

## Определение ПВЗ и совершенствование аппаратно-программных средств в ГМЦ ГСВЧ

© С. Л. Пасынок<sup>1</sup>, И. В. Безменов<sup>1</sup>, И. Ю. Игнатенко<sup>1</sup>,  
Е. Н. Цыба<sup>1</sup>, В. Е. Жаров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Московская обл., Россия

<sup>2</sup>ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия

В статье рассмотрена деятельность Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ) по определению параметров вращения Земли (ПВЗ) и совершенствованию аппаратно-программных средств в части определения ПВЗ в 2018 – нач. 2019 гг.

В обозначенный период в ГМЦ ГСВЧ были проведены измерения с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и спутниковых лазерных дальномеров (СЛД) нового поколения, которыми были оснащены пункты ФГУП «ВНИИФТРИ» и его Восточно-сибирского филиала (Менделеево и Иркутск). Выполнено определение ПВЗ по отдельным видам измерений (РСДБ, ГНСС и СЛД). С целью формирования справочных данных полученные в центре результаты были обработаны (и скомбинированы) с данными о ПВЗ, полученными в других отечественных Центрах обработки и анализа данных.

В ГМЦ ГСВЧ было разработано и модернизировано программное обеспечение как для определения ПВЗ, так и для решения других задач (определения эфемерид и поправок часов КА GPS/ГЛОНАСС и обработки данных спутниковых альтиметрических измерений).

**Ключевые слова:** параметры вращения Земли, всемирное время, служба ПВЗ, РСДБ, ГНСС, СЛД, альтиметрия.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.49.60-68>

### Введение

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ФГУП «ВНИИФТРИ») в части определения ПВЗ выполняет следующие функции:

— Главного метрологического центра Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) и функции Центра обработки и анализа данных (ЦОАД) ГСВЧ;

— Центра сбора и предварительной обработки данных измерений для целей определения ПВЗ с сети пунктов метрологического контроля Росстандарта, одним из пунктов измерений которой является ГМЦ ГСВЧ.

Роль ФГУП «ВНИИФТРИ» как ГМЦ ГСВЧ закреплена Постановлением Правительства Российской Федерации №225.

## **Определение ПВЗ и совершенствование аппаратно-программных средств ГМЦ ГСВЧ**

### *Проведение измерений в пунктах сети метрологического контроля Росстандарта*

Пункты метрологического контроля Росстандарта расположены в г. п. Менделеево, Новосибирске, Иркутске, Хабаровске и Петропавловске-Камчатском. В этих пунктах размещены эталоны времени и частоты, а также средства измерений для определения ПВЗ. Все пять пунктов входят в состав фундаментальной астрономо-геодезической сети, три пункта (Менделеево, Иркутск и Новосибирск) входят в состав сети пунктов Международной земной координатной основы и Международной ГНСС-службы International VLBI Service (IVS). Два пункта (Менделеево и Иркутск) являются пунктами с частичной колокацией, поскольку в них имеются средства приёма сигналов ГНСС и СЛД, и входят в состав сети Международной службы лазерной дальнометрии спутников и Луны. Один пункт (Менделеево) входит также в состав Европейской геодезической сети.

В 2018 г. на пунктах метрологического контроля Росстандарта проводились непрерывные ежесуточные ГНСС-измерения и по мере открытия погодных окон — СЛД-измерения с помощью спутникового лазерного дальномера «Сажень-ГМ-БИС».

В пунктах в Иркутске и Менделеево были установлены спутниковые лазерные системы нового поколения [1].

### *Обработка результатов РСДБ-, ГНСС- и СЛД-измерений*

В 2018 г. продолжалась ежесуточная оперативная обработка ГНСС-измерений (Bernese GNSS Software [2]), результатов отдельных измерительных сессий, проведенных на радиоинтерферометрах со сверхдлинными базами (РСДБ) («Ариадна 4.10» [3] и «Ossam» [4]), и лазерных измерений (Программный комплекс обработки лазерных измерений [5]).

В 2018 г. успешно выдержало предварительные испытания программно-аппаратное средство определения всемирного времени по лазерным наблюдениям Луны. По результатам испытаний среднеквадратическая погрешность (СКП) определений не превосходит 60 мкс и зависит от числа нормальных точек, использованных для обработки (испытания проводились с использованием измерительной информации со станции «GRSM»).

