

**I. Измерения времени и частоты**

УДК 521.3, 521.92

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАБОТ ГМЦ ГСВЧ  
В ЧАСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПВЗ****С.Л. Пасынок<sup>1</sup>, И.В. Безменов<sup>1</sup>, И.Ю. Игнатенко<sup>1</sup>,  
В.С. Иванов<sup>1</sup>, Е.Н. Цыба<sup>1</sup>, В.Е. Жаров<sup>2</sup>**<sup>1</sup>ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,<sup>2</sup>ГАИИШ МГУ, Москва, Россия,

pasynok@vniiftri.ru

*Аннотация.* ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ» в части определения параметров вращения Земли (ПВЗ) выполняет ряд функций: функции Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения ПВЗ (они закреплены Постановлением Правительства РФ № 225 с соответствующими изменениями и дополнениями); функции Центра обработки и анализа данных (ЦОАД) ГСВЧ; функции центра сбора и предварительной обработки данных (ЦД) измерений для целей определения ПВЗ с пунктов метрологического контроля Росстандарта; функции измерительного пункта в интересах определения ПВЗ. Кроме того, ГМЦ ГСВЧ участвует в ряде опытно-конструкторских работ по ФЦП «ГЛОНАСС», направленных на совершенствование системы определения и прогнозирования ПВЗ.

В статье описаны результаты исследований, проводившихся в ГМЦ ГСВЧ в последние годы в части определения параметров вращения Земли.

*Ключевые слова:* ПВЗ, ГНСС, РСДБ, СЛД, ГМЦ ГСВЧ, комбинирование.

**NOWDAYS WORKS OF MMC SSTF FOR EOP EVALUATION****S.L. Pasynok<sup>1</sup>, I.V. Bezmenov<sup>1</sup>, I.Yu. Ignatenko<sup>1</sup>,  
V.S. Ivanov<sup>1</sup>, E.N. Tsyba<sup>1</sup>, V.E. Zharov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>MMC SSTF FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region, Russia,<sup>2</sup>SAI MSU, Moscow, Russia,

pasynok@vniiftri.ru

*Abstract.* MMC SSTF VSUE “VNIIFTRI” in the Earth’s orientation parameters (EOP) evaluation field executes the following functions: function of Main metrological center of State Service for time, frequencies and EOP evaluation (it states in Government Council of Russian Federation № 225 with changes and additions); function as Analysis Center (AS) of SSTF; function as Data Center (DC) of the satellite measurable network of metrological control sites of ROSSTANDART; function as measurable sites for EOP evaluation purposes. Besides these, MMC SSTF takes part in a development works of FTP “GLONASS” for improvement of system of EOP evaluation and prediction.

The results of MMC SSTF activities in last years for EOP evaluation are considered.

*Keywords:* EOP, GNSS, VLBI, SLR, MMC SSTF, combination.

## Введение

Высшей структурой международных организаций, координирующих работы по установлению и поддержанию опорных систем, связанных с определением параметров вращения Земли, является Глобальная геодезическая система наблюдений (ГГСН — рус., GGOS — англ.). Одной из её основных задач является установление и поддержание Глобальной геодезической опорной системы (ГГОС — рус., GGRS — англ.), которая структурно объединяет в одно целое следующие геометрические и гравиметрические опорные системы [1]:

- Международную земную опорную систему (ITRS — англ.);
- Международную небесную опорную систему (ICRS — англ.);
- Международную опорную систему ускорения силы тяжести (IGRS — англ.);
- Международную опорную систему физических высот (IVRS — англ.).

С точки зрения изучения вращения Земли важны первые две из них. Они включают в себя земную и небесную системы координат соответственно, которые связаны параметрами вращения Земли (ПВЗ — рус., EOP — англ.). Теоретическим фундаментом и практической реализацией этих опорных систем (земной и небесной координатными (опорными) основами — ITRF и ICRF), а также определением связи между ними (то есть ПВЗ) занимается Международная служба вращения Земли и опорных систем (МСВЗ — рус., IERS — англ.). Каталоги координат опорных пунктов сетей ITRF и ICRF публикуются в Центрах ITRS и ICRS МСВЗ соответственно. Эволюцию небесных объектов удобно изучать в небесной системе координат, а наблюдения удобно проводить с вращающейся Земли (т.е. в земной системе координат). Кроме того, в последнее время всё больше измерений проводится с бортов космических аппаратов (КА — рус.), а станции слежения за их движением расположены на поверхности Земли. Поэтому ПВЗ играют фундаментальную роль, так как они определяют связь между земной и небесной системами координат.

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

Для определения ПВЗ МСВЗ собирает данные астрономо-геодезических измерений и результатов их обработки со всего мира из различных министерств и ведомств, государственных и негосударственных организаций, научных институтов и Центров обработки и анализа данных (ЦОАД — рус., AC — англ.) МСВЗ. Основными видами измерений, которые используются при оперативном определении ПВЗ, являются:

- измерения, проведённые на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ);
- измерения, полученные по результатам приёма сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС);
- измерения, полученные спутниковыми и лунными лазерными дальномерами (СЛД и ЛЛД).

При определении окончательных данных о ПВЗ в апостериорном режиме привлекаются также данные измерений французской доплеровской спутниковой системы определения орбит искусственных спутников Земли (ИСЗ) — DORIS.

Для обеспечения единства измерений ПВЗ в международном масштабе МСВЗ проводит совместную обработку (комбинирование) этой информации и определяет справочные данные о ПВЗ различной степени срочности: оперативные, срочные и окончательные (опорные значения). Также проводится прогнозирование ПВЗ для удовлетворения нужд тех потребителей, которые либо работают в реальном времени, либо вынуждены закладывать данные о ПВЗ заранее, для целей автономной навигации.

Эти данные формируются в двух основных ЦОАД МСВЗ (их также часто называют центрами «продуктов», где под «продуктами» понимаются результаты обработки измерений):

- в Центре оперативных определений и прогноза ПВЗ МСВЗ (IERS Rapid Service / Prediction Center (RS/PC) for EOP);
- Центральном бюро определения ПВЗ МСВЗ (EOP Product Centre of the International Earth Rotation and Reference Systems Service).

Следует заметить, что понятие «продуктов» гораздо шире, чем ПВЗ: это и каталоги пунктов ITRF и ICRF, и сводные (комбинированные) орбиты и поправки часов КА ГНСС, и DCB-коды для обработки ГНСС, и т.д., но каждый «продукт», как правило, формируется в своём ЦОАД.

