

ПАРАМЕТРЫ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ

З.М.Малкин

Вращение Земли представляет собой сложное явление, сопровождающееся изменениями угловой скорости вращения Земли вокруг оси вращения и движением самой оси вращения как в теле Земли, так и в пространстве, т.е. в земной (связанной с телом Земли) и небесной (инерциальной) системах координат. Хотя с точки зрения механики вращение Земли может быть полностью описано тремя углами Эйлера, с практической точки зрения оказывается более удобным определять пять углов или параметров вращения Земли (ПВЗ): координаты земного полюса X_p и Y_p (чаще называемые просто координатами полюса), описывающие движение оси вращения в теле Земли, координаты небесного полюса X_s и Y_s (иногда называемые просто углами нутации), описывающие движение оси вращения в небесной системе координат, и всемирное время UT1, описывающее угловую скорость вращения. Рис. 1 иллюстрирует физический смысл трех типов ПВЗ.

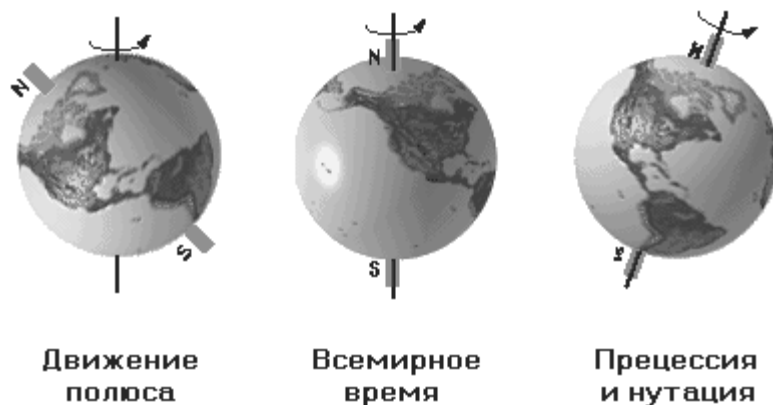


Рис. 1. Параметры вращения Земли.

В совокупности параметры вращения Земли (ПВЗ) определяют связь между земной и небесной системами координат. Первая из них практически реализуется через координаты опорных станций, вторая – через координаты опорных радио- и/или оптических источников. Учет параметров вращения Земли необходим при решении всех астрономических, геодезических и навигационных задач, связанных с наблюдениями искусственных и естественных небесных тел с поверхности Земли. Поэтому определение ПВЗ относится к одной из главных астрометрических задач.

К основным средствам определения ПВЗ относятся:

1. *Классические астрооптические средства*: пассажные инструменты, зенит-телескопы, астролябии, зенитные трубы, циркумзениталы и др. На этих средствах базировались все определения ПВЗ до 1972 г. Этот метод позволяет определять все типы ПВЗ, но их точность (порядка 25 мс дуги для координат полюса и 2 мс для всемирного времени) не удовлетворяет современным требованиям науки и практики. Однако, длительность накопленных рядов ПВЗ, полученных из астрооптических наблюдений, составляющая к настоящему времени более 150 лет для координат полюса и около 400

лет для всемирного времени и длительности суток, делает их уникальным средством изучения долгопериодических и вековых закономерностей во вращении Земли.

2. *Доплеровские наблюдения ИСЗ.* Этот метод активно применялся для определения координат полюса примерно с 1972 г до середины 1980-х годов с использованием ИСЗ навигационной системы TRANSIT (США), позволив в те годы примерно вдвое повысить точность ПВЗ. С 1993 г. начаты определения координат полюса с доплеровской спутниковой системой нового поколения DORIS (Франция). Ввиду сравнительно низкой точности, этот метод не играет заметной роли для задачи определения ПВЗ, хотя имеет важное значение для установления земной системы координат.