В 2018 – нач. 2019 гг. были выполнены работы по модернизации программного пакета для обработки РСДБ-измерений «Ариадна 4.10». Необходимость модернизации была обусловлена рядом факторов. Одним из основных факторов был переход службы IVS на новый формат данных (NetCDF) Глобальной системы РСДБ-измерений (VGOS) [6]. В связи с этим возник вынужденный перерыв в получении высокоточных данных об углах нутации, что привело к некоторому увеличению погрешности углов нутации ГСВЧ, которое, однако, не превысило пределов, установленных техническими требованиями. Кроме того, в связи с необходимостью будущего перехода на работу по SINEX-файлам (Solution INdependent EXchange format — независимый от программного обеспечения формат представления нормальных уравнений и их решений), необходимо было разработать модуль формирования SINEX-файлов по

интенсивным и трёхстанционным сессиям РСДБ-измерений. Помимо этого, в связи с появлением файлов нового формата и «интенсивных» SINEX-файлов необходимо было модернизировать неинтерактивную (автономную) версию пакета, поскольку в старой версии не была предусмотрена работа с такими входными и выходными файлами. Для совместной обработки (комбинирования) нескольких файлов РСДБ-измерений за сутки с одной пары телескопов нужно было подключить программу совместной обработки нескольких SINEX-файлов.

Новая версия программы «Ариадна 4.11» позволяет работать с файлами VGOS (в формате NetCDF) и NGS (в ASCII-формате), формировать результаты обработки «интенсивных» и трёхстанционных сессий в виде стандартизованных SINEX-файлов. В неинтерактивной (автономной) версии программы также предусмотрены подключение программного пакета SINcom [7], разработанного ИПА РАН для получения совместного решения по результатам РСДБ-сессий на новых 13-метровых антеннах РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» [8] на основе комбинирования нескольких SINEX-файлов, и формирование одного результирующего SINEX-файла с комбинированным решением на заданную дату.

На рис. 1 показаны разности значений UT1, вычисленных ведущими отечественными и международными центрами обработки и анализа данных (ИПА РАН, ВКГ (Агентство геодезии и картографии Германии) и USNO (военно-морская обсерватория США)) и ГМЦ ГСВЧ с помощью модернизированного программного комплекса «Ариадна 4.11». Взвешенные средние отклонения этих разностей составили  $-11$ ;  $-2.7$  и  $-4.8$  мкс соответственно; взвешенные среднеквадратические отклонения (СКО) —  $14.2$ ;  $11.3$  и  $12.4$  мкс.

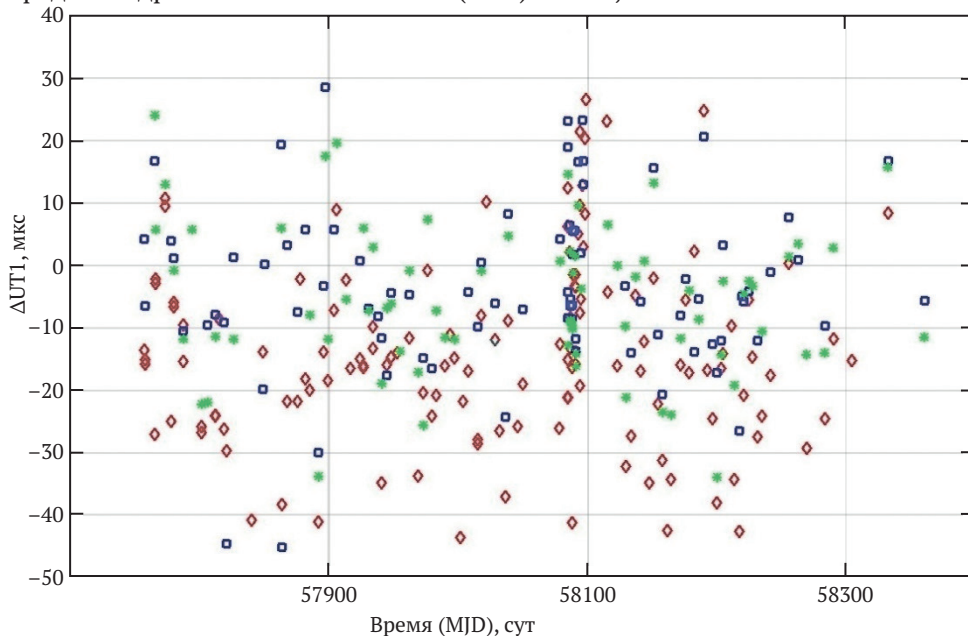


Рис. 1. Разности значений UT1, вычисленных ведущими международными ЦОАД (ИПА РАН (ромбики), ВКГ (квадраты) и USNO (звёздочки)) и ГМЦ ГСВЧ с помощью модернизированного программного комплекса «Ариадна 4.11»

