

Деятельность ГМЦ ГСВЧ в области определения и прогнозирования ПВЗ

© С. Л. Пасынок¹, С. Ю. Антропов¹, И. В. Безменов¹, В. Е. Жаров²,
И. Ю. Игнатенко¹, Н. Н. Пархоменко¹, Е. Н. Цыба¹, В. Н. Федотов¹

¹ФГУП ВНИИФТРИ, Менделеево, Моск. обл., Россия

²ГАИШ МГУ им. П. К. Штернберга, г. Москва, Россия

Реферат

Цель авторов статьи — дать краткий обзор деятельности ФГУП «ВНИИФТРИ» в области определения и прогнозирования ПВЗ. За институтом Постановлением Правительства РФ № 225 закреплена роль Главного метрологического центра (ГМЦ) Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ), которая включает совместную обработку данных измерений и результатов определения ПВЗ, полученных в рамках отдельных методов измерений; а также формирование справочной информации о ПВЗ и ее распространение. Помимо этого, ФГУП «ВНИИФТРИ» участвует в работе по определению ПВЗ ГСВЧ путем проведения навигационных и спутниковых лазерных дальномерных измерений на пунктах метрологического контроля Росстандарта, расположенных в городском поселении Менделеево и городах Новосибирск, Иркутск, Хабаровск и Петропавловск-Камчатский, и дальнейшей обработки результатов ГНСС-, СЛД- и РСДБ-измерений ГСВЧ и международных служб. Также в ГМЦ ГСВЧ ведутся работы по эксплуатации созданных ранее средств определения и прогнозирования ПВЗ и разработке новых.

Оценка качества получаемых результатов проводится путем сравнения с данными Международной службы вращения Земли и опорных систем с данными других Центров обработки и анализа данных, а также по соответствию их требованиям технических заданий проводимых работ.

В обзоре представлен анализ результатов, показано, что работы в части определения ПВЗ выполнялись на высоком научно-техническом уровне, в соответствии с техническими заданиями, в полном объеме и в установленные сроки. Справочные значения ПВЗ (полученные в результате совместной обработки всех данных о ПВЗ) определялись в заданных режимах и распространялись потребителям по установленным каналам связи.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, ГНСС, СЛД, РСДБ, ГСВЧ.

Контакты для связи: Пасынок Сергей Леонидович (pasynok@vniiftri.ru).

Для цитирования: Пасынок С. Л., Антропов С. Ю., Безменов И. В., Жаров В. Е., Игнатенко И. Ю., Пархоменко Н. Н., Цыба Е. Н., Федотов В. Н. Деятельность ГМЦ ГСВЧ в области определения и прогнозирования ПВЗ // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 73. С. 31–39.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.73.31-39>

MMC SSTF Activity in the EOP Evaluation and Prediction Field

S. L. Pasynok¹, S. Yu. Antropov¹, I. V. Bezmenov¹, V. E. Zharov²,
I. Yu. Ignatenko¹, N. N. Parkhomenko¹, E. N. Tsyba¹, V. N. Fedotov¹

¹Federal State Unitary Enterprise “Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering”,
Mendeleevo, Moscow region, Russia

²Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract

The purpose of this paper is to provide a brief overview of the activities carried out by the Federal State Unitary Enterprise “Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering” (FSUE VNIIFTRI) of the Federal Agency on Technical Regulation and Metrology in the field of EOP (Earth Orientation Parameters) evaluation and prediction. According to government decree, the institute serves as the Main Metrological Center (MMC) for the State Service of Time, Frequency, and EOP Evaluation (SSTF). Its responsibilities include the integrated processing of measurement data, as well as the analysis of measurement results obtained through modern space geodetic techniques. Additionally, it involves the formation and dissemination of combined information about EOP. Furthermore, FSUE VNIIFTRI participates in EOP SSTF evaluation by providing navigation and satellite measurements at metrological control sites operated by the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology. These sites are located in Mendeleevo (Moscow region), as well as in Novosibirsk, Irkutsk, Khabarovsk, and Petropavlovsk-Kamchatsky. The institute processes measurement results from SSTF and international services using VLBI, GNSS, and SLR methods to evaluate EOP values for each modern geodetic technique separately. Work is also underway at MMC SSTF on operating previously developed equipment for EOP evaluation and prediction, as well as developing new systems.

The quality of the results obtained is evaluated by comparing EOP values published by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) with the data from other EOP processing and analysis centers, as well as by assessing compliance with the technical requirements for service provision.

The review presents the result analysis, demonstrating that work related to EOP evaluation and prediction has been conducted at a high scientific and technical level, in accordance with established technical specifications, and has been completed fully and on time. The reference EOP values — derived from processing all available EOP data — were determined within the specified modes and distributed to users through established communication channels.

Keywords: Earth's orientation parameters, GNSS, SLR, VLBI, SSTF.

Contacts: Sergey L. Pasynok (pasynok@vniiftri.ru).

For citation: Pasynok S. L., Antropov S. Yu., Bezmenov I. V., Zharov V. E., Ignatenko I. Yu., Parkhomenko N. N., Tsyba E. N., Fedotov V. N. MMC SSTF activity in the EOP evaluation and prediction field // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 73. P. 31–39.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.73.31-39>

Введение

Целью настоящей публикации является проведение обзора деятельности ФГУП «ВНИИФТРИ» в области определения параметров вращения Земли (ПВЗ), которые обеспечивают связь земной и небесной систем координат. Поскольку только для ограниченной части составляющих ПВЗ могут быть построены модели, то для обеспечения высокой точности необходимо регулярное проведение измерений, их сбор, обработка, формирование справочных данных о ПВЗ, а также доведение их до потребителей. То есть необходима служба для обеспечения непрерывного определения и прогнозирования ПВЗ. В международном масштабе эту деятельность осуществляет Международная служба вращения Земли и опорных систем (МСВЗ). В России Постановлением Правительства РФ № 225 от 23 марта 2001 г. эта задача возложена на Государственную службу времени, частоты и определения ПВЗ (ГСВЧ) под руководством Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (Росстандарта).