3. *Лазерные светодальномерные наблюдения ИСЗ (SLR – Satellite Laser Ranging).* Этот метод используется с 1976 г., однако только к 1983 г. точность наблюдений позволила ему стать одним из основных методов определения ПВЗ. Для этих целей используются в основном наблюдения двух однотипных ИСЗ Lageos (США, запущен в 1976 г.) и Lageos-2 (США-Италия, запущен в 1992 г.). Иногда для определения ПВЗ используются также наблюдения двух российских ИСЗ «Эталон» (запущены в 1989 г.), однако их вклад невелик в силу малочисленности наблюдений этих ИСЗ. Наблюдения методом SLR регулярно производятся на глобальной сети из примерно 40 станций. Метод SLR позволяет независимо определять координаты полюса и длительность суток, а в комбинации с данными РСДБ также всемирное время и нутацию. Точность определения ПВЗ методом SLR составляет 0.2 мс дуги для координат полюса и 20 мкс для длительности суток. Временное разрешение данных SLR составляет одни сутки, а оперативность около двух суток.

4. *Лазерные светодальномерные наблюдения Луны (LLR).* Эти наблюдения ведутся регулярно двумя-тремя станциями с 1970 г. Они позволяют независимо определять всемирное время с точностью 100–150 мкс.

5. *Радиотехнические наблюдения ИСЗ навигационной системы GPS.* Регулярные определения ПВЗ по наблюдениям ИСЗ системы GPS (США) начаты в 1991 г. В настоящее время определение ПВЗ производится по наблюдениям на глобальной сети, состоящей из примерно 50 станций. В последние годы этот метод стал одним из двух основных методов определения ПВЗ (наряду с РСДБ). Метод GPS, также как SLR, позволяет независимо определять координаты полюса и длительность суток, а в комбинации с данными РСДБ также всемирное время и нутацию. Точность определения ПВЗ методом GPS лучше 0.1 мс дуги для координат полюса и 30 мкс для длительности суток. Временное разрешение стандартных данных GPS составляет одни сутки, а оперативность достигает трех часов. Поэтому GPS является в настоящее время основным средством оперативных определений ПВЗ, а также используется повышения временного разрешения рядов ПВЗ, полученных методом РСДБ.

6. *Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ).* Этот метод является наиболее универсальным из современных методов и единственным, который позволяет независимо и с высокой точностью определять все типы ПВЗ из наблюдений внегалактических радиоисточников на глобальной сети станций, число которых для разных сессий колеблется от 5 до 20. Метод РСДБ определяет фундаментальную систематическую основу для определения координат полюса и, особенно, всемирного времени и движения небесного полюса, поскольку способен одновременно с ПВЗ определять земную и небесную системы координат. Точность определения ПВЗ методом РСДБ составляет около 0.15 мс дуги для координат полюса, 5 мкс для всемирного времени и 0.1 мс дуги для нутации. Именно благодаря фундаментальному значению РСДБ этот метод развивается во всем мире, несмотря на то, что он является наиболее дорогим из современных методов.

Разрабатываются или находятся в стадии экспериментальных наблюдений и другие методы определения ПВЗ, такие как оптический интерферометр (аналог РСДБ, работающий в оптическом диапазоне), лазерный гироскоп, позволяющий, в принципе, непосредственно измерять скорость вращения Земли и др. Однако практических результатов эти методы пока не дали.

Наблюдения обрабатываются в центрах анализа данных, которые вычисляют ряды ПВЗ, полученные по наблюдениям тем или иным методом. Такие «индивидуальные» ряды ПВЗ затем поступают в центры сводной обработки, где в результате получают комбинированные ряды. При объединении индивидуальных рядов ПВЗ в сводный ряд производится анализ их систематических ошибок, приведение их в единую систему и приведение на равномерную временную сетку, в результате чего получается стандартный ряд, содержащий значения координат полюса, всемирного времени, длительности суток и нутации на 0^h каждых суток.

Основным мировым центром сводной обработки является Международная служба вращения Земли и опорных систем координат (IERS – International Earth Rotation and Reference Systems Service). IERS вычисляет сводные ряды ПВЗ, используемые во всем мире для научных и прикладных целей. Точность рядов IERS составляет порядка 0.1 мс дуги для координат полюса и нутации и 5 мкс для всемирного времени и длительности суток. Вклад различных средств измерений в сводные ряды ПВЗ IERS приведен на рис. 2.