Роль центра оперативных определений и прогноза ПВЗ МСВЗ в настоящее время возложена на военно-морскую обсерваторию Соединённых Штатов Америки (ВМО США — рус., USNO — англ.). Именно она формирует и распространяет оперативные и срочные значения ПВЗ (бюллетени МСВЗ (IERS) finals.daily и Bulletin A). Центральное бюро определения ПВЗ МСВЗ формирует окончательные (или опорные) данные о ПВЗ, которые используются в качестве истинных значений при оценке погрешностей более оперативных значений ПВЗ, в том числе значений из бюллетеней МСВЗ finals.daily и Bulletin A.

На территориях развитых стран существуют свои национальные службы, которые при определении параметров вращения Земли опираются на национальные средства измерений, а также привлекают в той или иной степени данные зарубежных средств измерений. Они ведут свои независимые шкалы

параметров вращения Земли, точностные характеристики и положение которых относительно Международной шкалы параметров вращения Земли устанавливаются по сравнению их с международными опорными окончательными данными МСВЗ (серией ЕОРС04). Точностные характеристики этих систем не могут быть выше, чем характеристики ПВЗ МСВЗ, поскольку точность определения ПВЗ при прочих равных условиях зависит от степени охвата средствами измерений Земной поверхности. Однако, в случае нарушения средств передачи международных данных о параметрах вращения Земли, такие системы могут функционировать независимо и обеспечивать своих потребителей данными о ПВЗ. Помимо этого, они осуществляют непрерывный контроль точности международных данных о ПВЗ и могут защитить своих потребителей в случае возникновения ошибок или намеренных искажений в них. То есть они обеспечивают координатно-временную безопасность своих стран и единство измерений на их территории.

В России роль национальной службы определения параметров вращения Земли выполняет Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ — рус., SSTF — англ.). ГСВЧ — это межведомственная организация, объединяющая усилия предприятий различных министерств и ведомств, направленные на определение параметров вращения Земли и обеспечение единства измерений в этой части. Руководство этой деятельностью, согласно Постановлениям Правительства РФ № 225 и 323, осуществляет Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии (Росстандарт). Результаты геодезических измерений с пунктов Роскосмоса, РАН, Росстандарта и других ведомств стекаются в центры обработки и анализа данных (ЦОАД), роль которых играют Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения АО «ЦНИИмаш» (далее — ИАЦ), Институт прикладной астрономии Российской академии наук (далее — ИПА), Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН) и Главный метрологический центр (ГМЦ — рус., MMS — англ.) ГСВЧ, в которых проводится обработка измерений и определяются значения параметров вращения Земли по каждому из видов измерений. Все полученные результаты стекаются в ГМЦ ГСВЧ, на который возложена обязанность по формированию и выдаче оперативных справочных данных о ПВЗ. В настоящее время роль ГМЦ ГСВЧ возложена на научно-исследовательское отделение (НИО) ФГУП «ВНИИФТРИ» (эта роль аналогична роли USNO в IERS).

Помимо функции ГМЦ ГСВЧ НИО ФГУП «ВНИИФТРИ» (далее — НИО) также выполняет функции ЦОАД ГСВЧ, Центра сбора и предварительной обработки данных (ЦД) измерений для целей определения ПВЗ с пунктов метрологического контроля Росстандарта и измерительного пункта ГСВЧ в интересах определения ПВЗ. Кроме того, НИО участвует в ряде опытно-конструкторских работ по ФЦП «ГЛОНАСС», направленных на совершенствование системы определения и прогнозирования ПВЗ.

Настоящая статья является доработанной версией доклада «Определение ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ в 2019–2020 годах», представленного на X Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства», который проходил в период с 6 по 8 октября 2021 года во ФГУП «ВНИИФТРИ». В статье описаны результаты исследований и работ, проводившихся в НИО в последние годы в части определения параметров вращения Земли. Доработка заключается в добавлении некоторых материалов, полученных в 2021 году, и актуализации части рисунков.

### 1. Совместная обработка и прогнозирование данных о ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ

В рамках МВСЗ USNO формирует и распространяет оперативные и срочные значения ПВЗ путём совместной обработки (комбинирования) значений ПВЗ из временных рядов, полученных в различных ЦОАД МСВЗ из обработки результатов отдельных видов измерений.

Оперативное определение и прогнозирование ПВЗ ГСВЧ выполняется в ГМЦ ГСВЧ путём совместной обработки (комбинирования) временных рядов, полученных после обработки в ЦОАД ГСВЧ результатов измерений отдельных видов (РСДБ, ГНСС и СЛД). В последние годы оперативные значения ПВЗ определялись путём совместной обработки (комбинирования) девяти независимых временных рядов, полученных в ГМЦ ГСВЧ, ИПА и ИАЦ.

Начиная с марта 2019 года в состав этих рядов входит ряд значений Всемирного времени, полученный в результате вторичной (посткорреляционной) обработки в ГМЦ ГСВЧ данных радиointерферометра на узлах колокации (РУК), созданного ИПА [2]. Использование этих данных позволило значительно увеличить точность оперативных значений Всемирного времени ГСВЧ (рис. 1). Совместная обработка проводится на уровне временных рядов с помощью алгоритма, разработанного в ГМЦ ГСВЧ [3].

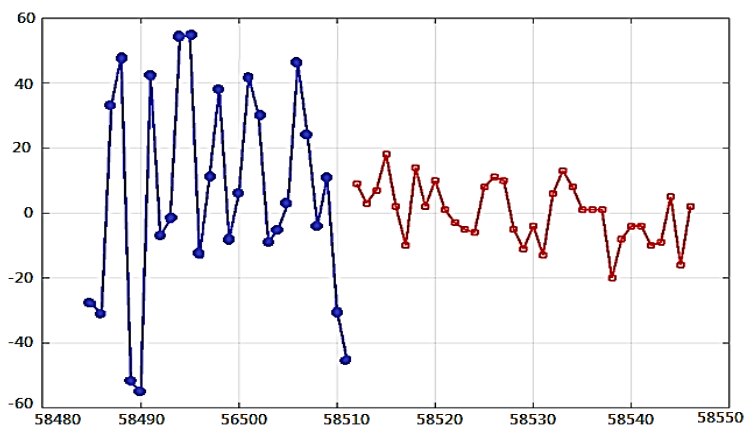


Рис. 1. Отклонения оперативных значений Всемирного времени ГСВЧ от МСВЗ до (слева) и после (справа) момента включения данных РУК в совместную обработку: по вертикальной оси — микросекунды; по горизонтальной — модифицированная Юлианская дата в сутках

Полученные значения ПВЗ ГСВЧ публикуются в бюллетенях ГСВЧ (рис. 2): оперативном «Q», срочном «А» и квартальном «Е». Также в ГМЦ ГСВЧ по мере необходимости выпускается бюллетень «Г» с сообщением о введении дополнительной секунды в Национальную шкалу координированного времени UTC (SU).

