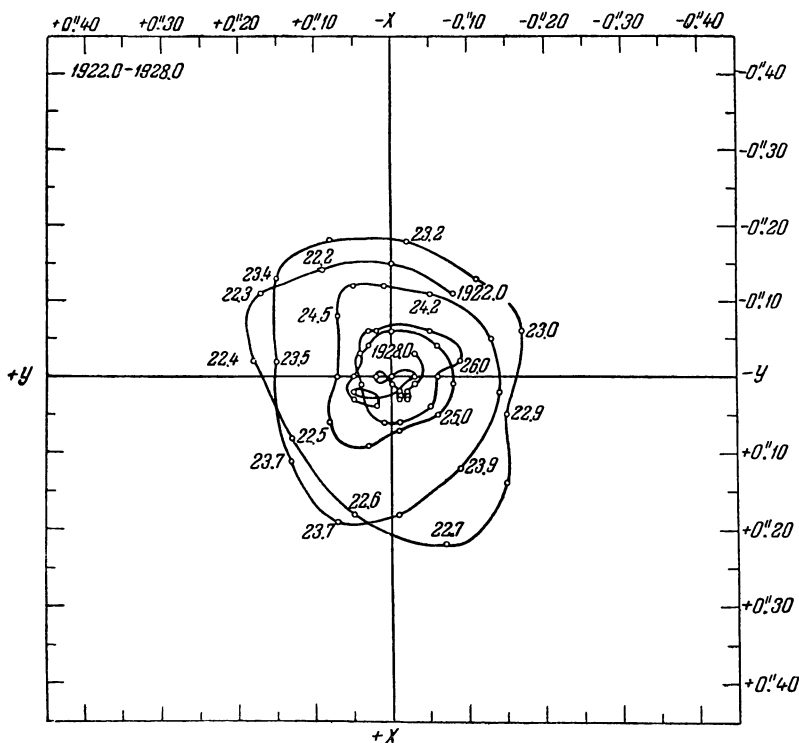


Рис. 36. Кривая движения северного полюса Земли с 1922. 0 по 1928. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

близка к трехосному эллипсоиду. Внутри Земли происходят перемещения масс, землетрясения, оседание и подъем материков. Это перераспределение масс внутри Земли изменяет ее эллипсоид инерции и меняет направление главных осей.

Допустим, что в какой-то момент времени ось вращения Земли совпадала с наименьшей главной осью инерции. Перераспределение масс изменило форму эллипсоида инерции, а следовательно, и расположение главных его осей; наименьшая ось инерции вышла из совпадения с осью вращения Земли. Если бы перераспределение масс произошло один раз и прекратилось, то мгновенная ось

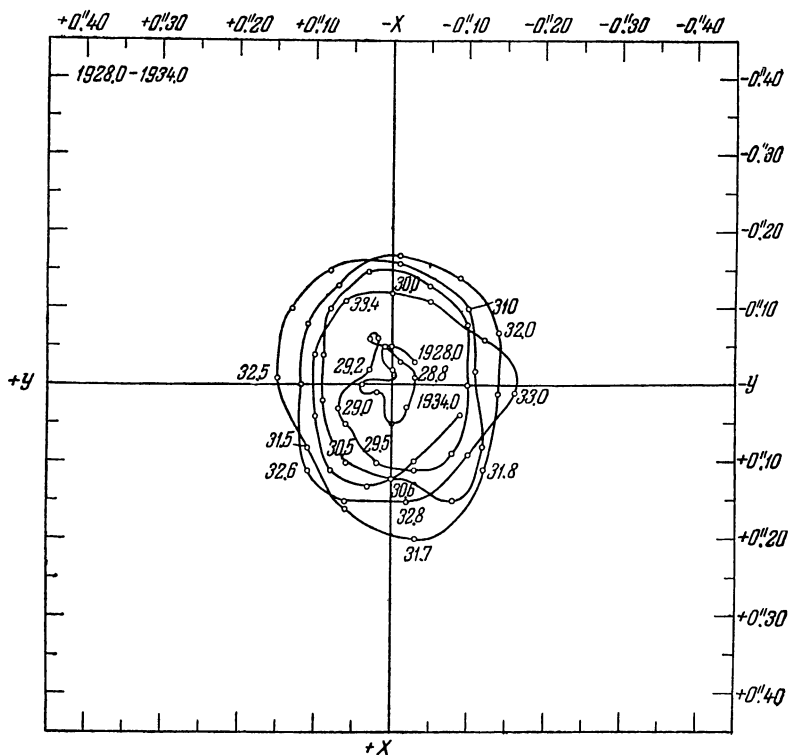


Рис. 37. Кривая движения северного полюса Земли с 1928. 0 по 1934. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

