

Определение ПВЗ

УДК 521.3, 521.92

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ****С.Л. Пасынок***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская область
pasynok@vniiftri.ru*

В России обязанность по определению параметров вращения Земли, согласно Постановлениям Правительства РФ № 225 и № 323, возложена на Государственную службу времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ). В статье рассматриваются основные задачи, возникающие при определении вращения Земли, дано краткое описание того, как вращается Земля и какие ПВЗ используются в настоящее время, рассмотрены средства измерений, используемые при определении ПВЗ, а также дан обзор отечественной и зарубежной служб определения ПВЗ.

The Russia Governmental Service of time, frequency and Earth's orientation parameters determination is responsible on Earth's orientation parameters determination in Russia according governmental decrees № 225 and № 323. The main tasks of Earth's orientation service are considered. The brief description of the Earth's rotation, Earth's orientation parameters (EOP) and geodetic technics for EOP determination presented. The brief review of national and international EOP services presented too.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, движение полюса, прецессия, нутация, метрология, комбинирование, ГЛОНАСС

Введение

Настоящая статья посвящена методам и средствам определения ПВЗ и обладает следующей структурой.

В первом разделе рассмотрены основные задачи, возникающие при определении вращения Земли (ПВЗ), дано краткое описание того, как вращается Земля и какие ПВЗ используются в настоящее время.

Во втором разделе рассмотрены средства измерений, результаты которых используются при определении ПВЗ.

В третьем разделе рассмотрена Международная служба определения ПВЗ и опорных систем (МСВЗ – рус., IERS – англ.). В дальнейшем материале для краткости принято следующее сокращённое обозначение: вместо аббревиатур в полной форме (МСВЗ – рус., IERS – англ.) будем использовать следующую краткую форму (МСВЗ, IERS), полагая по соглашению, что первая аббревиатура относится к наименованию на русском языке, а вторая – к наименованию на английском языке.

В четвёртом разделе рассмотрена отечественная служба определения ПВЗ. И наконец, в пятом разделе кратко очерчены основные направления развития средств определения ПВЗ.

1. Вращение Земли и параметры вращения Земли

1.1. Основные задачи, возникающие при изучении вращения Земли

Определение вращения Земли – это область человеческой деятельности, включающая в себя научную, техническую и хозяйственную составляющие, направленные на реализацию трех основных задач:

– установление и поддержание земной координатной основы (ЗКО,* TRF) и обеспечение возможности потребителю определять свои координаты в этой системе;

– установление и поддержание небесной координатной основы (НКО, CRF) и обеспечение возможности потребителю определять координаты интересующих его объектов в этой системе;

– регулярное определение связи между земной и небесной системами координат и обеспечение возможности потребителю определять эту связь на любой заданный момент времени.

Первая задача решается с помощью создания сети специальных инженерно-технических сооружений (сети опорных геодезических пунктов), на которых ведутся непрерывные измерения с помощью средств измерений, одного или нескольких из следующих видов:

– радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ, VLBI);

– приёмниками сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС, GNSS);

– лазерными спутниковыми и лунными дальномерами (СЛД, SLR),

а также непрерывно функционируют передающие антенны французской доплеровской системы спутниковой орбитографии DORIS. Земная координатная основа помимо непрерывно функционирующей сети опорных пунктов включает в себя также каталог координат опорных пунктов в земной системе координат (ЗСК, TCS), которая строится в соответствии с определёнными требованиями. Международная сеть таких опорных геодезических пунктов в совокупности с каталогом координат таких пунктов в ЗСК позволяет установить координаты потребителя в ЗСК и определить направление осей и положения начала отсчёта ЗСК относительно пунктов опорной сети.

* согласно последней редакции ГОСТ: «земная отсчётная основа» заменена на «земную координатную основу», а «опорная система» - на «опорную систему координат».

«Практическая реализация» - на «материализацию».

Вторая задача решается с помощью выбора сети опорных удалённых внегалактических радиоисточников (ВР, ER) и проведения регулярных измерений задержек с помощью РСДБ-сети, радиотелескопы которой расположены на опорных пунктах геодезической сети.

В оптическую область их координаты передаются к опорным звёздам (ОЗ) с помощью наблюдений опорных звёзд и ВР, имеющих изображения как в оптическом, так и радиодиапазоне.

Сеть опорных ВР (и опорных звёзд в оптической области) в совокупности с каталогом их координат в небесной системе координат (НСК, СС) позволяет определить направление на заданный объект в НСК, а также определить направление осей НСК.

Третья задача решается с помощью регулярной обработки результатов измерений, полученных с помощью всех видов средств измерений опорных геодезических пунктов.

1.2. Параметры вращения Земли

В настоящее время по причинам различного (не только научного) характера отечественные понятия параметров вращения Земли (ПВЗ, ERP) и параметров ориентации Земли (ПОЗ, EOP) немного отличаются от принятых международных (т.е. не гармонизированы с международными). В России в настоящее время приняты следующие определения.

Параметры ориентации Земли (ПОЗ, EOP) – совокупность параметров, однозначным образом определяющих взаимную ориентацию ЗСК и НСК.

Параметры вращения Земли (ПВЗ, ERP) – та часть ПОЗ, которую необходимо определять из наблюдений в режиме службы с заданной точностью и периодичностью.

Принятые международные определения: ПВЗ – координаты земного полюса и разность шкал Всемирного и международного координированного времени, ПОЗ – дополнительно включают ещё поправки n модельным углам прецессии и нутации (или однозначно связанные с ними поправки к модельным координатам небесного полюса координаты небесного полюса). Эту особенность следует учитывать при переводе своих и чтении зарубежных статей по проблемам определения ПВЗ.

В настоящей статье эта разница будет учитываться при переводе названий зарубежных служб на русский язык, а именно: Earth's orientation parame-

ters будут переводиться как параметры вращения Земли, а не дословно как параметры ориентации Земли.

1.3. Как вращается Земля

Для того, чтобы определить взаимную ориентацию НСК и ЗСК, достаточно трёх независимых параметров (например, трёх углов Эйлера).



Рис. 1 Леонард Эйлер (1707-1783) – швейцарский, немецкий и российский математик и механик, внёсший фундаментальный вклад в развитие этих наук. Создатель теории вращения абсолютно твёрдой Земли. В рамках своей теории он предсказал существование Чандлерового движения полюса (ЧДП). Определённый из измерений период ЧДП оказался значительно больше (430 суток), в отличие предсказанного Эйлером периода (около трёхсот суток). Причина этого состоит в том, что реальная Земля отличается от рассмотренной Эйлером модели абсолютно твёрдой Земли. Портрет выполнен Я.Э. Хэндманом (1756). Использовано фото из Википедии (<https://ru.wikipedia.org/wiki>)

Однако спектр ПОЗ охватывает огромный диапазон частот, поэтому принято разделять полное вращение Земли на части: прецессию, нутацию, осевое вращение и движение полюса. В первом приближении они легко разделяются по векторным свойствам (модуль и направление угловой скорости вращения Земли) и частотному диапазону (быстрые и медленные движения относительно инерциального пространства).

1.3.1. Осевое вращение

Наибольшей амплитудой обладает осевое вращение Земли. Оно было отлично видно даже невооружённому глазу древнего человека. С относительным разрешением 10^{-7} оно представляется равномерным и ему соответствует линейная скорость в 462 м/с на экваторе Земли. Номинальная угловая скорость $\Omega_0 = 7,292115 \cdot 10^{-5}$ рад/с и её числовое значение установлено стандартами МСВЗ – IERS Conventions.

Однако, начиная с относительного разрешения в 10^{-8} , видны неравномерности вращения Земли (см. рис. 2).

Сама же относительная точность, с которой измеряется угловая скорость осевого вращения Земли, в настоящее время составляет 10^{-10} и ожидается её повышение до 10^{-11} .

Параметрами вращения Земли, связанными с осевым вращением Земли, являются разность шкал всемирного и международного координированного времени UT1-UTC и вариация продолжительности суток ΔLOD .

Когда появились атомные часы и доказали свою высокую стабильность и точность, международные службы стали формировать международную шкалу атомного времени (TAI), секунда которого стала новой реализацией секунды СИ, сменив ее реализацию в виде эфемеридной секунды. Для обеспечения непрерывности международной шкалы времени новая атомная секунда была выбрана равной секунде эфемеридного времени 1900 года.

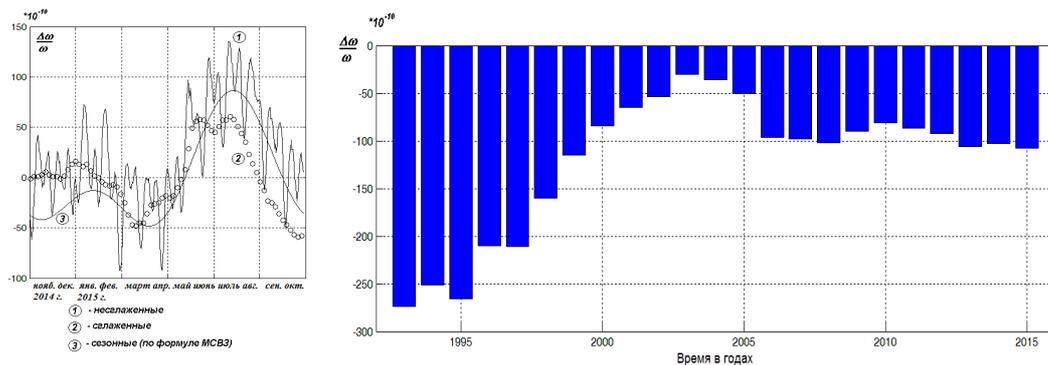


Рис. 2. Относительные вариации угловой скорости вращения Земли: относительно среднегодового значения (слева) и вариации самих среднегодовых значений справа [1]

Однако, на момент введения TAI Земля уже вращалась медленнее, чем один оборот за 86400 с эфемеридного времени 1900 года. Поэтому шкала UT1 испытывает вековой тренд по отношению к шкале TAI. Также угловая скорость вращения Земли испытывает нерегулярные вариации как на протяжении года (см. рис. 2 слева), так и на протяжении десятилетий (см. рис. 2 справа). Астрономические измерения и навигация в то время опирались на UT1, а не на TAI. Поэтому встал вопрос о том, что в качестве международной шкалы времени должна была быть выбрана шкала, которая бы, во-первых, обладала высокой стабильностью как атомное время и, во-вторых, не слишком бы отличалась от UT1. Такой шкалой и стала шкала международного координированного времени UTC, принятая в настоящее время. Ее единицей является атомная секунда, а численное значение момента времени в UTC не отличается больше чем на 0,9 секунды от численного

значения того же момента времени в UT1, что обеспечивается путем введения в шкалу UTC дополнительной (скачущей, *leap*) секунды в продолжительность суток 31 декабря или 30 июня. В такой день после 23 часов 59 минут 59 секунд следует не начало следующих суток, а 23 часа 59 минут 60 секунд того же дня. Так как Земля вращается неравномерно, вводится эта поправка нерегулярно по решению Международной службы вращения Земли и опорных систем (*MCB3, IERS*). Вводить такую поправку приходится в среднем чуть реже, чем раз в полтора года. Однако, поскольку Земля вращается неравномерно, то когда Земля вращалась медленнее, поправку приходилось вводить чаще (каждые полгода), а когда Земля вращалась быстрее, промежуток между двумя последовательными введениями скачущей секунды был дольше и однажды составил семь лет (с 1 января 1999 года по 1 января 2006 года).

Вариация продолжительности суток ΔLOD приблизительно численно равна производной с обратным знаком от величины $UT1-UTC$. Поэтому, имея информацию о ΔLOD , можно точнее определить $UT1-UTC$.

1.3.2. Прецессия

Вторым по величине эффектом во вращении Земли является прецессия. Прецессионное движение представляет собою медленное изменение направления оси вращения Земли в пространстве, при котором она в первом приближении описывает конус, причем ось этого конуса перпендикулярна плоскости эклиптики. Полный оборот полюс мира описывает приблизительно за 26000 лет. Образующая прецессионного конуса отклонена от его оси на угол в $84381,406''$, или приблизительно $23,4^\circ$ на эпоху J2000.

Одним из наблюдаемых проявлений прецессии является медленное смещение положения точки весеннего равноденствия (одной из точек, в которых пересекаются небесный экватор и эклиптика) навстречу годичному движению Солнца по эклиптике. Другим – медленное смещение полюса мира среди звезд. На латыни название первого из этих эффектов звучит как *praecessio aequinoctiorum* и означает «предварение равноденствий», откуда прецессия и получила свое название.

Считается, что впервые явление прецессии открыл древнегреческий астроном Гиппарх (см. рис. 3) во II в. до н.э. по результатам измерений положения точки весеннего равноденствия в разные годы. Он оценил ее

смещение примерно в 1° за 100 лет (современное значение приблизительно $50,3''$ в год или $1,4^\circ$ за 100 лет).

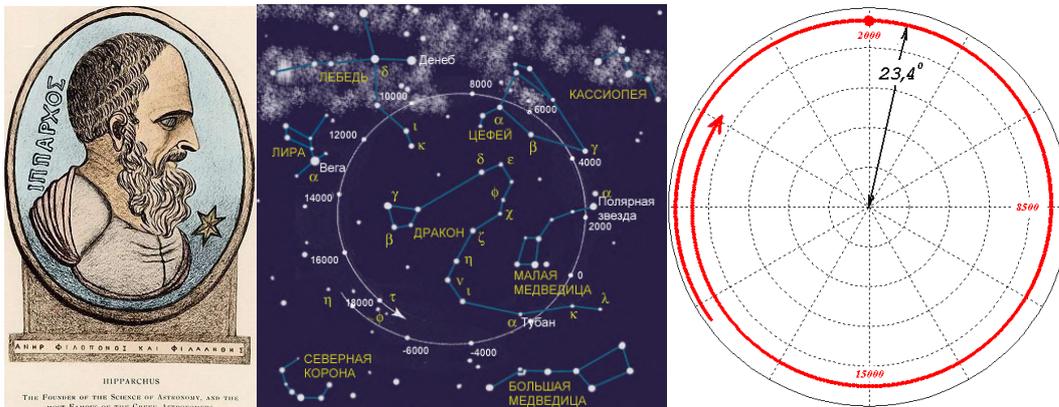


Рис. 3. Первооткрыватель прецессии Гиппарх (слева, <http://fineartamerica.com/featured/hipparchus-greek-astronomer-photo-researchers-inc.html>), прецессионное смещение полюса мира среди звёзд, как оно выглядит при наблюдениях с Земли (в центре, http://edu.znate.ru/tw_files/31012/d-31011922/31011922_html_7136b219.jpg), и прецессионное смещение полюса, как оно выглядит из космоса в направлении на северный полюс (справа)

Причиной прецессии (как и нутации, которая будет рассмотрена ниже) является действие сил гравитационного притяжения со стороны Солнца, Луны и планет.

Прецессионное движение имеет достаточно большую амплитуду, ему соответствует смещение на экваторе в 1,5 км за год. Но прецессию с необходимой точностью можно учесть с помощью модели, построенной на основе теории движения больших планет Солнечной системы и Луны. Если использовать принятую теорию прецессии для прогноза, то с учетом поправки к скорости прецессии, полученной в теории нутации МНВ2000, систематическая ошибка, вызванная неточностью теории прецессии, не должна превышать $2 \cdot 10^{-6}''$ за год. Что за 26000 лет составит $0,05''$, что всего лишь в 5 раз превышает среднеквадратическое отклонение (СКО) астрооптических измерений.

Поэтому в оперативной службе ПВЗ прецессия считается заданной и вычисляется в соответствии со стандартной моделью МСВЗ, описанной в стандартах МСВЗ – IERS Conventions.

1.3.3. Нутация

Название термина произошло от латинского глагола *nutare*, что означает «колебаться». Амплитуда нутации достаточно мала в сравнении с амплитудой прецессии (по порядку величины $10''$). Средний радиус нутационного эллипса примерно в 5 раз меньше годового прецессионного сдвига, что соответствует 300 м на поверхности Земли. Поэтому, даже если бы она была нарисована на рисунке 3, ее бы все равно не было бы видно, т.к. весь её размах в этом масштабе закрылся бы толщиной линии.

В первом приближении нутационное движение оси вращения представляет собою эллипс и полный оборот по нему совершается за 18,6 года. Полуоси нутационного «эллипса» составляют около $10''$ и $8''$. Более точное рассмотрение показывает, что полное нутационное движение состоит из более тысячи гармонических составляющих, которые выглядят на рисунке как петли. Главная из них – это эллиптическое движение с периодом 18,6 года и полуосями около $9''$ и $7''$, которая и придает полному нутационному движению эллиптическую форму. Вторая по величине – полугодовая гармоника, ответственная за формирование больших петель. Она тоже эллиптическая с полуосями около $0,6''$ и $0,5''$. А главная составляющая следующих по величине завитков образована почти круговым эллиптическим движением с периодом чуть меньше двух недель (13,6 суток) и полуосями около $0,01''$. Полугодовой и двухнедельной составляющим соответствуют смещения с амплитудами 15 м и 30 см на поверхности Земли соответственно. Три гармоники: 19-летняя, годовая и двухнедельная определяют приближённую форму нутационного движения (см. рис. 4).

