

На правах рукописи



**Мартынов Евгений Александрович**

**Методы и алгоритмы прогнозирования и уточнения параметров  
вращения Земли на борту современных и перспективных  
космических аппаратов ГЛОНАСС**

Специальность: 2.5.16.

Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва — 2024 год

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Научный руководитель:** Кружков Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационно-управляющие комплексы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

**Официальные оппоненты:** Назаров Анатолий Егорович, доктор технических наук, заместитель начальника отдела АО «НПО Лавочкина» (Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область, 141402).  
Тучин Денис Андреевич, кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук». (Миусская пл., 4, Москва, 125047).

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт прикладной астрономии Российской академии наук. 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10

Защита диссертации состоится 12 декабря 2024 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте МАИ по адресу: [https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT\\_ID=182703](https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=182703)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4 Учёный совет МАИ.

**Ученый секретарь**  
**диссертационного совета 24.2.327.03**  
**доктор технических наук**



**А.В. Старков**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Наиболее актуальными направлениями совершенствования глобальных спутниковых систем навигации являются, во-первых, улучшение точности эфемеридно-временного и частотного обеспечений, которые позволяют снизить ошибку потребителя глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) за счет космического сегмента (signal-in-space ratio, SISRE), во-вторых, расширение функциональных возможностей орбитальной группировки за счет использования бортовых средств. Второе направление связано, в том числе, с обеспечением функционирования ГНСС без информационной поддержки наземного комплекса. Говоря о достигнутом на сегодняшний день в ГЛОНАСС уровне SISRE 1+ м (0.95) можно констатировать некоторое отставание от конкурентных ГНСС (примерно в 2-3 раза), одновременно с этим подчеркивая, что обеспечение даже такого уровня этого параметра возможно лишь в условиях регулярной и достаточно частой (раз в 12 часов) закладки новых пакетов данных, содержащих уточненные эфемериды, значения параметров вращения Земли и частотно-временные поправки, то есть целого массива информации, подготовленного в наземном комплексе управления. Необходимо заметить, что у конкурентных ГНСС уровень SISRE ниже (0.15 м – 0.6 м) не только за счет применения более совершенных технических средств, но и за счет реализации более продвинутых технологических циклов, вовлекающих бортовые аппаратные средства в процессы штатного функционирования орбитальной группировки (ОГ). Таким образом, в настоящее время актуальной остается потребность улучшения показателя SISRE ГЛОНАСС как в штатном, так и в особом режимах функционирования орбитальных группировок без закладки данных, при котором значение данного показателя становится неопределенным, т.е. может вырасти до неприемлемых значений и лишить ГЛОНАСС возможности решать целевые задачи. Так как обсуждаемый параметр точности SISRE агрегирует целый набор характеристик данных из различных источников, его значение зависит от погрешностей определения эфемерид в инерциальной системе координат, уходов бортовых шкал времени, погрешностей знания параметров вращения Земли и т.д. Проблема расходимости ошибок эфемерид и уходов часов бортовых шкал времени в настоящее время решается путем разработки соответствующих технологических циклов по использованию бортовой аппаратуры межспутниковых измерений. Известно, что применение данных средств обеспечивает решение задач по повышению точности эфемерид космического аппарата (КА) и взаимной синхронизации часов в штатном режиме, а также предоставляет возможность определения эфемерид в инерциальной системе координат в условиях отсутствия запрашиваемых данных. При таком подходе нерешенной остается задача определения параметров вращения Земли (ПВЗ), без которых перевод инерциальных координат и компонент скорости КА в земную СК для трансляции потребителю будет не осуществим, а ошибки, вызванные неопределенной эволюцией ПВЗ, будут приводить к ухудшению SISRE. Рассмотрим обобщенное выражение SISRE на предмет влияния на него погрешностей знания ПВЗ:

$$SISRE = w_{T,N} \sqrt{(\Delta dUTx_s + \Delta y_p z_s)^2 + (\Delta dUTy_s + \Delta x_p z_s)^2 + (\Delta x_p x_s - \Delta y_p y_s)^2}, \quad (1)$$

где  $x_s, y_s, z_s$  – координаты НКА в промежуточной СК CIRС;  $\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta dUT$  – ошибка знания смещения мгновенного полюса вращения Земли и ее неравномерности вращения (разницы между шкалой UT1 и UTC) соответственно;  $w_{T,N}$  – коэффициент

учета ошибки, определяемый индивидуально для каждой ГНСС исходя из параметров рабочих орбит ее НКА.

Анализ (1) показывает, что с учетом неопределенной динамики смещения полюса и изменения длины дня, приводящих к угловому отклонению в 3-25 mas/200-500 mas за сутки и месяц соответственно, можно утверждать, что ошибка ПВЗ составляет существенную долю итоговой погрешности в размере до 2/60 метров (сутки/месяц). Таким образом, возникает необходимость ее компенсации как в условиях штатного функционирования, так и при работе ОГ ГЛОНАСС в независимом от наземного комплекса режиме.

**Цель работы.** - повышение точности эфемеридной информации и обеспечения возможности функционирования современных и перспективных орбитальных группировок ГЛОНАСС за счет определения на борту параметров вращения Земли без загрузки пакетов данных с такой информацией. В качестве основы для достижения цели предлагается рассмотреть разработку и реализацию на борту НКА процедур высокоточного прогнозирования и формирования оценок текущих значений параметров вращения Земли на основе обработки измерений до наземных станций.

**Метод исследования.** Имитационное математическое моделирование процессов эволюции параметров вращения Земли, процессов прогнозирования и уточнения ПВЗ на борту навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС на основе использования специального программно-математического обеспечения.