вращения Земли, выйдя из совпадения с осью инерции, стала бы описывать относительно последней коническую поверхность с периодом, продолжительность которого зависит от упругих свойств Земли. Полюс же Земли, если считать Землю сфероидом, стал бы описывать около полюса инерции небольшой круг. Это движение оси вращения Земли называется свободной нутацией, так как оно происходит без воздействия внешних сил.

Период этого движения из наблюдений получился равным 1,2 года, что значительно больше периода, полученного Эйлером для абсолютно твердой Земли. Это расхождение впоследствии было объяснено американским астро-

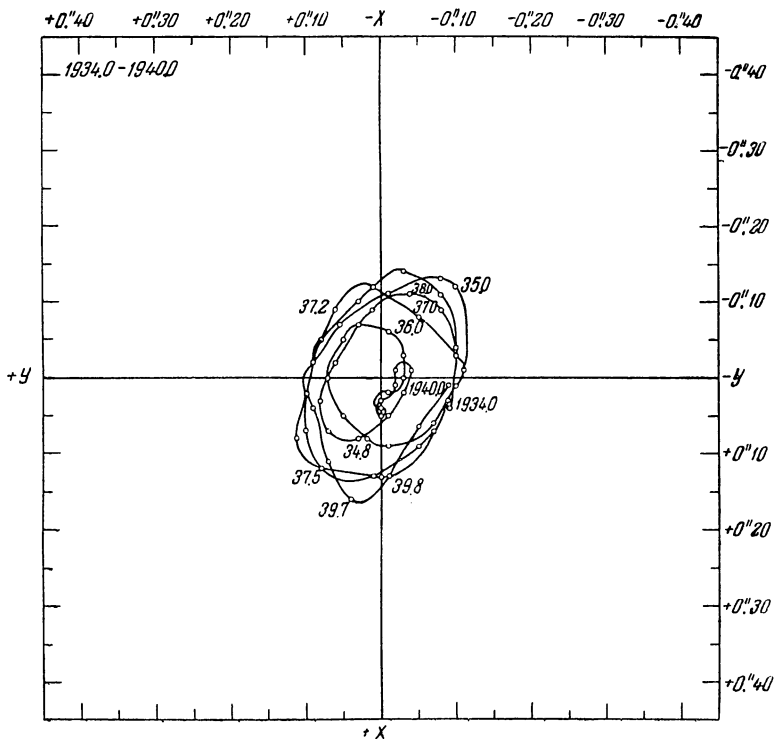


Рис. 38. Кривая движения северного полюса Земли с 1934, 0 по 1940, 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

номом С. Ньюкомбом, который как раз и указал на то, что Земля не является абсолютно твердым телом. По мнению Ньюкомба, полученный из наблюдений период в 1,2 года есть именно период Эйлера, но удлинённый за счет неабсолютной твердости Земли. Ньюкомб выяснил, как влияют на положение полюсов инерции упругие деформации Земли и движения масс на ее поверхности. Он показал, что вследствие перемещения мгновенной оси вращения Земли центробежная сила в любой ее точке меняется как по величине, так и по направлению. Результатом этого изменения центробежной силы является то, что каждая частица Земли находится под непрерывным перемен-