Хотя нутация и достаточно велика, ее очень долгое время не замечали на фоне более значительного прецессионного движения. Она была открыта только в 18-м веке английским астрономом Джеймсом Брэдли (см. рис. 4) в результате 20-летних непрерывных измерений и их анализа. О своем открытии он заявил в 1748 году на заседании Лондонского королевского общества. Погрешность его измерений была около $1''$.

Основная причина прецессии и нутации – гравитационное притяжение Луной и Солнцем. Причем влияние Луны в два раза превосходит солнечное.

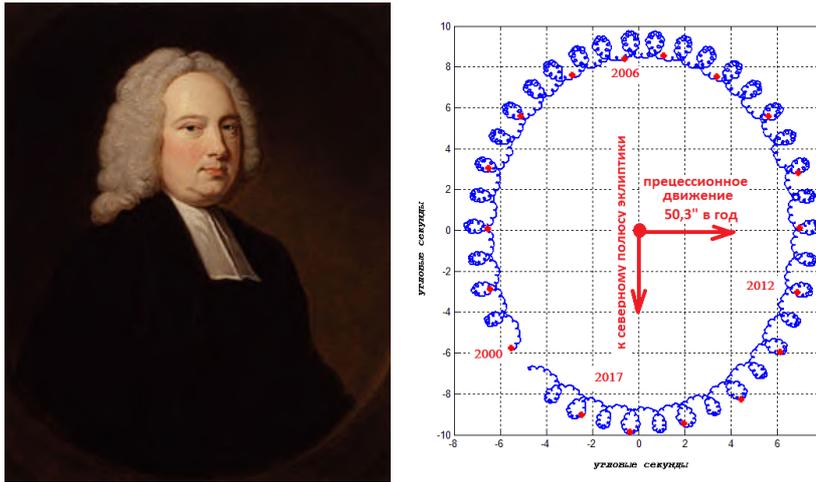


Рис. 4. Первооткрыватель нутации Джеймс Брэдли (слева, <https://ru.wikipedia.org/wiki>) и нутационное движение, как оно выглядит при взгляде из космоса со стороны северного полюса эклиптики (справа). Портрет выполнен Томасом Хадсоном в 18-м веке

Поскольку существуют высокоточные теории движения больших планет Солнечной системы и Луны, то существуют модели нутации, которые позволяют предвычислять нутационные углы с высокой точностью. Так что до недавнего времени не было необходимости в определении углов нутации в режиме оперативной службы. Принятая в настоящее время модель нутации MAC2000 позволяет предвычислять углы нутации с погрешностью в доли миллисекунды дуги.

Параметрами вращения Земли, связанными с прецессией/нутацией являются поправки к углам нутации теории MAC1980 $d\psi$ и $d\epsilon$, или поправки к компонентам движения небесного полюса dX и dY . Эти величины однозначно связаны между собою известными формулами (IERS Conventions 2010).

1.3.4. Движение полюса

Визуально движение полюса представляет собою то закручивающуюся, то раскручивающуюся спираль (см. рис. 5), центр которой смещается вековым образом в направлении моря Баффина (которое лежит между северо-восточной частью Северной Америки и Гренландией).

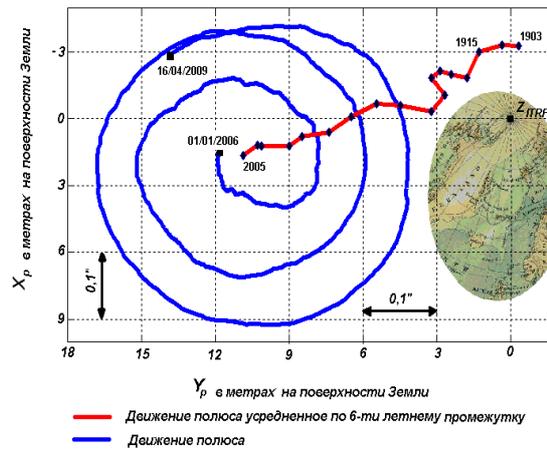


Рис. 5. Первооткрыватель Чандлерового движения полюса – Сет Карло Чандлер (слева, <https://ru.wikipedia.org/wiki>) и движение полюса, как оно выглядит при взгляде из космоса со стороны северного полюса Земли (справа)

Период закрутки-раскрутки спирали составляет около 6,5 лет. При этом в отличие от прецессии/нутаии движение по спирали происходит против часовой стрелки, если смотреть из внешнего пространства в направлении на северный полюс Земли. Наибольшее удаление от центра спирали составляет приблизительно около 0,25", что соответствует 7,5 метрам на поверхности Земли. Сам же центр спирали удалился от его положения в 1903 году на приблизительно на 13 метров.

Частотный анализ выявляет две основные составляющие движения полюса относительно центра спирали «раскрутки-закрутки»: это гармоника с годовым периодом и гармоника с периодом около 430 суток относительно вращающейся Земли. Движение с периодом 430 суток получило наименование Чандлерового движения полюса (CW от Chandler wobble, ЧДП). Это движение исторически сыграло огромную роль при разработке теории вращения Земли, поскольку его частота ассоциируется с главной собственной частотой вращения Земли, которая получается в результате решения задачи на собственные вращения Земли. Поэтому одной из важных характеристик

точности теории вращения является степень совпадения периода ЧДП, предсказанного теорией, с определяемым из измерений значением.

Чандлер опубликовал своё открытие в 1891 году, спустя более века после предсказания Эйлера. Неудачи его предшественников объясняются не столько недостаточной точностью измерений, сколько тем, что, основываясь на предсказании Эйлера, они искали ЧДП с периодом около трёхсот суток.

Хотя амплитуды движения полюса невелики в сравнении с прецессией и нутацией, высокоточное их определение (также как и вариаций Всемирного времени) является основной задачей службы определения параметров вращения Земли.

Причина этого состоит в том, что в формирование этих неравномерностей значительный вклад вносят так называемые флюиды – подвижные части Земли (атмосферные и океанические массы, грунтовые воды, ледяная фракция, осадки), в результате чего высокоточное определение этих ПВЗ нуждается в проведении непрерывных астрономо-геодезических измерений и их математической обработки.

Параметрами вращения Земли, связанными с движением земного полюса, являются его координаты: x_p и y_p .

1.4. Промежуточные системы координат

Поскольку спектр ПОЗ охватывает огромный диапазон частот, то для удобства обработки измерений и строгого разделения полного вращения Земли на части вводят промежуточную систему координат (ПСК, ICS).

Согласно стандартам МСВЗ (IERS Conventions) 1980 года, в качестве ПСК в 1980 году была определена небесная эфемеридная система координат (НЭСК). Её начало совпадало с действующей на тот момент НСК, а направление осей получалось из осей НСК поворотами последних на углы прецессии и нутации. Она соответствовала НСК даты по старой классификации ПСК (НСК эпохи, средняя НСК и НСК даты). Под движением земного полюса понималось движение полюса НЭСК (так называемого небесного эфемеридного полюса (НЭП, СЕР)) в земной системе координат.

С точностью измерения ПВЗ того времени (0,01" по движению полюса и 0,001 с по всемирному времени) прецессия и нутация исчерпывали все долгопериодические в НСК гармоники, обусловленные влиянием гравитационного притяжения Солнца, Луны и планет, а движение полюса исчерпывало все гармоники, связанные с влиянием геофизических флюидов (атмосферные и океанические массы, грунтовые воды, ледяная фракция, осадки, дви-

жения в мантии).

Однако благодаря новым методам космической геодезии точность возросла почти в 100 раз. В результате оказалось, что часть гармоник, обусловленная геофизическими флюидами, проникает в область частот прецессии и нутации, и что часть нутационных гармоник проникает в частотную область движения полюса. Тогда было принято решение провести чёткое частотное разделение полной вариации направления угловой скорости вращения Земли на части в соответствии с таблицей 1.

В таблице 1: ITRF – международная земная координатная основа, GCRF – геоцентрическая небесная координатная основа. Эти понятия далее будут пояснены, на данном же этапе достаточно знать, что первая связана некоторым образом с земной поверхностью, а вторая – с инерциальным пространством.

Таблица 1

Разделение вариации направления угловой скорости вращения Земли на прецессию/нутацию и движение полюса согласно стандартам МСВЗ 2010 (IERS Conventions 2010).

| | Движение полюса | | Прецессия /нутация | Движение полюса | |
|---|-------------------|----------------|--------------------|-----------------|-------------------|
| | | | | | |
| Частотный диапазон в ITRF (частоты в оборотах за сутки) | $(-\infty; -2,5)$ | $(-2,5; -1,5)$ | $(-1,5; -0,5)$ | $(-0,5; +0,5)$ | $(+0,5; +\infty)$ |
| Частотный диапазон в GCRF (частоты в оборотах за сутки) | $(-\infty; -1,5)$ | $(-1,5; -0,5)$ | $(-0,5; +0,5)$ | $(+0,5; +1,5)$ | $(+1,5; +\infty)$ |

Астрономические определения, установленные стандартами МСВЗ, не совпадают (не гармонизированы) с определениями прецессии и нутации, используемыми в физике. Физические прецессия и нутация определены для механической системы, не обменивающейся энергией с внешними телами, поэтому, строго говоря, для Земли неприменимы. Причём основой определений в физике является наличие/отсутствие момента внешних сил, а не частотное разделение.

Следует отметить, что понятия прецессии и нутации, используемые в настоящей работе, соответствуют стандартам МСВЗ, которые в свою очередь основываются на резолюциях Международного астрономического союза (МАС, IAU).

Кроме того, из-за прецессии/нутаии начало отсчёта прямых восхождений в НЭСК медленно смещается относительно инерциального пространства. Для того, чтобы компенсировать это малое смещение для строгого определения новой ПСК, вводится дополнительное (очень малое вращение), чтобы исключить движение начала отсчёта прямых восхождений ПСК относительно инерциального пространства. Полнос небесной промежуточной системы координат получил наименование небесного промежуточного полюса (НПП, СР).

Современное разделение вращения Земли на составляющие связано с принятой промежуточной системой координат следующим образом.

Движение земного полюса – движение небесного промежуточного полюса в ЗСК.

Движение небесного полюса – движение небесного промежуточного полюса в НСК (оно однозначно связано с прецессией и нутацией).

Осевое вращение – движение начала отсчёта долгот земной ПСК относительно начала отсчёта прямых восхождений небесной ПСК. В рамках этого определения угол аксиального поворота Земли действительно описывает осевое вращение Земли относительно удалённых ВР.

Поскольку небесная эфемеридная система координат (НЭСК, СЕС) используется для астрономических наблюдений, её также продолжают поддерживать в несколько модифицированном виде. Связанные с ней ПОЗ вычисляют исходя из ПОЗ, полученных для ПСК, таким образом, чтобы полная матрица перехода от ЗСК к НСК в точности совпадала для обоих промежуточных систем координат.

1.5. Опорные системы координат и координатные основы

Большая часть высокоточных астрономических и геодезических измерений в своей основе относительные. В астрономии это связано с тем, что для наблюдения слабых объектов необходимо наращивать увеличение телескопов, в результате чего поле зрения уменьшается. А в геодезии это связано с большими размерами Земли как планеты. Поэтому необходимо иметь опорные объекты с известными координатами в поле зрения телескопа или опорные пункты с известными координатами на Земле, вблизи потребителя. Т.е. нужна некоторая опорная сеть пунктов, совокупность координат которых будет играть роль эталона координат объектов, расположенных на небе

или на Земле. При этом сеть должна позволять выполнять относительные измерения, т.е. на её пунктах должны вестись непрерывные измерения средствами измерений различных видов (РСДБ, ГНСС, СЛД) или передаваться сигналы (передающие антенны DORIS), а небесные объекты (ВР или ОЗ) должны непрерывно излучать или передавать сигналы (космические аппараты ГНСС).

Совокупность таких опорных сетей на небе и на Земле и опорных каталогов приписанных им координат в русском языке, согласно ГОСТ Р 8.699-2010 [1], называется небесной и земной координатной основой соответственно (НКО, CRF) и (ЗКО, TRF). Согласно стандартам МСВЗ (IERS Conventions), в английском языке им соответствуют celestial и terrestrial reference frames.

Термин «система координат» (СК, CS) здесь понимается согласно его общепринятому определению.

Термин, который в стандартах МСВЗ (IERS Conventions) назван «reference system», в настоящей статье понимается и переводится, согласно ГОСТ Р 8.699-2010, как «опорная система координат» (ОК, RS). Это понятие очень близко к принятому понятию «система отсчёта», однако отличается от него тем, что в понятие «опорная система координат» помимо системы отсчёта входят некоторые дополнительные технические требования, регламентирующие, как именно нужно привязать систему координат к телам отсчёта и какие единицы измерения должны использоваться.

В англоязычной литературе термином «reference system» обозначают также и обычные системы отсчёта. Однако, поскольку о последних здесь ничего не говорится, то недоразумений возникнуть не должно.

О координатных основах говорят, что они являются «материализациями» (согласно НО [1]) соответствующих опорных систем координат. Поскольку опорная система не определяет однозначным образом координатную основу, то для одной и той же опорной системы возможно построить множество практических реализаций.

1.6. Формулы, описывающие связь ЗСК и НСК

Пусть $X^{(НСК)}$ – столбец координат вектора \bar{x} в неподвижной системе координат и $X^{(ЗСК)}$ – столбец координат вектора \bar{x} во вращающейся земной

системе координат. Тогда они связаны друг с другом матрицей поворота:

$$X^{(НСК)} = \Phi(t)X^{(ЗСК)}. \quad (1.1)$$

Зная матрицу поворота $\Phi(t)$, можно определить компоненты $\bar{\Omega}$ – угловой скорости вращения ЗСК относительно НСК:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & -\Omega_3 & \Omega_2 \\ \Omega_3 & 0 & -\Omega_1 \\ -\Omega_2 & \Omega_1 & 0 \end{pmatrix} = -\frac{d\Phi^{-1}}{dt} \Phi. \quad (1.2)$$

Это соотношение является обобщенной формой кинематических уравнений вращательного движения. Следует заметить, что известные кинематические уравнения Эйлера являются частным случаем этого соотношения.

Вне зависимости от вида используемой для разделения полного вращения на составляющие ПСК матрица поворота $\Phi(t)$ представляется в виде:

$$\Phi(t) = Q(t)R(t)W(t), \quad (1.3)$$

где $Q(t), R(t), W(t)$ - матрицы, учитывающие низкочастотные в НСК изменения направления оси вращения Земли (прецессия, нутация, смещение небесного полюса), осевое вращение Земли относительно направления принятого промежуточного полюса (НЭП или НПП) и движение полюса ЗПСК (включая короткопериодическую нутацию) относительно направления на северный полюс ЗСК.

Ниже в таблицах 2-4 приведены ПОЗ и соответствующие им ПВЗ для используемых в настоящее время Небесной промежуточной системы координат (НПСК-10, CIRS-10) и Небесной эфемеридной системы координат (НЭСК-10, CERS-10), установленных стандартами МСВЗ 2010 года (IERS Conventions 2010).

Таблица 2

Выражения для матрицы перехода от небесной промежуточной системы и соответствующие ПОЗ и ПВЗ

| ПНСК | Выражение | ПОЗ | ПВЗ |
|---------|---|---|--------------------|
| НПСК-10 | $Q_{\text{НПСК-10}}(t) =$ $= R_3(-E) \cdot R_2(-d) \cdot R_3(E) \cdot R_3(s)$ | E, d, s или X, Y, s | dX, dY |
| НЭСК-10 | $Q_{\text{НЭСК-10}}(t) = B(\eta_0, \xi_0, d\alpha_0) \cdot$ $\cdot P(\epsilon_0, \chi_A, \omega_A, \psi_A) \cdot N(\epsilon_A, \Delta\epsilon, \Delta\psi)$ | $\eta_0, \xi_0, d\alpha_0, \epsilon_0,$ $\chi_A, \omega_A, \psi_A, \epsilon_A, \Delta\epsilon, \Delta\psi$ | $d\psi, d\epsilon$ |

где:

$$B(\eta_0, \xi_0, d\alpha_0) = R_3(-d\alpha_0) \cdot R_2(-\xi_0) \cdot R_1(\eta_0);$$

$$P(\epsilon_0, \chi_A, \omega_A, \psi_A) = R_1(-\epsilon_0) \cdot R_3(\psi_A) \cdot R_1(\omega_A) \cdot R_3(-\chi_A);$$

$$N(\epsilon_A, \Delta\epsilon, \Delta\psi) = R_1(-\epsilon_A) \cdot R_3(\Delta\psi) \cdot R_1(\epsilon_A + \Delta\epsilon);$$

$R_i(\varphi)$ – матрица вращения на угол φ вокруг направления оси ОХ, ОУ и ОZ (при $i=1,2,3$) против часовой стрелки, если смотреть навстречу направлению соответствующей оси в используемых правых СК;

χ_A, ω_A, ψ_A и ϵ_A – углы прецессии в виде разложений по степеням времени, отсчитанном от эпохи J2000 в Юлианских столетиях.