С метрологической точки зрения ПВЗ представляют собой шкалу измерений совокупности пяти угловых параметров ([ГОСТ Р 8.739-2011](#)). В настоящее время для их оперативного определения используются следующие методы современной космической геодезии:

- радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ);

- прием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС);

- спутниковая лазерная дальнометрия (СЛД).

За рубежом также используются данные французской доплеровской системы спутниковой орбитографии (DORIS), однако их вклад незначителен. Основное назначение DORIS — координатно-временное обеспечение полетов космических аппаратов (КА), имеющих на борту приемники DORIS.

Каждый из этих методов обладает своими достоинствами и недостатками, например, метод РСДБ является основополагающим для определе-

ния всемирного времени и положения небесного полюса, спутниковые методы играют ключевую роль при определении положения земного полюса и продолжительности суток. Кроме того, результаты определения ПВЗ в различных Центрах обработки и анализа данных (ЦОАД) немного отличаются друг от друга, что обусловлено использованием различных пакетов программного обеспечения, использованием своих реализаций земной системы координат ITRF, различными массивами наблюдательных данных, различными весами, приписываемыми измерениям). Поэтому для формирования полного набора ПВЗ и обеспечения единства измерений данные, полученные по каждому виду измерений в различных ЦОАД, стекаются в Главный метрологический центр (ГМЦ), роль которого выполняет организация, назначенная либо государственными директивными документами, либо принятая по соглашению, где подвергаются процессу совместной обработки (комбинированию). Данные такого ГМЦ играют роль принятых опорных значений ([РМГ 29-2013](#)) в соответствующем масштабе.

В международном масштабе роль такого ГМЦ в части оперативных данных играет Военно-морская обсерватория Соединенных штатов Америки (ВМО США или USNO), которая имеет статус Центра оперативных определений и прогнозирования ПВЗ МСВЗ. Ранее, в разное время, эту роль исполняли Гринвичская королевская, Парижская и Вашингтонская астрономические обсерватории, а также Международная служба широты и Международное бюро времени (ВН), действовавшее на базе Парижской астрономической обсерватории.

В России с 1955 г. роль ГМЦ национальной службы определения ПВЗ, которая интегрирована в ГСВЧ, играет ФГУП «ВНИИФТРИ» — ведущее предприятие Росстандарта. До 1955 г. эту роль исполняли Пулковская (императорская Николаевская) астрономическая обсерватория (ныне ГАО РАН), ЦНИИГАиК (ныне Центр ГК и ИПД ППК «Роскадастр») и Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ).

Помимо работ, связанных с осуществлением функций ГМЦ ГСВЧ, основные направления деятельности ФГУП «ВНИИФТРИ» в части определения ПВЗ включают:

- проведение регулярных навигационных измерений ГНСС-приемниками сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS Росстандарта, проведение регулярных СЛД-измерений с помощью ММКОС «Сажень-ТМ-БИС», установленных во ФГУП «ВНИИФТРИ» и в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ»;

- проведение регулярных определений ПВЗ отдельно по каждому виду измерений (РСДБ, СЛД, ГНСС);

- проведение работ по разработке и модернизации средств определения ПВЗ и эфемеридно-временной информации (ЭВИ) по спутниковым измерениям, а также внесение необходимых изменений в ранее разработанные программы;

- проведение работ по эксплуатации лазерной станции комплекса средств фундаментального сегмента ГЛОНАСС (ЛС КСФО) «Точка», ЦОАД ГМЦ ГСВЧ и Коррелятора ГМЦ ГСВЧ, а также сегмента обмена данными (СОД) Росстандарта.

Таким образом, работы, связанные с ГСВЧ, носят характер непрерывной оперативной службы. Настоящий обзор относится к работам, выполненным в рамках ГСВЧ в период 2023–2024 гг.

1. Проведение лазерных и навигационных измерений

В 2023–2024 гг. во ФГУП «ВНИИФТРИ» продолжалось непрерывное проведение регулярных навигационных измерений ГНСС-приемниками сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS Росстандарта, а также проведение регулярных СЛД-измерений с помощью СЛД ММКОС «Сажень-ТМ-БИС», установленных во ФГУП «ВНИИФТРИ» и в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ». Суточные файлы данных приемников, входящих в состав IGS, выкладывались на общедоступную по анонимному доступу часть сервера ФГУП «ВНИИФТРИ» в круглосуточном режиме. Часовые файлы измерений формировались в почасовом режиме и передавались в отечественные и частично в международные базы данных.

Стабильность положения пунктов в ITRF в апостериорном режиме (при проведении годового анализа) контролировалась путем сравнения наблюдаемого тренда и теоретического, опубликованного в каталоге пунктов ITRF. Наблюдаемый тренд за указанный период в пределах погрешностей измерений совпал с теоретическим, что свидетельствует о стабильном поведении расположения пунктов измерений региональной сети Росстандарта в ITRF.

Качество формирования внутренней шкалы времени (ШВ) приемников контролируется с по-

мощью измерителей интервалов времени (ИВИ) по результатам сличений импульсных сигналов частотой 1 Гц (PPS) внутренней ШВ приемника и PPS стандарта, сигналы которого используются для формирования частоты в приемнике.

2. Проведение определений ПВЗ по отдельным видам измерений

В 2023–2024 гг. в ГМЦ ГСВЧ продолжалось проведение регулярных определений ПВЗ отдельно по каждому виду измерений (СЛД, ГНСС, РСДБ).