**Научная новизна** полученных в работе результатов состоит в следующем:

- сформирована концепция реализации технологического цикла по определению ПВЗ на борту НКА ГЛОНАСС современных и перспективных орбитальных сегментов на основе применения существующих бортовых средств;
- создана методика настройки алгоритма прогнозирования ПВЗ, позволяющая минимизировать ошибку их прогноза путем подбора оптимальных параметров соответствующего алгоритма;
- разработаны и исследованы алгоритмы обработки измерений между НКА ГЛОНАСС и наземными станциями, обеспечивающие определение ПВЗ при различном составе и расположении взаимодействующих объектов;
- разработано специализированное программно-математическое обеспечение для моделирования процессов прогнозирования и уточнения ПВЗ на борту и отработки соответствующих алгоритмов, позволяющее оценить результативность и эффективность реализации предлагаемых методик и алгоритмов и при необходимости провести их коррекцию перед внедрением в действующие технологические циклы ГЛОНАСС.

**Практическая значимость** полученных в диссертационной работе результатов состоит в следующем:

- получены результаты, позволяющие определить достижимый уровень точности прогнозирования ПВЗ на основе применения различных математических моделей;
- разработанные алгоритмы прогнозирования и уточнения ПВЗ на борту НКА, реализованы в форме прототипов бортового программного обеспечения для перспективного орбитального сегмента ГЛОНАСС;
- сформулированы рекомендации по размещению наземных станций и характеристикам соответствующих аппаратных средств;

- предложены циклограммы информационного взаимодействия НКА средневисотного и высокоорбитального сегментов космического комплекса при определении ПВЗ на вычислительных средствах НКА;

- результаты работы внедрены и опробированы при проведении работ в АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева» при выполнении опытно-конструкторских работ в рамках федеральных программ, направленных на поддержание, развитие и совершенствование глобальной спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС.

**Внедрение результатов диссертационной работы.** Основные результаты диссертационной работы внедрены при выполнении опытно-конструкторских работ в АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева, что подтверждается соответствующим актом о внедрении.

**Достоверность результатов** подтверждается использованием корректных математических моделей, результатами имитационного моделирования, верифицированными с доступными фактическими данными об эволюции ПВЗ и движении НКА ГЛОНАСС.

**Апробация работы.** Основные результаты работы обсуждались на четырех конференциях: «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, 2021г), Всероссийской научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» (г. Москва, 2022г), «XLVII АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВТИКЕ» посвященные памяти академика С.П. Королёва (г. Москва, 2023г), молодежной научной конференции «XLIX Гагаринские чтения» (г. Москва, 2023г).

По теме диссертации опубликовано девять печатных работ, из них три в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в МРБД перечня ВАК, две в индексируемых в международных реферативных базах данных Web Of Science, Scopus, четыре в сборниках тезисов докладов четырех конференций.

Все результаты, представленные в диссертации, **получены автором лично или при его непосредственном участии.** При непосредственном участии автора проведены разработана информационная технология, определяющая необходимые аппаратные средства, методы и алгоритмы, обеспечивающие повышение точности эфемерид ГЛОНАСС в оперативном и автономном режимах работы. Автором разработан усовершенствованный алгоритм прогнозирования ПВЗ на борту, определены его точностные характеристики по на длительной выборке данных. Предложен алгоритм уточнения ПВЗ по измерениям дальности, проведено имитационное моделирование для оценки точностных характеристик данного алгоритма в зависимости от заданных условий. Автором разработан программный макет для исследования эффективности методов и алгоритмов прогнозирования и уточнения ПВЗ на основе использования реальных данных.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и Приложения. Работа изложена на 133 страницах машинописного текста, содержит 91 рисунок, 91 формулу, 15 таблиц и 34 наименования литературных источников.

#### **На защиту выносятся:**

- Информационная технология, определяющая необходимые аппаратные средства, методы и алгоритмы, обеспечивающие повышение точности эфемерид ГЛОНАСС в оперативном и автономном режимах работы.

- Алгоритм высокоточного прогнозирования ПВЗ, обеспечивающий на интервале 90 дней непревышение ошибки определения координат полюса более 65 mas и погрешности знания длины суток более 41 ms по уровню доверительной вероятности 0.95, что обеспечивает эквивалентную погрешность по псевдодальности (ЭППД) на уровне не более 13 м.

- Алгоритм уточнения ПВЗ на борту НКА ГЛОНАСС по измерениям дальностей до наземных станций. Алгоритм обеспечивает (при уровне 0.95) ошибку оценки менее 5 mas по координатам полюса и  $<1$  ms по dUT (при СКО случайных ошибок измерений дальности, равном 0.2 м), что соответствует ЭППД менее 1.5 м.

- Программный макет для исследования эффективности методов и алгоритмов прогнозирования и уточнения ПВЗ на основе использования реальных данных.

- Технические требования и рекомендации к составу, количеству и размещению наземных станций, их возможностям, характеристикам бортовых аппаратных средств НКА, циклограммам взаимодействия.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** посвящено анализу актуальности и новизны задачи разработки алгоритмов для определения параметров вращения Земли на борту НКА ГЛОНАСС. Целью такого анализа является выявление наиболее актуальных тенденций совершенствования характеристик ГЛОНАСС в части точности и автономности. Рассмотрена фундаментальная проблема неопределенной эволюции ПВЗ и ее влияние на характеристики и соответствующие технологические процессы в ГЛОНАСС. Показано, какой эффект ухудшения точности эфемерид может быть получен при условии отсутствия данных об истинных координатах полюса и разнице между UTC и UT1.