Постоянные $\xi_0, \eta_0, d\alpha_0, \epsilon_0$ задают на эпоху J2000 положение НПП в НСК, положение начала отсчета прямых восхождений и наклон эклиптики к экватору. Постоянные ξ_0, η_0 связаны с постоянными поправками к углам нутации на эпоху J2000 $\delta\epsilon_{J2000}, \delta\psi_{J2000}$, полученными в теории нутации МНВ2000.

Таблица 3

Выражения для матрицы аксиального вращения и соответствующие ПОЗ и ПВЗ

| ПНСК | Выражение | ПОЗ | ПВЗ |
|---------|-------------------------------------|-------|----------------------------|
| НПСК-10 | $R_{\text{НПСК-10}}(t) = R_3(-ERA)$ | ERA | $UT1-UTC,$ ΔLOD |
| НЭСК-10 | $R_{\text{НЭСК-10}}(t) = R_3(-GST)$ | GST | |

Таблица 4

Выражения для матрицы движения полюса и соответствующие ПОЗ и ПВЗ

| ПНСК | Выражение | ПОЗ | ПВЗ |
|---------|---|-------------|------------|
| НПСК-10 | $W_{НПСК-10}(t) = R_3(-s')R_2(x_p)R_1(y_p)$ | $x_p, y_p,$ | x_p, y_p |
| НЭСК-10 | $W_{НЭСК-10}(t) = R_2(x_p)R_1(y_p)$ | x_p, y_p | |

ERA – угол вращения Земли относительно инерциального пространства, GST – Гринвичское звёздное время, ΔLOD – вариация продолжительности суток, x_p, y_p – координаты земного полюса. Матрицы поворота, содержащие углы s и s' , отвечают за те самые дополнительные малые вращения, которые компенсируют смещения начала отсчёта прямых восхождений и долгот из-за прецессии/нутаии и движения полюса, соответственно.

2. Средства измерений, используемые при оперативном определении ПВЗ

В настоящем разделе кратко рассмотрены средства измерений, используемые для оперативного определения ПВЗ:

- радиointерферометры со сверхдлинными базами (РСДБ);
- приёмники сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС);
- спутниковые лазерные дальнометры (СЛД).

Соответственно, сюда не вошли средства измерений, используемые для решения неоперативных задач службы вращения Земли, а именно – средства доплеровской спутниковой орбитографии (DORIS) и средства измерений классической геодезии, которые используются для измерений векторов привязки (ВП) на пунктах колокации. (Пункты колокации – пункты, на которых установлены средства измерений двух и более видов измерений. Привязка опорных точек (ОТ) этих инструментов к геодезическому маркеру (или опорной точке), являющемуся (являющейся) носителем координат пункта, осуществляется с помощью средств измерений классической геодезии).

Следует отметить, что ни одно из вышеперечисленных средств измерений напрямую не измеряет ПВЗ. Измеряемыми величинами всех этих средств измерений являются интервалы времени между определёнными событиями

измерительного цикла. Чисто инструментальная погрешность измерения этих величин очень мала – она находится на уровне миллиметров и даже долей миллиметра, и если бы не было среды, в которой распространяются сигналы, то погрешность ПВЗ, определяемых из таких измерений, была бы близкой к нескольким угловым микросекундам. К сожалению, среда распространения и непредсказуемая часть вариаций различных геодинамических факторов приводят к тому, что значение погрешности ПВЗ, получаемых в результате обработки таких данных, в 5-10 раз выше.

Средства измерений (СИ) для целей определения ПВЗ можно условно разделить на абсолютные и относительные. Относительные СИ/методы опираются на наблюдения за быстродвижущимися легкими объектами (искусственными спутниками Земли). Из-за чувствительности ИСЗ к малым возмущениям не удастся полностью учесть медленное систематическое смещение орбит спутников относительно инерциального пространства. Поэтому углы прецессии/нутации и низкочастотный тренд во Всемирном времени не могут быть определены по спутниковым методам с требуемой точностью. Т.е. спутниковые методы позволяют определять только координаты полюса и продолжительность суток.

Спутниковые СИ/методы в свою очередь по видам измерений делятся на радионавигационные и лазерные. Радионавигационные спутниковые средства в свою очередь по методам измерений делятся на доплеровские и псевдодальномерные. Доплеровские измерения в настоящее время используются только для контроля систематической составляющей ПВЗ, поскольку они проигрывают как по точности, так и по оперативности в части определения ПВЗ радионавигационным псевдодальномерным измерениям.

Абсолютные СИ/методы опираются на наблюдения за малоподвижными (или практически неподвижными относительно инерциального пространства) объектами (такими как звезды или удаленные внегалактические источники радиоизлучения). Поэтому по ним можно определять полный набор параметров вращения Земли. Также все ПВЗ можно определять по наблюдениям Луны, которая благодаря своим огромным размерам практически не реагирует на те малые возмущения, которым так подвержены ИСЗ. Однако станций лазерной лунной дальнометрии на настоящий момент всего три, и находятся они за рубежом. Поэтому по причине более низкой точности и оперативности результаты их определений могут служить лишь для контро-

ля поведения систематической составляющей Всемирного времени, но никак не для его определения в режиме службы. В настоящее время единственным используемым высокоточным абсолютным методом измерений, который позволяет определять разность шкал Всемирного и международного координированного времени, а также углы прецессии/нутации, является метод РСДБ.

2.1. Радиointерферометры со сверхдлинными базами

Радиointерферометр со сверхдлинными базами измеряет групповые задержки – интервалы времени между моментами приема шумовых сигналов от внегалактического радиоисточника (квазара) радиотелескопами, разнесенными на большие расстояния, сравнимые с радиусом Земли. Схема, поясняющая принцип РСДБ измерений, и радиотелескоп обсерватории Светлое (Ленинградская обл.) из состава РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» ИПА РАН изображены на рисунке 6.

Определяемая групповая задержка τ_g связана с вектором базы \vec{b} и вектором направления на радиоисточник \vec{s} формулой:

$$\tau_g = \frac{1}{c} \vec{b} \cdot \vec{s} + \sum_i \Delta\tau_i, \quad (2.1)$$

где $\Delta\tau_i$ – различные поправки, учитывающие влияние среды распространения и релятивистские эффекты.

Поскольку при вращении Земли взаимная ориентация вектора базы и вектора направления на радиоисточник изменяется, то из (2.1) возможно узнать, как вращается в пространстве вектор базы. Чтобы узнать, как вращается Земля, необходимо минимум три разнесённых радиотелескопа. Однобазовая конфигурация, показанная на рисунке 6, используется только для определения разности шкал Всемирного и международного координированного времени $UT1-UTC$, при этом координаты полюса полагаются известными.

Достоинства РСДБ метода в части определения ПВЗ состоят в том, что он всепогодный и с помощью него можно определять все ПВЗ. Наблюдения проводятся за малоподвижными объектами – внегалактическими радиоисточниками (ВР). Причём для величины $UT1-UTC$ он играет роль репера, поскольку спутниковые методы не способны установить тренд этой величины.

Недостатком РСДБ метода в части определения ПВЗ является его боль-

шая стоимость и сложность аппаратуры (рис. 7).

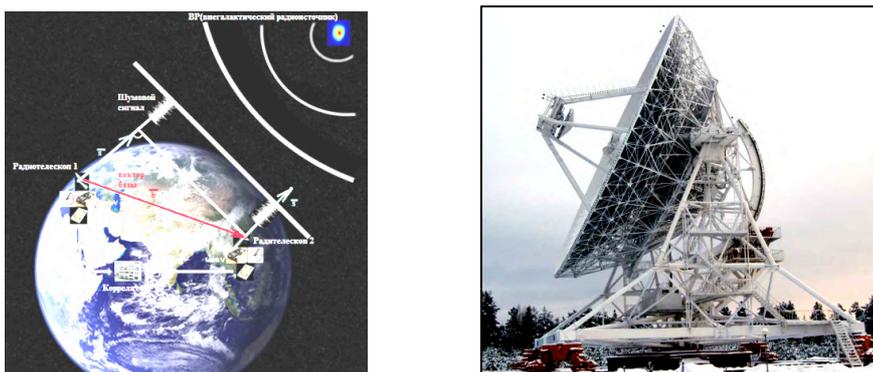


Рис. 7. Принцип радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ, VLBI) слева и радиотелескоп обсерватории Светлое РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» справа (фото с сайта ИПА РАН: <http://www.ipa.nw.ru/PAGE/OBSERVATORY/img/S/svtl04.jpg>)

2.2. Приёмники сигналов ГНСС

Результатом ГНСС измерений является *псевдодальность* – выраженный в единицах длины интервал времени между моментом приема сигнала ГНСС приемником по часам приемника и моментом излучения этого же сигнала с космического аппарата (КА) по часам спутника:

$$P = c(t_{\Pi} - t_{КА}). \quad (2.2)$$

Навигационная измерительная аппаратура пункта определения ПВЗ ГМЦ ГСВЧ изображена на рисунке 8 слева.

Другим видом навигационных измерений являются фазовые измерения, при которых измеряется сдвиг фазы несущей.

Для обработки кодовых измерений используется следующая модель:

$$P_i^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t_k) + \Delta \rho_{i, \text{trop}}^k + \Delta \rho_{i, \text{ion}}^k + c(b_i - b_k) + \epsilon, \quad (2.3)$$

где i – номер приёмника, k – номер КА, ρ_i^k – геометрическая дальность, Δt_i (Δt_k) – отстройка шкалы времени приёмника (КА) от системной шкалы, $\Delta \rho_{i, \text{trop}}^k$ – тропосферная задержка, $\Delta \rho_{i, \text{ion}}^k$ – ионосферная задержка, b_i (b_k) – аппаратная задержка в приёмнике (КА) и, наконец, ϵ – шумовая составляющая.



Рис. 8. Навигационная измерительная аппаратура пункта определения ПВЗ ГМЦ ГСВЧ (слева) и СЛД «Сажень-ТМ» (справа)

Для обработки фазовых измерений используется следующая модель:

$$L_i^k = \rho_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t_k) + \Delta \rho_{i, trop}^k + \Delta \rho_{i, ion}^{k(L)} + \lambda B_i^k + \epsilon, \quad (2.4)$$

где λB_i^k – совокупность фазовой неоднозначности и задержек в аппаратуре приёмника и КА, λ – длина волны несущей.

Достоинствами метода ГНСС в части определения ПВЗ являются всепогодность, сравнительно (с РСДБ и СЛД) малая стоимость как самой аппаратуры, так и её эксплуатации.

Недостатками в части определения ПВЗ средств ГНСС являются невозможность отследить медленный дрейф группировки спутников как целого из-за чего возможно определять только координаты полюса и вариации продолжительности суток, а также отсутствие государственного эталона для метода ГНСС, что позволяет установить метрологическую прослеживаемость только с привлечением других средств, например, спутниковых лазерных дальномеров (см. пункт 2.3).

2.3. Спутниковые лазерные дальномеры

Спутниковые (лунные) лазерные дальномеры измеряют интервал времени между моментом излучения импульса со станции спутниковой лазерной дальнометрии и моментом приема его отражения от уголкового отражателя,

установленных на пассивном геодезическом спутнике (или Луне), причем оба этих момента измеряются по одним и тем же часам станции СЛД (ЛЛД). По этому интервалу времени можно вычислить эффективную дальность:

$$d_{eff} = \frac{c(t_{\text{приёма}} - t_{\text{излучения}})}{2} = d + \sum_i \Delta_i d \quad , \quad (2.5)$$

где d – геометрическая дальность, а $\Delta_i d$ – различные поправки.

Общий вид спутникового лазерного дальномера «Сажень-ТМ», установленного в ГМЦ ГСВЧ, изображён на рисунке 8 справа.

Для целей определения ПВЗ нужны пассивные (чтобы они не совершали частых манёвров), а также среднеорбитальные и массивные спутники сферической формы (чтобы атмосфера и другие возмущения не слишком влияли на их движение). В настоящее время основными спутниками для определения ПВЗ методом лазерной дальнометрии являются Lageos, Etalon и Луна (см. рисунок 9).

Достоинствами средств измерений в части определения ПВЗ лазерной локацией является их прослеживаемость к эталонам длины и, в том числе к Государственному специальному эталону длины, расположенному во ФГУП «ВНИИФТРИ».

Недостатками в части определения ПВЗ являются возможность определять только координаты полюса и вариации продолжительности суток и зависимость от погоды.

3. Международная служба вращения Земли и опорных систем

Поскольку на вращение Земли оказывают влияние глобальные геофизические флюиды и в том числе глобальные атмосферные явления, то параметры ориентации Земли содержат непредсказуемую часть (ПВЗ), которую необходимо постоянно определять (вспомните о прогнозе погоды). ПВЗ, определённые по результатам измерения различных видов (РСДБ, ГНСС, СЛД), дают результаты, несколько различающиеся между собою, поскольку каждый вид измерений обладает своими систематическими погрешностями. Кроме того, поскольку эти определения производятся на границе имеющихся научно-технических возможностей, то даже результаты определений ПВЗ, получаемые в различных центрах обработки и анализа данных, несколько различаются между собой.

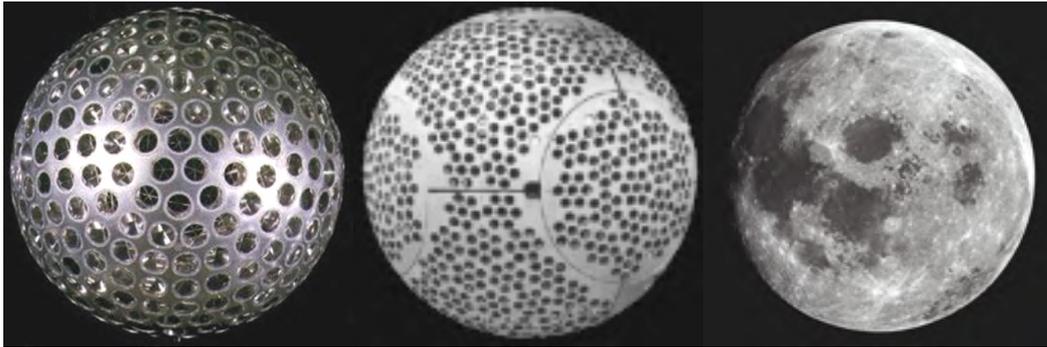


Рис. 9. Пассивные спутники: Lageos, Etalon и Луна (<http://ilrs.gsfc.nasa.gov>)

А для практических целей данные о ПВЗ должны выдаваться единые, с заданными временным разрешением и задержкой. 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 эта задача решается Международной службой вращения Земли и опорных систем (МСВЗ, IERS). 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, VLBI)), проводит их совместную обработку и определяет опорные оперативные и срочные значения ПВЗ, публикуемые в бюллетенях серии «А» Военно-морской обсерватории США (ВМО США, USNO), а также окончательные опорные значения серии EOPC04, формируемой в Центральном бюро МСВЗ. В работе МСВЗ участвуют средства измерений большинства стран мира (и, в том числе, средства измерений ФГУП «ВНИИФТРИ»).

3.1. Структура МСВЗ

Структура МСВЗ изображена на следующем рисунке 10.

С точки зрения проводимых работ её условно можно разбить на три группы:

- центры определения и распространения выходных данных (Product Centers);
- центры совместной обработки и рабочие группы;
- центры отдельных видов измерений (Technique Centers), которые руководят деятельностью соответствующих служб (Services).

Центры совместной обработки и рабочие группы выполняют различные разработки, направленные на совершенствование методов и средств работы центров отдельных видов измерений и центров определения и распространения выходных данных в целом. Если перевести это на привычный язык разработки, то они выполняют научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на совершенствование методов и средств сбора и обработки измерений, стандартов и форматов представления данных, а также определения выходных данных и их распространения потребителям. Также центры совместной обработки проводят опытную эксплуатацию разработанных средств. Текущие работы выполняют остальные две группы.

Центры отдельных видов измерений (Technique Centers) или службы решают те же задачи, что и МСВЗ, но только на основе подведомственного им вида измерений.