Обработка СЛД-измерений ведется с помощью разработанного в ГМЦ ГСВЧ программного комплекса (Tsyba, Volkova, 2019). Поскольку одних только отечественных пунктов не хватает для определения ПВЗ, то в обработке использовались все доступные измерения сети Международной службы спутниковой лазерной дальнометрии (ILRS), которые также содержат и измерения СЛД ММКОС «Сажень-ТМ-БИС», установленных во ФГУП «ВНИИФТРИ» и в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ». Точностные характеристики отклонений результатов определений координат земного полюса по СЛД-измерениям, полученным в ГМЦ ГСВЧ в 2023–2024 гг., от данных МСВЗ составили: 20 и 10 угл. мкс — в части систематических смещений, 100 и 120 угл. мкс — в части СКО для координат земного полюса x и y соответственно.

На рис. 2 изображены отклонения результатов определений координаты x земного полюса в ГМЦ ГСВЧ по данным ГНСС-измерений региональной сети приемников, расположенных в России и странах СНГ (всего около 30 пунктов), от данных МСВЗ (красные звездочки) и их систематическая часть (красная линия). Остальные маркеры и линии изображают аналогичные величины, полученные в других ЦОАД по данным обработки результатов ГНСС-измерений глобальной международной сети приемников IGS. Программное обеспечение обработки ГНСС-измерений основано на использовании метода высокоточного точечного позиционирования (PPP) и отдельных программ из состава ПО BERNES 5.0 (R. Dach et al., 2007).

Вторичная (посткорреляционная) обработка РСДБ-измерений (задержек, полученных на Корреляторах МСВЗ) международной сети РСДБ-станций велась в ГМЦ ГСВЧ с помощью программного комплекса «Ариадна», разработанного в России, в ГАИШ МГУ (Жаров, 2011), что облегчает получение технической поддержки, а также своевременную модернизацию программы. На рис. 2 показаны отклонения результатов определения UT1–UTC (часовых сессий) друг от друга по данным измерений Международной РСДБ-службы (IVS), полученных в ЦОАД РАН, ВКГ и ГМЦ ГСВЧ.

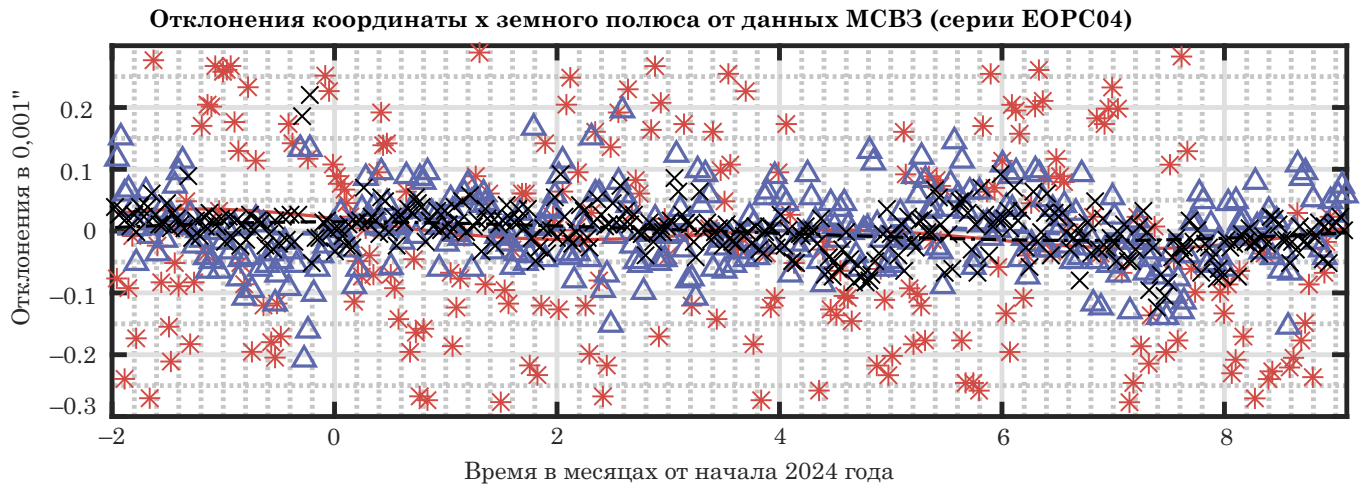


Рис. 1. Отклонения результатов определений координаты x земного полюса в ГМЦ ГСВЧ по данным ГНСС-измерений региональной сети приемников, расположенных в России и странах СНГ, от данных МСВЗ (красные звездочки) и их систематическая часть (красная линия); аналогичные величины для других ЦОАД, полученные по данным приемников всей сети Международной ГНСС службы (IGS)