Данные вторичной (посткорреляционной) обработки в ГМЦ ГСВЧ РСДБ-сессий, выполняемых по программам IVS, с 2018 г. передаются в Международную службу вращения Земли и опорных систем (МСВЗ). Данные вторичной (посткорреляционной) обработки в ГМЦ ГСВЧ результатов РСДБ-сессий на новых 13-метровых антеннах РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» с 2019 г. используются в ГМЦ ГСВЧ только для формирования сводных (комбинированных) данных о всемирном времени.

### Определение орбит космических аппаратов GPS и ГЛОНАСС

В 2007–2017 гг. в ГМЦ ГСВЧ были разработаны программные средства определения орбит и поправок часов космических аппаратов (КА) глобальных навигационных спутниковых систем РФ (ГЛОНАСС) и США (GPS), позволяющие определять эфемеридно-временную информацию (ЭВИ) в трех режимах: а) апостериорном [9], б) срочном [10] и в) оперативном [11]. При этом апостериорная информация формируется (с задержкой ~2 недели) по результатам сводной обработки данных об орбитах и поправках часов, полученных в отечественных и зарубежных ЦОАД. Информация в срочном (задержка ~ 1 сут) и оперативном (реальное время) режимах получается непосредственно из обработки ГНСС-измерений от ~ 500 станций.

В 2018 г. продолжалось совершенствование программного обеспечения оперативных определений и прогнозирования орбит и поправок часов в части:

- совершенствования процедуры отбраковки плохих данных и идентификации скачков (см. [12], [13]);
- создания более эффективного распараллеливания вычислений и сокращения времени обработки.

Программное обеспечение по формированию ЭВИ КА ГНСС в трех указанных режимах к настоящему времени полностью разработано. В частности, оперативная информация по ЭВИ выдается с периодичностью 6 ч (4 раза/сут) в виде SP3-файлов, каждый из которых содержит ЭВИ за 2-суточный интервал. При этом данные из первой половины файла получаются в результате обработки данных измерений, а данные из второй половины — в результате прогнозирования, см. табл. 1. Значение (-24) в скобках означает, что соответствующий момент времени относится к суткам, предшествующим текущим (суткам вычисления), а (+24) — к суткам, следующим за текущими.

Таблица 1

Расписание выдачи оперативных данных о координатах и поправках часов КА GPS и ГЛОНАСС для текущих суток

Наименование файла SP3	Время выдачи	Интервал данных	
		Обработка измерений	Прогноз
VNUwwwwd_00.SP3	~08:15	00:00(-24)–23:59(-24)	00:00–23:59
VNUwwwwd_06.SP3	~14:15	06:00(-24)–05:59	06:00–05:59(+24)
VNUwwwwd_12.SP3	~20:15	12:00(-24)–11:59	12:00–11:59(+24)
VNUwwwwd_18.SP3	~02:15(+24)	18:00(-24)–17:59	18:00–17:59(+24)

Для оценки точности полученной в ГМЦ ГСВЧ ЭВИ для КА GPS было проведено сравнение результатов с апостериорными значениями параметров ЭВИ GPS, сформированных Международной ГНСС-службой (International GNSS Service, IGS).

Что же касается ГЛОНАСС, то с данными Международной ГНСС-службы сравнивались только координаты КА ГЛОНАСС. Сравнение поправок часов КА ГЛОНАСС проводилось с опорными значениями, полученными с помощью алгоритма (см. [10]), аналогичного алгоритму формирования комбинированных значений IGS.

Погрешности значений ЭВИ, полученной по результатам тестовых вычислений в оперативном режиме, приведены в табл. 2. СКП полученных в ГМЦ ГСВЧ поправок часов, а также СКП поправок часов, полученных в других ЦОАД, приведены в табл. 3 и 4.