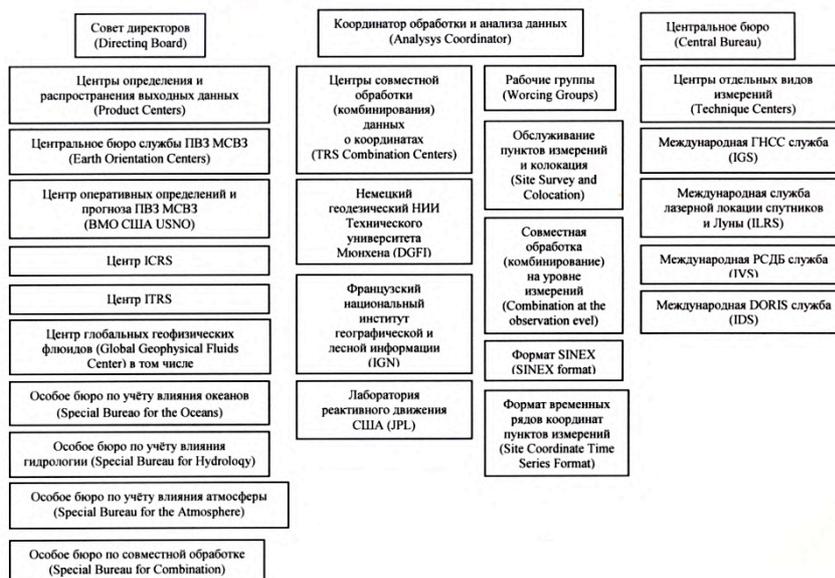


Рис. 10. Структурная схема МСВЗ

В качестве примера на рисунке 11 показан снимок Интернет-страницы Международной РСДБ-службы (IVS).

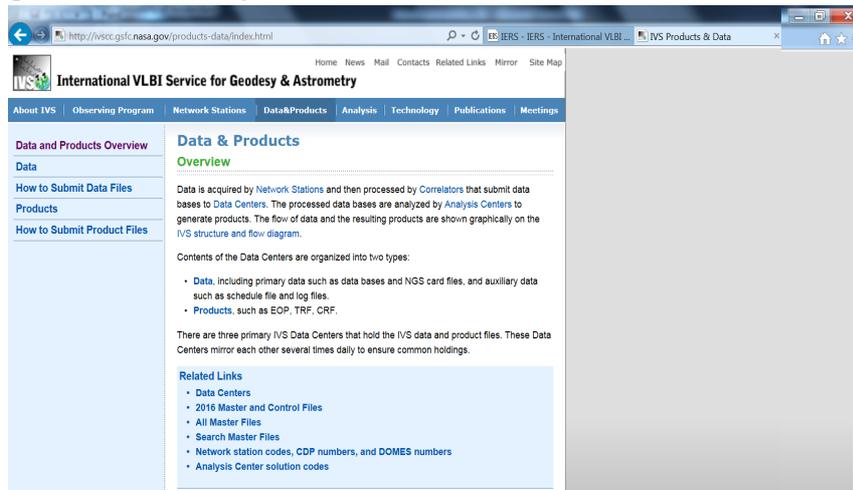


Рис. 11. Снимок Интернет-страницы Международной РСДБ службы

Видно, что выходными данными службы являются данные о ПВЗ (EOP), земной и небесной отсчётным основам (TRF и CRF), полученным на основе обработки РСДБ – измерений.

Каждая из служб (IGS, IVS, ILRS, DORIS) собирает данные с сети пунктов, оборудованных соответствующими средствами измерений. На следующем рисунке 11 в качестве примера изображена сеть пунктов Международной службы лазерной локации спутников и Луны (ILRS).

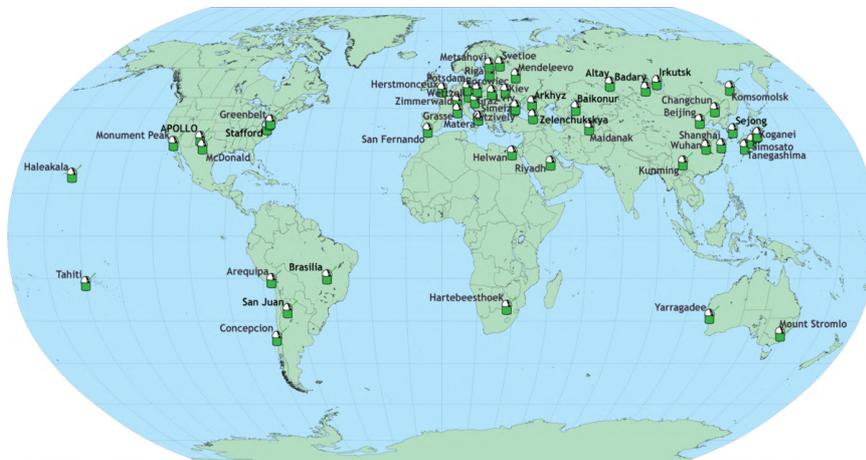


Рис. 11. Глобальная сеть пунктов Международной службы лазерной локации спутников и Луны

Пункты измерений не являются частью служб и входят в их состав функционально, посредством отправляемых ими в международные базы данных результатов измерений. Однако одного желания для такого функционального вхождения в состав международной сети недостаточно: пункты измерений, желающие участвовать в работе МСВЗ, должны удовлетворять определённым требованиям соответствующей службы. Например, для того, чтобы войти в состав Международной ГНСС сети, пункт измерений должен выполнить требования и пройти процедуры, указанные по адресу: <http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>.

Сводная (полученная на основе совместной обработки данных всех видов измерений) выходная информация МСВЗ формируется центрами определения и распространения выходных данных (Product Centers).

3.2. Центры опорных систем координат

Информация о координатах пунктов международной земной и небесной отсчётной основы (ITRF и ICRF) формируется Центрами международных земной и небесной опорных систем координат (Центром ITRS и Центром ICRS). Фактически решаемые ими задачи – это установление и поддержания международной земной и небесной координатных основ. Информация о координатах опорных пунктов и ВР формируется на основе совместной обработки (комбинирования) результатов всех видов измерений.

Согласно резолюции №9 Генеральной конференции Международного бюро мер и весов (CGPM) 24 созыва, международная земная координатная основа (МЗКО, ITRF) принята как единая международная земная координатная основа для всех метрологических работ. Она является реализацией международной земной опорной системы координат (МЗОСК, ITRS), которая включает следующие требования:

– ЗСК, связанная с ITRF, должна быть геоцентрической, причем центр масс рассчитывается по всей Земле, включая океаны и атмосферу;

– в качестве единицы длины принимается метр SI, что в трактовке используемой релятивистской модели задает масштаб системы, согласованный с земным координатным временем TCG, как это предусмотрено резолюциями IAU и IUGG 1991 года;

– ориентация ЗСК для начальной эпохи должна совпадать с ориентацией системы координат Международного бюро времени (МБВ, ВИН) на эпоху

1984.0;

– изменение ориентации с течением времени должно компенсироваться с помощью модели "невращения сети", применяемой к горизонтальным тектоническим подвижкам по всей Земле;

– численные значения констант заданы в соответствии с текущими резолюциями Международной службы вращения Земли (МСВЗ, IERS);

– она должна быть построена Центром ITRS МСВЗ для глобальной опорной сети пунктов служб МСВЗ.

Аналогично международная небесная координатная основа (МНКО, ICRF), формируемая Центром ICRS, является материализацией [1] «Международной небесной опорной системы (МНОС, ICRS), которая включает следующие требования:

– НСК, связанная с ICRF, должна быть невращающейся в кинетическом смысле (неподвижными считаются направления на самую удаленную материю во Вселенной – внегалактические радиоисточники (ВР), такие, как большинство квазаров, лацертиды, некоторые активные ядра галактик);

– начало отсчета прямых восхождений на небесной сфере и направления осей должны быть неподвижны по отношению к большинству ВР;

– набор условий, алгоритмов и констант задается в соответствии с текущими резолюциями Международного астрономического союза (МАС) и Международной службы вращения Земли и опорных систем;

– она должна быть построена Центром ICRS МСВЗ для глобальной сети опорных ВР.

3.3. Центры определения ПВЗ и основные виды информации о ПВЗ МСВЗ

Военно-морская обсерватория США (ВМО США, USNO) исполняет функции Центра оперативных определений и прогноза ПВЗ (IERS Rapid Service/Prediction Service). Она формирует оперативные данные о ПВЗ МСВЗ, доступные по сети Интернет. Их метод вычислений основан на использовании кубических сплайнов и подробно описывается в работе [2].

В качестве систематически несмещенных данных в этом алгоритме рассматриваются данные серии EOPC04, содержащие опорные данные ПВЗ МСВЗ. Далее поступившие входные временные ряды, содержащие результаты оперативных определений ПВЗ по отдельным видам измерений и постро-

енные в различных ЦОАД, сравниваются с данными ЕОРС04, и на основе этого сравнения определяется их систематическое поведение (смещения и тренд) относительно этой серии, а также среднеквадратические отклонения (СКО). После этого систематические отклонения исключаются из этих рядов, а также исключаются годовая и полугодовая волны. Веса данным каждого ряда назначаются равными обратным квадратам среднеквадратических отклонений этих рядов от ЕОРС04. Значения, выходящие за утроенное среднеквадратическое отклонение (СКО), исключаются из обработки. Далее, для интерполяции результатов измерений на заданные моменты (0 часов UTC) используются кубические сплайны, что приводит к незначительному сглаживанию результатов. Комбинирование проводится путем образования средневзвешенных значений.

Оперативна информация о ПВЗ МСВЗ формируется в следующих видах.

Во-первых, ежесуточно формируется бюллетень *finals.daily* (см. рис. 12.), доступный в электронном виде на ftp-серверах USNO и через Интернет-страницу МСВЗ. Как правило, он содержит информацию о ПВЗ МСВЗ за 90 суток, предшествующих моменту вычисления, а также прогноз на последующие 91 сутки.

Вычисленные по измерениям значения за указанную дату помечаются флагом «I», а на основе прогноза значений, полученных за предшествующую дату, – флагом «P». После значений каждого из ПВЗ (координат земного полюса, UT1-UTC и смещений углов прецессии/нутаии относительно теории МАС1980) указывается их формальная ошибка (т.е. СКО, определённое в рамках принятой модели измерений по сходимости результатов между собою или «СКО по внутренней сходимости»). Точные значения погрешностей («СКО по внешней сходимости») определяются только спустя значительное время, после того как будут получены международные принятые опорные значения ПВЗ (ряд ЕОР (IERS) 08 C04), который и играет роль точных значений ПВЗ при проведении оценок.

Во-вторых, еженедельно формируется Бюллетень А (Bulletin A) МСВЗ (см. рис. 13), который распространяется как в электронном, так и печатном виде. Он включает значения ПВЗ за истёкшую неделю, а также ряд другой информации. Сразу отметим, что для перевода буквы бюллетеня на русский язык в настоящей статье используется латинская транскрипция, например, «D» соответствует «Д», «C» соответствует «Ц» и т.д.

The image shows a screenshot of a spreadsheet application, likely Microsoft Excel, displaying a large table of data. The data is organized into columns and rows, with some cells containing numerical values and others containing text or formulas. The spreadsheet appears to be a detailed log or data set, possibly related to the 'finals.daily' mentioned in the caption. The interface includes a menu bar at the top with options like 'Файл', 'Правка', 'Вид', and 'Справка'. The data rows consist of multiple columns of numbers, some with scientific notation or specific units, and some with text labels.

Рис. 12. Ежесуточный бюллетень MCB3 finals.daily

ВМО США (USNO) формирует также ежемесячные и окончательные сводные данные о ПВЗ, однако они не имеют статуса официальных ежемесячных и окончательных данных MCB3.

В настоящее время данные о ПВЗ выдаются с суточным шагом, а для получения внутрисуточных значений (для ГНСС применений) интерполируются в соответствии с процедурой, утверждённой стандартами MCB3 – IERS Conventions.

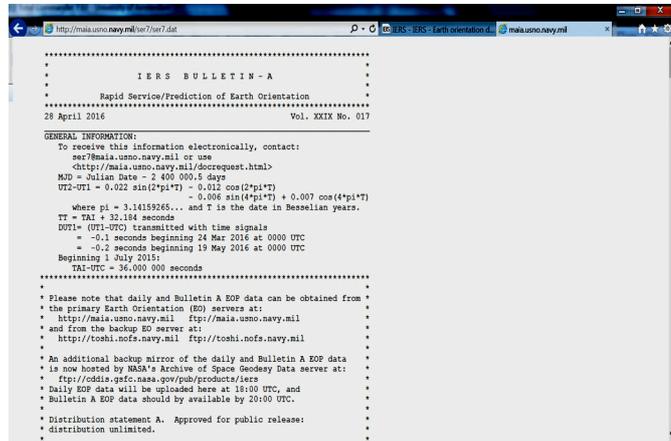


Рис. 13. Еженедельный Бюллетень А MCB3

За менее оперативную информацию отвечает Центр определения ПВЗ Центрального бюро МСВЗ (Earth's Orientation Center). Он формирует официальные ежемесячные данные о ПВЗ МСВЗ – Бюллетень Б (Bulletin B). Он изображён на следующем рисунке 14.

BULLETIN B 339
1 May 2016

Contents are described in ftp://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulb_new/bulletinb.pdf

1 - DAILY FINAL VALUES OF $x, y, UT1-UTC, dx, dy$
Angular unit is milliarcsecond (mas), time unit is millisecond (ms).
Upgraded solution from February 1 2011 - consistent with ITRF 2008.

| DATE (0 h UTC) | MJD | x mas | y mas | UT1-UTC ms | dx mas | dy mas | x err mas | y err mas | UT1 err ms | X err mas | Y err mas |
|-------------------|-----|----------|----------|---------------|-----------|-----------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|
| Final values | | | | | | | | | | | |
| Mean formal error | | 0.041 | 0.036 | 0.0053 | 0.025 | 0.023 | | | | | |
| 2016 | 3 | 2 | 57449 | -24.691 | 355.899 | -21.9964 | -0.115 | -0.088 | 0.042 | 0.036 | 0.0043 |
| 2016 | 3 | 3 | 57450 | -23.998 | 357.830 | -23.6932 | -0.105 | -0.091 | 0.042 | 0.036 | 0.0043 |
| 2016 | 3 | 4 | 57451 | -23.638 | 360.187 | -25.4431 | -0.095 | -0.096 | 0.042 | 0.036 | 0.0042 |
| 2016 | 3 | 5 | 57452 | -23.781 | 362.636 | -27.2362 | -0.039 | 0.015 | 0.042 | 0.037 | 0.0042 |
| 2016 | 3 | 6 | 57453 | -23.651 | 365.026 | -29.2110 | -0.027 | -0.020 | 0.043 | 0.037 | 0.0042 |
| 2016 | 3 | 7 | 57454 | -24.020 | 367.582 | -31.3863 | -0.013 | -0.055 | 0.043 | 0.037 | 0.0042 |
| 2016 | 3 | 8 | 57455 | -24.452 | 370.044 | -33.5662 | -0.003 | -0.090 | 0.043 | 0.037 | 0.0042 |
| 2016 | 3 | 9 | 57456 | -24.840 | 372.516 | -35.9203 | -0.006 | -0.083 | 0.043 | 0.036 | 0.0043 |
| 2016 | 3 | 10 | 57457 | -25.099 | 374.925 | -38.3632 | -0.013 | -0.065 | 0.043 | 0.036 | 0.0044 |
| 2016 | 3 | 11 | 57458 | -25.071 | 377.066 | -40.8584 | -0.020 | -0.048 | 0.043 | 0.036 | 0.0045 |
| 2016 | 3 | 12 | 57459 | -25.172 | 378.945 | -43.2780 | -0.027 | -0.030 | 0.043 | 0.036 | 0.0047 |
| 2016 | 3 | 13 | 57460 | -25.264 | 380.833 | -45.5811 | -0.035 | -0.012 | 0.043 | 0.036 | 0.0048 |
| 2016 | 3 | 14 | 57461 | -24.788 | 382.602 | -47.7513 | -0.042 | 0.005 | 0.043 | 0.037 | 0.0049 |
| 2016 | 3 | 15 | 57462 | -24.001 | 384.767 | -49.7722 | -0.049 | 0.023 | 0.043 | 0.037 | 0.0051 |
| 2016 | 3 | 16 | 57463 | -22.790 | 387.138 | -51.6443 | -0.057 | 0.045 | 0.043 | 0.037 | 0.0052 |
| 2016 | 3 | 17 | 57464 | -20.843 | 389.451 | -53.4764 | -0.066 | 0.069 | 0.043 | 0.037 | 0.0054 |
| 2016 | 3 | 18 | 57465 | -18.330 | 392.012 | -55.2905 | -0.075 | 0.093 | 0.042 | 0.037 | 0.0056 |
| 2016 | 3 | 19 | 57466 | -16.086 | 394.478 | -57.1464 | -0.097 | 0.074 | 0.042 | 0.037 | 0.0059 |
| 2016 | 3 | 20 | 57467 | -14.473 | 396.973 | -59.0904 | -0.124 | 0.040 | 0.042 | 0.037 | 0.0060 |
| 2016 | 3 | 21 | 57468 | -13.668 | 399.507 | -61.1074 | -0.151 | 0.005 | 0.042 | 0.037 | 0.0062 |
| 2016 | 3 | 22 | 57469 | -13.496 | 402.064 | -63.1844 | -0.178 | -0.029 | 0.041 | 0.037 | 0.0063 |
| 2016 | 3 | 23 | 57470 | -13.649 | 404.403 | -65.2904 | -0.204 | 0.013 | 0.041 | 0.037 | 0.0064 |
| 2016 | 3 | 24 | 57471 | -13.656 | 406.397 | -67.3380 | -0.227 | 0.194 | 0.040 | 0.037 | 0.0064 |
| 2016 | 3 | 25 | 57472 | -13.268 | 408.432 | -69.3414 | -0.216 | 0.161 | 0.040 | 0.037 | 0.0064 |
| 2016 | 3 | 26 | 57473 | -12.630 | 410.453 | -71.3826 | -0.205 | 0.127 | 0.040 | 0.037 | 0.0064 |
| 2016 | 3 | 27 | 57474 | -11.832 | 412.654 | -73.3909 | -0.194 | 0.094 | 0.040 | 0.037 | 0.0063 |
| 2016 | 3 | 28 | 57475 | -11.104 | 414.514 | -75.3360 | -0.183 | 0.060 | 0.040 | 0.037 | 0.0062 |
| 2016 | 3 | 29 | 57476 | -10.242 | 416.353 | -77.1739 | -0.172 | 0.027 | 0.040 | 0.037 | 0.0061 |
| 2016 | 3 | 30 | 57477 | -9.340 | 418.021 | -78.9548 | -0.161 | -0.007 | 0.040 | 0.037 | 0.0059 |
| 2016 | 3 | 31 | 57478 | -8.700 | 419.752 | -80.7071 | -0.135 | 0.012 | 0.040 | 0.037 | 0.0058 |

Рис. 14. Ежемесячный Бюллетень Б МСВЗ

Также Центр определения ПВЗ Центрального бюро МСВЗ формирует международные принятые опорные данные о ПВЗ – ряд EOP (IERS) 08 C04 в различных модификациях (см. рис. 15).