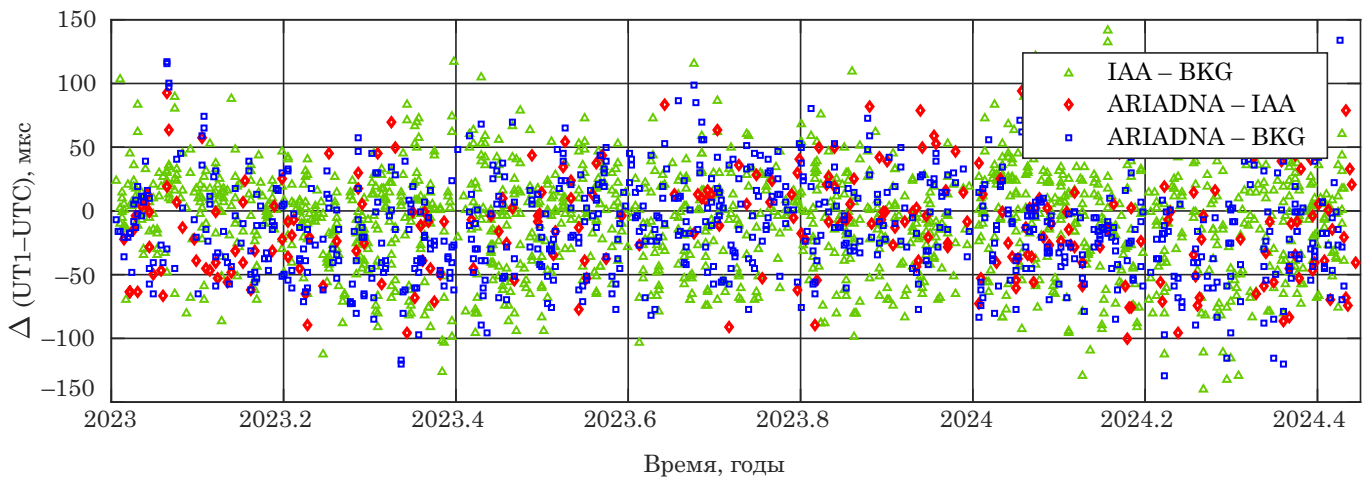


Рис. 2. Отклонения результатов определения UT1-UTC (часовых сессий) друг от друга по данным измерений Международной РСДБ-службы (IVS), полученных в ЦОАД РАН, BKG и ГМЦ ГСВЧ

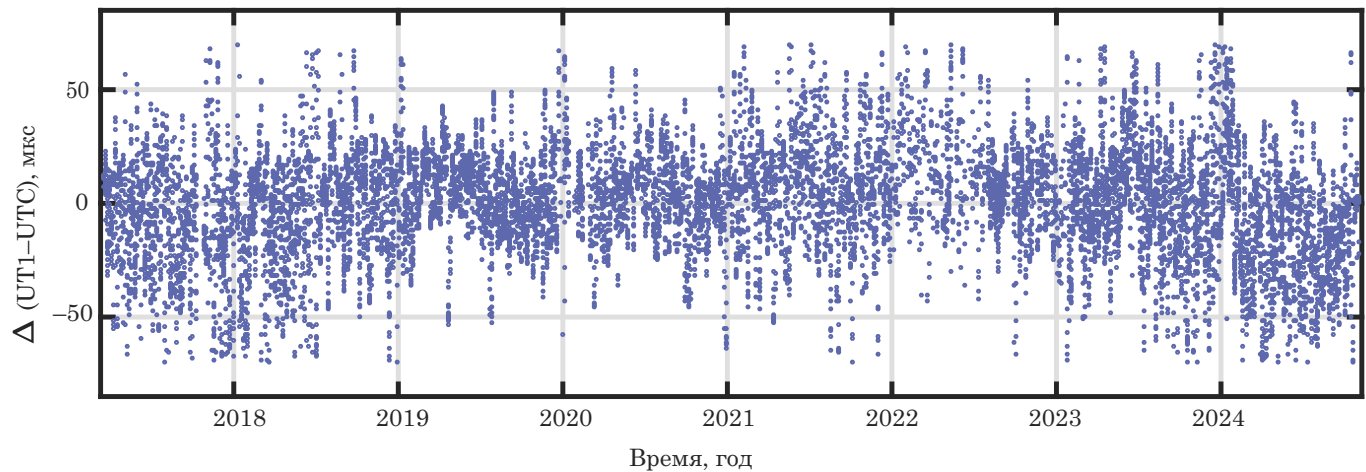


Рис. 3. Отклонения результатов определения UT1-UTC (часовых сессий) по данным измерений от данных МСВЗ

Вторичная (посткорреляционная) обработка РСДБ-измерений (задержек, полученных на Корреляторе РАН) с трехэлементного радиоинтерферометра (ТРУК) на основе малых быстороворотных антенн РТ-13 нового поколения, созданных ИПА РАН, велась в ГМЦ ГСВЧ с помощью программного комплекса ОССАМ (Titov et al., 2001), разработанного за рубежом и модернизированного в ГМЦ ГСВЧ для этой цели. На рис. 3 изображены отклонения результатов определения UT1–UTC (часовых сессий) по данным измерений от данных МСВЗ.

3. Совместная обработка измерений

В 2023–2024 гг. в ГМЦ ГСВЧ продолжалась ежесуточная совместная обработка (комбинирование) и прогнозирование, в результате которых формировались данные о ПВЗ ГСВЧ. Результаты публиковались в виде бюллетеней ГСВЧ Q и A установленной формы и распространялись через сайт (pvz.vniiftri.ru), ftp-сервер ([ftp.vniiftri.ru](ftp://vniiftri.ru)) и электронную почту (<mailto:mark@vniiftri.ru>). Квартальные бюллетени E ГСВЧ распространялись также в печатной форме.

4. Проведение работ по разработке и модернизации средств определения ПВЗ и ЭВИ по спутниковым измерениям, а также внесение необходимых изменений в ранее разработанные программы

4.1 Сводная обработка (комбинирование) данных о продолжительности суток

Вариации продолжительности суток регулярно определяются в ГМЦ ГСВЧ и других ЦОАД по отдельным видам измерений уже несколько десятилетий, однако сводные данные, полученные из совместной обработки (комбинирования) отдельных определений, до недавнего времени не требовались, не строились и не публиковались. Поэтому, когда появились запросы на опубликование таких данных, алгоритм совместной обработки (комбинирования) и прогнозирования значений вариации продолжительности суток был внедрен и запущен в режиме службы с 29 февраля 2024 г. Значения вариации продолжительности суток публикуются с этого момента в бюллетенях ГСВЧ новой формы.