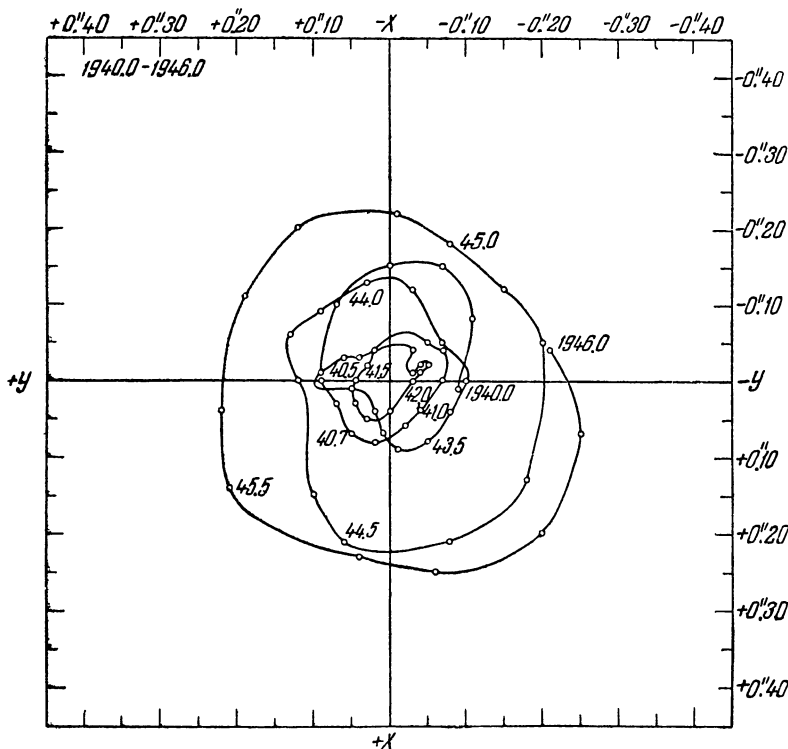


Рис. 39. Кривая движения северного полюса Земли с 1940. 0 по 1946. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

ным напряжением. Это действие вызывает слабые упругие деформации Земли, которые всегда приближают полюс инерции к полюсу вращения Земли. Если бы Земля была не упругая, а, например, вся состояла из воды, то вследствие ее вращения мгновенная ось по законам механики совпала бы с наименьшей главной осью инерции. Это значит, что никакого движения полюсов по поверхности воды не было бы.

Приближение полюса инерции к полюсу вращения Земли приводит к тому, что скорость движения полюса вращения Земли вокруг полюса инерции уменьшается, а следовательно, период движения увеличивается. Так уста-

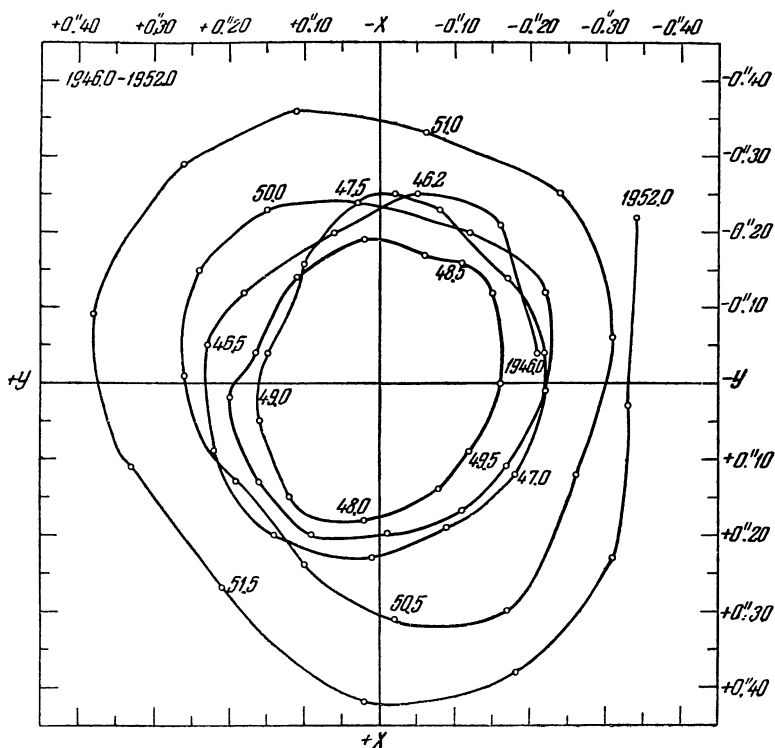


Рис. 40. Кривая движения северного полюса Земли с 1946. 0 по 1952. 0. Положения полюса отмечены через десятую долю года

навливается зависимость периода свободного движения полюса Земли от упругих ее свойств. Это дает возможность находить его величину на основе тех или иных представлений о внутреннем строении Земли. Значит, в согласии с классической теорией, в которой Земля считается сфероидом, можно сказать, что при свободной нутации траектория полюса вращения Земли относительно полюса инерции в среднем близка к круговой; радиус этой средней траектории, как показывают наблюдения, равен 4,5 м. Если считать Землю трехосным эллипсоидом, то эта траектория представится эллипсом с очень малым эксцентриситетом.