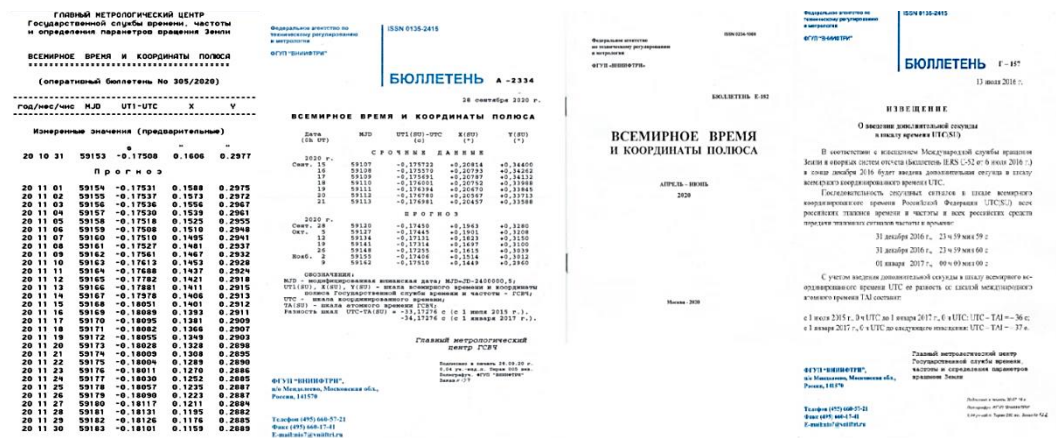


Рис. 2. Бюллетени ГМЦ ГСВЧ

Однако за прошедший период такой необходимости не возникло, так как в результате локального ускорения вращения Земли продолжительность средних солнечных суток практически сравнялась с продолжительностью атомных суток, что на графике UT1 – UTC иллюстрируется сменой «горного» рельефа «равнинным» (рис. 3). Изображённый на рис. 2 в качестве примера бюллетень «Г» не относится к рассматриваемому периоду времени, он был выпущен в 2016 году и содержит извещение о последнем введении дополнительной секунды.

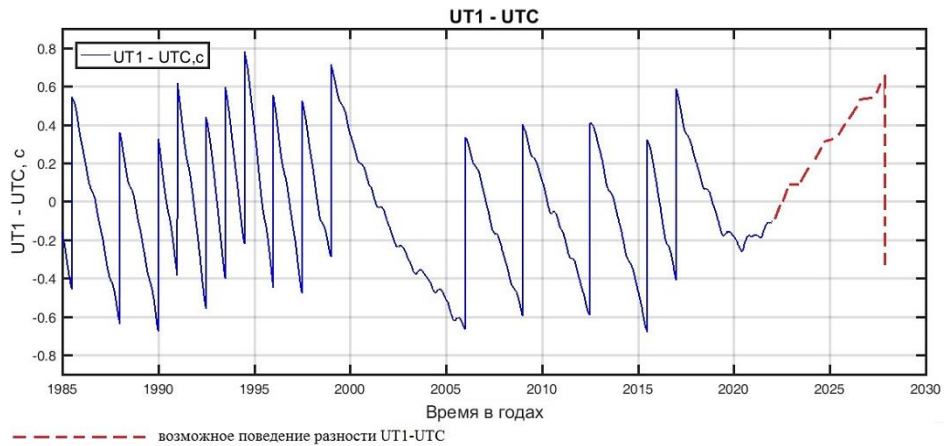


Рис. 3. Разность UT1 – UTC с 1985 г. и по настоящее время: Красная штрихованная линия показывает UT1 – UTC в случае, если характер вращения Земли не изменится

Если в ближайшее время эта тенденция не изменится и не будет принято решение «заморозить» значение UTC, то, возможно, что следующую корректирующую секунду придётся отнять из шкалы UTC (SU), а не добавить в неё. На рис. 3 красной пунктирной линией изображён прогноз поведения величины UT1 – UTC, если в ближайшее время характер вращения Земли не изменится.

В этом случае «лишнюю» секунду из шкалы UTC нужно будет изъять примерно в 2028 году, если к тому времени не будет принято решение о переопределении шкалы UTC и процедура введения корректирующей секунды не будет отменена.

На рис. 4 изображены среднегодовые вариации угловой скорости вращения Земли, а на рис. 5 — соответствующие им ускорения. Видно, что баланс смещён в сторону положительных ускорений.

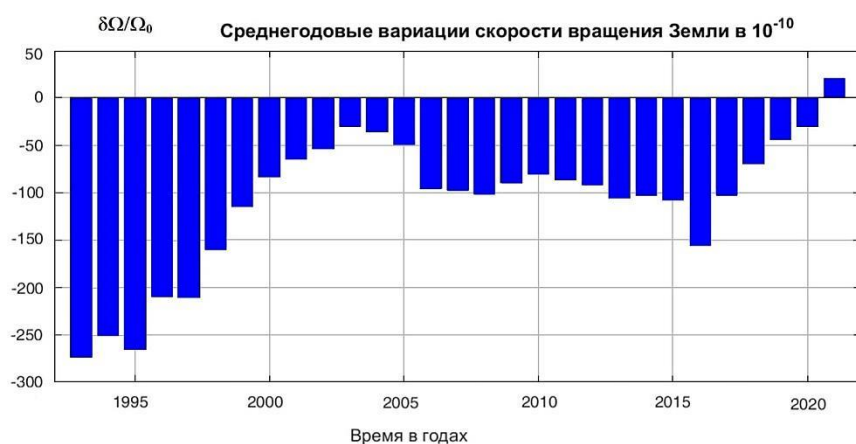


Рис. 4. Среднегодовые вариации угловой скорости вращения Земли. По вертикальной оси отложены значения в десятиллиардных долях, а по горизонтальной — время в годах



Рис. 5. Ускорение, соответствующее среднегодовым вариациям угловой скорости вращения Земли. По вертикальной оси отложены значения ускорения в пЭ, по горизонтальной — время в годах. Видно, что баланс смещён в сторону положительных ускорений

Данные о ПВЗ распространялись не только в печатной форме, но также и по сети Интернет, электронной почте, а также в составе эталонных сигналов частоты и времени (ЭСЧВ). Через ftp-сервер ФГУП «ВНИИФТРИ» (ftp.vniiftri.ru) оперативные бюллетени ГСВЧ доступны по анонимному доступу. Они также доступны через сайт Центра сводной обработки и определения (ЦСОО) ПВЗ ГМЦ ГСВЧ, размещённый по адресу: pvz.vniiftri.ru.