Алгоритм комбинирования, реализованный в данном варианте, такой же, как и у остальных ПВЗ: после исключения из рядов отдельных ЦОАД систематических вариаций образуется средневзвешенное значение с весами, определенными из анализа предшествующих определений. Среднее систематическое смещение для текущей недели образуется как средневзвешенное значение среднего смещения для предшествующей и текущей недели. После проведения взвешива-

ния систематические вариации возвращаются. Алгоритм прогнозирования значений продолжительности суток использовался тот же, что и для остальных ПВЗ (Кауфман, 2008).

Бюллетень A ГСВЧ новой формы с комбинированными значениями вариаций продолжительности суток за последнюю истекшую неделю ГСВЧ доступен по адресу <http://pvz.vniiftri.ru/data/an.txt>. На рис. 4a изображены отклонения значений вариаций продолжительности суток от данных МСВЗ, на рис. 4b — вид окна программы для графического контроля полученных значений оператором. Сводные значения изображены на рис. 4a голубым цветом, а на рис. 4b — бирюзовым. Маркерами и линиями других цветов изображены данные, полученные в других ЦОАД, а сплошными линиями — их систематические части.

4.2 Новый алгоритм оперативной сводной обработки (комбинирования) ПВЗ

В связи с растущими требованиями к точности определения и прогнозирования ПВЗ в ГМЦ ГСВЧ ведутся исследования по повышению точности совместной обработки данных (комбинирования) и прогнозирования. Хотя старый метод оперативного комбинирования (Кауфман М., 2008) долгое время успешно применялся в ГМЦ ГСВЧ, на новом, более высоком уровне точности проявились его недостатки. Прежде всего, как отмечал и сам автор действующего метода (Кауфман М., 2008), процедура взвешенного определения недельного систематического смещения находится в противоречии с повышением требований к оперативности определения ПВЗ. Поэтому в ГМЦ ГСВЧ был разработан другой метод оперативного комбинирования, основанный на построении экспериментальных распределений вероятностей и использовании медиан этих распределений. Пока сравнение этих методов (старого и нового) было проведено только на сравнительно малом промежутке времени. В результате этого (предварительного) сравнения было установлено, что новый метод позволяет повысить точность срочных данных на 14 %, 22 %, 20 % и 34 % для координат земного полюса x и y , а также для UT1 и вариации LOD соответственно. Наибольшего повышения точности удалось добиться для вариации продолжительности суток. Для углов нутации новый метод никакого улучшения не показал. По-видимому, это связано с малым числом измерений и значительной задержкой появления результатов корреляционной обработки данных измерений многостанционных РСДБ-сессий в международных базах данных измерений и результатов их обработки, в результате чего вероятностные оценки в этом случае были значительно грубее, чем для других ПВЗ.