**В первой главе** произведена формулировка технических задач, решение которых обеспечивает требуемое повышение точности и расширение функциональных возможностей существующих и перспективных ОГ за счет реализации на борту соответствующего технологического цикла, способного выполнять:

- высокоточное прогнозирование эволюции параметров вращения Земли;
- оценку параметров вращения Земли, проводимую на основе обработки измерений до наземных станций;

Решение поставленной задачи и реализация перечисленных процедур должны соответствовать требованиям, предъявляемым к точности эфемерид ГЛОНАСС и соответствующему им показателю SISRE как в штатном режиме функционирования, так и в режиме, когда нет возможности в силу самых различных причин осуществлять закладку специализированной информации о ПВЗ с наземного комплекса управления.

С учетом того обстоятельства, что требования по обеспечению точности и автономности навигации, предъявляемые к спутниковым системам, постоянно растут, сформулированная техническая задача должна решаться «с запасом». Кроме того, необходимо создать инструмент исследования эффективности применения разрабатываемых процедур и алгоритмов при различных условиях функционирования обособленных наземных станций и орбитальных группировок ГЛОНАСС и различном их оснащении современными и перспективными техническими средствами.

**Вторая глава** содержит анализ современного состояния обсуждаемых в работе задач с учетом отечественного и зарубежного опыта в ее решении. Описываются существующие подходы к определению ПВЗ, применяемые в

различных системах, обсуждаются используемые для этого аппаратные средства, конечные точностные характеристики и организации – поставщики данных. Подробно рассматриваются те возможности, которыми на текущий момент и в будущем могут располагать разработчики в задачах по обеспечению современных и перспективных ГНСС необходимыми данными об эволюции ПВЗ. В главе приводится описание необходимых для использования в исследовании моделей и алгоритмов, применяемых как в задачах прогнозирования эволюции ПВЗ, так и в задаче их уточнения с применением бортовых средств радиотехнических измерений.

При решении поставленных задач проведено разделение на два технологических цикла. В первом предполагается осуществлять прогноз эволюции ПВЗ. Для этого в силу ряда объективных причин выбран метод прогнозирования эволюции ПВЗ на основе использования гармонического полинома, коэффициенты которого определяются путем аппроксимации апостериорных данных с помощью метода наименьших квадратов. При этом автором рассматриваются несколько видов моделей эволюции, базирующихся на соотношениях следующего вида:

$$x_p(t) = A + B(t - t_a) + \sum_{j=1}^2 C_j \sin\left(\frac{2\pi(t-t_a)}{P_j}\right) + D_j \cos\left(\frac{2\pi(t-t_a)}{P_j}\right), \quad (2)$$

$$y_p(t) = E + F(t - t_a) + \sum_{k=1}^2 G_k \sin\left(\frac{2\pi(t-t_a)}{Q_k}\right) + H_k \cos\left(\frac{2\pi(t-t_a)}{Q_k}\right), \quad (3)$$

$$dUT(t) = I + J(t - t_b) + \sum_{m=1}^4 K_m \sin\left(\frac{2\pi(t-t_b)}{R_m}\right) + L_m \cos\left(\frac{2\pi(t-t_b)}{R_m}\right), \quad (4)$$

где  $P_1, Q_1, R_3$  – годовой цикл,  $P_2, Q_2$  – Чандлеровский цикл,  $R_1$ - лунный цикл,  $R_2$ - полулунный цикл,  $R_4$ - полугодовой цикл, А-L – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов. Состав гармоник представленного полинома обоснован в том числе проведенным спектральным анализом (рис. 1), который показал следующие частотные составляющие на примере обработки данных об эволюции координат полюса и dUT:

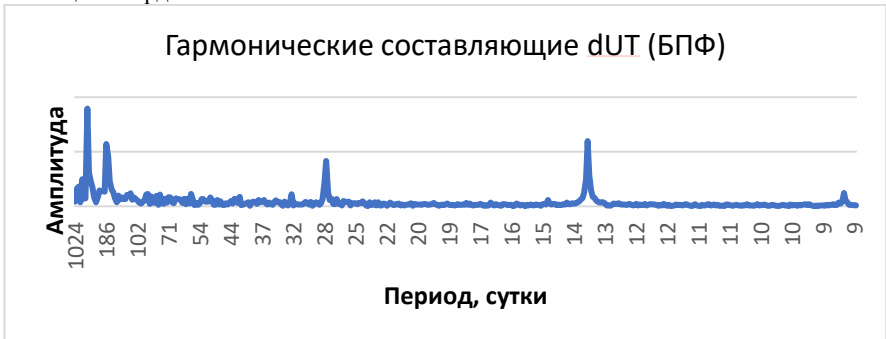


Рис.. 1. Спектр dUT, полученный с помощью быстрого преобразования Фурье временных рядов ПВЗ, представленных в каталоге C04 МСВЗ.

Для оценки точностных характеристик с последующим их улучшением при прогнозировании была разработана методика, в рамках которой для длительного

исторического отрезка проводилась итеративная обработка апостериорных данных с помощью скользящего окна (условно представлена на схеме ниже)

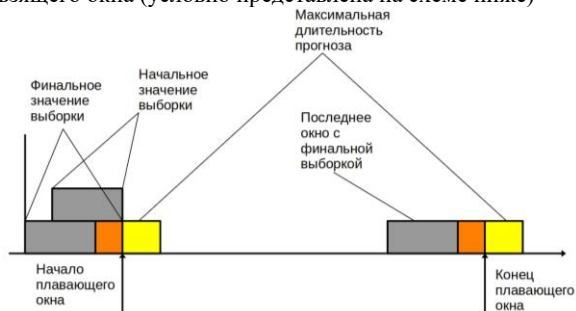


Рис. 2. Схема перемещения плавающего окна по выборке параметров при анализе точности прогноза и подборе оптимального интервала наблюдения.