## 2. Определение ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ по отдельным видам измерений

В ГМЦ ГСВЧ проводятся не только финальная совместная обработка и прогнозирование данных о ПВЗ, но и оперативное определение ПВЗ по каждому из отдельных видов измерений (РСДБ, ГНСС, СЛД). Полученные в результате этой обработки ряды ПВЗ участвуют в совместной обработке при определении и прогнозировании значений ПВЗ ГСВЧ (см. п. 1).

Результаты проведённой в ИПА корреляционной обработки РСДБ-измерений на созданном ИПА радиоинтерферометре на узлах колокации (РУК) нового поколения (стандарта VGOS [4], ранее — VLBI2010) поступают в ГМЦ ГСВЧ через каналы Интернет из Центра корреляционной обработки РАН. Вторичная (посткорреляционная) обработка проводится в ГМЦ ГСВЧ с помощью программного комплекса ОССАМ [5]. Фотография антенны радиотелескопа нового поколения приведена на рис. 6.



Рис. 6. Входящая в состав РУК малая быстроповоротная антенна нового поколения стандарта VGOS, установленная в обсерватории «Светлое» (Ленинградская область) из состава РСДБ-комплекса «КВАЗАР-КВО», созданного в ИПА

Данные с международной сети станций обрабатываются в ГМЦ ГСВЧ с помощью отечественного программного комплекса «Ариадна» (автор Жаров В.Е., [6]). На рис. 7 изображены отклонения оперативных определений значений Всемирного времени (по часовым сессиям) путём обработки результатов РСДБ-измерений с международной сети станций, полученных в различных ЦОАД друг от друга.



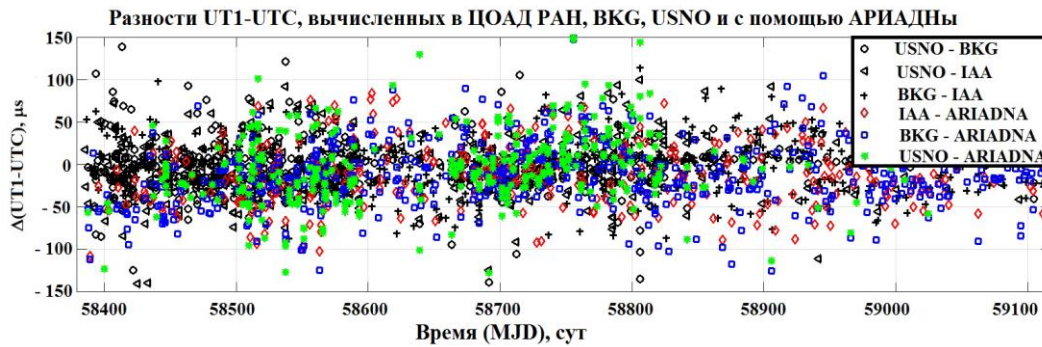


Рис. 7. Разности значений UT1 – UTC часовых сессий IVS, полученных различными ЦОАД

Видно, что расхождения значений Всемирного времени, полученных с помощью «Ариадны» (ARIADNA), со значениями других ЦОАД сравнимы с расхождениями этих ЦОАД друг с другом, что свидетельствует о соответствии проводимых вычислений международному уровню. Другие ЦОАД на этом рисунке это: USNO — ВМО США; BKG — ЦОАД Федерального агентства по геодезии и картографии Германии; IAA — ИПА.

Результаты ГНСС-измерений по данным измерений пунктов сетей Росстандарта, РАН, Росреестра, Минобрнауки обрабатываются с помощью метода PPP (точного точечного позиционирования), реализованного в ГМЦ ГСВЧ на базе программного комплекса BERNESE5.0 [7].

Результаты спутниковых лазерных дальномерных (СЛД — рус., SLR — англ.) измерений международной сети спутниковой лазерной дальнометрии Международной службы лазерной дальнометрии ИСЗ и Луны (МСЛД — рус., ILRS — англ.) обрабатываются в ГМЦ ГСВЧ с помощью разработанного в ГМЦ ГСВЧ программного комплекса обработки СЛД-измерений [8]. Особенностью алгоритма ГМЦ ГСВЧ является использование метода нейронных сетей для прогнозирования орбит пассивных геодезических спутников, что позволяет повысить оперативность определений координат земного полюса по результатам спутниковых лазерных измерений.

### **Участие ГМЦ ГСВЧ в проведении спутниковых измерений ГСВЧ**

Как пункт измерений ГМЦ ГСВЧ имеет средства измерений на основе приёма сигналов КА ГНСС и средствами лазерной спутниковой дальнометрии (см. рис. 8 и левую часть рис. 9).

Спутниковые лазерные дальномерные измерения для целей определения ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ проводятся по мере открытия погодных окон (т.е. в хорошую погоду) с помощью спутникового лазерного дальнометра ММКОС «Сажень-ТМ-БИС», расположенного в р.п. Менделеево [9]. Перед измерениями дальномер калибруется с помощью калибровочного базиса.

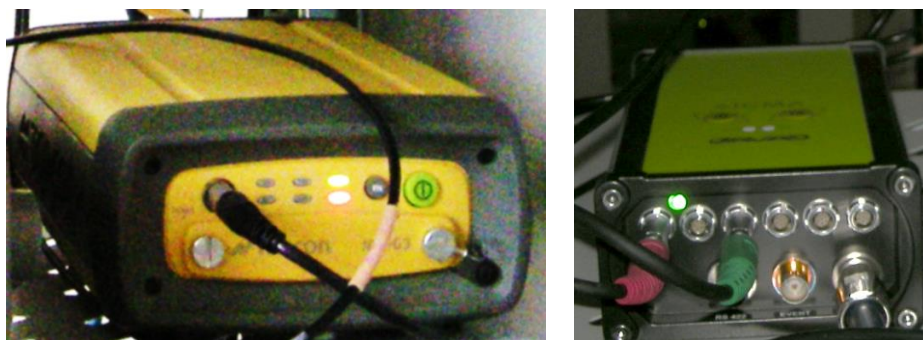


Рис. 8. Средства ГНСС, расположенные в Менделеево:  
Net-G3 (слева) и JAVAD JNSS Delta (справа)



Рис. 9. ММКОС «Сажень-ТМ-БИС»,  
расположенные в Менделеево (слева) и Иркутске (справа)

Длина самого калибровочного базиса контролируется при помощи эталона-переносчика (тахеометра), который получает единицу длины от Государственного первичного специального эталона единицы длины (ГСЭД) [10], созданного во ФГУП «ВНИИФТРИ». Кроме того, обеспечивается метрологическая прослеживаемость шкалы времени самой лазерной станции и средств ГНСС к Государственному первичному эталону единиц времени, частоты и национальной шкалы времени (ГЭВЧ) [11].