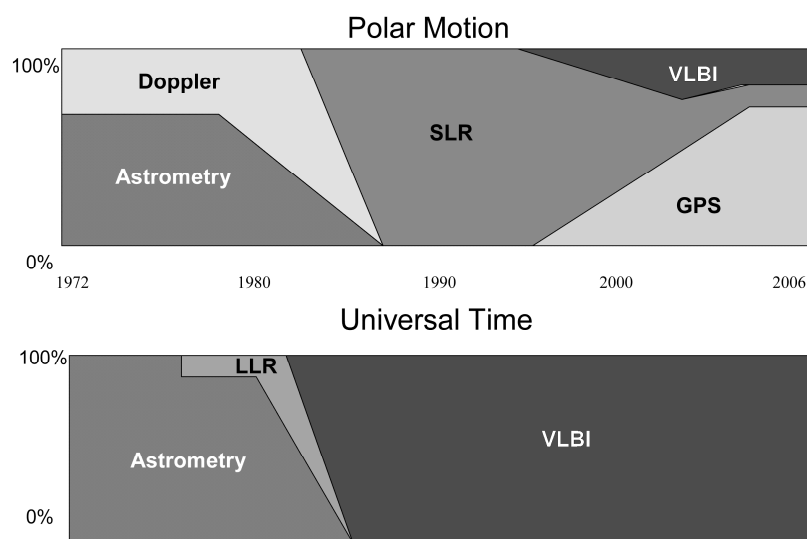


Рис. 2. Вклад методов определения ПВЗ в сводный ряд IERS.

Рассмотрим различные составляющие вращения Земли более подробно. Движение полюса представляет собой изменение углов X_p и Y_p , т.е. изменение положения оси вращения в теле Земли. Координаты полюса определяются в прямоугольной системе координат, ось X которой направлена вдоль Гринвичского меридиана ($\lambda=0^\circ$) на определенную эпоху, а ось Y – вдоль меридиана с западной долготой 90° . На рис. 3 показано движение полюса за период регулярных наблюдений. Можно видеть, что движение полюса подвержено вековым, (квази)периодическим и нерегулярным изменениям. Основными составляющими движения полюса являются вековое движение (смещение среднего полюса), годовая и чандлеровская составляющая с периодом около 1.19 года.

