

УДК 006.92:521.9

**НЕКОТОРЫЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГМЦ ГСВЧ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ  
ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ  
С.Л. Пасынок**

ФГУП «ВНИИФТРИ»

**Введение**

Параметры вращения Земли (ПВЗ) описывают ориентацию земной поверхности в целом относительно инерциального пространства, которое в настоящее время привязано к положению внегалактических радиоисточников (квазаров). Они необходимы при решении любых задач, связанных с движением тел в околоземном пространстве, поскольку уравнения движения аппаратов и их управления сформулированы и решаются в инерциальном пространстве<sup>1</sup>, в то время как наблюдения за движением аппаратов ведутся с поверхности Земли. Таким образом, без информации о вращении Земли относительно инерциального пространства невозможно правильно интерпретировать и обрабатывать наблюдения и осуществлять эффективное управление аппаратами.

С точки зрения метрологической теории шкал измерений, ПВЗ представляют собою «шкалу измерений совокупности пяти угловых параметров, характеризующих взаимную ориентацию земной и небесной систем координат. Два угла определяют нутационное движение оси вращения Земли, два угла определяют положение мгновенного полюса (оси вращения в теле Земли), пятый параметр – всемирное время, которому соответствует угол поворота Земли вокруг своей оси в данный момент времени» (ГОСТ Р 8.739-2011).

К числу областей производственной деятельности, нуждающихся в информации о вращении Земли, относятся наземная и космическая геодезия, аэрокосмические съемки, картографирование; космическая, воздушная, наземная и морская навигация; метрология; мониторинг природных ресурсов; экология, прогноз землетрясений и техногенных катастроф; мониторинг крупных объектов (плотин, газопроводов и т.д.) и обеспечение безопасности их эксплуатации и т.д. Фундаментальные научные исследова-

---

<sup>1</sup> Возможно решать уравнения движения аппаратов и в неинерциальной системе отсчета, однако в этом случае параметры вращения Земли войдут тогда в выражения для сил, действующих на аппарат, и без их высокоточного определения уравнения точно не решить. Кроме того, такой метод решения приводит к очень громоздким выкладкам, что увеличивает вероятность ошибок и уменьшает надежность.

ния, использующие параметры вращения Земли, - это определение координат небесных объектов; геодинамика; изучение внутреннего строения Земли, геофизических явлений и их влияния на процессы, происходящие на поверхности Земли и в окружающем пространстве; динамика атмосферы, суши, океанов и ледников; исследования физических полей Земли. Особые требования к информации о ПВЗ, в особенности – к оперативности и надежности обеспечения данными, предъявляются со стороны ГЛОНАСС и современных средств оборонной техники.

Хотя для описания ориентации осей средней Тиссерановой системы для мантии (обобщения системы главных осей инерции на случай реальной, а не абсолютно твердой Земли) достаточно трех углов Эйлера, параметров вращения Земли существует гораздо больше: это углы прецессии, углы нутации, координаты полюса и Всемирное время [1]. Прецессия и нутация имеют наибольшую амплитуду. Однако они достаточно хорошо вычисляются по теоретическим формулам, поскольку определяются, в основном, гравитационным притяжением Солнца, Луны и планет. Только в последнее время возникла практическая необходимость в определении поправок к модельным значениям углов прецессии/нутации из измерений в режиме службы. Координаты полюса и, частично, Всемирное время обусловлены изменением углового момента атмосферы и океанов, а также другими геофизическими эффектами. Их предсказание сродни прогнозу погоды и носит вероятностный характер. Поэтому для обеспечения высоких требований науки и техники к точности знания ориентации Земли в пространстве необходима служба определения параметров вращения Земли, которая бы непрерывно определяла из измерений параметры вращения Земли и сообщала их потребителям с заданной точностью и оперативностью. Такая служба нужна и с метрологической точки зрения – для обеспечения единства измерений в области координатно-временных определений, использующих информацию о точных значениях параметров вращения Земли.