INTERNATIONAL EARTH ORIENTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE
EARTH ORIENTATION PARAMETERS
EOP (IERS) 08 C04

FORMER (3:14), 17, 2 (P11.6), 2 (P12.7), 2 (P11.6), 2 (P11.7), 2 (P12.6)

| Date (0h UTC) | MJD | x " | y " | UT1-UTC s | LOD s | dx mas | dy mas | x Err mas | y Err mas | UT1-UTC Err ms | LOD Err ms | dx Err mas | dy Err mas |
|------------------|-----|--------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| 2016 | 1 | 57388 | 0.281191 | 0.284749 | 0.0815228 | 0.0019355 | -0.000224 | 0.000041 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000051 | 0.0000175 | 0.000030 |
| 2016 | 1 | 57389 | 0.284883 | 0.287338 | 0.0796106 | 0.0019278 | -0.000202 | 0.000015 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000049 | 0.0000174 | 0.000029 |
| 2016 | 1 | 57390 | 0.287083 | 0.291451 | 0.0776975 | 0.0019223 | -0.000179 | 0.000042 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000047 | 0.0000173 | 0.000027 |
| 2016 | 1 | 57391 | 0.2845709 | 0.288473 | 0.0757503 | 0.0019378 | -0.000157 | -0.000039 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000045 | 0.0000173 | 0.000027 |
| 2016 | 1 | 57392 | 0.284144 | 0.291158 | 0.0738391 | 0.0019595 | -0.000134 | -0.000065 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000045 | 0.0000173 | 0.000026 |
| 2016 | 1 | 57393 | 0.282275 | 0.281823 | 0.0719549 | 0.0019749 | -0.000116 | -0.000122 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000045 | 0.0000174 | 0.000025 |
| 2016 | 1 | 57394 | 0.280642 | 0.263779 | 0.0700883 | 0.0018212 | -0.000098 | -0.000167 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000047 | 0.0000176 | 0.000024 |
| 2016 | 1 | 57395 | 0.282552 | 0.262033 | 0.0682662 | 0.0017627 | -0.000081 | -0.000252 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000049 | 0.0000178 | 0.000023 |
| 2016 | 1 | 57396 | 0.287983 | 0.267151 | 0.0663816 | 0.0017625 | -0.000097 | -0.000220 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000052 | 0.0000179 | 0.000022 |
| 2016 | 1 | 57397 | 0.285903 | 0.268943 | 0.0647975 | 0.0017983 | -0.000125 | -0.000150 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000055 | 0.0000180 | 0.000022 |
| 2016 | 1 | 57398 | 0.282426 | 0.270522 | 0.0629649 | 0.0018802 | -0.000153 | -0.000081 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000058 | 0.0000181 | 0.000021 |
| 2016 | 1 | 57399 | 0.282745 | 0.272336 | 0.0612219 | 0.0019886 | -0.000184 | -0.000053 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000059 | 0.0000182 | 0.000021 |
| 2016 | 1 | 57400 | 0.281081 | 0.274414 | 0.0594849 | 0.0021079 | -0.000216 | -0.000143 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000059 | 0.0000183 | 0.000020 |
| 2016 | 1 | 57401 | 0.282927 | 0.275802 | 0.0578573 | 0.0022039 | -0.000211 | -0.000140 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000057 | 0.0000177 | 0.000020 |
| 2016 | 1 | 57402 | 0.282849 | 0.278683 | 0.0561850 | 0.0022971 | -0.000211 | -0.000139 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000058 | 0.0000176 | 0.000019 |

INTERNATIONAL EARTH ORIENTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE
EARTH ORIENTATION PARAMETERS
EOP (IERS) 08 C04

FORMER (3:14), 17, 2 (P11.6), 2 (P12.7), 2 (P11.6), 2 (P11.7), 2 (P12.6)

| Date (0h UTC) | MJD | x " | y " | UT1-UTC s | LOD s | dpsi mas | dssps mas | x Err mas | y Err mas | UT1-UTC Err ms | LOD Err ms | dpsi Err mas | dssps Err mas |
|------------------|-----|--------|-----------|--------------|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------------|---------------|-----------------|------------------|
| 2016 | 1 | 57388 | 0.281191 | 0.284749 | 0.0815228 | 0.0019355 | -0.000224 | 0.000041 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000051 | 0.0000175 | 0.000076 |
| 2016 | 1 | 57389 | 0.284883 | 0.287338 | 0.0796106 | 0.0019278 | -0.000202 | 0.000015 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000049 | 0.0000174 | 0.000073 |
| 2016 | 1 | 57390 | 0.287083 | 0.291451 | 0.0776975 | 0.0019223 | -0.000179 | 0.000042 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000047 | 0.0000173 | 0.000070 |
| 2016 | 1 | 57391 | 0.2845709 | 0.288473 | 0.0757503 | 0.0019378 | -0.000157 | -0.000039 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000045 | 0.0000173 | 0.000068 |
| 2016 | 1 | 57392 | 0.284144 | 0.291158 | 0.0738391 | 0.0019595 | -0.000134 | -0.000065 | 0.000042 | 0.000036 | 0.0000045 | 0.0000173 | 0.000066 |
| 2016 | 1 | 57393 | 0.282275 | 0.281823 | 0.0719549 | 0.0019749 | -0.000116 | -0.000122 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000045 | 0.0000174 | 0.000065 |
| 2016 | 1 | 57394 | 0.280642 | 0.263779 | 0.0700883 | 0.0018212 | -0.000098 | -0.000167 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000047 | 0.0000176 | 0.000064 |
| 2016 | 1 | 57395 | 0.282552 | 0.262033 | 0.0682662 | 0.0017627 | -0.000081 | -0.000252 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000049 | 0.0000178 | 0.000063 |
| 2016 | 1 | 57396 | 0.287983 | 0.267151 | 0.0663816 | 0.0017625 | -0.000097 | -0.000220 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000052 | 0.0000179 | 0.000062 |
| 2016 | 1 | 57397 | 0.285903 | 0.268943 | 0.0647975 | 0.0017983 | -0.000125 | -0.000150 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000055 | 0.0000180 | 0.000061 |
| 2016 | 1 | 57398 | 0.282426 | 0.270522 | 0.0629649 | 0.0018802 | -0.000153 | -0.000081 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000058 | 0.0000181 | 0.000060 |
| 2016 | 1 | 57399 | 0.282745 | 0.272336 | 0.0612219 | 0.0019886 | -0.000184 | -0.000053 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000059 | 0.0000182 | 0.000059 |
| 2016 | 1 | 57400 | 0.281081 | 0.274414 | 0.0594849 | 0.0021079 | -0.000216 | -0.000143 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000059 | 0.0000183 | 0.000058 |
| 2016 | 1 | 57401 | 0.282927 | 0.275802 | 0.0578573 | 0.0022039 | -0.000211 | -0.000140 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000057 | 0.0000177 | 0.000057 |
| 2016 | 1 | 57402 | 0.282849 | 0.278683 | 0.0561850 | 0.0022971 | -0.000211 | -0.000139 | 0.000043 | 0.000036 | 0.0000058 | 0.0000176 | 0.000056 |

Рис. 15. Принятые опорные значения ПВЗ МСВЗ (окончательные значения серия EOP (IERS) 08 C04) в виде с координатами небесного полюса (вверху) и в виде с поправками к углам нутации MАС1980 (внизу)

Кроме того, Центр определения ПВЗ Центрального бюро МСВЗ предоставляет потребителям доступ к ещё двум важным видам информации о ПВЗ: Бюллетеню Ц (Bulletin C) и Бюллетеню Д (Bulletin D) (см. рисунок 16). Первый бюллетень публикуется в первых числах первого (третьего) квартала и сообщает о том, что дополнительная («скачущая») секунда будет или не будет вводиться в шкалу Всемирного координированного времени (ВКВ, UTC) в конце второго (четвёртого) квартала календарного года из даты выпуска бюллетеня.

Второй из них, Бюллетень Д (Bulletin D), публикует информацию, необходимую для передачи величины *UTI-UTC* в закодированном виде в составе радиосигналов, позволяющих определять эту величину с погрешностью, не превосходящей $\pm 0,1$ секунды времени.

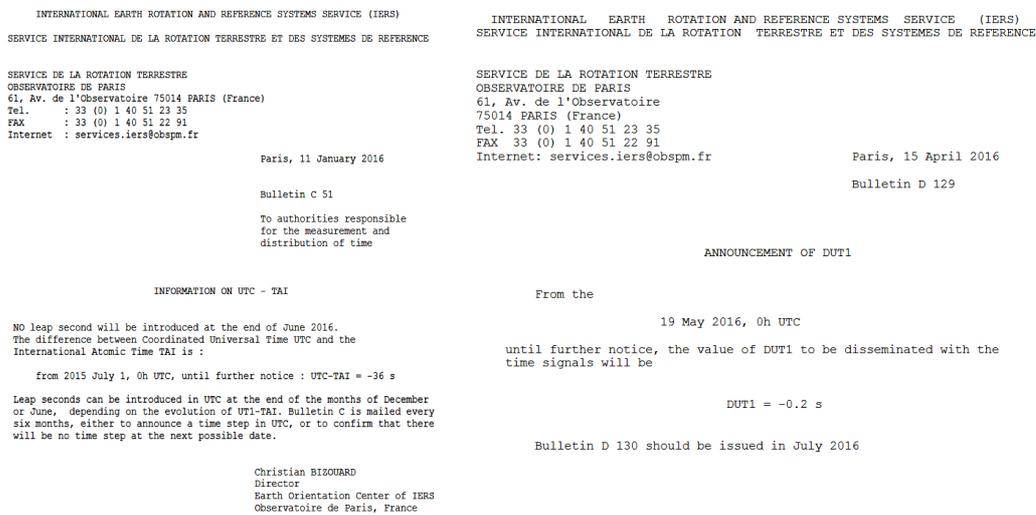


Рис. 16. Бюллетень Ц (Bulletin C, слева) и Бюллетень Д (Bulletin D, справа) МСВЗ

3.4. Особые бюро по учёту влияния геофизических флюидов

В отдельную группу выделены сравнительно недавно созданные особые бюро по учёту влияния геофизических флюидов на вращение Земли. Их выходными данными являются функции эффективного углового момента атмосферы, океанов и гидрологической составляющей соответственно. Эти бюро пока функционируют в экспериментальном режиме. Их данные пред-

назначены для повышения точности прогнозирования ПВЗ.

4. Национальная служба вращения Земли

В России ответственность за решение задач по установлению и поддержанию отсчётных основ и оперативному определению ПВЗ распределена между различными министерствами и ведомствами:

– согласно Постановлению Правительства РФ № 1463 от 28.12.2012 и № 323 установление и поддержание ЗСК возложено на Росреестр (в картографической части) и Минобороны России (в части навигации);

– согласно Постановлениям Правительства № 225 от 23.03.2001 и 323 от 30.04.2008 руководство работами по определению ПВЗ возложено на Росстандарт.

Согласно Постановлению Правительства № 225 от 23.03.2001, Росстандарт осуществляет руководство Государственной службой времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), которая была создана для объединения усилий по осуществлению деятельности по непрерывному воспроизведению, хранению и распространению значений времени, частоты и определению ПВЗ большого числа организаций и институтов различной ведомственной принадлежности (Роскосмоса, Минобороны, Росстандарта, Росреестра, Минобрнауки, Минсвязи и др.).

Такое межведомственное распределение задач обуславливает различие структуры МСВЗ (рис. 10) и службы определения ПВЗ ГСВЧ (рис. 17).

ПВЗ необходимы во множестве областей научной и хозяйственной деятельности, таких как наземная и космическая геодезия, аэрокосмические съемки, картографирование; космическая, воздушная, наземная и морская навигация; метеорология; 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.

Наиболее высокие требования к информации о ПВЗ, и в особенности – к оперативности и надежности обеспечения данными, предъявляет ГЛОНАСС.

Фундаментальные научные исследования, использующие ПВЗ, – это определение координат небесных объектов, геодинамика, изучение внутреннего строения Земли, геофизических явлений и их влияния на процессы,

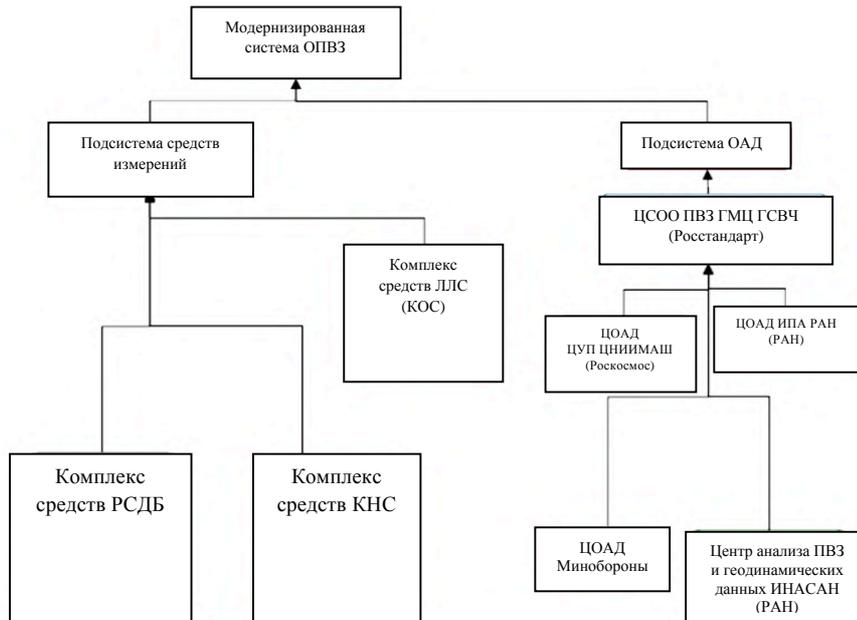


Рис. 17. Структурная схема службы определения ПВЗ ГСВЧ

происходящие на поверхности Земли и в окружающем пространстве; динамика атмосферы, суши, океанов и ледников; исследования физических полей Земли.

4.1. Определение ПВЗ для целей службы времени

До изобретения высокоточных атомных стандартов частоты вращения Земли было наиболее равномерным процессом на суточном интервале. Поэтому долгое время наблюдения за ним использовались для целей службы времени.

История отечественной службы времени начинается с 1827 года, когда Петербургская Академия наук приняла решение о создании Николаевской астрономической обсерватории (ныне Пулковской – Главной астрономической обсерватории Российской академии наук – ГАО РАН). Это решение было одобрено императором Николаем I, который самолично указал место на вершине Пулковской горы, на которой и были воздвигнуты здания новой обсерватории (см. рис. 18). Эти, а также ряд последующих фотографий, взяты из [3].

Время воспроизводилось с помощью астрооптических инструментов, а хранилось с помощью высокоточных астрономических часов (см. рис. 19).

(Согласно ГОСТ 8.567-99, хранение времени – это действия, выполняемые для определения времени в избранной шкале времени с заданной точностью; а воспроизведение времени – воспроизведение частоты (или ряда частот) заданного размера и (или) формирования шкалы времени с нормированными метрологическими характеристиками).

Временем России являлось среднее солнечное время на Пулковском меридиане (меридиан, проходящий через центр Круглого зала главного здания Пулковской обсерватории и расположенный в $30^{\circ}19'34''$ к востоку от Гринвичского меридиана (он отмечен геодезическим маркером см. рис. 20).



Рис. 18. Император Николай I (слева) и главное здание Николаевской (ныне Пулковской, или Главной) астрономической обсерватории на Пулковской горе (справа, фото второй половины XIX века) [3]

До начала XX века он использовался в качестве нулевого меридиана для отсчёта географических долгот на картах Российской империи).