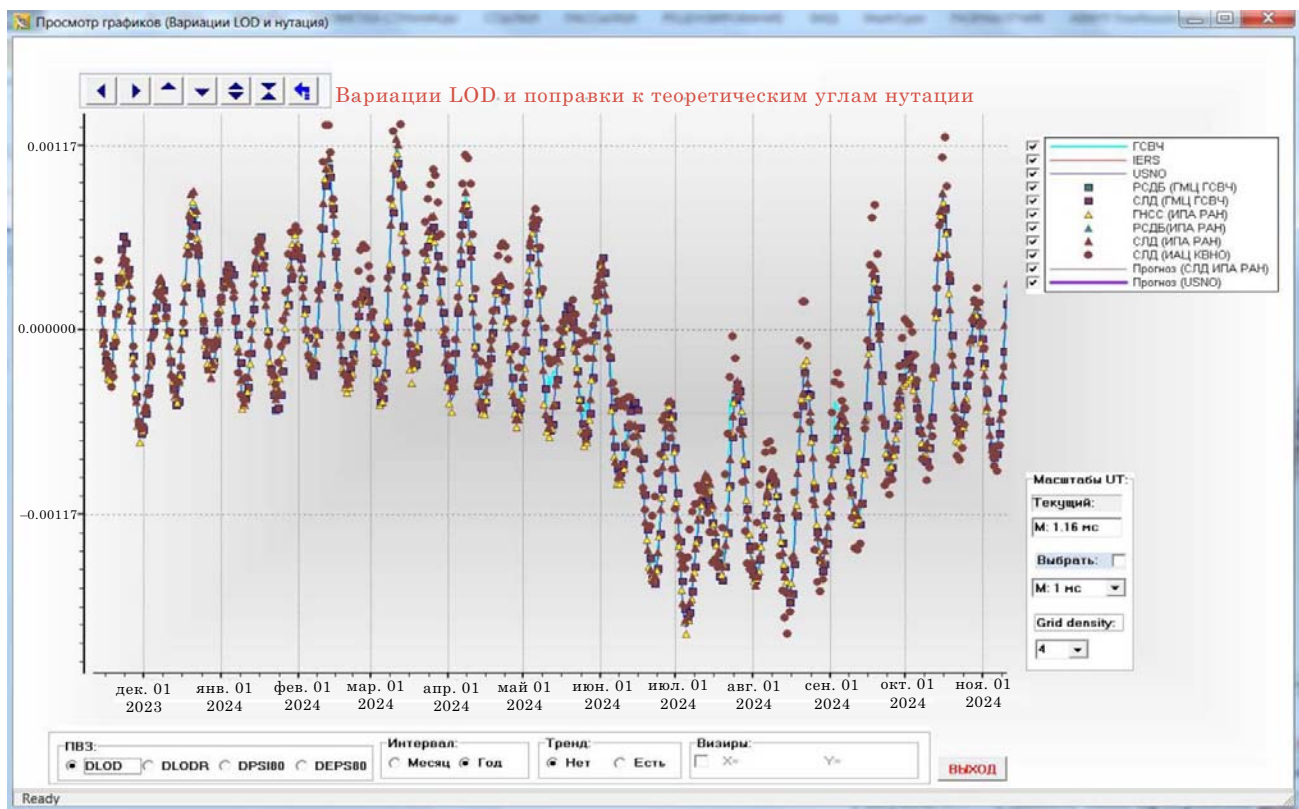
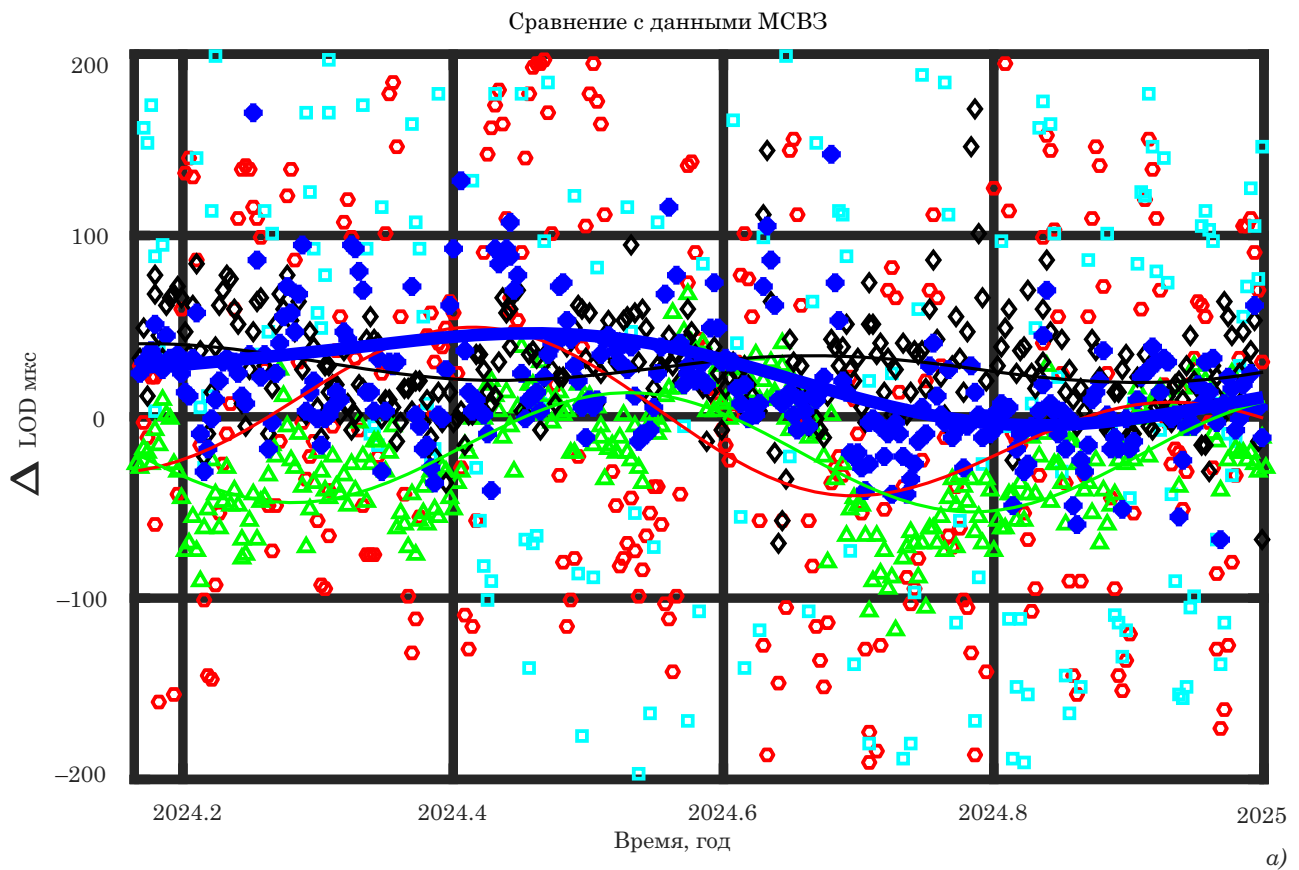


Рис. 4. Отклонения значений продолжительности суток от данных МСВЗ (a) и фото окна программы графического контроля оператором этих значений (b)