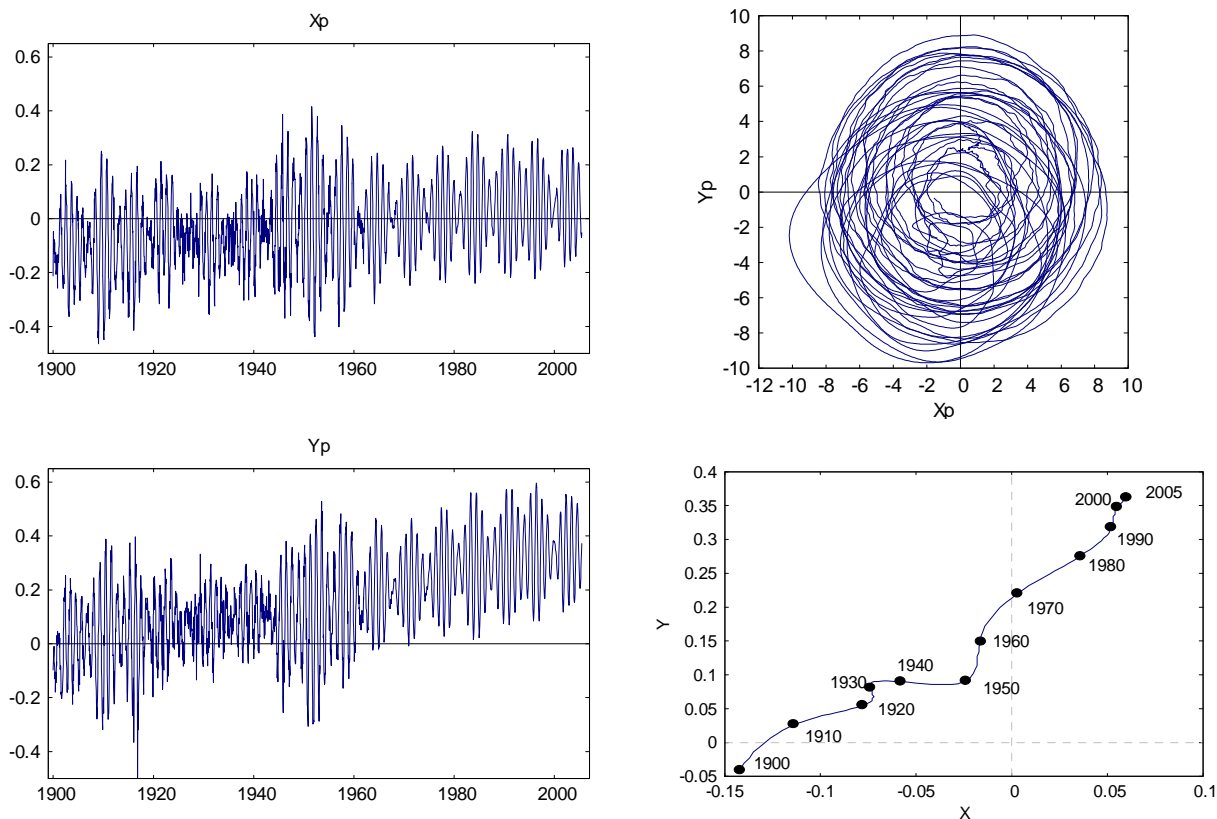


Рис. 3. Слева изменение координат полюса, секунды дуги, справа полюдия движения полюса по поверхности Земли, метры, и движение среднего полюса, секунды дуги.

Всемирное время UT1 описывает угловую скорость вращения Земли вокруг оси. Оно определяется углом между нулевым (Гринвичским) меридианом и определенной точкой на небесной сфере, задаваемой астрономическими методами. Фактически в качестве параметра вращения Земли используется разность между всемирным и атомным временем UT1–TAI или разность между всемирным и координированным временем UT1–UTC. Наряду с всемирным временем для описания угловой скорости вращения Земли используется также длительность суток LOD, вернее отличие реальной длительности суток от номинальной, равной 86400 с, которое равно производной от UT1–UTC, взятой с обратным знаком. На рис. 4 показано изменение всемирного времени и длительности суток (разность с номинальным значением 86400 с), где также наблюдаются вековые и (квази)периодические, в частности, сезонные вариации.