В результате проведения каждой итерации по обработке апостериорного отрезка данных с рядами ПВЗ с помощью МНК в соответствии с рис. 3 формируются коэффициенты полинома, используемые для вычисления прогнозной эволюции ПВЗ, невязки между которой и соответствующими фактическими значениями являлись выходными данными для оценки точностных характеристик предлагаемой методики. В общем виде обсуждаемая методика может быть описана схемой:

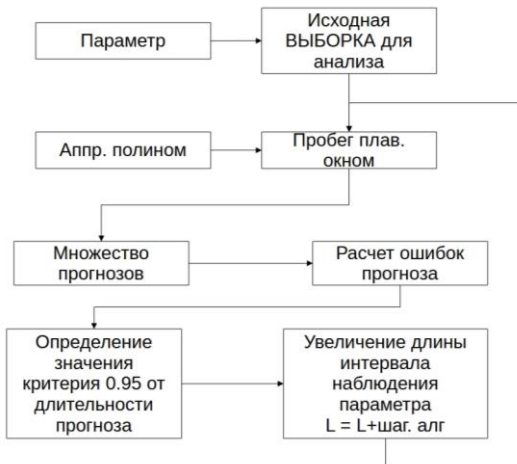


Рис. 3. Общая схема алгоритма поиска оптимального в смысле точности прогноза интервала аппроксимации выбранного ПВЗ

Результаты обработки исторического интервала длиной в 20 лет показали, что ключевым аспектом методики является выбранная длина отрезка аппроксимации данных, используемая для определения коэффициентов в МНК. В зависимости от этой длины и выбранной модели получаются различные уровни точности прогнозирования. Более того, для разных интервалов прогнозирования (1,5, 10, 30, 60,



90 дней) оптимальными с точки зрения точности являются и различные величины длины обрабатываемых отрезков, и различные модели представления рядов ПВЗ. Таким образом, была решена оптимизационная задача по точности прогнозирования, параметрами которой являлись вид модели, требуемая длительность прогноза в днях, выбранный параметр ПВЗ. Результаты решения данной задачи позволили сформировать наборы наиболее подходящих решений, обеспечивающих наилучшую точность прогнозирования (см. ниже в табл. 1).

Таблица 1. Оптимальные длины интервалов аппроксимации апостериорных данных в зависимости от длительности прогнозирования ПВЗ.

Параметр	Длительность прогноза:	5	10	20	30	50	70	90
хр	Оптимальная длина окна наблюдения	190-200	700-710	710-720	690-700	690-700	710-720	730-740
	Значение $0,95, m_{as}$	12,5	25,1	26,9	28,7	33,1	43,1	49,8
ур	Оптимальная длина окна наблюдения	110-120	410-420	470-480	510-520	600-610	600-610	640-660
	Значение $0,95, m_{as}$	8,1	16,1	19,5	23,8	32,3	41,9	52,5
dUT	Оптимальная длина окна наблюдения	290-300	310-320	320-330	300-310	310-320	310-320	310-320
	Значение $0,95, m_s$	6,4	9,5	9,8	12,1	25,5	31,2	32,4

В представленной таблице обозначены характеристики получаемой точности прогноза (максимальная ошибка) с вероятностью 0,95 для конкретного значения длины интервала и параметров алгоритма. Использование представленных результатов позволяет выбрать на борту оптимальные параметры процедуры для получения максимальной точности прогноза. Полученные для исторического отрезка наблюдения в 20 лет значения оптимальных интервалов аппроксимации под соответствующую длительность прогнозирования были исследованы на предмет состоятельности для других исторических отрезков, в том числе более коротких, где показали свою стабильность.

Итоговая ЭППД, которая обусловлена ошибками прогнозирования, изображена на рис.4. Несмотря на сравнительно неплохие результаты полученной точности прогноза в сравнении с потенциальной ошибкой (улучшение точности до 2х раз), вызванной неопределенной эволюцией ПВЗ, величина ЭППД (рис. 4) через несколько суток является неприемлемой для использования в технологическом цикле функционирования ГЛОНАСС без каких-либо дополнений. В связи с этим была разработана методика уточнения ПВЗ на борту НКА на основе обработки измерений до наземных станций. Ее облик представлен функциональной схемой на рисунке 5.

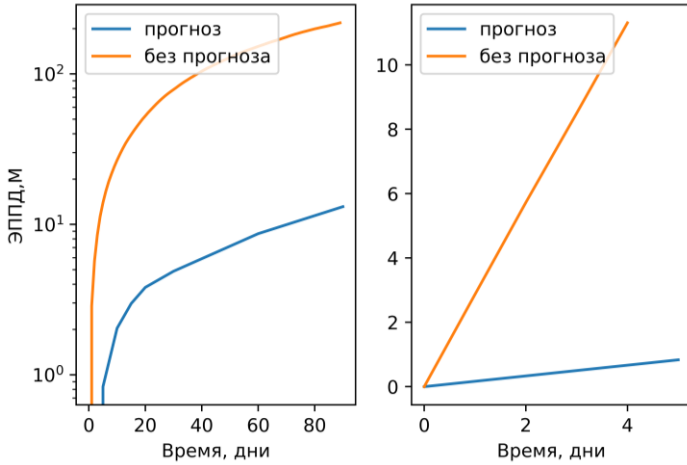


Рис.. 4. Итоговая ЭПД, обусловленная ошибками ПВЗ.