Пункт Менделеево является одним из пунктов измерительной сети Росстандарта, которая состоит из средств ГНСС и СЛД, расположенных на пунктах метрологического контроля Росстандарта в р.п. Менделеево (mdvj, mdvl) и городах Новосибирске (novn), Иркутске (irkj, irkl), Хабаровске (khas) и Петропавловске-Камчатском (pett). Два пункта (Менделеево и Иркутск) являются пунктами с частичной колокацией (ГНСС и СЛД). В Иркутске регулярные спутниковые лазерные дальномерные измерения проводятся также с помощью установленного там ММКОС «Сажень-ТМ-БИС» (см. рис. 9, справа) [12].

Результаты измерений стекаются в ГМЦ ГСВЧ, который играет роль Центра сбора и предварительной обработки данных измерений этой сети. Сравнение среднеквадратических погрешностей (СКО) измерений на пунктах Росстандарта в сравнении с СКО измерений на других пунктах российской лазерной сети показано синим цветом на рис. 10.

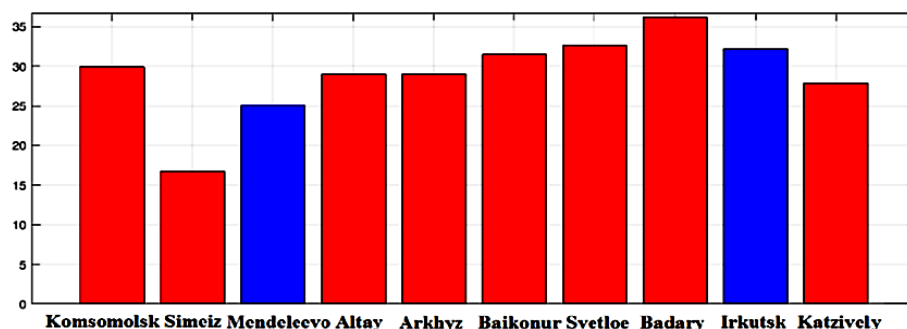


Рис. 10. СКО станций российской лазерной сети в 2020 году в миллиметрах

Пункты сети Росстандарта также функционально входят в состав отечественных и международных измерительных сетей: все пять пунктов входят в состав Фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС), три пункта (Менделеево, Иркутск и Новосибирск) входят в ITRF и IGS TRF, два пункта (ГНСС и СЛД) входят в состав LTRF, один пункт (Менделеево) входит в EPN (Европейская опорная ГНСС-сеть).

Данные измерений поступают в отечественные и международные базы данных: Центр геодезии, картографии и информационно-пространственных данных (Центр ГК и ИПД), IGS, EDC, EPN. С июня 2021 года они также поступают в ФЦ (Федеральный центр сбора, хранения, применения и предоставления гражданским потребителям навигационной информации) АО «ЦНИИмаш» (ФЦ, 2021). Результаты ГНСС-измерений также используются непосредственно в ГМЦ ГСВЧ совместно с данными спутниковых средств других ведомств (РАН, Роскосмоса, Минобрнауки) для определения ПВЗ по ГНСС-измерениям. Суточные файлы ГНСС-измерений пунктов IGS (Менделеево, Иркутск и Новосибирск) доступны на ftp-сервере ФГУП «ВНИИФТРИ» (<ftp.vniiftri.ru>) по анонимному доступу и выкладываются в папку JPS\_Rinex/YYYY/DOY на сервере с задержкой в 1 сутки.

ГНСС-измерения ведутся в непрерывном режиме с шагом дискретизации 30 секунд; файлы измерений формируются в почасовом режиме. Погрешность измерений контролируется на всех этапах обработки:

- оперативно по мере формирования RINEX-файлов по кодовым измерениям;
- при определении ПВЗ с помощью метода PPP;
- апостериорно с помощью метода двойных разностей фазовых измерений.

Шкалы времени (ШВ) приёмников сличаются с эталонными сигналами с помощью частотомеров, работающих в режиме измерителей интервалов времени (ИВИ). На рис. 11 слева изображены экспериментально полученные в 2020 году тренды. Их величины согласуются с трендами ITRF2014 в пределах ошибок измерений, что свидетельствует о стабильности положений пунктов в ITRF.

Справа на рис. 11 показаны разности в наносекундах между импульсным сигналом частотой 1 Гц (PPS) ШВ приёмника и PPS стандарта частоты и времени, от которого приёмник получает частоту для формирования своей внутренней ШВ.

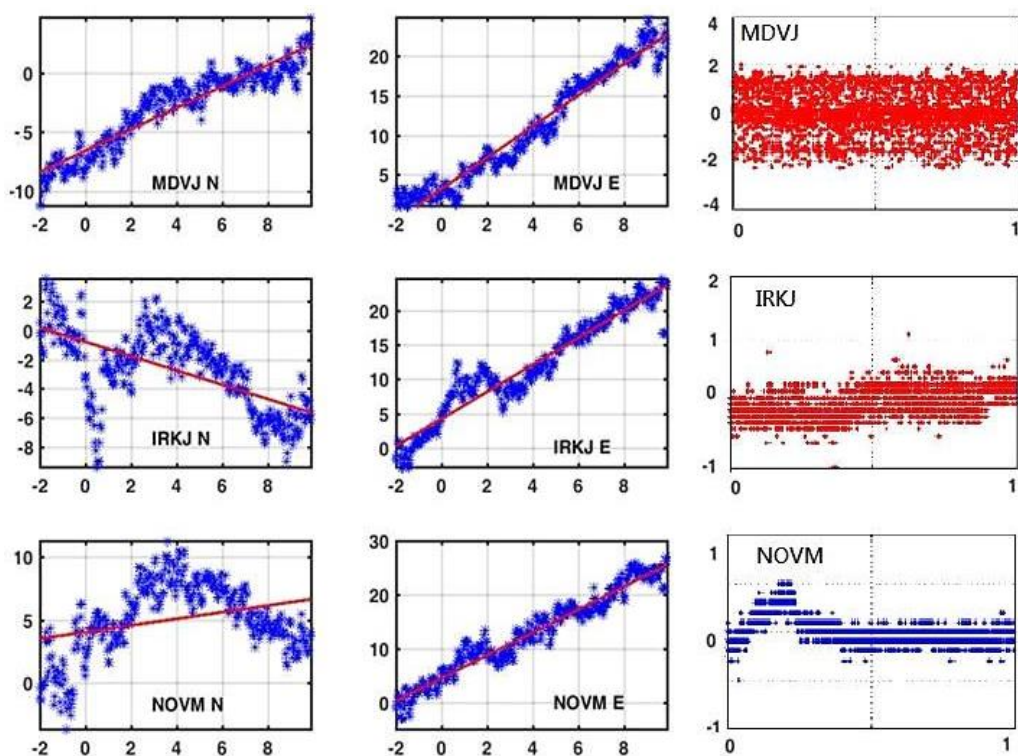


Рис. 11. Экспериментальный тренд (прямые линии, слева), мм. Разности PPS ШВ приёмников и стандарта (справа), нс

### 3. Пилотные проекты ГМЦ ГСВЧ в части КВНО

Одной из работ, осуществляемой в ГМЦ ГСВЧ и имеющей статус пилот-проекта, является работа по определению эфемерид и поправок к бортовым часам космических аппаратов ГНСС. Целью этой работы является формирование в ГМЦ ГСВЧ альтернативной эфемеридно-временной информации (ЭВИ) для КА ГНСС. К настоящему времени разработано программное обеспечение по формированию ЭВИ КА ГЛОНАСС и GPS в апостериорном [13] (см. рис. 12), срочном [14] и оперативном режимах [15].