Т а б л и ц а 2

Погрешности координат и поправок часов КА GPS и ГЛОНАСС

Наименование файла SP3	Обработка измерений, СКП	Прогнозирование, СКП
Координаты КА GPS, м	~0.017	<0.2
Координаты КА ГЛОНАСС, м	~0.045	<0.2
Поправки часов GPS, нс	<1.0	~3.0
Поправки часов ГЛОНАСС, нс	<1.0	~5.0

Т а б л и ц а 3

СКП (нс) поправок часов КА GPS, полученных различными Центрами

Центр (название в IGS)	COD	EMX	ESA	GFZ	GRG	MIT	PMK	VNF	VNP
Интервал 1	0.692	1.095	1.406	0.353	0.165	2.246	3.771	0.294	—
Интервал 2	0.701	1.550	0.872	0.379	0.166	2.306	3.543	0.410	1.930
Интервал 3	0.636	1.294	1.157	0.376	0.167	2.255	3.897	0.467	1.854
Интервал 4	0.636	0.764	1.289	0.389	0.151	2.305	3.894	0.625	1.709

Т а б л и ц а 4

СКП (нс) поправок часов КА ГЛОНАСС, полученных различными Центрами

Центр	ESA	GRG	IAC	PMK	VNF	VNP
Интервал 1	3.418	1.524	2.544	7.381	0.675	—
Интервал 2	3.315	1.768	2.480	6.977	0.614	5.663
Интервал 3	3.491	2.072	2.231	6.946	0.609	4.405
Интервал 4	4.053	2.297	1.392	6.564	0.975	6.468

Расчеты проводились на четырех следующих друг за другом суточных интервалах, начиная с 06:00 30.05.2018 и заканчивая 05:59 03.06.2018. Так, интервал 1 начинался в 06:00 ч 30.05.2018 и заканчивался в 05:59 ч 31.05.2018. Аббревиатуры «VNF» и «VNP» соответствуют ЭВИ, полученным в ГМЦ ГСВЧ: «VNF» — обработка данных измерений, «VNP» — прогноз.

### *Обработка спутниковых альтиметрических измерений*

В ГМЦ ГСВЧ разработано программное обеспечение [14] для определения уклонений отвесных линий по данным спутниковой альтиметрии и проводятся вычисления орбит низкоорбитальных спутников по данным ГНСС и СЛД. Ранее определение орбит проводилось с помощью Bernese GNSS Software [2], однако сейчас для вычислений используется программа собственной разработки (язык программирования — Python).

На текущий момент комплекс имеет следующие характеристики:

- СКО определения орбит КА JASON1 не более 4.2 см;
- СКО определения высот геоида не более 2.5 см;
- СКО определения уклонений отвесных линий не более 1.8<sup>2</sup>;
- СКО определения аномалий силы тяжести не более 6 мГал.

### *Комбинирование (сводная обработка)*

В 2018 г. проводилось ежесуточная совместная обработка (комбинирование) на уровне временных рядов для целей определения значений ПВЗ ГСВЧ.

Сравнение с данными МСВЗ результатов регулярной вторичной обработки в ГМЦ ГСВЧ данных РСДБ-измерений, проводимых на 13-метровых радиотелескопах двухэлементного радиоинтерферометра на узлах колокации (ДРУК) комплекса «Квазар-КВО», созданного ИПА РАН, показало, что в начале 2018 г. СКО этих данных не превысило 21 мкс. Причём эти данные обладают высокой оперативностью.

Поэтому была проведена модернизация имеющегося в ГМЦ ГСВЧ программного обеспечения сводной обработки с целью включения в неё дополнительно данных ДРУК. С февраля 2019 г. данные о всемирном времени ГСВЧ формируются с учётом данных ДРУК.

На рис. 2 показаны отклонения от данных МСВЗ данных о всемирном времени ГСВЧ до и после подключения данных ДРУК. Видно, что за приведенный промежуток времени СКП данных о всемирном времени, полученных с учетом данных ДРУК, меньше 20 мкс (вычисления дают около 15 мкс).

Поскольку данные МСВЗ на момент проведения оценки ещё не являлись окончательными, то при проведении более поздних оценок результаты могут измениться. Однако в любом случае этот результат свидетельствует о высокой эффективности ДРУК в части решения задачи определения всемирного времени и настоятельной необходимости расширения сети малых антенн для повышения точности и оперативности определения и прогнозирования ПВЗ.

Помимо сводной обработки (комбинирования) с помощью временных рядов в ГМЦ ГСВЧ проводится ежесуточное экспериментальное комбинирование на основе SINEX-файлов с помощью автоматизированного программного пакета. Сбор результатов данных обработки отдельных файлов в формате SINEX, определение режима обработки в соответствии с порядком формирования бюллетеней ГСВЧ, формирование выходных данных, как в форматах

МСВЗ (ряда EOPC04 и бюллетеня *finals.daily*), так и в виде официальных бюллетеней ГСВЧ, а также запуск на выполнение вычислительного ядра производится скриптами, разработанными в ГМЦ ГСВЧ (на языке Perl), начало выполнения которых определяется планировщиком заданий операционной системы.