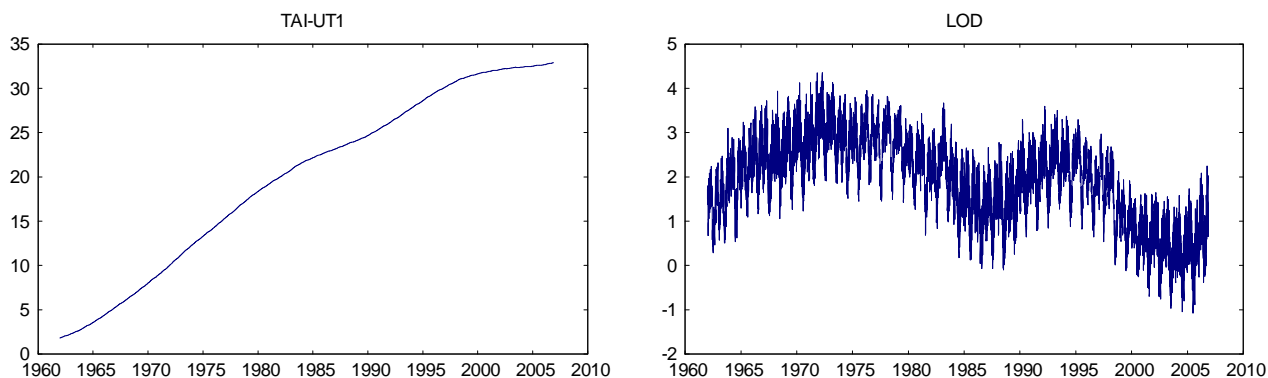


Рис. 4. Слева изменение всемирного времени, с, справа – длительность суток, мс

Движение небесного полюса описывается углами X_c и Y_c в небесной системе координат, определяемой астрономическими теориями и наблюдениями. К этой же системе координат отнесено и всемирное время. Движение небесного полюса определяется прецессией и нутацией (как свободной, так и вынужденной) оси вращения и описывается современной теорией прецессии-нутации с высокой точностью (лучше 0.5 мс дуги). Из наблюдений обычно выводят разности между наблюдаемыми и теоретическими значениями, основной вклад в которые вносит пока плохо прогнозируемая свободная нутация земного ядра. Изменения координат небесного полюса показаны на рис. 5. Основной период изменений координат небесного полюса на указанном промежутке времени – период обращения лунных узлов 18.6 года. Однако, на самом деле основная составляющая в движении небесного полюса, конечно, прецессия, которая вызывает его обращение с периодом около 26 тыс. лет и амплитудой около 23.5° .

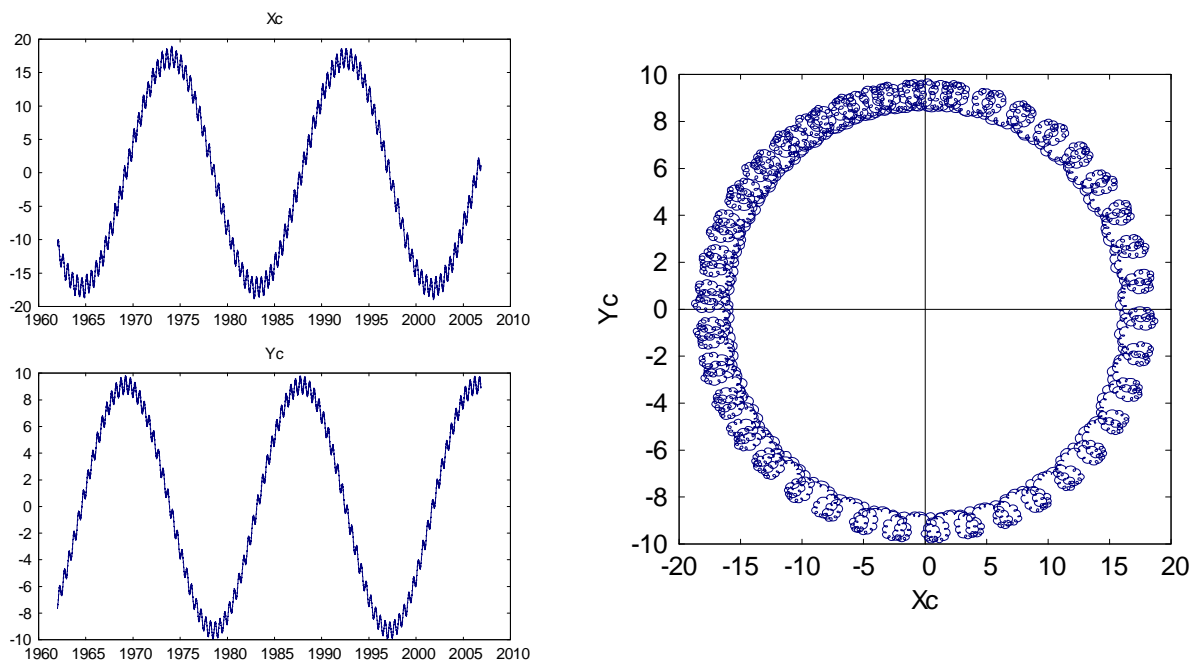


Рис. 5. Слева изменение координат небесного полюса, справа полюдия движения полюса, секунды дуги.

Основные, особенно нерегулярные, изменения ПВЗ непосредственно связаны с различными процессами, происходящими на поверхности Земли, в ее недрах, в атмосфере и океане. Главными геофизическими факторами, влияющими на вращение Земли являются перенос воздушных масс в атмосфере Земли: перенос водных масс в океане, включая приливные явления, динамическое взаимодействие между атмосферой, океаном и твердой Землей, а также динамические явления в недрах Земли: такие как перенос вещества в ядре и мантии и динамическое взаимодействие внутренних оболочек Земли. Оказывают влияние на вращение Земли также приливы в теле Земли, океане и атмосфере, а также многие другие факторы (рис. 6).