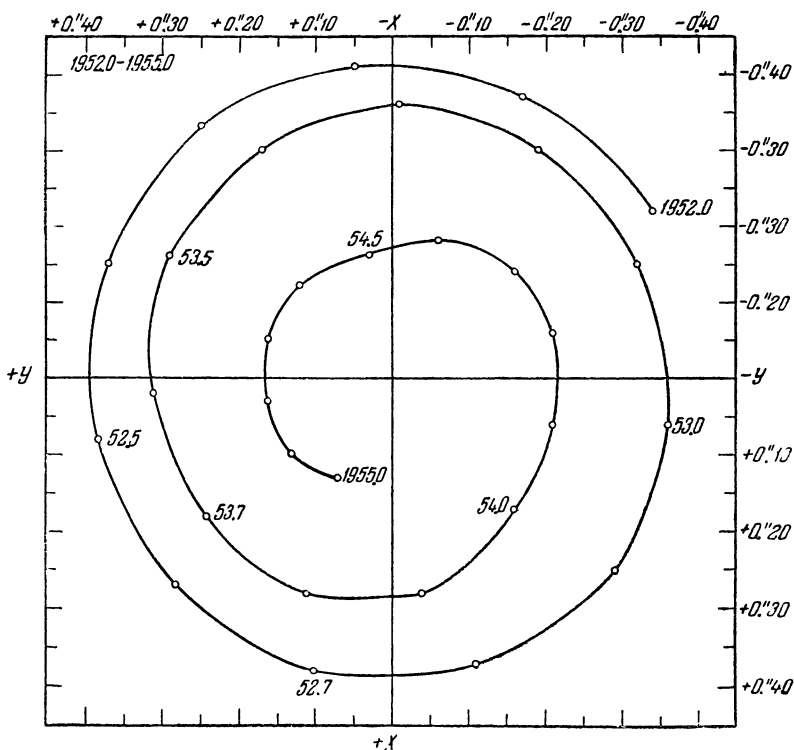


Рис. 41. Кривая движения северного полюса Земли с 1952.0 по 1955.0
Положения полюса отмечены через десятую долю года

ситетом¹; большая ось эллипса по направлению совпадает с малой осью экватора. Однако в действительности это движение полюса с четырнадцатимесячным периодом имеет сложный и неправильный характер. По данным А. Я. Орлова, амплитуда движения полюса вращения вокруг полюса инерции (иначе говоря, расстояние между ними) не остается постоянной, а меняется в значительных пределах. Так, за время с 1892 по 1938 г. изменения амплитуды происходили в пределах от 0,04 до 0,25 секунды

¹ Эксцентриситетом эллипса называется отношение расстояния между фокусами к расстоянию большой оси,