Вычислительным ядром программы является главный исполняемый модуль программного пакета SINCom, разработанный в ИПА РАН [7].

Таким образом, в настоящее время в ГМЦ ГСВЧ функционируют параллельно три метода комбинирования:

- комбинирование на уровне временных рядов с учётом данных ДРУК, на основе которого формируются бюллетени ГСВЧ с февраля 2019 г.;
- комбинирование на уровне временных рядов без учёта данных ДРУК для проведения сравнительного анализа;
- комбинирование на уровне SINEX-файлов в режиме исследований.

### Распространение информации о ПВЗ ГСВЧ

Оперативные данные о ПВЗ ГСВЧ включают:

- ежесуточные данные о ПВЗ — бюллетень Q (содержит вычисленные значения за предшествующие моменту определения сутки и прогноз на следующие 30 сут);
- еженедельные данные о ПВЗ — первая часть бюллетеня A (содержит вычисленные значения за неделю, предшествующую неделе момента определения данных, и прогноз на следующие 7 нед. с шагом в одну неделю);
- по мере необходимости информационное сообщение DT.

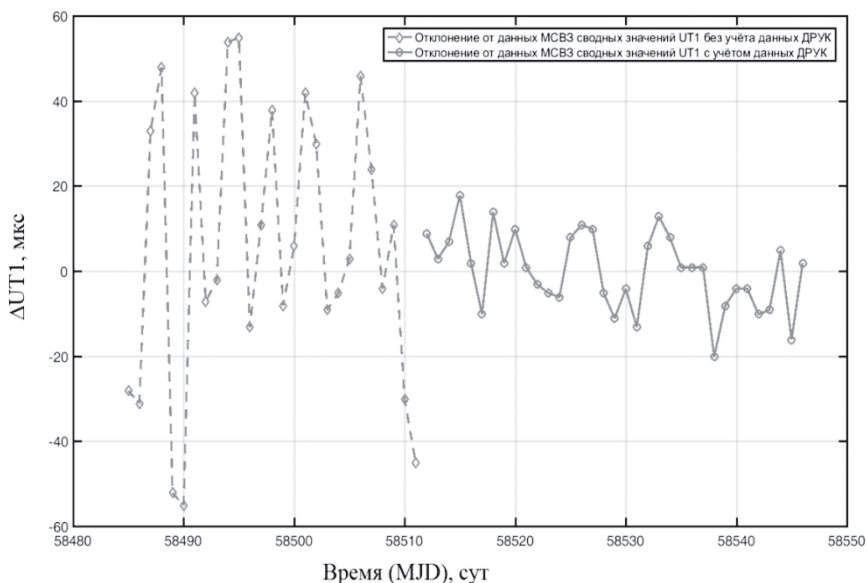


Рис. 2. Отклонения от данных МСВЗ данных о всемирном времени ГСВЧ до и после подключения данных ДРУК

В 2018 г. бюллетени А и Q распространялись через общедоступный ftp-сервер, через сайт службы ПВЗ, по электронной почте, факсу, а также по автоматизированному каналу связи между ГМЦ ГСВЧ и Автоматизированным центром контроля и управления системы «Цель».

## Заключение

По результатам проведенных работ можно сделать следующие выводы:

— работы ГМЦ ГСВЧ в 2018 г. выполнялись согласно требованиям Постановлений Правительства Российской Федерации №225 и Технического задания;

— в ГМЦ ГСВЧ проводится непрерывное совершенствование технических средств для обеспечения их соответствия неуклонно возрастающим требованиям ГЛОНАСС и других потребителей;

— для достижения перспективных тактико-технических требований ГЛОНАСС необходимо развитие сети малых быстровращающихся антенн нового поколения.

## Литература

1. Барышников М. В., Блинов И. Ю., Бондарев Н. Н., Борисов Б. А., Донченко С. И., Колычев А. М., Некрасов Ю. В., Мартынов С. В., Садовников М. А., Шаргородский В. Д. Результаты испытаний российской лазерной станции нового поколения «Точка» // Восьмая Всероссийская конференция Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО–2019), Санкт-Петербург, 15–19 апреля, 2019: Тезисы докладов. — СПб.: ИПА РАН, 2019. — С. 18.