В Международном масштабе задача по определению и распространению опорных высокоточных значений ПВЗ возложена на Международную службу вращения Земли и опорных систем отсчета (МСВЗ – рус., IERS – англ.). Она собирает данные всех геодезических измерений (измерений с помощью навигационных приемников (ГНСС), измерений с помощью спутниковых лазерных дальномеров (СЛД), измерений с помощью радиointерферометров со сверхдлинными базами (РСДБ – рус., VLBI – англ.)), проводит их совместную обработку и определяет опорные оперативные и срочные значения ПВЗ, публикуемые в бюллетенях серии «А» Военно-морской обсерватории США (ВМО США – рус., USNO – англ.),

а также окончательные опорные значения серии ЕОРС04, формируемой в центральном бюро МСВЗ (IERS). В работе МСВЗ участвуют средства измерений большинства стран мира (в том числе средства Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли России).

На территориях развитых стран существуют свои национальные службы, которые при определении параметров вращения Земли опираются на национальные средства измерений, а также привлекают в той или иной степени данные зарубежных средств измерений. Они ведут свои независимые шкалы параметров вращения Земли, точностные характеристики и положение которых относительно международной шкалы параметров вращения Земли устанавливаются по сравнению их с международными опорными окончательными данными МСВЗ (серией ЕОРС04). Точностные характеристики этих систем не могут быть выше, чем характеристики ПВЗ МСВЗ, поскольку точность определения ПВЗ при прочих равных условиях зависит от степени охвата средствами измерений земной поверхности. Однако в случае нарушения средств передачи международных данных о параметрах вращения Земли такие системы могут функционировать независимо и обеспечивать своих потребителей данными о ПВЗ. Помимо этого, они осуществляют непрерывный контроль точности международных данных о ПВЗ и могут защитить своих потребителей в случае возникновения ошибок или намеренных искажений в них. То есть, они обеспечивают координатно-временную безопасность своих стран и единство измерений на их территории.

В России роль национальной службы определения параметров вращения Земли выполняет Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ). Это межведомственная организация, объединяющая усилия предприятий различных министерств и ведомств, направленные на определение параметров вращения Земли и обеспечение единства измерений в этой части. Руководство этой деятельностью, согласно Постановлениям Правительства РФ № 225 и № 323, осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (РОССТАНДАРТ). Результаты геодезических измерений с пунктов РОСКОСМОСА, РАН, РОССТАНДАРТА и других ведомств стекаются в центры обработки и анализа данных (ЦОАД), роль которых играют ИАЦ ГЛОНАСС и ЦУП ЦНИИМАШ, ИПА РАН, ИНАСАН, ГМЦ ГСВЧ, в которых проводится обработка измерений и определяются значения параметров вращения Земли по каждому из видов измерений (РСДБ, ГНСС, СЛД). Все полученные результаты стекаются в Главный метрологический центр ГМЦ ГСВЧ, на который, согласно Постановлениям Правительства РФ

№ 225 и № 323, возложена обязанность по формированию и выдаче (опорных) данных о параметрах вращения Земли (ПВЗ).

Настоящая статья посвящена некоторым метрологическим аспектам деятельности Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) по осуществлению своих функций в части определения параметров вращения Земли.

## **1. Метрологические проблемы, возникающие при определении ПВЗ**

### **1.1 Основная задача ГМЦ ГСВЧ в части ПВЗ**

Основной задачей Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) в части задачи определения ПВЗ является определение справочных значений ПВЗ, обязательных к применению на территории РФ, в режиме службы и распространение их заинтересованным потребителям по каналам связи. С метрологической точки зрения справочные значения ПВЗ играют двоякую роль. С одной стороны, они обеспечивают единство измерений в области координатно-временных определений в части использования единых значений ПВЗ, а с другой стороны, играют роль принятых опорных значений.

Согласно Международному словарю основных и общих терминов в метрологии (International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms VIM) , опорное значение величины (reference quantity value) – это значение величины, используемое как основа для сравнения со значением величины того же рода.

Опорным значением величины может быть истинное значение измеряемой величины (статья 2.11), в таком случае оно неизвестно, или приписанное (стандартизованное) значение величины (статья 2.12), в таком случае оно известно.