Точное время передавали из Пулковской обсерватории к часам Главной Петербургской телеграфной конторы (см. рис. 21), с часами которой сверялось время во всех телеграфных учреждениях России, и к часам Петропавловской крепости.

Местное время в городах равнялось среднему солнечному времени Пулковской обсерватории, полученному по телеграфу, с учётом разности географической долготы места и географической долготы Пулковского меридиана.

С развитием железных дорог на железных дорогах было введено единое Петербургское время, которое определялось как среднее солнечное время

Царскосельского вокзала в Санкт-Петербурге и устанавливалось по данным Пулковской обсерватории, с учётом незначительной разности долгот.



Рис. 19. Большой пассажный инструмент Струве-Эртеля (слева вверху), астрономические часы (справа вверху) и нынешний вид главного здания Пулковской обсерватории [3]

После революции работами служб времени руководил Комитет времени ГАО РАН вплоть до середины 1941 года [5]. В военные годы эту роль выполняла служба времени ГАИШ МГУ, а в послевоенные годы, в разное время – службы времени ГАИШ МГУ и ЦНИИГАиК. С 1949 года эта роль перешла к ЦНИБ (Центральному научно-исследовательскому бюро единой службы времени), на базе которого впоследствии образовался ФГУП «ВНИИФТРИ». В настоящее время в рамках службы ГСВЧ на ФГУП «ВНИИФТРИ» возложено исполнение функций Главного метрологического центра ГСВЧ (ГМЦ ГСВЧ).



Рис. 20. Геодезический маркер Пулковской обсерватории [3]



Рис. 21. Телеграфный аппарат Морзе (слева) и аппаратный зал Главной Петербургской телеграфной конторы (справа), <http://rzd-expo.ru/history/Telegraf/>

Согласно Постановлению правительства РФ №225 от 23.03.2001, значения времени, частоты и ПВЗ, формируемые в ГМЦ ГСВЧ, являются офици-

льными и обязательны к использованию на территории Российской Федерации.

Очень подробно послереволюционная история службы времени рассматривается в статье [4], которая доступна также в электронном виде на Интернет-странице http://pvz.vniiftri.ru/history_1972.php.

Работы по определению ПВЗ в ЦНИБ, а затем и во ФГУП «ВНИИФТРИ» возглавил Д.Ю. Белоцерковский. В текущем 2016 году исполняется 100 лет со дня его рождения. В ЦНИБ Д.Ю. Белоцерковский пришёл в 1949 году после обучения в аспирантуре Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии (МИИГАиК) и успешной защиты кандидатской диссертации. Он работал в ЦНИБ в 1949–1954 гг., а после реорганизации ЦНИБ – в подразделении времени и частоты ФГУП «ВНИИФТРИ» в 1955–1990 гг.

Д.Ю. Белоцерковский руководил работами по астрономическим определениям всемирного времени, включая совершенствование технических средств наблюдений и методов их математической обработки. Осуществлял методическое руководство совместной работой по астрономическим наблюдениям служб времени СССР и стран СЭВ с целью определения параметров вращения Земли. Был ответственным редактором официальных бюллетеней Госстандарта «Эталонное время», «Всемирное время и координаты полюса» (1953–1990), членом комиссии «Время» Международного астрономического союза. Он является автором более 80 научных работ по тематике службы времени и исследованиям неравномерности вращения Земли, награжден почетным знаком «За заслуги в стандартизации», медалью «Ветеран труда», ему присвоено звание «Ветеран труда ВНИИФТРИ».

Задача определения ПВЗ для целей службы времени сводилась к определению измерений неравномерностей вращения Земли и последующего их исключения для того, чтобы построить наиболее равномерную и стабильную шкалу времени. Шкалы всемирного времени – это общее наименование всех шкал времени, основанных на вращении Земли. В аббревиатуре это отражается наличием букв УТ.

По результатам обработки астрономических наблюдений строили шкалу Всемирного времени УТ0. Основными неравномерностями этой шкалы являются вариации из-за движения полюса (зависящие от широты и долготы места наблюдения) и сезонные составляющие. После учёта влияния движе-

ния земного полюса получали шкалу Всемирного времени UT1, которая характеризует вращение Земли в целом и не содержит широтно-долготной составляющей. А после исключения сезонных гармоник (годовой и полугодовой) получали шкалу Всемирного времени UT2.

4.2. Определение ПВЗ для координатно-временного и навигационного обеспечения

С запуском 4 октября 1957 года первого искусственного спутника Земли началась космическая эра, и задача определения ПВЗ приобрела еще одно важнейшее значение: ПВЗ стали определять, в том числе и для обеспечения полетов космических аппаратов. Определять стали не только Всемирное время, но и координаты полюса, а в настоящее время определяют полный набор ПВЗ: координаты земного полюса x_p и y_p , UT1-UTC и поправки к координатам небесного полюса теории МАС2000 dX и dY (или однозначно связанные с ними поправки к углам нутации $d\psi$ и $d\epsilon$ к углам $\Delta\psi$ и $\Delta\epsilon$ теории нутации МАС1980).

Кроме того, были изобретены высокоточные атомные стандарты частоты, которые, во-первых, позволили в сотни раз повысить стабильность национальной шкалы времени, а во-вторых, появились новые средства измерений, используемые для целей определения ПВЗ и основанные на использовании стандартов частоты (РСДБ, ГНСС, СЛД). Точность определения ПВЗ по результатам измерений с помощью этих средств в сотни раз превысила точность использовавшихся ранее астрооптических средств измерений. Поэтому сейчас ПВЗ используется, в основном, по прямому назначению – для определения связи ЗСК и НСК для всех практических задач, её использующих (см. последние три абзаца перед п. 4.1).

В отличие от задач службы времени, в которых из UT0 нужно было исключить влияние движения полюса и убрать все неравномерности вращения Земли, чтобы получить равномерную шкалу времени UT2, для целей координатного обеспечения необходимо, наоборот, как можно точнее определить все ПВЗ со всеми их неравномерностями.

Оперативное определение ПВЗ ведётся как по отдельным видам измерений (РСДБ, ГНСС, СЛД), так и по совокупности всех измерений. Английское название совместной обработки всех видов измерений *combination* дословно переводится на русский язык как *комбинирование*.

Для обработки результатов измерений отдельных видов в мире используется довольно широкий спектр программных пакетов. Например, для обработки РСДБ-измерений Международной РСДБ службой IVS рекомендованы пакеты программ CALC/SOLVE, MODEST, OCCAM, GLORIA, SteelBreeze, GEOSAT, VieVS, c5++. Ведущие центры обработки и анализа данных (ЦОАД) разрабатывают и используют также свои собственные пакеты программ.

Поскольку результаты одних и тех же измерений могут использоваться для решения различных задач, то каждый пакет по своей сути представляет собою набор программ, позволяющий решать все типы подзадач, которые при этом могут возникнуть. Поэтому необходимо такие пакеты приспособлять для целей ведения оперативной службы ПВЗ, что означает написание управляющей программы, которая должна готовить нужные входные данные для решения каждой из подзадач и последовательно запускать их на выполнение.

В настоящее время в ГМЦ ГСВЧ для обработки РСДБ-измерений используются два пакета: OCCAM и VieVs. Их модернизация для целей оперативной службы ПВЗ была проведена С.Л. Пасынком и М.Б. Кауфманом соответственно [5].

Кауфман Марк Борисович (1938-2014) – выпускник Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, ученик основоположника работ по определению ПВЗ во ФГУП «ВНИИФТРИ» Д.Ю. Белоцерковского. Марк Борисович полвека проработал во ВНИИФТРИ, награжден медалью «Ветеран труда» и знаком «За заслуги в стандартизации», является автором более 70 опубликованных научных работ. Марк Борисович вел научную и практическую работу по астрономическим наблюдениям с целью определений Всемирного времени и координат полюса. Он является соавтором фундаментального труда «Каталог звездных положений служб времени СССР» (1971), участвовал в разработке вероятностно-статистического метода вычислений параметров вращения Земли по данным наблюдений обсерваторий Государственной службы времени и частоты (1977), алгоритмов и программ комбинированной обработки астрономических, спутниковых и радиоинтерферометрических измерений с целью оперативного определения параметров вращения Земли. Марк Борисович занимался исследованиями теоретических и практических вопросов применения средств космических

навигационных систем для решения задач ГСВЧ, с 1990 по 2014 год он являлся ответственным редактором официального бюллетеня Росстандарта «Всемирное время и координаты полюса». Большинство программ обработки измерений для целей определения ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ разработаны и внедрены им.

Программы обработки РСДБ-измерений запускаются рано утром через планировщик, без участия оператора. Утром оператор приходит и начинает проверку результатов машинной обработки. Те сессии, результаты которых оказались не соответствующими ряду критериев или вообще не получились, оператор запускает на выполнение в интерактивном режиме. М.Б. Кауфман разработал визуальную оболочку, которая отображает данные для каждой станции на отдельных графиках и позволяет с помощью манипулятора «мышь» исключать часть измерений отдельной станции или отмечать места скачков хода часов, а также выбирать станцию, часы которой полагаются опорными. Результаты его выбора отображаются на перерисованных графиках. После того, как все параметры выбраны и результат оптимальный, происходит обработка измерений и определение ПВЗ. На рисунке 22 слева изображён вид окна управляющей программы, а справа изображены результаты обработки часовых сессий РСДБ-измерений.

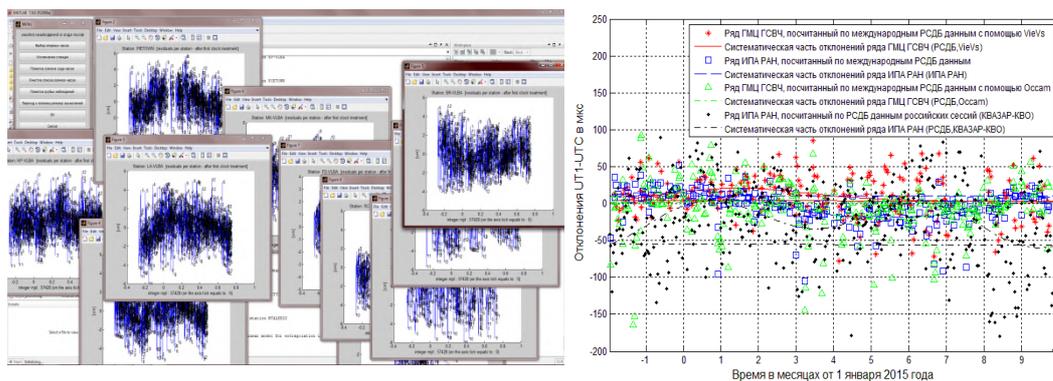


Рис. 22. Вид окна управляющей программы (слева) и результаты обработки часовых РСДБ-сессий (отклонения от международных опорных значений ряда EOP (IERS) 08 C04, справа)

Аналогично, для обработки спутниковых измерений существует несколько пакетов программ. В ГМЦ ГСВЧ для этой цели используется пакет про-

грамм Bernese GNSS Software, созданного в Астрономическом институте Бернского университета (Швейцария) [5]. Для обработки ГНСС измерений этот комплекс работает под управлением программы, разработанной М.Б. Кауфманом. Алгоритм базируется на так называемом методе точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning). Этот метод состоит в использовании безразностных фазовых измерений для решения навигационной задачи по известным точным координатам спутников и поправкам бортовых часов. Из сопоставления полученных текущих координат пунктов с их каталожными значениями определяют затем значения Всемирного времени и координат полюса.

Для обработки лазерных измерений научным сотрудником Е.Н. Цыбой был разработан программный комплекс, частично привлекающий некоторые данные из подпрограмм Bernese GNSS Software. Он предназначен для вычисления ПВЗ по данным лазерной локации ИСЗ (Lageos 1, Lageos 2). В нём для вычисления ПВЗ и определения и прогноза орбит используются модели и параметры, рекомендованные Международной службой вращения Земли и опорных систем отсчёта (МСВЗ-рус., IERS - англ.) и закреплённые в стандартах МСВЗ 2010 года (IERS Conventions (2010)).



Рис. 23. Блок-схема программного комплекса вычисления ПВЗ по данным спутниковой лазерной дальнометрии

Блок-схема программного комплекса представлена на рисунке 23.

В 2015 году этот программный комплекс был доработан его разработчиком в части автоматизации вычислений, а также в части совершенствования методов определения орбит наблюдаемых космических аппаратов [7]. Благодаря этому удалось добиться высокой точности получаемых результатов.

После экспериментальных вычислений в режиме службы с 15 мая 2015 года результаты определения ПВЗ по данным СЛД, полученные с помощью разработанного в ГМЦ ГСВЧ АПК, участвуют в совместной обработке всех данных о ПВЗ и вносят вклад в формируемые официальные данные о ПВЗ ГСВЧ.

Поскольку каждый из методов обладает своими случайными и систематическими погрешностями, то наиболее стабильными и устойчивыми в систематическом и случайном отношении являются ПВЗ, определённые в результате совместной обработки (комбинирования) всей совокупности измерений, проведенных с помощью всех методов. В настоящее время совместная обработка (комбинирование) с целью оперативного определения ПВЗ и у нас в стране и за рубежом [8] проводится на уровне временных рядов. Это означает, предполагает, что совместное решение ищется путем образования взвешенного среднего из отдельных рядов ПВЗ, полученных по различным видам измерения в различных ЦОАД. Совместная математическая обработка (комбинирование) независимых определений ПВЗ, полученных спутниковыми и РСДБ средствами, выполняется в настоящее время ГМЦ ГСВЧ с помощью программного комплекса и по методике, разработанных в 2006 г. М.Б. Кауфманом и введенных с 18 июля 2006 г. в эксплуатацию. Эта методика разработана с учетом все 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).

В настоящее время результирующие значения ПВЗ образуются путем комбинирования 9 независимых рядов, формируемых в ГМЦ ГСВЧ, ИПА РАН, ИАЦ КВНО и СВОЭВП. Список используемых рядов и технических средств приведен в таблице 5.

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.

Таблица 5

Источники данных определений ПВЗ в течение отчётного периода

| № | Центр вычислений | Технич. средства определений ПВЗ | Определяемые параметры | Измерительные пункты |
|---|------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| 1 | ГМЦ ГСВЧ | GPS | X, Y, UTI | Российские |
| 2 | ГМЦ ГСВЧ | РСДБ | $X, Y, UTI, d\psi, d\varepsilon$ | Зарубежные + 3 российск. |
| 3 | ГМЦ ГСВЧ | Лаз. локация ИСЗ | X, Y | В основном – зарубежн., с 15 мая 2015 года |
| 4 | ИПА РАН | Лаз. локация ИСЗ | X, Y, UTI | Зарубежные |
| 5 | ИПА РАН | GPS | X, Y, UTI | В основном – зарубежн. |
| 6 | ИПА РАН | РСДБ | $X, Y, UTI, d\psi, d\varepsilon$ | Зарубежные + 3 российск. |
| 7 | СВОЭВП | GPS/ГЛОНАСС | X, Y, UTI | Не сообщается |
| 8 | ИАЦ КВНО | Лаз. локация ИСЗ | X, Y | В основном – зарубежн. |
| 9 | ИАЦ КВНО | GPS | X, Y | В основном – зарубежн. |

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.

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:

- ежесуточно 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. В частности, данные РСДБ при определении оперативных значений ПВЗ не используются, т.к. результаты их измерений поступают в зарубежные базы данных с задержкой (иногда в 2–3 недели).

В течение года оценка точности вычисленных значений ПВЗ производилась по сходимости между собой суточных значений отдельных определений:

$$m_c = \sqrt{\frac{\sum_j p_j v_j^2}{n \sum p_j}} \quad , \quad (4.1)$$

где j обозначает перечисленные в таблице 5 независимые ряды определений ПВЗ;

v_j – средние отклонения индивидуальных значений ПВЗ от средневзвешенных;

p_j – использованные при вычислениях веса, с которыми индивидуальные значения ПВЗ вошли в совместную обработку.

4.3. Виды информации о ПВЗ ГСВЧ

На основе полученных с помощью оперативной совместной обработки (комбинирования) оперативных значений ПВЗ формируются различные виды выходных данных ГСВЧ с информацией о ПВЗ. Виды и форматы бюллетеней с информацией о ПВЗ ГСВЧ регламентируются организационной структурой, утверждаемой Росстандартом, а также соответствующими про-

токолами информационно-логического взаимодействия. В настоящее время формируются следующие виды бюллетеней. Бюллетени формируются в Главном метеорологическом центре ГСВЧ (ГМЦ ГСВЧ), на который эта обязанность возложена Постановлением правительства РФ № 225.