2. Bernese GPS Software. Version 5.0. // ed. by Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. — Univ. of Bern, 2007. — 612 p.

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

4. Titov O., Tesmer V., Bohm J. Version 5.0 of the OCCAM VLBI Software, User Guide // AUSLIG Technical Report 7. — AUSLIG, Canberra, 2001.

5. Цыба Е. Н. Вычисление параметров вращения Земли по результатам спутниковой лазерной дальнометрии международной сети ILRS // Труды ИПА РАН. — СПб: ИПА РАН, 2016. — Вып. 38. — С. 66–70.

6. Gipson J. IVS Working Group 4 on VLBI Data Structures // The 5th IVS General Meeting Proceedings. — 2008. — P. 143–152.

7. Brattseva O., Gayazov I., Kurdubov S., Suvorkin V. SINCom — the new program package for combined processing of space geodetic observations // Proceedings of the Journées 2014 “Systèmes de Référence Spatio-Temporels”: Recent developments and prospects in ground-based and space astrometry, held at Pulkovo Observatory from 22 to 24 September 2014 / ed. Z. Malkin and N. Capitaine. — 2015. — P. 250–251.

8. Ипатов А. В., Иванов Д. В. Сеть радиотелескопов РТ-13 комплекса «Квазар-КВО»: первые результаты // Восьмая Всероссийская конференция Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО–2019), Санкт-Петербург, 15–19 апреля, 2019: Тезисы докладов. — СПб.: ИПА РАН, 2019. — С. 15.

9. Безменов И. В., Пасынок С. Л. Формирование опорных значений координат и поправок часов КА ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2015. — №2. — С. 143–158.

10. Безменов И. В., Пасынок С. Л. Определение эфемеридно-временной информа-



ции космических аппаратов ГНСС в срочном режиме по данным измерений // Альманах современной метрологии. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. — № 11. — С. 104–120.

11. *Безменов И. В.* Вычисление в ГМЦ ГСВЧ эфемерид и временных поправок космических аппаратов ГНСС в оперативном режиме по данным измерений // Материалы IX международного симпозиума «Метрология времени и пространства». — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2019 (в печати).

12. *Безменов И. В., Наумов А. В., Пасынок С. Л.* Эффективный алгоритм устранения выбросов из данных измерений глобальных навигационных спутниковых систем // Измерительная техника. — М: ФГУП ВНИИМС, 2018. — №9. — С. 26–30.

13. *Безменов И. В., Блинов И. Ю., Наумов А. В., Пасынок С. Л.* Алгоритм определения скачков в комбинации Мельбурна-Вуббена, образованной из кодовых и фазовых данных измерений в глобальных навигационных спутниковых системах // Измерительная техника. — М: ФГУП «ВНИИМС», 2019. — №5. — С. 25–30.

14. *Цыба Е. Н.* Предварительные результаты построения модели геоида акватории Мирового океана по данным спутниковой альтиметрии в ГМЦ ГСВЧ // Восьмая Всероссийская конференция Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО–2019), Санкт-Петербург, 15–19 апреля, 2019: Тезисы докладов. — СПб.: ИПА РАН, 2019. — С. 191.

## **EOP Evaluation and Activities to Improve the Facilities of the SSTF's Main Metrological Centre**

**S. L. Pasynok, I. V. Bezmenov, I. Yu. Ignatenko,  
E. N. Tsyba, V. E. Zharov**

This article considers the activities in 2018 and early 2019 to determine the Earth orientation parameters (EOP) and to improve the facilities used by the Main Metrological Centre (MMC) of the State Service for Time, Frequency and EOP evaluation (SSTF). The MMC SSTF made the GNSS and SLR measurements. The sites of the VNIIFTRI and its East-Siberian branch (Mendeleevo and Irkutsk) were equipped by the new generation satellite laser stations. The EOP were evaluated separately for the VLBI, GNSS or SLR observation techniques. The MMC SSTF's EOP were combined with the EOP data from other Russian Analysis Centres in order to produce the SSTF's combined EOP. The MMC SSTF developed and upgraded its software both for the EOP evaluation and for some other tasks (such as evaluation of ephemeris and clocks for GPS/GLONASS and the satellite altimetry data processing).

**Keywords:** Earth's orientation parameters, EOP service, VLBI, GNSS, SLR, altimetry.