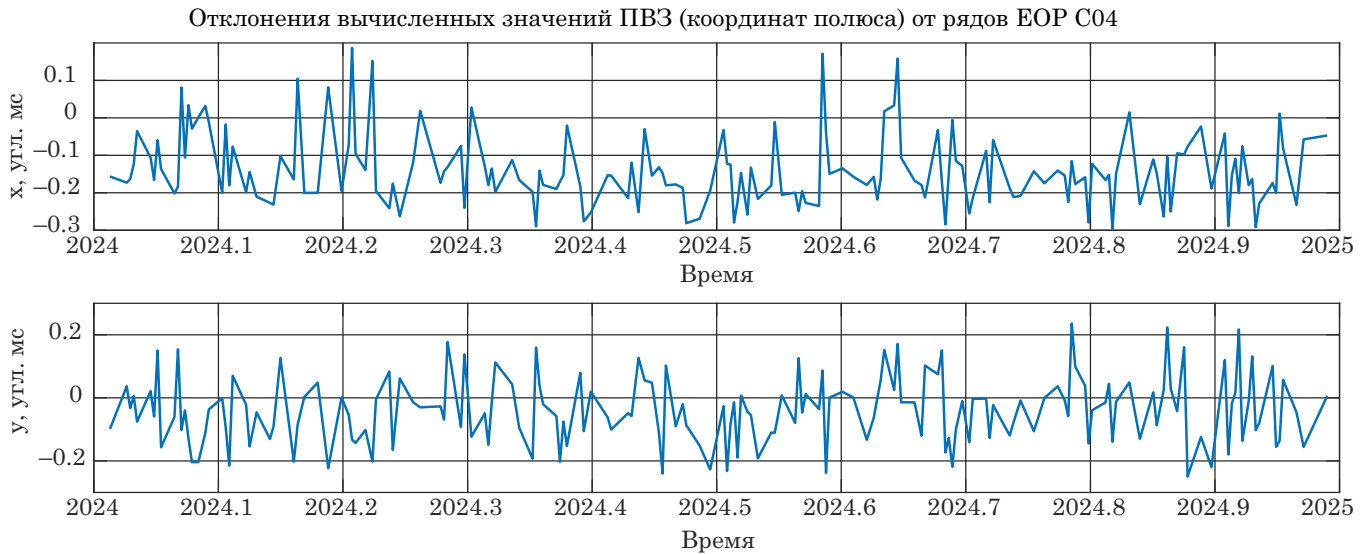


Рис. 5. Определенные с помощью метода RADAU отклонения результатов определений координат земного полюса по СЛД-измерениям от данных МСВЗ

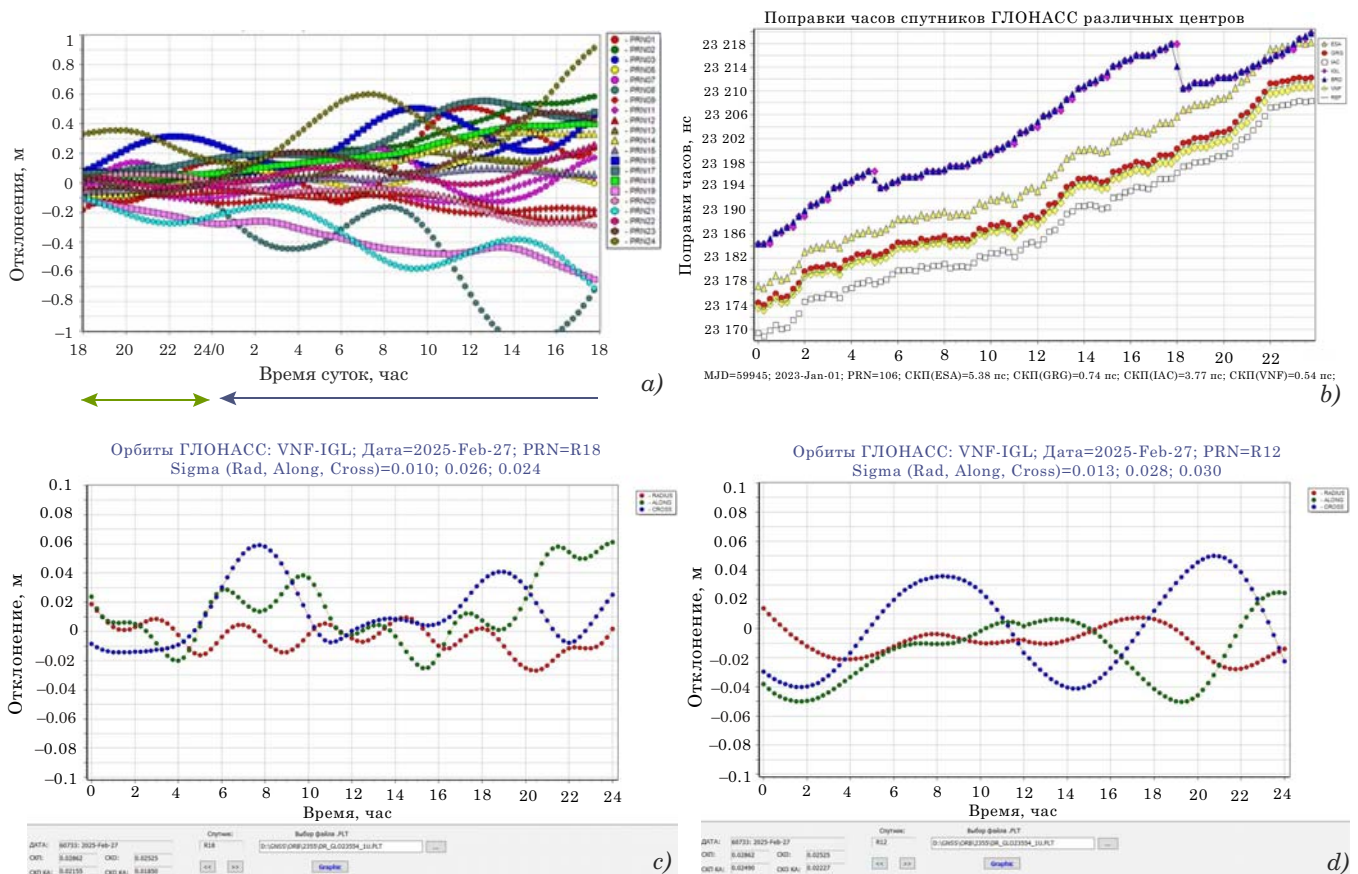


Рис. 6. Результаты определения ЭВИ ГНСС ГЛОНАСС в ГМЦ ГСВЧ (описание в тексте)

4.3 Проведение работ по разработке и модернизации средств определения ПВЗ и ЭВИ по спутниковым измерениям

В рамках работ по совершенствованию средств определения ПВЗ по спутниковым измерениям ведутся работы по модернизации ЦОАД ГМЦ ГСВЧ. Для этой цели закупается новое оборудова-