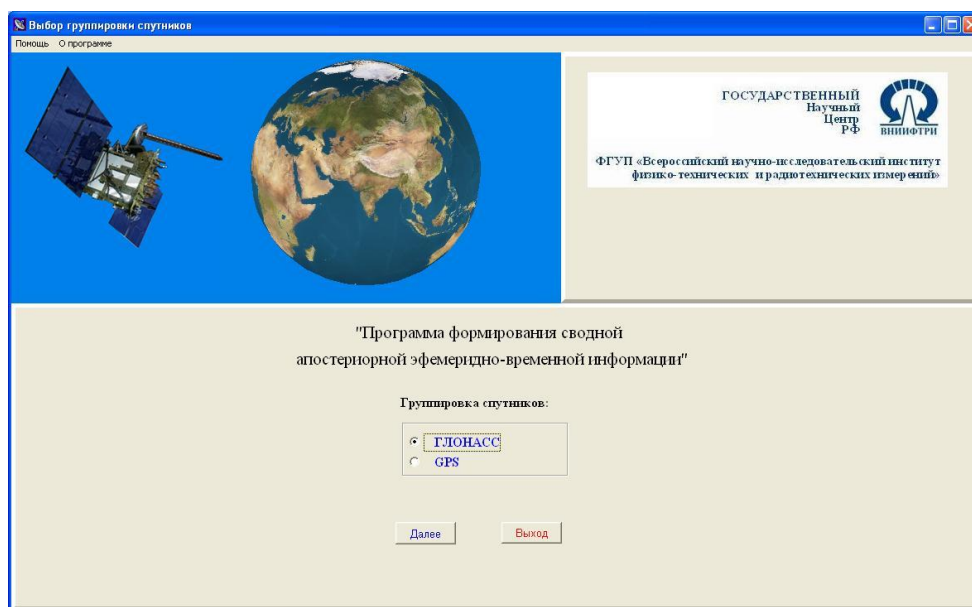


Рис. 12. Начальная панель программы формирования сводной апостериорной ЭВИ

Формирование орбит и поправок часов в срочном и оперативном режимах выполняется в результате обработки данных ГНСС-измерений, полученных от станций слежения за спутниками ГНСС, входящих в глобальную сеть IGS. Исходными данными для расчётов ЭВИ в оперативном режиме являются часовые RINEX-файлы (в форматах d/g/n), содержащие результаты измерений кодовых и фазовых псевдодальностей на двух несущих частотах. Общее количество станций варьируется от 350 до 450.

В настоящее время программно-аппаратный комплекс работает в режиме тестирования, целью которого является совершенствование программного обеспечения, улучшение точностных характеристик вычисляемых эфемерид КА и повышение оперативности получения конечного результата. Для улучшения точностных характеристик используются новые методы предварительной обработки измерительных данных [16].

В части вторичной (посткорреляционной) обработки РСДБ-измерений в ГМЦ ГСВЧ ведутся работы по совершенствованию программного комплекса «Ариадна» для расширения его возможностей.

Также в экспериментальном режиме проводятся работы по определению орбит геодезических КА, определению Всемирного времени по данным измерений лазерной локации Луны [8] (рис. 13), определению отклонений отвесной линии (УОЛ) по данным спутниковой альтиметрии [17], ведутся исследования для применения технологии машинного обучения (нейронных сетей) для прогнозирования орбит [18] и построения цифровой модели гравитационного поля Земли на акватории Мирового океана [17].

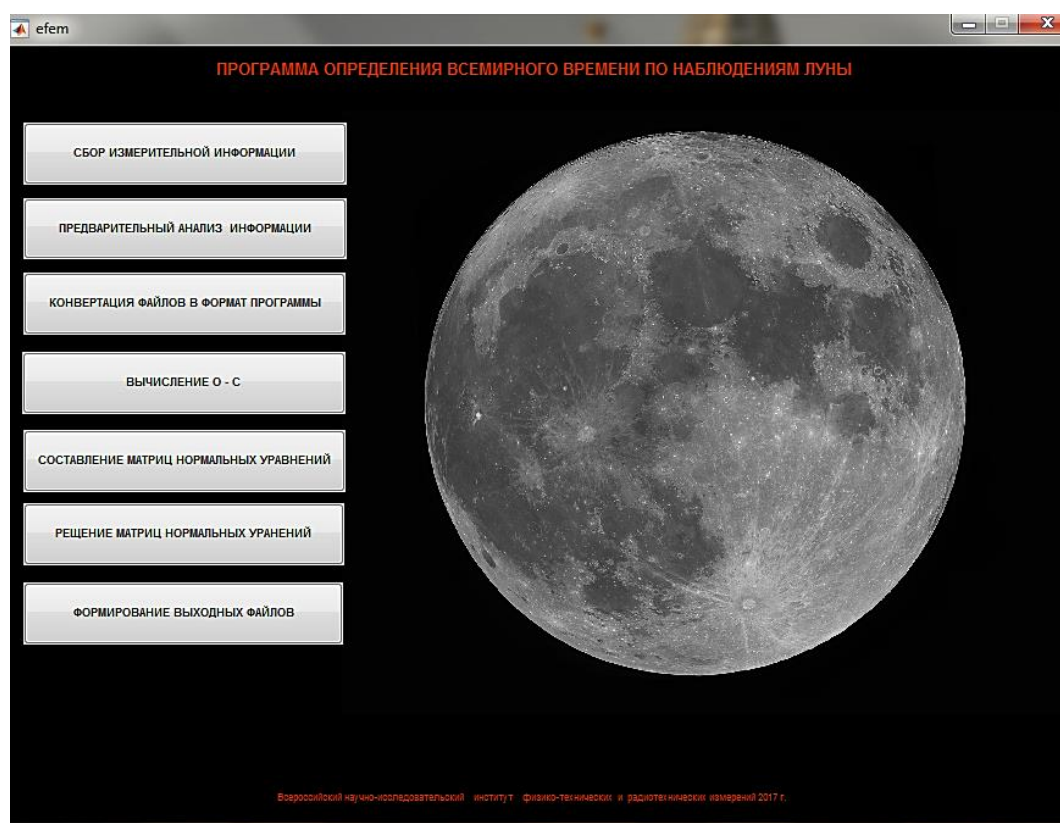


Рис. 13. Основная панель программы определения Всемирного времени по данным измерений лазерной локации Луны

Разработанное программное обеспечение обработки результатов лазерных измерений также имеет возможность определять координаты геоцентра.