Ежесуточный бюллетень Q формируется каждый день до 10 часов утра по московскому времени. Он включает в себя значения координат земного полюса и *UT1-UTC*, посчитанные по измерениям за сутки, предшествующие суткам выхода бюллетеня и прогноз на 30 суток. Такой же бюллетень формируется для углов нутации, за тем исключением, что вместо измеренного за предшествующие сутки значения он включает, как правило, прогноз значения поправок к углам нутации. Это обусловлено тем, что сессии РСДБ-измерений, направленные на измерение углов нутации, не проводятся ежесуточно. Бюллетень Q (см. рис. 24) по оперативности соответствует бюллетеню MCV3 finals.daily (см. рис. 12).

| | | | | | | | | | |
|---|-------|----------|--------|--------|---|-------|-----------|-----------|--|
| ГЛАВНЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли | | | | | ГЛАВНЫЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли | | | | |
| ВСЕМИРНОЕ ВРЕМЯ И КООРДИНАТЫ ПОЛЮСА ===== (оперативный бюллетень No 100/2016) ----- | | | | | НУТАЦИОННЫЕ УГЛЫ DPSI_1980 DEPS_1980 ===== (оперативный бюллетень No 100/2016) ----- | | | | |
| год/мес/чис | MJD | UT1-UTC | X | Y | год/мес/чис | MJD | DPSI | DEPS | |
| Измеренные значения (предварительные) | | | | | Предварительные значения (прогноз на 19 суток) | | | | |
| 16 04 09 | 57487 | -0.09965 | 0.0017 | 0.4370 | 16 04 09 | 57487 | -0.092047 | -0.013122 | |
| П р о г н о з | | | | | П р о г н о з | | | | |
| 16 04 10 | 57488 | -0.10182 | 0.0033 | 0.4394 | 16 04 10 | 57488 | -0.092043 | -0.013120 | |
| 16 04 11 | 57489 | -0.10380 | 0.0049 | 0.4420 | 16 04 11 | 57489 | -0.092039 | -0.013118 | |
| 16 04 12 | 57490 | -0.10550 | 0.0068 | 0.4442 | 16 04 12 | 57490 | -0.092035 | -0.013116 | |
| 16 04 13 | 57491 | -0.10710 | 0.0092 | 0.4461 | 16 04 13 | 57491 | -0.092031 | -0.013114 | |
| 16 04 14 | 57492 | -0.10870 | 0.0110 | 0.4481 | 16 04 14 | 57492 | -0.092027 | -0.013113 | |
| 16 04 15 | 57493 | -0.11039 | 0.0126 | 0.4494 | 16 04 15 | 57493 | -0.092023 | -0.013111 | |
| 16 04 16 | 57494 | -0.11219 | 0.0155 | 0.4507 | 16 04 16 | 57494 | -0.092019 | -0.013109 | |
| 16 04 17 | 57495 | -0.11409 | 0.0143 | 0.4520 | 16 04 17 | 57495 | -0.092014 | -0.013108 | |
| 16 04 18 | 57496 | -0.11606 | 0.0153 | 0.4532 | 16 04 18 | 57496 | -0.092010 | -0.013106 | |
| 16 04 19 | 57497 | -0.11812 | 0.0166 | 0.4545 | 16 04 19 | 57497 | -0.092005 | -0.013104 | |
| 16 04 20 | 57498 | -0.12011 | 0.0182 | 0.4558 | 16 04 20 | 57498 | -0.092001 | -0.013103 | |
| 16 04 21 | 57499 | -0.12221 | 0.0198 | 0.4572 | 16 04 21 | 57499 | -0.091996 | -0.013102 | |
| 16 04 22 | 57500 | -0.12423 | 0.0213 | 0.4599 | 16 04 22 | 57500 | -0.091992 | -0.013100 | |
| 16 04 23 | 57501 | -0.12627 | 0.0230 | 0.4606 | 16 04 23 | 57501 | -0.091987 | -0.013099 | |
| 16 04 24 | 57502 | -0.12818 | 0.0245 | 0.4621 | 16 04 24 | 57502 | -0.091982 | -0.013097 | |
| 16 04 25 | 57503 | -0.12991 | 0.0259 | 0.4636 | 16 04 25 | 57503 | -0.091977 | -0.013096 | |
| 16 04 26 | 57504 | -0.13161 | 0.0269 | 0.4650 | 16 04 26 | 57504 | -0.091972 | -0.013095 | |
| 16 04 27 | 57505 | -0.13331 | 0.0280 | 0.4663 | 16 04 27 | 57505 | -0.091967 | -0.013094 | |
| 16 04 28 | 57506 | -0.13498 | 0.0295 | 0.4688 | 16 04 28 | 57506 | -0.091962 | -0.013093 | |
| 16 04 29 | 57507 | -0.13668 | 0.0317 | 0.4708 | 16 04 29 | 57507 | -0.091957 | -0.013091 | |
| 16 04 30 | 57508 | -0.13879 | 0.0345 | 0.4726 | 16 04 30 | 57508 | -0.091952 | -0.013090 | |
| 16 05 01 | 57509 | -0.14074 | 0.0380 | 0.4744 | 16 05 01 | 57509 | -0.091947 | -0.013089 | |
| 16 05 02 | 57510 | -0.14291 | 0.0418 | 0.4761 | 16 05 02 | 57510 | -0.091942 | -0.013088 | |
| 16 05 03 | 57511 | -0.14524 | 0.0453 | 0.4776 | 16 05 03 | 57511 | -0.091937 | -0.013087 | |
| 16 05 04 | 57512 | -0.14771 | 0.0481 | 0.4792 | 16 05 04 | 57512 | -0.091931 | -0.013086 | |
| 16 05 05 | 57513 | -0.15026 | 0.0505 | 0.4805 | 16 05 05 | 57513 | -0.091926 | -0.013086 | |
| 16 05 06 | 57514 | -0.15272 | 0.0526 | 0.4815 | 16 05 06 | 57514 | -0.091921 | -0.013085 | |
| 16 05 07 | 57515 | -0.15500 | 0.0544 | 0.4825 | 16 05 07 | 57515 | -0.091915 | -0.013084 | |
| 16 05 08 | 57516 | -0.15709 | 0.0562 | 0.4835 | 16 05 08 | 57516 | -0.091910 | -0.013083 | |
| 16 05 09 | 57517 | -0.15902 | 0.0580 | 0.4848 | 16 05 09 | 57517 | -0.091904 | -0.013083 | |

Рис. 24. Ежесуточные бюллетени Q ГСВЧ со всемирным временем и координатами земного полюса (слева) и с поправками к углам нутации теории MAC1980 (справа)

Еженедельный бюллетень А ГСВЧ (см. рис. 25) со Всемирным временем и координатами земного полюса выпускается в электронном и печатном видах, а с углами нутации – только в электронном виде. Он формируется еженедельно до 10 часов утра по московскому времени. По оперативности он аналогичен бюллетеню А МСВЗ. Он содержит значения ПВЗ, определённые за истёкшую неделю ГСВЧ (она начинается в календарный вторник и оканчивается в календарный понедельник), а также прогноз на последующие 7 недель с недельным шагом (т.е. на последующие за концом недели 7 понедельников).

Ежемесячно выходит также в двух формах (с поправками к углам нутации и без них) вторая часть бюллетеня А (см. рис. 26), которая содержит ежемесячные данные о ПВЗ ГСВЧ. По оперативности она соответствует бюллетеню Б МСВЗ (Bulletin В, см. рис. 14).

Бюллетеня, аналогичного бюллетеню МСВЗ ЕОР (IERS) 08 С04 (см. рис. 15), ГМЦ ГСВЧ не формирует. Это связано с тем, что значения ПВЗ бюллетеня МСВЗ ЕОР (IERS) 08 С04 имеют статус окончательных опорных данных МСВЗ, и именно его значения должны использоваться для метрологических оценок точности.

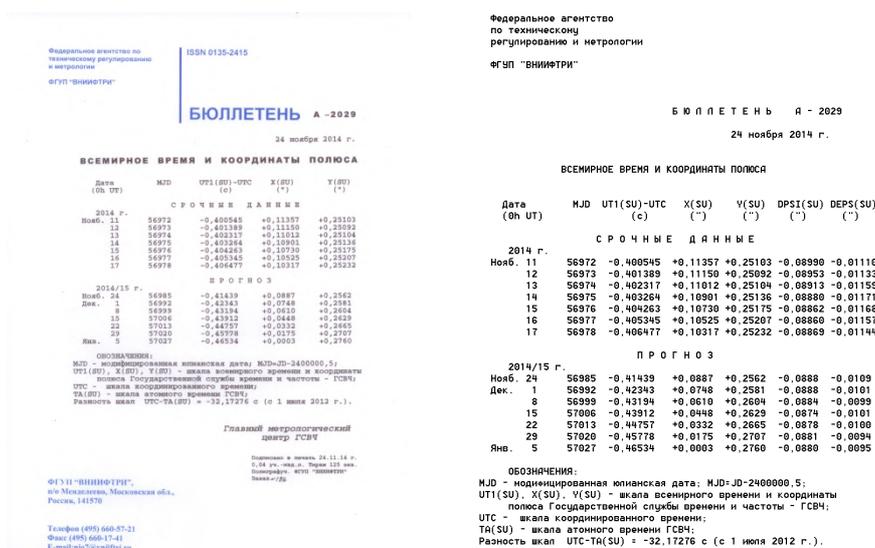


Рис. 25. Еженедельные бюллетени А ГСВЧ со Всемирным временем и координатами земного полюса в печатном виде (слева) и с поправками к углам нутации теории МАС1980 в электронном виде (справа)

| А - 2106 | | | | | А - 2106 | | | | | | |
|-------------------------------------|-------|--------------------|--------------|--------------|-------------------------------------|-------|--------------------|--------------|--------------|-----------------|------------------|
| ВСЕМИРНОЕ ВРЕМЯ И КООРДИНАТЫ ПОЛЮСА | | | | | ВСЕМИРНОЕ ВРЕМЯ И КООРДИНАТЫ ПОЛЮСА | | | | | | |
| (окончательные данные) | | | | | (окончательные данные) | | | | | | |
| Дата (оп. UT) 2016 г. | МJD | UT1(SU)-UTC (с) | X(SU) (") | Y(SU) (") | Дата (оп. UT) 2016 г. | МJD | UT1(SU)-UTC (с) | X(SU) (") | Y(SU) (") | DPS1(SU) (") | DEPS1(SU) (") |
| Март 1 | 57448 | -0,020418 | -0,02514 | +0,35432 | Март 1 | 57448 | -0,020418 | -0,02514 | +0,35432 | -0,09444 | -0,01197 |
| 2 | 57449 | -0,021377 | -0,02501 | +0,35536 | 2 | 57449 | -0,021377 | -0,02501 | +0,35536 | -0,09449 | -0,01193 |
| 3 | 57450 | -0,022301 | -0,02438 | +0,35774 | 3 | 57450 | -0,022301 | -0,02438 | +0,35774 | -0,09456 | -0,01172 |
| 4 | 57451 | -0,022384 | -0,02408 | +0,36007 | 4 | 57451 | -0,022384 | -0,02408 | +0,36007 | -0,09384 | -0,01147 |
| 5 | 57452 | -0,022295 | -0,02409 | +0,36253 | 5 | 57452 | -0,022295 | -0,02409 | +0,36253 | -0,09355 | -0,01141 |
| 6 | 57453 | -0,022164 | -0,02404 | +0,36490 | 6 | 57453 | -0,022164 | -0,02404 | +0,36490 | -0,09363 | -0,01163 |
| 7 | 57454 | -0,031177 | -0,02432 | +0,36742 | 7 | 57454 | -0,031177 | -0,02432 | +0,36742 | -0,09381 | -0,01198 |
| 8 | 57455 | -0,033554 | -0,02482 | +0,36991 | 8 | 57455 | -0,033554 | -0,02482 | +0,36991 | -0,09385 | -0,01211 |
| 9 | 57456 | -0,035325 | -0,02513 | +0,37236 | 9 | 57456 | -0,035325 | -0,02513 | +0,37236 | -0,09272 | -0,01168 |
| 10 | 57457 | -0,038328 | -0,02545 | +0,37477 | 10 | 57457 | -0,038328 | -0,02545 | +0,37477 | -0,09236 | -0,01166 |
| 11 | 57458 | -0,040861 | -0,02548 | +0,37693 | 11 | 57458 | -0,040861 | -0,02548 | +0,37693 | -0,09238 | -0,01161 |
| 12 | 57459 | -0,042287 | -0,02546 | +0,37862 | 12 | 57459 | -0,042287 | -0,02546 | +0,37862 | -0,09275 | -0,01176 |
| 13 | 57460 | -0,045601 | -0,02550 | +0,38064 | 13 | 57460 | -0,045601 | -0,02550 | +0,38064 | -0,09316 | -0,01195 |
| 14 | 57461 | -0,047773 | -0,02506 | +0,38255 | 14 | 57461 | -0,047773 | -0,02506 | +0,38255 | -0,09333 | -0,01212 |
| 15 | 57462 | -0,049827 | -0,02422 | +0,38412 | 15 | 57462 | -0,049827 | -0,02422 | +0,38412 | -0,09320 | -0,01230 |
| 16 | 57463 | -0,051733 | -0,02298 | +0,38709 | 16 | 57463 | -0,051733 | -0,02298 | +0,38709 | -0,09296 | -0,01247 |
| 17 | 57464 | -0,053551 | -0,02100 | +0,38934 | 17 | 57464 | -0,053551 | -0,02100 | +0,38934 | -0,09280 | -0,01257 |
| 18 | 57465 | -0,055349 | -0,01859 | +0,39182 | 18 | 57465 | -0,055349 | -0,01859 | +0,39182 | -0,09274 | -0,01259 |
| 19 | 57466 | -0,057180 | -0,01646 | +0,39429 | 19 | 57466 | -0,057180 | -0,01646 | +0,39429 | -0,09267 | -0,01262 |
| 20 | 57467 | -0,059150 | -0,01497 | +0,39681 | 20 | 57467 | -0,059150 | -0,01497 | +0,39681 | -0,09253 | -0,01266 |
| 21 | 57468 | -0,061267 | -0,01407 | +0,39939 | 21 | 57468 | -0,061267 | -0,01407 | +0,39939 | -0,09236 | -0,01270 |
| 22 | 57469 | -0,063259 | -0,01381 | +0,40195 | 22 | 57469 | -0,063259 | -0,01381 | +0,40195 | -0,09227 | -0,01266 |
| 23 | 57470 | -0,065349 | -0,01385 | +0,40434 | 23 | 57470 | -0,065349 | -0,01385 | +0,40434 | -0,09234 | -0,01256 |
| 24 | 57471 | -0,067379 | -0,01391 | +0,40632 | 24 | 57471 | -0,067379 | -0,01391 | +0,40632 | -0,09237 | -0,01254 |
| 25 | 57472 | -0,069392 | -0,01290 | +0,40837 | 25 | 57472 | -0,069392 | -0,01290 | +0,40837 | -0,09248 | -0,01263 |
| 26 | 57473 | -0,071421 | -0,01290 | +0,41037 | 26 | 57473 | -0,071421 | -0,01290 | +0,41037 | -0,09263 | -0,01276 |
| 27 | 57474 | -0,073439 | -0,01211 | +0,41250 | 27 | 57474 | -0,073439 | -0,01211 | +0,41250 | -0,09331 | -0,01287 |
| 28 | 57475 | -0,075391 | -0,01138 | +0,41451 | 28 | 57475 | -0,075391 | -0,01138 | +0,41451 | -0,09345 | -0,01298 |
| 29 | 57476 | -0,077230 | -0,01057 | +0,41635 | 29 | 57476 | -0,077230 | -0,01057 | +0,41635 | -0,09364 | -0,01311 |
| 30 | 57477 | -0,078967 | -0,00966 | +0,41792 | 30 | 57477 | -0,078967 | -0,00966 | +0,41792 | -0,09359 | -0,01324 |
| 31 | 57478 | -0,080726 | -0,00905 | +0,41964 | 31 | 57478 | -0,080726 | -0,00905 | +0,41964 | -0,09318 | -0,01321 |

Главный метеорологический центр ГСВЧ

Главный метеорологический центр ГСВЧ

Рис. 26. Ежемесячная вторая часть бюллетеня А ГСВЧ со Всемирным временем и координатами земного полюса (слева) и с поправками к углам нутации теории МАС1980 (справа)

Кроме того, аналогично МСВЗ, ГСВЧ по необходимости формирует бюллетень Г с сообщением о введении дополнительной секунды в шкалу всемирного координированного времени Российской Федерации UTC(SU). Один из таких бюллетеней изображён на рис. 27 слева.

Однако, в отличие от бюллетеня Ц (Bulletin C) МСВЗ:

- ГМЦ ГСВЧ рассылает этот бюллетень не позднее, чем за 2 месяца до введения скачущей секунды, а не за полгода;

- бюллетень Г выходит только если секунда действительно будет введена, если же секунда не будет введена, то бюллетень Г не выпускается (МСВЗ всегда выпускает Bulletin C вне зависимости от того, будет или не будет введена дополнительная секунда);

- бюллетень Г не является специализированным бюллетенем для сообщения о введении секунды (он предназначен для публикации всех извещений ГСВЧ, а не только извещения о введении дополнительной секунды).