ние и совершенствуется программное обеспечение для определения ПВЗ и орбит по измерениям пассивных геодезических спутников. Разработана гибридная динамическая модель орбитального движения ([Цыба, Пасынок, 2025](#)).



a)



b)

Рис. 7. Внешний вид коррелятора ГМЦ ГСВЧ (a) и ЛС КСФО «Точка», установленной в Менделеево (b)

Продолжается разработка аппаратно-программных средств (АПС) определения ПВЗ и орбит по СЛД-измерениям. Сравнение вычисленных с помощью этого метода отклонений координат пассивных геодезических спутников Lageos-1 и Lageos-2 от точных (апостериорных) координат, вычисленных в Центре GFZ, и отклонений прогнозных орбит той же срочности, распространяемых Международной службой лазерной спутниковой дальнометрии (ILRS), от тех же точных орбит показало, что применение указанного метода ([Цыба, Пасынок, 2025](#)) позволяет получить более точную оперативную орбиту. СКО снижается от 30 см (для прогнозных орбит ILRS) до 8 см для орбит той же срочности, вычисленных с помощью нового метода. Это позволяет уменьшить задержку и повысить точность оперативных определений ПВЗ по СЛД-измерениям. На рис. 5 показаны отклонения определенных с помощью этого программного комплекса значений ПВЗ от данных МСВЗ. СКО полученных значений составило около 90 угл. мкс.

Продолжается разработка АПС определения ПВЗ и ЭВИ по ГНСС-измерениям. Новое программное обеспечение сможет работать в сверхсрочном (ultrarapid) режиме, а также работать с данными измерений новых навигационных систем: GALILEO (ГНСС Европейского Союза) и BEIDOU (ГНСС Китайской народной республики). Испытания АПС намечены на конец 2025 г.

На рис. 6 показан ряд результатов, полученных с помощью АПС (вид графического окна отображения результатов работы программы):

- отклонения определенных с помощью АПС сверхоперативных орбит КА ГЛОНАСС по бинормали (рис. 6a);

- поправки часов КА ГЛОНАСС PRN R06, определенные с помощью разрабатываемого АПС (желтые ромбы) и других ЦОАД (синими треугольниками изображены поправки часов, передаваемые в навигационном сообщении). СКП по-

правок часов, определенных в ГМЦ ГСВЧ (VNF) составило 0.54 нс (рис. 6b);

- отклонения определенных с помощью АПС апостериорных орбит КА ГЛОНАСС с PRN R18 и R12 от окончательного решения IGS (рис. 6c и 6d). Красным цветом изображены радиальные отклонения, зеленым — вдоль орбиты, синим — по бинормали. СКП орбит аппаратов R18 и R12 составили 2.1 см и 2.5 см соответственно. Среднее по группировке СКО составило 2.9 см.

При разработке программного обеспечения определения ПВЗ и ЭВИ по ГНСС-измерениям возник ряд препятствий, которые успешно были преодолены ([Безменов, 2023](#); [Безменов, 2024](#)).

5. Проведение работ по эксплуатации ранее созданных средств

Также в 2023–2024 гг. продолжалась эксплуатация ЦОАД ГМЦ ГСВЧ и Коррелятора ГМЦ ГСВЧ (рис. 7a), ЛС КСФО «Точка» (рис. 7b), а также СОД Росстандарта.

Заключение

В статье проведен краткий обзор деятельности, осуществляемой во ФГУП «ВНИИФТРИ» в области определения и прогнозирования ПВЗ. Описаны результаты и показано, что работы в части определения ПВЗ выполнялись на высоком научно-техническом уровне, в соответствии с техническими заданиями, в полном объеме и в установленные сроки. Справочные значения ПВЗ (полученные в результате совместной обработки всех данных о ПВЗ) определялись в заданных режимах и распространялись потребителям по установленным каналам связи.

Литература

Безменов И. В. Быстрый алгоритм очистки от выбросов измерительных данных: поиск оптимального решения с минимальным количеством отбракованных

результатов измерений // Альманах современной метрологии, 2023. №4 (36). С. 96–122.

Безменов И. В. Поиск тренда во временных рядах измерительных данных // Альманах современной метрологии. 2024. № 2 (38). С. 106–139.

ГОСТ Р 8.739-2011 ГСИ. Эталоны для координатно-временных измерений. Основные положения. Способы выражения погрешностей. М.: Стандартинформ, 2019.

Жаров В. Е. Основы радиоастрометрии. М.: Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2011. С. 208–224.

Кауфман М. Б. Точные методы измерения параметров вращения Земли в интересах навигационно-временных определений. В кн. Точные измерения для высоких технологий. Монография. ФГУП «ВНИИФТРИ». Менделеево, 2008. С. 80–18.

РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Стандартинформ, 2014.

Цыба Е. Н., Пасынок С. Л. Численная гибридная динамическая модель орбитального движения высоко-, средне- и низкоорбитальных спутников на основе формул RADAU // Институт прикладной астрономии РАН [Электронный ресурс]. URL: <https://iaaras.ru/meetings/kvno2025/abstracts/cyba/> (дата обращения: 16.05.2025).

Bernese GPS Software. Version 5.0 / ed. by R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl. Astronomical Institute of Bern University, 2007.

Тыба Е., Волкова О. Determination of Earth orientation parameters by SLR in MMC SSTF FSUE VNIIFTRI // Proceedings of the Journees / ed. by C. Bizouard. 7–9 October, 2019. Observatoire de Paris, 2020. P. 159–162.

Titov O., Tesmer V., Böhm J. OCCAM Version 5.0 Software, User Guide, AUSLIG Technical Report 7, Australian Surveying and Land Information Group (AUSLIG), Canberra, 2001.