В 2019–2020 гг. продолжались формирование SINEX-файлов для отдельных измерительных сессий и оперативное определение ПВЗ на основе совместной обработки SINEX-файлов с помощью программного комплекса на основе пакета SINCom [19] в режиме исследований с привлечением международных SINEX-файлов. Снимок окна программы с результатами определений координат земного полюса, полученных в результате комбинирования, показан на рис. 14. Квадратными маркерами показаны значения, полученные из комбинирования SINEX-файлов в ГМЦ ГСВЧ. Значения, полученные методом комбинирования временных рядов в ГМЦ ГСВЧ и USNO, изображены круглыми маркерами и сплошной кривой соответственно. Основным препятствием к внедрению метода обработки на основе SINEX-файлов в службу ГСВЧ является недостаточное (в сравнении с оперативными данными временных рядов) число доступных оперативных отечественных решений в формате SINEX.

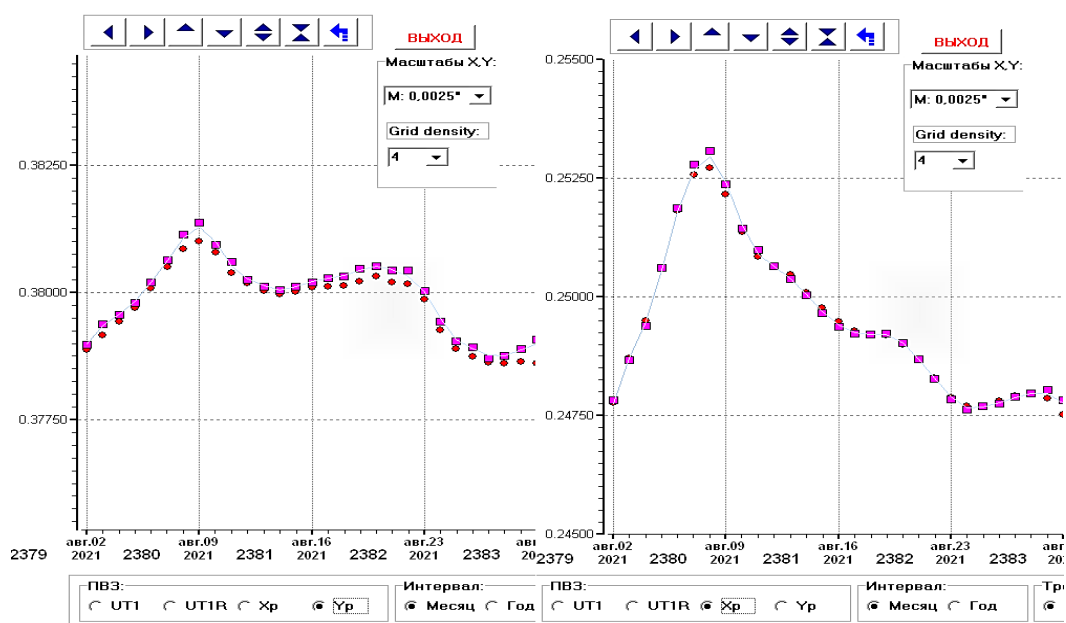


Рис. 14. Результаты определения координат земного полюса из комбинирования SINEX-файлов (квадраты), комбинирования временных рядов в ГМЦ ГСВЧ (круги) и USNO (сплошная серая кривая). Тренд снят

#### 4. Дальнейшие планы

Повышение точности определения значений Всемирного времени и координат небесного полюса связано с использованием данных измерений с РСДБ-сетей нового поколения (стандарта VGOS) на основе малых быстроповоротных антенн нового поколения с широкополосной приёмной системой. До сих пор ФГУП «ВНИИФТРИ» принимало участие только во вторичной (посткорреляционной) обработке таких измерений. Однако ФГУП «ВНИИФТРИ» планирует расширить своё участие в этих работах.

Институт обладает программным коррелятором ГМЦ ГСВЧ (рис. 15), разработанным в ИПА РАН, который способен обрабатывать первичные РСДБ-измерения. В ближайшем будущем в ГМЦ ГСВЧ планируется начать регулярные вычисления с целью определения задержек в результате корреляционной обработки данных «сырых» измерений с сети 13-метровых антенн РСДБ-комплекса «КВАЗАР-КВО», созданного ИПА РАН.

Если повышение точности значений Всемирного времени и координат небесного полюса связано с РСДБ нового поколения, то повышение точности определения координат земного полюса связано преимущественно с развитием ГНСС-технологий. Это объясняется огромным числом и большим охватом поверхности Земли измерительными станциями ГНСС. Кроме того, в настоящее время глобальные спутниковые системы ГНСС переживают бурное

развитие. Появились новые ГНСС, такие как Beidou и Galileo, причём по последним оценкам, проведённым в ИАЦ КВНО, точность Beidou сравнима с GPS, а точность Galileo примерно в 2 раза выше. Таким образом, при укомплектовании пунктов измерений мультисистемными многочастотными ГНСС-приёмниками нового поколения и включении их измерений в обработку точность и оперативность определения координат земного полюса должны значительно повыситься.



Рис. 15. Программный коррелятор ГМЦ ГСВЧ

GGOS (IAG, 2021) ставит задачу достичь точности в один миллиметр в определении координат на поверхности Земли, что в части ПВЗ означает достижение точности в 2 мкс по Всемирному времени и 30 микросекунд дуги по координатам полюса. Такие точности находятся на пределе возможностей имеющихся и перспективных средств измерений.

Поэтому важную роль играют методы предварительной обработки измерений, которые также будут развиваться [16].

При увеличении числа привлекаемых измерений понадобится существенно повысить производительность вычислений. Этого планируется добиться за счёт более широкого привлечения алгоритмов распараллеливания. Хотя сейчас алгоритмы распараллеливания также применяются, однако при увеличении числа обрабатываемых в оперативном режиме данных ГНСС-измерений в разы не удастся выполнить требования по оперативности без значительного расширения их использования.

В настоящее время растут требования по оперативности, в качестве конечной цели заявлен переход к обработке в реальном времени. Однако при оперативной работе не всегда доступны все необходимые для расчёта параметров данные измерений. В этом случае недостающие данные можно заменить прогнозом и получить более оперативное решение.