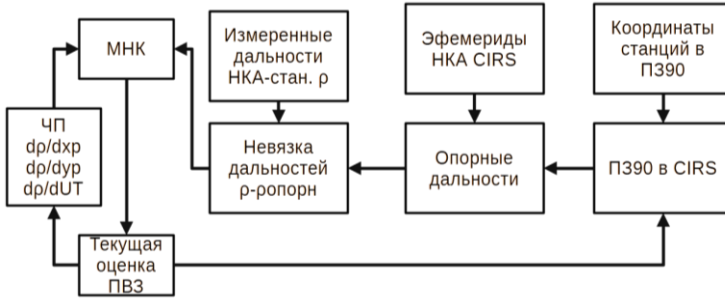


Рис. 5. Функциональная схема процесса уточнения ПВЗ на борту НКА. На рисунке CIRS – промежуточная земная система координат, полученная из инерциальной с учетом параметров прецессии и нутации

Основными источниками измерительной информации для обсуждаемого алгоритма являются измерения псевдодальностей, модель которых после проведения временной редукции выглядит следующим образом:

$$\rho = \sqrt{(x_{sat} - x_{st})^2 + (y_{sat} - y_{st})^2 + (z_{sat} - z_{st})^2} + \Delta\rho_{eph} + \Delta\rho_{st} + \Delta\rho_{clk} + \Delta\rho_{atm}. (5)$$

где  $x_{sat}, y_{sat}, z_{sat}$  – истинные координаты НКА в момент приема сигналов,  $x_{st}, y_{st}, z_{st}$  – истинные координаты станции в момент отправки сигналов,  $\Delta\rho_{eph}$  – ошибка, вызванная погрешностью бортовых эфемерид НКА,  $\Delta\rho_{st}$  – ошибка из-за неточности знания положения станции (следствие изменения ПВЗ),  $\Delta\rho_{clk}$  – ошибка, обусловленная разностью хода часов станции и НКА,  $\Delta\rho_{atm}$  – ошибка, вызванная задержкой распространения сигнала в атмосфере (ионосфере и тропосфере). В настоящей работе предполагается, что за счет формирования, последующей передачи по межспутниковой радиолинии и обработки встречных измерений между НКА и станциями взаимный уход часов может быть определен и потому данная ошибка нивелируется. Кроме того, сделано допущение об оснащении каждой

наземной станции помимо аппаратуры межспутниковых измерений стандартным двухчастотным приемником сигналов ГНСС и радиометром водяного пара. Первый позволяет определить задержку сигнала в ионосфере и убрать ее целиком, второй – почти полностью определить влажную составляющую тропосферной задержки и также нивелировать ее в измерениях. Ошибка эфемерид НКА при обработке измерений (5) остается, так как уточнить эфемериды без загрузки новых данных с НКУ в штатной процедуре не представляется возможным.

В основе концептуальной идеи оценки ПВЗ по результатам измерений до наземных станций лежит зависимость изменения дальности между объектами на поверхности Земли и в космосе при смещении полюса вращения Земли и изменении dUT. Такое смещение математически представимо в виде:

$$\rho = \left| X_{st}^{itrf} - [R_z(-ERA(dUT))]^T [R_z(-s')R_y(x_p)R_x(y_p)]^T [PN]^T X_{sat}^{grcs} \right|, \quad (6)$$

где  $X_{st}^{itrf}$  – координаты станции в земной связанной системе координат (ITRF, ПЗ90.11, WGS84),  $X_{sat}^{grcs}$  – координаты НКА в GCRS,  $PN$  – матрица прецессии-нугации на текущую эпоху,  $ERA(dUT)$  – угол вращения Земли, зависящий в том числе от dUT,  $x_p, y_p$  – координаты полюса вращения Земли. Дифференцирование выражения (6) по компонентам оцениваемых параметров позволяет сформировать применяемые при обработке МНК частные производные в аналитическом виде. Пример их эволюции для одного из НКА и станции представлен ниже на рисунке 6.

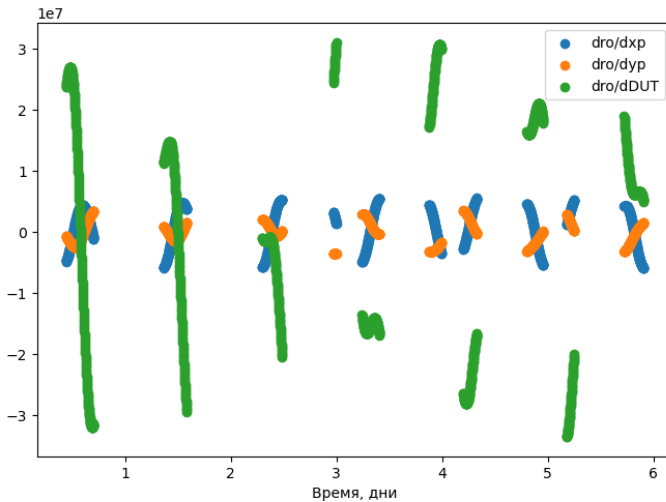


Рис. 6. Эволюция частных производных дальностей по компонентам ПВЗ для НКА СВС ГЛОНАСС.

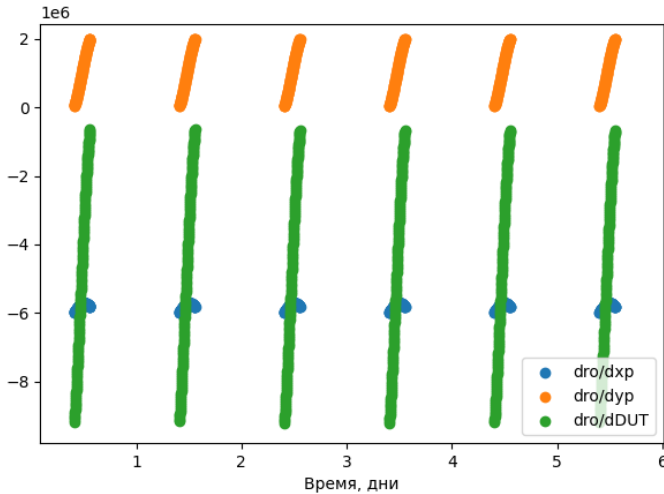


Рис. 7. Эволюция частных производных дальностей по компонентам ПВЗ для НКА ГЛОНАСС.