Опорное значение величины со связанной с ним неопределенностью измерения обычно сопровождается ссылкой на:

- материал, например, стандартный образец;
- прибор, например, стабилизированный лазер;
- исходную процедуру измерений (статья 2.7);
- сличение эталонов.

(Статья 5.18).

**К о м м е н т а р и й** (РМГ91-2009). По смыслу обобщенное понятие «приписанное (стандартизованное) значение величины» (статья 2.12) охватывает понятие «действительное значение величины» — значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Причиной, по которой построение опорных значений ПВЗ представляет собою фундаментальную практическую и теоретическую метрологическую проблему, является то, что не существует эталона ПВЗ, поскольку такой гипотетический эталон потребовал бы несколько экземпляров Земли, изготовленных одинаковым образом и помещенных в одинаковые условия, что совершенно невозможно. Однако возможно разработать и использовать для определения опорных значений ПВЗ первичную референтную методику.

Первичная референтная методика измерений (англ. primary reference measurement procedure, primary reference procedure, фр. procedure de mesure primaire, f; procedure opératoire primaire, m) – референтная методика измерений, которая используется для получения результата измерения без сравнения с эталоном единицы величины того же рода (VIM, статья 2.8).

### 1.2 Измерения и их точность

В настоящее время опорные значения ПВЗ определяются в ГМЦ ГСВЧ на основе совместной обработки следующих видов измерений:

- измерений на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ);
- измерений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС);
- измерений с помощью спутниковых лазерных дальномеров (СЛД).

Кроме того, для уточнения систематического поведения ПВЗ используются данные системы DORIS и лазерной локации луны (ЛЛЛ).

Ни один из этих методов напрямую не измеряет ПВЗ.

РСДБ измеряет интервалы времени (*групповые задержки*) между моментами приема сигналов от внегалактического радиоисточника (квазара) радиотелескопами, разнесенными на большие расстояния, сравнимые с радиусом Земли.

Результатом ГНСС измерений является *псевдодальность* – выраженный в единицах расстояния интервал времени между моментом приема сигнала ГНСС приемником по часам приемника и моментом излучения этого же сигнала со спутника по часам спутника.

Результатом лазерных дальномерных измерений является *наклонная дальность* – выраженный в единицах расстояния интервал времени между моментом излучения импульса со станции спутниковой лазерной дальнометрии (СЛД) и моментом приема его отражения от спутника, оснащенного уголковыми отражателями, причем оба этих момента измеряются по одним и тем же часам станции СЛД.

Чисто инструментальная погрешность измерения этих величин очень мала – она находится на уровне миллиметров, даже долей миллиметра, и если бы не было среды, в которой распространяются сигналы, то погреш-

ность ПВЗ, определяемых из таких измерений, была бы близкой к нескольким угловым микросекундам. К сожалению, среда распространения и непредсказуемая часть вариаций различных геодинимических факторов приводят к тому, что значение погрешности ПВЗ, получаемое в результате обработки таких данных, в 5-10 раз выше. Поскольку эти определения производятся на границе имеющихся научно-технических возможностей, то результаты определений ПВЗ, получаемые в различных центрах обработки и анализа данных, несколько различаются между собой.

Из-за чрезвычайной сложности задачи различные Центры обработки и анализа данных (ЦОАД) поддерживают различные модели описания процесса распространения излучения в пространстве (не противоречащие при всем при этом стандартам МСВЗ – IERS Conventions), которые достаточно обоснованны, что в свою очередь, приводит к использованию различных пакетов программного обеспечения. Например, в настоящее время Международная РСДБ служба для целей геодезии и астрометрии (IVS) рекомендует применять для обработки около восьми различных пакетов обработки и анализа данных РСДБ. Кроме того, различные центры используют свои реализации ITRF и различные массивы наблюдательных данных, что обусловлено либо ограничениями на доступ к данным, либо целями, для которых производится вычисление.

Но даже если бы все ЦОАД обрабатывали бы одни и те же массивы данных измерений и применяли бы один и тот же пакет обработки данных и реализации ITRF, всё равно они бы получали несколько различающиеся результаты. Дело в том, что на результат определения ПВЗ влияет и то, как отбраковывались грубые наблюдения, какие из наблюдений можно считать грубыми, а какие нет.