Важнейшей и самой ресурсоёмкой задачей, конечно, является переход на средства измерений нового поколения, провозглашённый Глобальной геодезической системой наблюдений GGOS [20]. В настоящее время проходят испытания лазерные станции комплекса средств фундаментального обеспечения ГЛОНАСС (ЛС КСФО) «Точка», расположенные во ФГУП «ВНИИФТРИ» и его Восточно-Сибирском филиале (рис. 16). Новые станции отвечают стандарту SLR2000 [21], а СКО определения наклонных дальностей для них будет достигать единиц миллиметров.



Рис. 16. ЛС КСФО во ФГУП «ВНИИФТРИ» (слева)  
и в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ» (справа)

## 5. Резюме

Результаты сравнения данных о ПВЗ ГСВЧ с аналогичными данными международных служб за последние три года свидетельствуют о высоком научно-техническом уровне работ, проводимых в ГМЦ ГСВЧ в части определения ПВЗ. Планы по дальнейшему развитию средств определения и прогнозирования ПВЗ ФГУП «ВНИИФТРИ» находятся в русле тенденций развития аналогичных средств международных служб.

## Список литературы

1. Международная ассоциация геодезии (IAG). Description of the Global Geodetic Reference Frame: [сайт]. — URL: <https://iag-aig.org/topic/3> (дата обращения: 10.09.2021).
2. Ипатов А.В., Иванов Д.В. Сеть радиотелескопов РТ-13 комплекса «Квазар-КВО»: первые результаты // Тезисы Восьмой всероссийской конференции «Фундаментальное прикладное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019). — СПб.: ИПА РАН, 2019. — С. 15.

3. Пасынок С.Л., Безменов И.В., Жаров В.Е., Игнатенко И.Ю., Цыба Е.Н. Определение ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ в 2017 году // Материалы IX Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». — ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. — С. 178–182.
4. International VLBI Service. IVS Technology. VGOS Concept: [website]. — URL: <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-concept.html> (date of the application: 10.09.2021).
5. Titov O., Tesmer V., Böhm J. OCCAM Version 5.0 Software. User Guide // AUSLIG Technical Report 7. — Canberra: Australian Surveying and Land Information Group (AUSLIG), 2001.
6. Жаров В. Е. Основы радиоастрометрии. — М: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2011. — С. 208–224.
7. Bernese GPS Software. Version 5.0 / Edited by Rolf Dach, Urs Hugentobler, Pierre Fridez, Michael Meindl. — Astronomical Institute of Bern University, 2007.
8. Тcyба Е., Volkova O. Determination of Earth Orientation Parameters by SLR in MMC SSTF FSUE VNIIFTRI // Proceedings of the Journees 2019 / ed. C. Bizouard. — Observatoire de Paris, 2020. — P. 159–162.
9. Ignatenko I.Yu. Section 8 ILRS Network of International Laser Ranging Service (ILRS) // 2016-2019 Report / C. Noll, M. Pearlman (eds.). NASA/TP-20205008530, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA, 2020. — P. 8–66 – 8–68.
10. Соколов Д.А., Олейник-Дзядик О.М., Сильвестров И.С. Эталонный измерительный комплекс длины в диапазоне до 60 м из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины // Труды ИПА РАН. — 2020. — Вып. 52. — С. 63–67.
11. Донченко С.И., Блинов И.Ю., Домнин Ю.С., Гончаров А.С. Слюсарев С.Н., Норец И.Б. Государственный первичный эталон единиц времени, частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2018 // Альманах современной метрологии. — 2019. — № 1 (17). — С. 10–24.
12. Valery A. Emelyanov: Irkutsk, Russia. In: Section 8 ILRS Network of International Laser Ranging Service (ILRS) // 2016–2019 Report. Noll C. and Pearlman M. (eds.). — 2020. — P. 8–47 – 8–48. NASA/TP-20205008530, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA.
13. Безменов И.В., Пасынок С.Л. Формирование опорных значений координат и поправок часов КА ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. — 2015. — № 2. — С. 143–158.
14. Безменов И.В., Пасынок С.Л. Определение эфемеридно-временной информации космических аппаратов ГНСС в срочном режиме по данным измерений // Альманах современной метрологии. — 2017. — № 11. — С. 104–120.
15. Безменов И.В. Вычисление эфемерид и временных поправок навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме по данным измерений // Измерительная техника. — 2020. — № 1. — С. 11–17.

16. Безменов И.В., Игнатенко И.Ю., Пасынок С.Л. Новые методы достижения перспективного уровня точности координатно-временных измерений // ИПА РАН: [сайт]. — URL: <https://iaaras.ru/meetings/kvno2021/abstracts/bezmenov/> (дата обращения: 10.09.2021).
17. Цыба Е.Н., Пасынок С.Л. Предварительные результаты построения геоида акватории Мирового океана по данным спутниковой альтиметрии в ГМЦ ГСВЧ // Сборник тезисов докладов Восьмой Всероссийской конференции «КВНО-2019». — СПб.: ИПА РАН, 2019. — С. 191.
18. Цыба Е.Н., Волкова О.А., Панарин С.С., Пасынок С.Л. Метод повышения точности определения орбит спутников глобальных навигационных систем в базе нейросетевого моделирования // ИПА РАН: [сайт]. — URL: <https://iaaras.ru/meetings/kvno2021/abstracts/ciba/> (дата обращения: 10.09.2021).
19. Brattseva O., Gayazov I., Kurdubov S., Suvorkin V. SINCom — the new program pack-age for combined processing of space geodetic observations // Proceedings of the Journées 2014 «Systèmes de Référence Spatio-Temporels» / Malkin and N. Capitaine (eds). — Pulkovo observatory, 2015. — P. 250–251.
20. GGOS. GGOS Requirements for Core Sites, Global Geodetic Observing System (Revision 2): [website]. — URL: [https://cdis.nasa.gov/docs/2015/SiteRecDoc\\_Rev2\\_D3.4.pdf](https://cdis.nasa.gov/docs/2015/SiteRecDoc_Rev2_D3.4.pdf) (date of the application: 16.08.2019).
21. Degnan J., McGarry J., Zagwodzki T., Titterton P., Sweeney H., Donovan H., Perry M., Conklin B., Decker W., Cheek J., Mallama A., Dunn P., Rinklefs R. SLR2000: An Inexpensive, Fully Automated, Eyesafe Satellite Laser Ranging System // Proceedings of the 10th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation. — China, Shanghai: 1996. — P. 367–377.

*Статья поступила в редакцию: 16.11.2021 г.*

*Статья прошла рецензирование: 06.12.2021 г.*

*Статья принята в работу: 17.01.2022 г.*