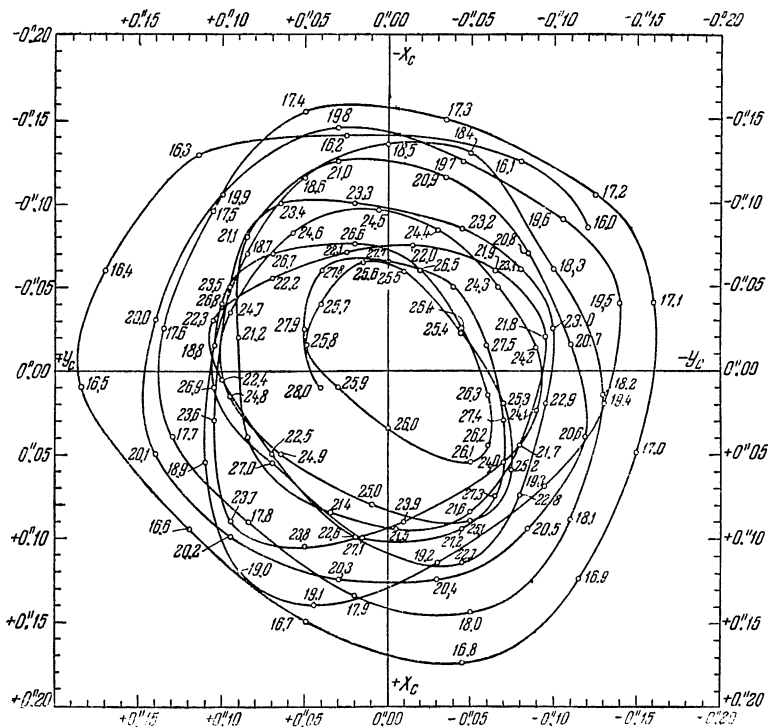


Рис. 42. Движение полюса (четырнадцатимесячный период) с 1892 по 1938 г.

дуги. На рис. 42 приведена кривая этого движения с 1892 по 1938 г.; здесь ясно виден его сложный характер. Полюс Земли движется в том же направлении, в котором вращается Земля.

Кроме этого движения полюса Земли относительно полюса инерции с четырнадцатимесячным периодом, обнаружено движение полюса с годовым периодом.

Метеорологические сезонные явления, происходящие на поверхности Земли, а именно: образование и таяние снежного покрова и в особенности перемещения воздушных масс в различные времена года, изменяют эллипсоид инерции Земли и направление его главных осей, вызывая тем самым движение полюса инерции с годовым перио-

дом. Это движение полюса инерции происходит в плоскости меридиана, перпендикулярного Гринвичскому, в среднем с амплитудой 0,03 секунды дуги. Так как полюс вращения движется вокруг полюса инерции, то ему передается и это другое движение с годовым периодом да еще, по некоторым причинам, в увеличенном виде. Получается так, что полюс инерции колеблется в плоскости меридиана, перпендикулярного Гринвичскому, с амплитудой 0,03 секунды дуги с годовым периодом, а от этого движения полюса инерции полюс вращения движется с годовым же периодом по эллипсу, средняя длина большой полуоси которого равна 0,088, а малой — 0,075 секунды дуги. В линейных единицах большая полуось эллипса равна 2,7 м, а малая — 2,3 м. Это движение называется вынужденным движением полюса.

Годовая составляющая сохраняет устойчивость и постоянство только в среднем за большой промежуток времени, а от года к году она может изменяться. Это изменение вызывается тем, что сезонные явления, происходящие на Земле, о которых говорилось выше, не строго периодические. Иными словами, так называемый «геофизический год» (промежуток времени между минимумами температур воздуха) не равен тропическому году, а может продолжаться и 11 и 13 месяцев, вследствие чего годовая составляющая и бывает неустойчива.

В результате свободной нутации и вынужденной нутации ось вращения Земли совершает около наименьшей главной оси инерции сложное движение с четырнадцатимесячным, годовым и едва заметным полугодовым периодами, вследствие чего северный полюс и описывает на поверхности Земли сложную кривую, изображенную на вышеприведенных рисунках. Такую же кривую описывает и южный полюс Земли. Незначительное расхождение в кривых, описываемых северным и южным полюсами Земли, может произойти только за счет небольших неполярных изменений широты, т. е. таких изменений, которые зависят не от движения полюса, а от каких-то других причин. Причины возникновения неполярных изменений широты мы пока не знаем. В различных местах Земли, эти изменения широты различны. По всей вероятности, они происходят вследствие различных деформаций земных пород верхних слоев оболочки Земли. Чтобы знать точную кривую

вую, которую описывает на поверхности Земли южный полюс, нужно так же изучить движение южного полюса Земли, как и северного. Для этого нужно построить сеть широтных станций в южном полушарии, как это было сделано в свое время в северном.

Заключение

При современном состоянии науки о движении полюса можно следить за колебаниями широты, вычислять из наблюдений координаты мгновенного полюса относительно его среднего положения и, более того, предвычислять с достаточной для практических нужд точностью эти координаты на некоторое время вперед. Но советские ученые этим не ограничиваются. Как мы уже говорили, кривая, которую описывает полюс вращения на поверхности Земли, в основном зависит от внутреннего строения Земли, от процессов, происходящих внутри Земли, а также от особенностей сезонного хода метеорологических процессов. Поэтому изучение движения полюсов Земли может дать науке важные сведения о внутреннем строении Земли, что представляет глубокий интерес для геофизики.