С учетом формирования аналитических выражений для расчета частных производных дальностей, полный вид которых не приводится здесь в силу своей громоздкости, становится возможным провести обработку методом наименьших квадратов невязок между расчетными дальностями НКА-станция и фактическими измерениями. Важным фактором, существенно влияющим на точность полученных оценок ПВЗ, является точность бортовых эфемерид в инерциальной СК. Ошибки эфемерид при отсутствии их регулярной коррекции имеют склонность к неограниченному росту, что не позволяет производить уточнение ПВЗ с достаточной точностью.

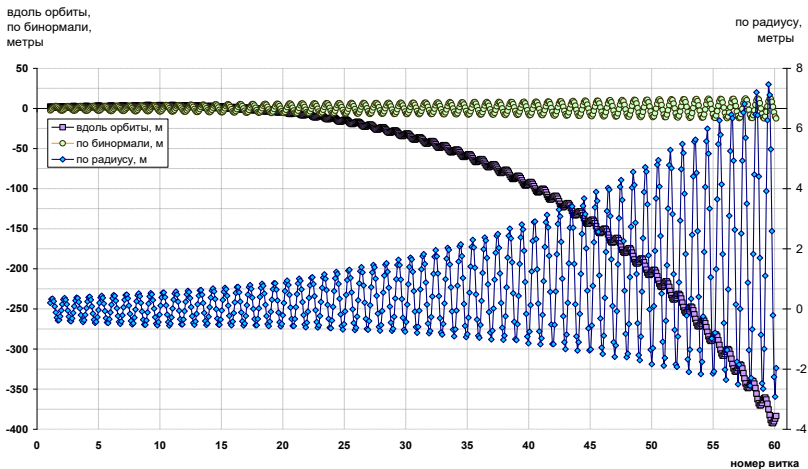


Рис. 7. Рост ошибок эфемерид для НКА СВС ГЛОНАСС при прогнозировании.

Возможным способом компенсации ошибок эфемерид в промежутках между их закладками на борт или же вообще в отсутствие таковых может быть введение согласующих параметров в оцениваемый вектор состояния. С учетом изложенного этапы выполнения прототипа бортового алгоритма уточнения ПВЗ на основе обработки измерений до наземных станций включают:

1. Накопление измерений дальностей между НКА и видимыми наземными станциями -  $\rho_{sat-station}$ .
2. Формирование вектора невязок между реальными и расчетными измерениями дальности

$$\Delta Y = (\Delta \rho_1^{sat-station} \Delta \rho_2^{sat-station} \dots \Delta \rho_i^{sat-station} \dots \Delta \rho_N^{sat-station})^T. \quad (5)$$

3. Вычисление матрицы ЧП дальностей по ПВЗ на основе имеющихся значений ПВЗ и бортовых эфемерид НКА:  $H_i = \frac{\partial \rho_i^{sat-station}}{\partial x_p} \frac{\partial \rho_i^{sat-station}}{\partial y_p} \frac{\partial \rho_i^{sat-station}}{\partial dUT}$ .

4. Вычисление поправок к текущим значениям ПВЗ с помощью метода наименьших квадратов:

$$\begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta dUT \end{bmatrix} = (H^T H)^{-1} H^T \Delta Y \quad (6)$$

5. Прогнозирование до момента очередного выполнения п.1.
6. Передача данных между НКА.

В качестве опорных значений для начала алгоритма используется вектор оценок, полученный в результате выполнения прошлой итерации алгоритма уточнения ПВЗ. Ниже приведены исходные выражения для вычисления частных производных дальности по добавкам к ПВЗ, используемые в разработанном прототипе бортового алгоритма.

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_p} = \frac{\partial \rho}{\partial X_{st}^{circ}} \frac{\partial X_{st}^{circ}}{\partial x_p} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial y_p} = \frac{\partial \rho}{\partial X_{st}^{circ}} \frac{\partial X_{st}^{circ}}{\partial y_p} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial dUT} = \frac{\partial \rho}{\partial X_{st}^{circ}} \frac{\partial X_{st}^{circ}}{\partial ERA} \frac{\partial ERA}{\partial dUT} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial X_{st}^{circ}} = \frac{1}{\rho} (X_{st}^{circ} - X_b^{circ})^T \quad (10)$$

$$\frac{\partial X_{st}^{circ}}{\partial x_p} = R_z(-ERA) \begin{bmatrix} -x_p & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -x_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & y_p \\ 0 & y_p & 1 \end{bmatrix} X_{st}^{itrf} \quad (11)$$

$$\frac{\partial X_{st}^{circ}}{\partial y_p} = R_z(-ERA) \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_p \\ 0 & 1 & 0 \\ x_p & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -y_p & 1 \\ 0 & -1 & -y_p \end{bmatrix} X_{st}^{itrf} \quad (12)$$

$$\frac{\partial X_{st}^{cirs}}{\partial dUT} = K_{ERA} \begin{bmatrix} \sin(ERA) & -\cos(ERA) & 0 \\ \cos(ERA) & \sin(ERA) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_p \\ 0 & 1 & y_p \\ x_p & -y_p & 1 \end{bmatrix} X_{st}^{itrf} \quad (13)$$

где,  $X_b^{cirs}$ ,  $X_{st}^{cirs}$  – радиус-векторы наземной станции и НКА в CIRS,  $\rho$  – дальность НКА-станции, ERA – угол суточного вращения Земли,  $R_x, R_y, R_z$  – матрицы вращения вокруг осей x, y, z.