Аналогом бюллетеня Д МСВЗ у ГСВЧ является информация DT. Она включает предвычисленные разности между Всемирным и координированным временем $UT1-UTC$, округленные до 0,02 с и выраженные в виде поправок $DUT1+dUT1$. Эти разности передаются радиостанциями ГСВЧ одновременно с сигналами времени специальным позиционным кодом.

Величина $DUT1$ для гармонизации передаваемых ГСВЧ сигналов с меж-

дународными выбирается равной величине, публикуемой в бюллетене Д (Bulletin D) МСВЗ. Величина $dUTI$ определяется по измеренным значениям таким образом, чтобы отклонения измеренной разности $UTI-UTC$ от передаваемого в составе радиосигналов приближённого значения $DUTI+dUTI$ не превысила 15 миллисекунд (см. рис. 27 справа).

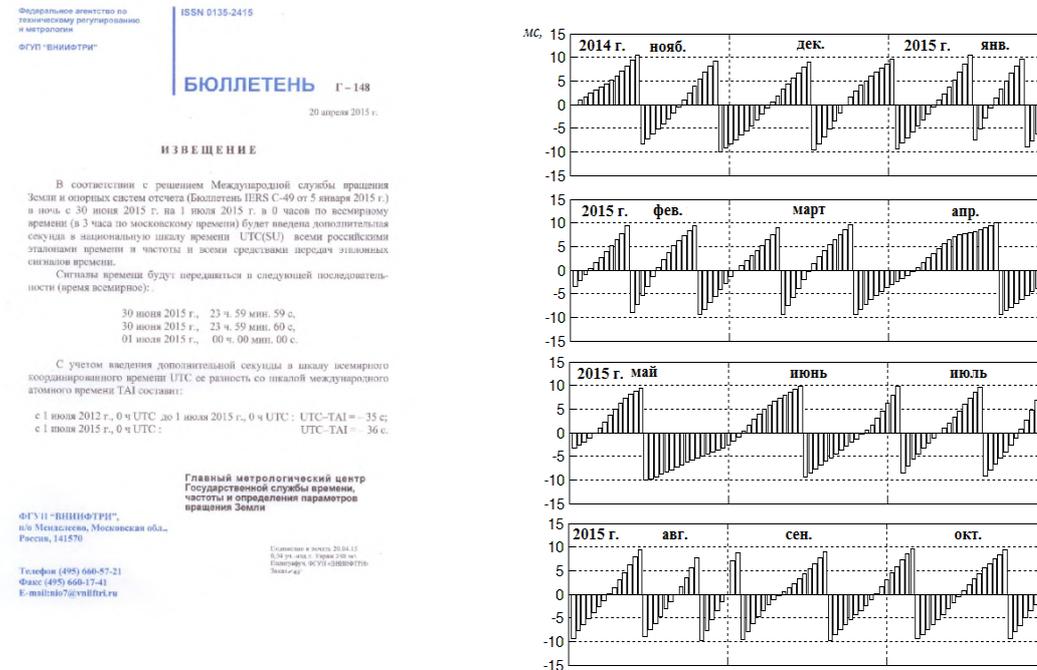


Рис. 27. Бюллетень Г ГСВЧ (слева) с извещением о введении дополнительной секунды и отклонения значения $UTI-UTC$, переданного кодом в составе радиосигналов, от истинного значения с ноября 2014 г. по октябрь 2015 г. (справа)

Также ГСВЧ выпускает ежеквартальный бюллетень Е, в котором собраны ежемесячные значения ПВЗ ГСВЧ, а также значения ПВЗ исходных рядов, на основе совместной обработки которых они были получены. Бюллетень Е за последний квартал истёкшего года включает в себя также краткий годовой отчёт о работе ГСВЧ (см. рисунок 28).

4.4. Распространение информации о ПВЗ ГСВЧ

После того как информация о ПВЗ сформирована, её необходимо сообщить заинтересованным потребителям. Результаты вычислений оператив-

Альманах современной метрологии, 2016, №8

ных, срочных, окончательных и прогнозированных значений ПВЗ передаются потребителям при помощи следующих средств:

- электронная почта;
- общедоступная через Интернет база данных;
- публикация в недельных и квартальных бюллетенях;
- передача по радио в составе сигналов точного времени.

Рассылка производится в соответствии со списком рассылки, который составляется в соответствии с действующими организационной структурой ГСВЧ и протоколами информационного взаимодействия между ГМЦ ГСВЧ и заинтересованными организациями, а также запросами потребителей.

В среднем, за год ГМЦ ГСВЧ готовит, формирует и рассылает 52 бюллетеня А, 365 бюллетеней Q, 4 бюллетеня Е и около 22 информационных сообщений DT.

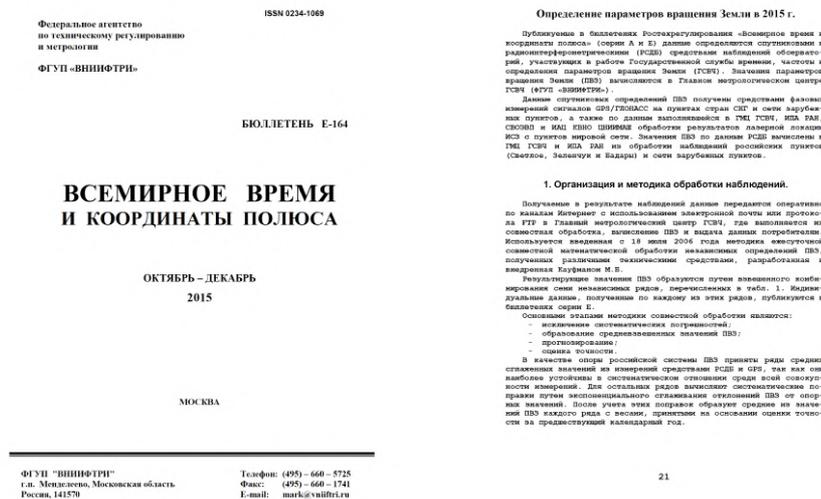


Рис. 28. Ежеквартальный Бюллетень Е ГСВЧ (слева) и страница с началом краткого отчёта за год из этого бюллетеня (справа)

5. Развитие средств определения ПВЗ

Несмотря на то, что точность ПВЗ, определяемых отечественной и международной службами, достаточно высока, требования к точности определения ПВЗ непрерывно растут. В связи с этим в настоящее время идёт активное развитие методов и средств определения ПВЗ в следующих направлениях:

- развитие РСДБ-сети нового поколения на основе быстровращающихся антенн малого диаметра с широкополосной приёмной аппаратурой;
- развитие методов и средств учёта влияния атмосферы;
- развитие методов и средств обработки анализа данных;
- повышение оперативности определения и выдачи ПВЗ, вплоть до квазиреального времени;
- увеличение числа колокационных пунктов;
- развитие средств лазерной лунной дальнометрии.

Начиная с 2004 г. Международная РСДБ служба IVS совместно с другими международными организациями (IERS, IAG и др.) активно ведут работы над созданием РСДБ сети нового поколения на основе применения антенн малого диаметра (10-15 м), широкополосных приемников, систем преобразования, регистрации и передачи данных, обработки данных практически в онлайн-режиме. Основная работа по этому проекту ведется комитетом IVS VLBI2010. Такие антенны уже сейчас установлены и работают во многих странах мира (см., например, рис. 29 слева). Как было отмечено выше, метод РСДБ обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами для решения задачи определения ПВЗ. Однако основным его недостатком является малое число измерений в сравнении со спутниковыми методами. Основной причиной этого является малая подвижность антенн старого поколения, обусловленная их огромным весом и габаритами, не позволяющая им быстро сменять объект наблюдения. Чтобы решить эту проблему, нужно строить более маленькие антенны, однако тогда и их соотношение сигнал/шум упадёт. Это можно компенсировать расширением полосы приёма, что позволит сохранить необходимую чувствительность при уменьшении размеров антенны. Подробно требования к новым системам были опубликованы в работе [10].

В России работы по развитию РСДБ-сети нового поколения на основе быстровращающихся антенн малого диаметра с широкополосной приёмной аппаратурой осуществляет ИПА РАН на базе обсерваторий РСДБ комплекса Квazar-КВО по заданию Росстандарта. В ФЦП ГЛОНАСС на это направлены опытно-конструкторские работы (ОКР) «Квazar-М» и «Корреляторы». В рамках первой работы в 2012-2015 гг. были созданы два пункта измерений на базе обсерваторий Зеленчукская и Бадары (вместе они составляют двух-элементный радиоинтерферометр на узлах колокации), а в рамках второй

работы создаются программные корреляторы в ИПА РАН и ГМЦ ГСВЧ, которые предназначены для корреляционной обработки результатов этих измерений. ФГУП «ВНИИФТРИ» участвует в этих работах как контрагент.



Рис. 29. Быстровращающиеся антенны малого диаметра обсерватории Ветцель (www.tum.de, Германия, слева) и двухэлементного радиоинтерферометра на узлах колокации (www.ipa.nw.ru, справа)

Основным фактором, мешающим достичь субмикросекундных точностей, остаётся точность определения атмосферной задержки. Её ионосферная часть исключается с помощью измерений на нескольких частотах благодаря известной частотной зависимости ионосферной задержки. Однако с тропосферной задержкой так справиться не удаётся. Борьба за точность здесь ведётся в двух направлениях:

- разработка средств измерений, способных вычислять тропосферную задержку по измерениям концентрации водяного пара – основного фактора, ответственного за немоделируемую часть тропосферной задержки;
- определение тропосферной задержки из другого вида измерений, например, из ГНСС измерений для РСДБ.

Тонким местом первого метода является то, что задержка не является измеряемой величиной, в связи с чем точность определяемой задержки зависит от точности модели связи, и, кроме того, измерения проводятся не на всём пути распространения, в отличие от реального пути электромагнитных волн в атмосфере.

Применение второго же метода осложняется тем, что при обработке измерений в систему условных уравнений входит несколько факторов, которые коррелируют друг с другом. Таким образом, неточность определения тропосферной задержки может компенсироваться, например, неточностью определения высоты пункта измерений.

Тем не менее, радиометр водяного пара, созданный в ИПА, показал высокую точность определения тропосферной задержки и отличное согласие с задержкой, определённой из ГНСС измерений. ФГУП «ВНИИФТРИ» принимал участие в этой работе как контрагент.

Основным направлением совершенствования совместной обработки измерений является переход к комбинированию на уровне измерений в отличие от применяемого в настоящее время для оперативного определения ПВЗ комбинирования на уровне временных рядов [7]. В настоящее время оптимальным методом совместной обработки (комбинирования) на уровне измерений признан наиболее удобным и эффективным метод совместного решения систем нормальных уравнений, построенных по результатам отдельных измерительных сессий. МСВЗ для координации этих работ была создана и функционирует отдельная рабочая группа «Комбинирование на уровне измерений». В этой работе также активно участвуют Центры совместной обработки и комбинирования данных МСВЗ, выделенные жёлтым цветом на рисунке 10. В России для внедрения новых технологий обработки и анализа данных в части определения ПВЗ в рамках ФЦП «ГЛОНАСС» 2012 – 2020 годов была поставлена опытно-конструкторская работа (головной исполнитель – ФГУП «ВНИИФТРИ».

Вторым направлением совершенствования средств обработки является повышение оперативности определения и выдачи ПВЗ вплоть до квазиреального времени и повышение точности прогнозирования ПВЗ. МСВЗ для повышения точности прогноза и оперативных данных созданы особые бюро по учёту влияния геофизических флюидов (см. рисунок 10).

Поскольку связь параметров вращения Земли определяется различными методами, она осуществляется через измерения на колокационных пунктах, оснащённых несколькими средствами измерений различных видов. Поэтому МСВЗ провозглашён курс на увеличение числа пунктов измерений с полной колокацией (оснащённых всеми средствами измерений, начиная малыми РСДБ-антеннами и оканчивая приёмниками системы DORIS). МСВЗ

для координации этой программы создана и функционирует рабочая группа «Обслуживание пунктов измерений и колокация» (см. рисунок 3.1). В нашей стране пунктами с полной колокацией являются только пункты РСДБ-комплекса Квazar-КВО, созданного ИПА РАН.

По причине исключительной роли метода РСДБ в задаче определения Всемирного времени все оценки систематической погрешности Всемирного времени базируются на сравнении рядов данных, систематическое поведение которых определяется, так или иначе, на основе данных РСДБ. Таким образом, все эти оценки являются оценками внутри одного метода измерения. Однако известно, что разные методы измерения обладают своими систематическими погрешностями, и поэтому более достоверная оценка получается при сравнении результатов измерений, проведенных методами, основанными на различных физических принципах и явлениях.

Каково же может быть решение этой проблемы? Оказывается, оно есть: Всемирное время можно определить и спутниковым методом, если изготовить достаточно большой и достаточно удаленный от Земли спутник, такой, что действием на него возмущений можно было практически пренебречь или определить их влияние с требуемой точностью. И такой спутник естественного происхождения действительно имеется – это Луна. Благодаря отечественной лунной программе «Луноход» и американской лунной программе «Аполлон», Луна представляет собою спутник, укомплектованный пятью ретрорефлекторами. Используя определения Всемирного времени, полученные на основе обработки измерений времени пролета лазерного луча от наземной обсерватории до одного из ретрорефлекторов, расположенных на Лунной поверхности, и обратно, можно осуществлять контроль долговременного поведения систематической составляющей Всемирного времени и достоверно оценить систематическую погрешность его определения из измерений.

В рамках работ по модернизации комплекса средств определения фундаментальных астрономогеодезических параметров (ФАГП) должен быть создан лунный лазерный дальномер и лицензионно чистые высокоточные отечественные специальные эфемериды тел Солнечной системы. ФГУП «ВНИИФТРИ» участвует в этой работе (головной исполнитель АО «НПК «СПП») как контрагент в части разработки комплекса средств метрологического обеспечения лунного лазерного дальномера, разработки ГОСТ по

ФАГП и разработки программно-аппаратных средств по определению Всемирного времени из совместной обработки лунных лазерных измерений.

6. Заключение

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, в то время как наблюдения за движением аппаратов ведутся с поверхности Земли.

В международном масштабе задача по определению и распространению опорных высокоточных значений ПВЗ возложена на Международную службу вращения Земли и опорных систем, а в России – на ГСВЧ. ГСВЧ обеспечивает потребности страны в узаконенной информации о ПВЗ согласно требованиям Постановлений Правительства РФ № 225 и № 323.

Дальнейшее совершенствование технических средств МСВЗ и ГСВЧ необходимо для обеспечения их соответствия неуклонно возрастающим требованиям ГНСС и других потребителей.

В совокупности выполнение работ, заложенных в ГСВЧ и ФЦП ГЛОНАСС, должно обеспечить поддержание характеристик подсистемы определения параметров вращения Земли ГСВЧ на высоком научно-техническом уровне, соответствующему мировому, и выполнить те требования, которые заложены в ФЦП ГЛОНАСС.

Литература

1. ГОСТ Р 8.699-2010, Государственная система обеспечения единства измерений. Величины, единицы, шкалы измерений, используемые в глобальной навигационной спутниковой системе.
2. IERS Annual Report 2008-2009. Edited by Wolfgang R. Dick and Bernd Richter. International Earth Rotation and Reference Systems Service, Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2012, p. 203-204.
3. Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН – мировое достояние человечества, презентация Степанова А.В., Абалакина В.К. и Тол-

- бина С.В., http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/prez_gao.ppt.
4. Белоцерковский Д.Ю., Палий Г.Н. Государственная служба времени и частоты СССР// Измерительная техника, № 12, 1972, с. 38-42.
 5. Кауфман М.Б., Пасынок С.Л. Оперативные вычисления параметров вращения Земли по данным РСДБ с помощью программы VieVS. Труды ИПА РАН, вып. 23 (Материалы 4-й Всероссийской конференции "Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение" (КВНО-2011), 10-14 октября 2011 г., г. С.-Петербург, ИПА РАН) - СПб.: Наука, 2012, с. 361-363.
 6. Dach R., Hugentobler U., Fridez P. et. al. Bernese GPS Software. Version 5.0/Ed. – Astronomical Institute of Bern University, 2007.
 7. Tsyba E.N., Kaufman M.B. Improvement of the software BERNESE for SLR data processing in the Main Metrological Center of the State Time and Frequency Service, Proceedings of the Journees 2014 "Systemes de reference spatio-temporels", Z. Malkin and N. Capitaine (eds), Pulkovo observatory, 2015, ISBN 978-5-9651-0873-2 & ISBN 978-2-901057-70-3, pp. 235-236.
 8. McCarthy D.D. and Luzum B.J. Combination of Precise Observations of the Orientation of the Earth// Bulletin Géodesique, 65, 22, 1991.
 9. VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI Systems, Report of Working Group 3 to the IVS Directing Board, http://ivs.nict.go.jp/mirror/about/wg/wg3/IVS_WG3_report_050916.pdf, 2005.
 10. Petrachenko B. et al. Design Aspects of the VLBI2010 System. Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee, June 2009, NASA/TM-2009-214180, 2009.