Предвычисление координат полюса для практических целей на несколько недель вперед делается в настоящее время на Полтавской гравиметрической обсерватории опытным путем на основе предшествующих наблюдений. До сих пор нет теории, на основании которой можно было бы предвычислять координаты полюса на длительный интервал времени вперед, подобно тому, как это делается во многих других областях астрономии. Эта задача очень трудная; можно сказать, что она непосильна одним астрономам. Более 150 лет назад Л. Эйлер решил задачу о движении полюса, принимая Землю за абсолютно твердое тело. Это вполне естественно. Л. Эйлер ничего не знал или очень мало знал о внутреннем строении Земли. Теперь дело обстоит иначе; у нас имеется значительно больше данных для решения этой задачи. Геология, геофизика и сейсмология дали в наше распоряжение много сведений о строении земного шара.

Наши отечественные ученые Л. С. Лейбензон, М. С. Молоденский и Е. П. Федоров провели фундаментальные исследования по этому вопросу. Л. С. Лейбензон значитель-

ную часть своих трудов посвятил приложению теории упругости к вопросам строения Земли. Его гипотеза зависимости плотности Земли от глубины является в настоящее время, повидимому, более приемлемой, чем другие гипотезы. По гипотезе Лейбензона, Земля состоит из плотного жидкого ядра, заключенного в менее плотную упругую оболочку толщиной около 3000 км. Средняя твердость этой оболочки приблизительно вдвое больше твердости стали.

М. С. Молоденский продолжил исследования, начатые Лейбензоном. Используя все современные данные о внутреннем строении Земли, он рассчитал для нескольких моделей Земли те деформации и напряжения, которые возникают в Земле при воздействии на нее сил притяжения Луны и Солнца. Однако на основании всех имеющихся исследований мы все же ничего не можем сказать определенного об ядре Земли: жидкое оно или твердое.

По современным представлениям, граница, которая отделяет верхнюю оболочку Земли от ее ядра, лежит на глубине 2900 км. Объем ядра составляет одну шестую часть объема Земли. В изучении внутреннего строения Земли, особенно за последние годы, имеются большие достижения, которыми мы обязаны сейсмологии. Сейсмология изучает колебания в земной коре, вызываемые самыми разнообразными причинами: землетрясениями, искусственными взрывами, падением на землю крупных метеоритов и др. Под воздействием таких явлений в оболочке Земли возникают упругие колебания, которые передаются на большие расстояния. Скорость распространения этих упругих колебаний или упругих волн зависит от плотности и механических свойств Земли. Изучая скорость распространения таких волн, можно получить сведения о механических свойствах вещества в недрах Земли и об его плотности на различных глубинах.

Но поперечные сейсмические волны не проходят через ядро Земли, а затухают на границе, разделяющей внешнюю оболочку Земли и ее ядро. Поэтому наиболее надежный способ изучения внутреннего строения Земли по скорости распространения сейсмических волн результатов не дает, как только мы переходим к ее ядру. Значит, нужно изыскивать новые пути решения этой задачи.

Одно из новых направлений развития учения о Земле заключается в применении к изучению ее внутреннего строения наук, исследующих вращательное движение Земли и приливные деформации, вызываемые притяжением Луны и Солнца, т. е. астрономии и гравиметрии. Из астрономии для вышеизложенной цели пригодны широтные наблюдения, которые дают возможность изучить изменения направления силы тяжести. Направление силы тяжести в любом месте Земли можно найти при помощи отвеса. Но оно меняется под действием силы притяжения Луны и Солнца. Чтобы изучить, как это направление силы тяжести меняется, нужно измерять широту места наблюдения и по наблюдениям изменений широты судить о приливных колебаниях отвеса.

Гравиметрия дает возможность получить данные о приливных деформациях Земли.