Как это обычно бывает в естественных науках, чем точнее производится наблюдения, тем больше особенностей природного явления мы открываем. Как следствие новые наблюдательные данные приводят к уточнению и качественному развитию теории, которая вследствие этого может предсказать еще более тонкие эффекты, которые могут быть подтверждены или опровергнуты только еще более точными наблюдениями.

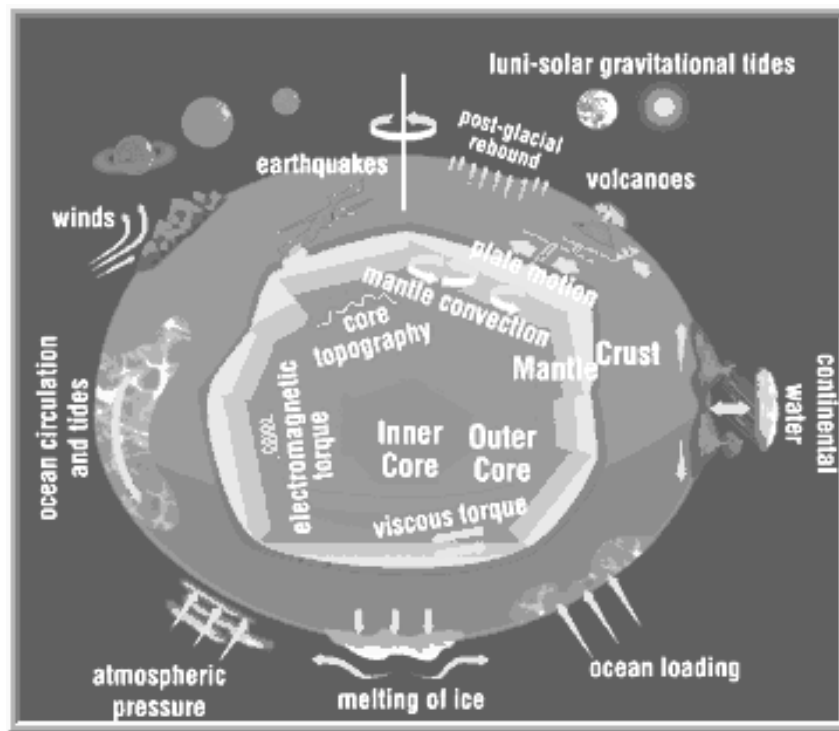


Рис. 6. Факторы, влияющие на вращение Земли.

Таким образом, учитывая тесную взаимосвязь между изменениями ПВЗ и геофизическими процессами, изучение временных рядов параметров вращения Земли является мощным, а иногда и единственным, средством исследования строения и эволюции Земли, включая ее недра океан и атмосферу. При этом к точности определения ПВЗ, а также к их временному разрешению предъявляются более высокие требования, чем для большинства прикладных задач. В настоящее время на регулярной основе производится определение координат полюса и длительности суток методами РСДБ и GPS с дискретностью 1-2 часа, что позволяет эффективно изучать высокочастотные вариации, в первую очередь приливные, во вращении Земли. Ведутся также экспериментальные определения ПВЗ с временным разрешением несколько минут.

С другой стороны, развивается теория учета различных геофизических факторов при астрономических наблюдениях. В частности, в рамках IERS несколько лет назад создан специальный центр по глобальным геофизическим явлениям (GGFC – IERS Global Geophysical Fluids Center), в задачи которого входит моделирование составляющих вращения Земли, обусловленных процессами, происходящими на поверхности Земли в ее недрах, атмосфере и океане. Соответствующие расчеты, производимые на основании обработки глобальных метеорологических полей, наблюдений за переносом океанических масс, гидрологических и сейсмических наблюдений, позволяют уже сейчас в значительной степени объяснить многие наблюдаемые закономерности во вращении Земли, такие как сезонное движение полюса, сезонные и декадные изменения скорости вращения Земли и др. Однако многие данные наблюдений еще ждут адекватной интерпретации. Все это определяет непреходящую актуальность развития методов и средств определения ПВЗ также, как развития теоретических представлений о вращении Земли.