С метрологической точки зрения, отдельные ЦОАД аналогичны лабораториям, выполняющим однотипные измерения с примерно равной точностью. Общепризнанной международной и отечественной практикой при анализе деятельности таких лабораторий является организация международных межлабораторных сличений между отдельными лабораториями. В данном случае это позволит провести анализ расхождений между результатами измерений отдельных лабораторий и выявить их систематические и случайные составляющие. В конечном итоге это ведет к международному признанию результатов определений углов нутации, повышению точности измерений и совершенствованию отдельных лабораторий. При этом функции пилот-лаборатории возлагаются на уполномоченные на эту деятельность метрологические организации.

В международном масштабе роль такой пилот-лаборатории играют Центр определения ПВЗ Военно-морской обсерватория США (USNO) в

части оперативных данных о ПВЗ и прогнозирования и Центр службы определения ПВЗ МСВЗ (IERS EOP PC) в части окончательных данных. В России роль такой пилот-лаборатории Постановлением Правительства РФ № 225 возложена на ГМЦ ГСВЧ.

### 1.3 Оперативное определение опорных значений ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ

В настоящее время вычисление опорных оперативных значений ПВЗ ГМЦ ГСВЧ осуществляется в соответствии с первичной референтной методикой, разработанной и внедренной М.Б. Кауфманом в 2006 году для обеспечения ежесуточного формирования опорных значений ПВЗ ГСВЧ [4]. Эта методика была разработана с учетом всё возрастающих требований к точности и оперативности выдачи текущих и прогнозируемых значений ПВЗ, возникающих сегодня, в первую очередь в связи с задачей эфемеридно-временного обеспечения модернизируемой системы ГЛОНАСС. Помимо существенного повышения оперативности выдачи данных, эта методика обеспечила более высокую точность ПВЗ (за счет возможности привлечения большего объема измерений), а также лучшую прогнозируемость (благодаря возможности использования самых последних измерений).

Результирующие значения ПВЗ в 2013 г. образовывались путем комбинирования 8 независимых рядов, формируемых в ЦОАД Росстандарта (ГМЦ ГСВЧ), РАН (ИПА РАН) и Роскосмоса (СВОЭВП, ЦУП ЦНИИМАШ и ИАЦ ЦНИИМАШ). Список используемых рядов и технических средств приведен в табл. 1.

Таблица 1

Источники данных определений ПВЗ в 2013 г.

	Центр вычислений	Технич. средства определений ПВЗ	Определяемые параметры
1	ГМЦ ГСВЧ	ГНСС	$X, Y, UT1$
2	ГМЦ ГСВЧ	РСДБ	$X, Y, UT1, d\psi, d\varepsilon$
3	ИПА РАН	Лаз. локация ИСЗ	$X, Y, UT1$
4	ИПА РАН	ГНСС	$X, Y, UT1$
5	ИПА РАН	РСДБ	$X, Y, UT1, d\psi, d\varepsilon$
6	СВОЭВП	ГНСС	$X, Y, UT1$
7	ЦУП ЦНИИМАШ	Лаз. локация ИСЗ	$X, Y$
8	ИАЦ ЦНИИМАШ	ГНСС	$X, Y$

Как показывает анализ и многолетний опыт, среди указанных рядов наиболее устойчивыми в систематическом отношении являются ряды РСДБ и GPS, и именно среднее из их сглаженных значений, вычисляемых в ГМЦ ГСВЧ, принято в качестве российской опорной системы ПВЗ. Для остальных рядов вычисляются систематические поправки путем экспоненциального сглаживания отклонений ПВЗ от опорных значений. После учета этих поправок образуются средние из значений ПВЗ каждого ряда с весами, принятыми на основании оценки точности за предшествующий календарный год.

Согласно принятой методике, предусмотрены следующие основные этапы совместной обработки:

- исключение систематических погрешностей индивидуальных рядов ПВЗ;
- образование средневзвешенных значений ПВЗ;
- прогнозирование;
- анализ результатов и оценка точности;
- формирование бюллетеней с выходными данными.