Передача данных между НКА (этап 6 изложенный выше процедуры) для выбранной группировки предполагается согласно следующему принципу. На интервале формирования выборки измерений на каждом НКА накапливаются данные о псевдодальностях и соответствующих им эфемеридах и моментах времени. По окончании наблюдения при условии взаимной видимости производится передача данных на НКА-коллектор, на котором на основе всего накопленного массива измерений вычисляются поправки к ПВЗ. Далее полученные таким образом поправки пересылаются между остальными НКА ОГ и используются в формировании данных транслируемых потребителю эфемерид.

**В третьей главе** приведено описание разработанного программного макета (ПМ) – инструмента отработки предлагаемых методик, который использовался для проведения экспериментальных исследований алгоритмов прогнозирования ПВЗ и уточнения их на борту НКА ГЛОНАСС. Функциональная схема сценариев использования ПМ для исследования эффективности алгоритмов прогнозирования и уточнения ПВЗ выглядит следующим образом:

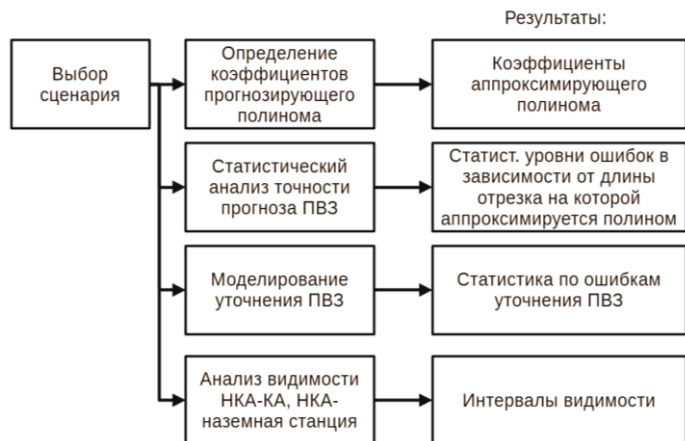


Рис. 7. Функциональная схема ПМ с точки зрения доступных сценариев расчета и получаемых в результате работы ПМ результатов моделирования.

**Четвертая глава** посвящена анализу результатов имитационного моделирования процесса уточнения ПВЗ для высокоорбитального и средневысотного сегментов системы ГЛОНАСС и исследованию получаемых точностных характеристик в зависимости от условий организации сеансов измерений и характеристик используемых средств. При моделировании исследовались следующие вариации внешних условий: случайные погрешности измерений псевдодальностей,

ошибки эфемерид НКА, размещение наземных станций. Моделирование орбитальных дополнений ГЛОНАСС осуществлялось на основе интегрирования уравнений движения НКА с учетом влияния неконтролируемых факторов, средневысотного сегмента – на основе интерполяции готовых высокоточных эфемерид. В составе исходных данных экспериментов таким образом нашли применение апостериорные эфемериды ГЛОНАСС, апостериорные данные ПВЗ из бюллетеня ИПА РАН, каталоги небесных тел, данные о долгопериодическом вращении Земли. Полученные результаты представлены ниже. В процессе исследований определено – каким образом точностные характеристики получаемых оценок ПВЗ зависят от количества задействованных в циклограмме формирования измерений станций, от количества задействованных НКА, от мест размещения станций, от ошибок измерений. Минимальным оказался набор из трех разнесенных по долготе наземных станций и 3 НКА, применение которых оправдано исходя из требований накопления не менее 2000 измерений в сутки. При этом текущего уровня ошибок измерений, получаемого при условии устранения систематических ошибок, вызванных задержкой сигнала при распространении, – достаточно для обеспечения точности определения ПВЗ на уровне единиц mas и соответствующей данной ошибке ЭППД менее 10 см (0,95).

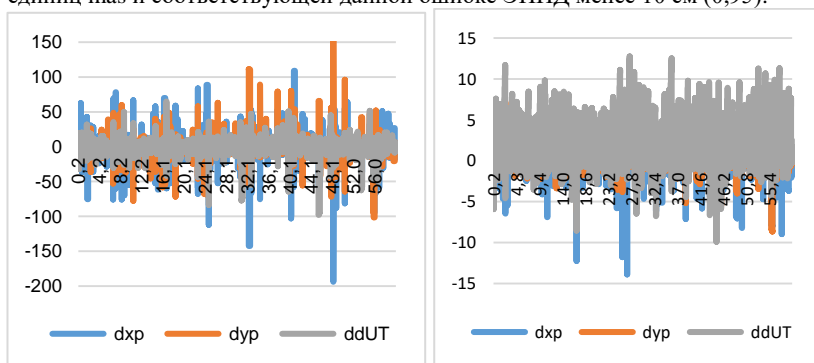


Рис. 8. Ошибки оценок ПВЗ для рабочего созвездия из 3-х НКА при обработке серии в 200 (слева) и 1000 (справа) измерений.