Совместными усилиями геофизиков, астрономов, математиков, метеорологов и геологов можно будет добиться желаемого успеха в решении поставленной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

- С. К. Костинский. Об изменении астрономических широт, СПб., 1893.
- П. К. Штернберг. Широта Московской обсерватории в связи с движением полюсов. М., 1903.
- Дж. Дарвин. Приливы и родственные им явления в солнечной системе, 1923.
- А. Я. Орлов. Движение мгновенного полюса Земли относительно среднего за 46 лет — с 1892 по 1939 г. Бюлл. ГАИИП, 1941, № 8.
- А. Я. Орлов. Движение полюса в 1891.5 до 1940.0. Докл. АН СССР, 1942, 37, № 9.
- А. Я. Орлов. О трехосности Земли. Докл. АН СССР, 1944, т. XVIII, № 8.
- А. Я. Орлов. О среднем годовом движении главных осей инерции Земли. Докл. АН СССР, 1946, № 7.
- Н. Бызова. Влияние сезонного переноса масс воздуха на движение земной оси. Докл. АН СССР, 1947, 58, № 3.
- Е. П. Федоров. Основы современной теории движения земных полюсов. Труды Полтавской гравиметрической обсерватории, т. II. Киев, 1948.
- К. А. Куликов. Движение полюсов Земли и изменимость широт «Успехи астрономических наук», 1950, т. V.

Труды второй всесоюзной широтной конференции. Киев, Изд-во АН СССР, 1950.

Е. П. Федоров. Новая программа для службы широты и ее испытание в Полтаве. Труды Полтавской гравиметрической обсерватории, т. IV. Киев, 1951.

С. В. Романская. Предварительные значения колебаний широты Пулкова за период с 1948.8 по 1950.9 по наблюдениям на пулковском зенит-телескопе. «Известия Главной астрономической обсерватории АН СССР», т. XIX, вып. 1, № 148.

С. В. Романская и В. И. Сахаров. Предварительные значения изменения широты Пулкова с 1950.8 по 1951.8. «Известия Главной астрономической обсерватории АН СССР», т. XIX, вып. 3, № 150.

Труды третьей всесоюзной широтной конференции. Киев, Изд-во АН УССР, 1954.

*Утверждено к печати редколлегией научно-популярной литературы
Академии наук СССР*

Редактор издательства *Т. С. Мешкова*. Технический редактор *Е. В. Макуни*
Корректор *Р. Н. Пагге*

РИСО АН СССР № 48 81В. Сдано в набор 15/X 1955 г. Подп. в печать 17/XII 1955 г.
Формат бум. 84×108¹/₃₂ Печ. л. 2,5=4,1. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 16000 (1-й завод—1000).
Т-10521. Изд. № 1284. Тип. зак. 345. Цена 1 р. 20 к.

Издательство Академии наук СССР. Москва Б-64 Подсосенский пер. д., 21

3-я типография Издательства АН СССР. Москва, Г-34, Савельевский пер., д. 13

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
§ 1. Несколько строк из астрономии	5
§ 2. Несколько строк из геометрии	9
§ 3. Несколько строк из механики	10
§ 4. Форма Земли	15
§ 5. Прецессия и нутация	19
§ 6. Движение полюса по поверхности Земли	22
§ 7. Как определяется широта места	23
§ 8. Изменяемость широт	24
§ 9. Как установили изменяемость широт	28
§ 10. От чего зависят изменения широты	30
§ 11. Цель изучения движения полюсов	32
§ 12. Международная служба широты	33
§ 13. Полтавская программа звездных пар	42
§ 14. Полярные и неполярные изменения широты	44
§ 15. Широтные наблюдения на обсерваториях	54
§ 16. Советская служба широты	58
§ 17. Движение северного полюса Земли за 63,5 года (1891,5— 1955,0 гг.)	63
§ 18. Причины, вызывающие движение полюсов Земли . . .	67
Заключение	77
Литература	79



ИСПРАВЛЕНИЯ И ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
23	10 сн.	$z'_H = z_H + \rho_H$	$z_H = z'_H + \rho_H$
31	1 св.	$B'' = 206264'', 8 \frac{v}{c} \sin \varphi$	$\beta'' = 206264'', 8 \frac{v}{c} \sin \varphi$
38	8 сн.	$\varphi = \frac{1}{2} (\delta_s + \delta_n) +$ $+ \frac{1}{2} (Z_s + Z_n)$	$\varphi = \frac{1}{2} (\delta_s + \delta_n) +$ $+ \frac{1}{2} (z_s + z_n)$