Вычисления ПВЗ на всех этапах производятся по отдельности для каждого из параметров – всемирного времени и координат полюса. Полученные значения ПВЗ относятся к 0 час UT каждых суток.

Вычисления по принятой методике ведутся тремя циклами:

- ежедневно определяются оперативные значения ПВЗ на истекшие сутки и прогноз на следующие 30 суток;
- еженедельно (каждый четверг) перерабатываются накопленные измерения за истекшую календарную неделю, уточняются систематические погрешности используемых независимых рядов и вычисляются срочные значения ПВЗ;
- спустя 5 недель после завершения очередного календарного месяца перерабатываются все накопленные за этот месяц измерения и вычисляются окончательные значения ПВЗ.

Такой режим вычислений позволяет быстро, хотя и с ограниченной точностью, получать текущие значения и прогноз ПВЗ, а затем уточнять их по мере поступления новых данных измерений. Так, при вычислении оперативных и срочных значений ПВЗ используется ограниченный набор наблюдений, доступных на момент обработки.

Вычисления ПВЗ на всех этапах производятся по отдельности для каждого из параметров – всемирного времени и координат полюса. Они проводятся утром каждые сутки с таким расчетом, чтобы отправить информацию о ПВЗ по автоматизированному каналу связи в АЦУС «Цель» до 10 часов утра по московскому времени. Полученные опорные значения



ПВЗ относятся к 0 часам UT каждых суток.

В результате вычислений по этой методике формируются следующие виды информации об оперативных официальных значениях ПВЗ:

– бюллетени Q формируются ежесуточно и содержат *оперативные* значения ПВЗ на истекшие сутки и прогноз на следующие 30 суток;

– первая часть бюллетеня А формируется еженедельно (каждый четверг) и содержит срочные значения ПВЗ за истекшую неделю ГСВЧ и прогноз на следующие 7 недель с недельным шагом. При этом перерабатываются накопленные измерения за истекшую календарную неделю и уточняются систематические погрешности используемых независимых рядов;

– информационное сообщение DT по мере необходимости.

На всех этапах вычислений производится оценка точности ПВЗ. Ежесуточно одновременно с определением ПВЗ оценивается их точность и результаты выводятся в специальных рабочих бюллетенях R. Они содержат результаты оценки точности по внутренней сходимости.

Каждое утро, в том числе в праздничные и выходные дни, оператор (до отправки данных о ПВЗ потребителям) осуществляет графический просмотр результатов определения ПВЗ, который в случае необходимости может быть уточнен с помощью данных бюллетеня R. Вычисленные по внутренней сходимости средние за год значения СКО приведены в табл. 2.

Таблица 2

Точность определений ПВЗ в 2013 г. по внутренней сходимости

	$U=UT1-UTC$	X	Y
Ср. кв. отклонения	0,009 мс	0.000086 "	0.000078 "

Апостериорная оценка точности осуществляется по сравнению с *окончательными* опорными данные о ПВЗ ГСВЧ, которые публикуются ежемесячно во второй части бюллетени А, а также с опорными *окончательными* данными Международной службы вращения Земли и опорных систем отсчета (МСВЗ, IERS). Следует отметить, что точность *окончательных* данных ГСВЧ достаточно высока (см. табл. 3).

Таблица 3

Точность окончательных опорных значений ПВЗ ГСВЧ в 2013 г.

	$U=UT1-UTC$	X	Y
Ср.кв. отклонения	0,017 мс	0,00014 "	0,00011 "
Среднее отклонение	-0,004 мс	-0,00001 "	+0.00001 "

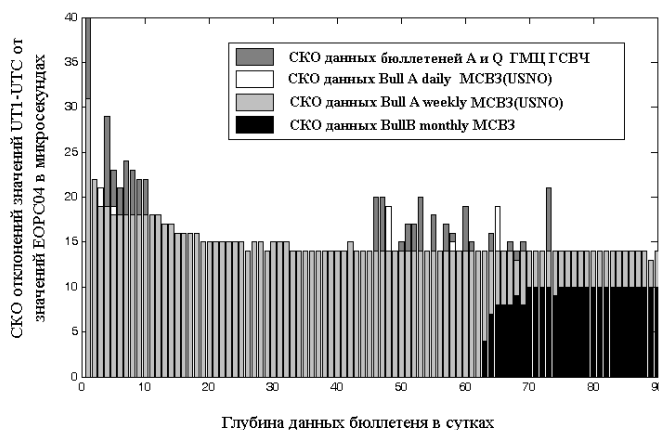
Точностные характеристики оперативной информации о ПВЗ ГСВЧ (данных бюллетеней Q и A) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Точность оперативных определений ПВЗ ГСВЧ в 2013 г.

Оперативные данные	Точностная характеристика	Источник опорных значений	$UT1-UTC$ ( $10^{-3}$ с)	X ( $10^{-3}$ "	Y ( $10^{-3}$ "
Бюллетень Q	СКО	МСВЗ	0,04	0,3	0,3
		ГСВЧ	0,04	0,3	0,3
	Среднее отклонение	МСВЗ	-0,02	+0,1	+0,1
		ГСВЧ	-0,01	+0,01	-0,03
Первая часть бюллетеня А	СКО	МСВЗ	0,03	0,2	0,2
		ГСВЧ	0,03	0,2	0,2
	Среднее отклонение	МСВЗ	-0,02	+0,1	+0,1
		ГСВЧ	-0,01	+0,01	-0,01

Окончательные опорные данные МСВЗ (IERS) формируются спустя примерно месяц после момента измерений, а затем уточняются на протяжении года. Поэтому полезно сравнить с ними не только данные оперативных бюллетеней ГСВЧ, но и данные различных оперативных бюллетеней МСВЗ(IERS). На рисунке изображены среднеквадратические отклонения (СКО) от опорных окончательных данных МСВЗ различных оперативных данных ГСВЧ (бюллетеней Q и A), выделенных темно-серым фоном, и МСВЗ (ежесуточного (белый фон) и ежемесячного (светло-серый фон) бюллетеней А Военно-морской обсерватории США (USNO), а также бюллетеня В (черный фон)). Глубина данных показывает насколько опубликованные в бюллетене данные отстают от момента публикации бюллетеня.



Сравнение СКО значений  $UT1-UTC$  МСВЗ и ГСВЧ

Распространение данных о ПВЗ ГСВЧ осуществляется в соответствии с положениями и протоколами информационного взаимодействия:

- ежесуточно до 10 часов утра по московскому времени отправляются по автоматизированному каналу связи между ГМЦ ГСВЧ и АЦУС «Цель»;
- выкладываются на сервер ГМЦ ГСВЧ (ftp.vniiftri.ru);
- в случае нарушений в работе каналов связи рассылаются по факсу или сообщаются по телефону;
- выпускаются в виде печатных бюллетеней серий А и Е и рассылаются по почте.

### **Заключение**

При осуществлении Главным метрологическим центром Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) своих функций в части определения параметров вращения Земли приходится сталкиваться с рядом метрологических проблем и решать задачи по их преодолению. Сравнение результатов деятельности ГМЦ ГСВЧ с аналогичными данными международных служб свидетельствует о высоком научно-техническом уровне работ, проводимых в ГМЦ ГСВЧ в части определения ПВЗ.

### **Литература**

1. IERS Technical Note; No. 36, IERS Conventions 2010, G. Petit and B. Luzum (eds.), Verlag des Bundesamts fur Kartographie und Geodasie, Frankfurt am Main, 2010, 43-72.
2. Брянский Л.Н., Дойников А.С., Крупин Б.Н. Метрология. Шкалы, эталоны, практика. М.: ФГУП «ВНИИФТРИ».- 2004.- С. 132.
3. Bernese GPS Software. Version 5.0. // Univ. of Bern, 2006.
4. Кауфман М. Б. Точные методы измерения параметров вращения Земли в интересах навигационно-временных определений. Точные измерения для высоких технологий. Менделеево: В кн. ФГУП «ВНИИФТРИ».- 2008.- С. 80-118.