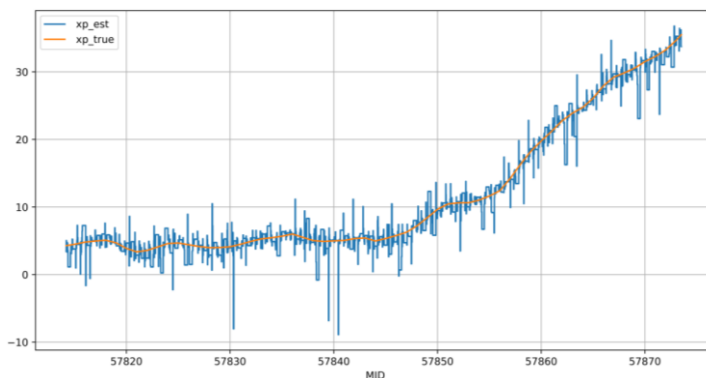


Рис. 9. График эволюции эталонного значения ПВЗ и его оценки, получаемой на борту НКА.

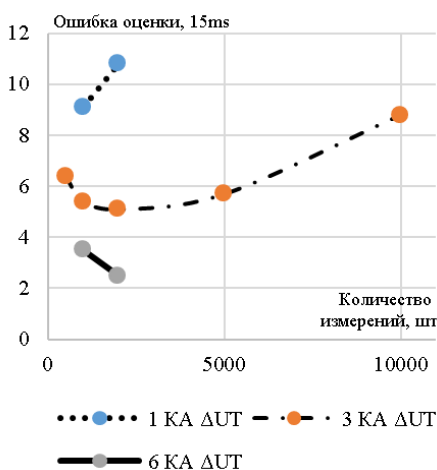


Рис. 11. Зависимость ошибки оценки dUT от количества измерений в серии и количества НКА.

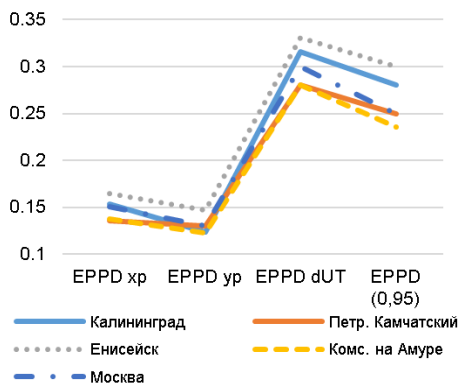


Рис. 13. ЭППД по уровню вероятности 0.95 в зависимости от оценки ПВЗ для различных станций на территории РФ.

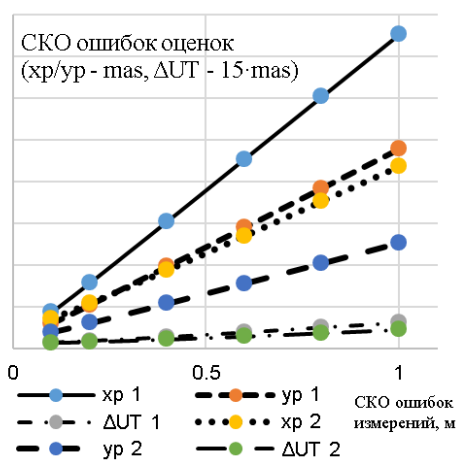


Рис. 12. Зависимость СКО ошибки оценки ПВЗ от СКО ошибки измерений дальности.

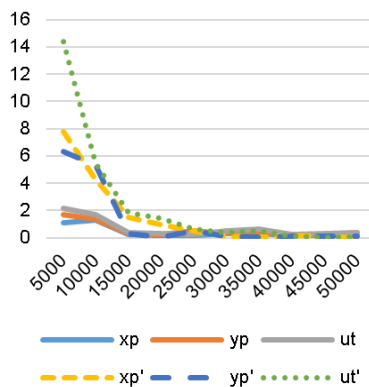


Рис. 14. Ошибки оценки 0-ых компонент ПВЗ в mas и производных эволюции ПВЗ mas/сут от количества измерений.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных исследований показана возможность совершенствования характеристик современных и перспективных дополнений ГЛОНАСС в части точностных характеристик, а именно: точности эфемерид и соответствующего им показателя SISRE, обусловленных величиной погрешности знания на борту НКА ГЛОНАСС параметров вращения Земли. Одновременно



обоснована возможность получения высокоточного прогноза и оценки ПВЗ на борту НКА ГЛОНАСС в процессе штатного функционирования без загрузки соответствующих данных с Земли.

Такие возможности реализуются путем создания соответствующих процедур, предназначенных для использования на борту НКА, использующих в качестве основных аппаратных средств – бортовой вычислитель и аппаратуру для проведения межспутниковых измерений, позволяющую получать запросно-беззапросные измерения с Земли, а также осуществлять обмен информацией между НКА по МРЛ. В настоящей работе сформирован облик обсуждаемых процедур, то есть – определен перечень необходимых моделей, разработаны алгоритмы, предложены циклограммы функционирования, определены требования к техническим характеристикам аппаратных средств.

Решение поставленной задачи отработано путем имитационного моделирования с использованием разработанного автором программного макета прототипа бортового алгоритма.

Научную новизну настоящей работы обуславливают следующие результаты.

1. Сформирован облик нового технологического цикла функционирования НКА, в составе которого реализованы процессы прогнозирования и уточнения ПВЗ.
2. Предложена методика улучшения точности прогнозирования, основанная на подборе оптимальных настроек разработанной процедуры, что позволяет существенно (в 2 раза) уменьшить итоговую погрешность результата.
3. Предложена концептуальная идея и соответствующие ей процедуры и алгоритмы для получения оценок ПВЗ на борту НКА на основе функционирования бортовых аппаратных средств измерений и соответствующих численных алгоритмов их обработки, функционирующих без закладки данных с наземного комплекса управления.
4. Получены результаты анализа условий наблюдаемости оцениваемых ПВЗ в зависимости от условий проведения сеансов измерений и мест расположения станций и их влияния на точностные характеристики формируемых оценок.
5. Разработаны и предложены прототипы бортовых алгоритмов, циклограмм сеансов измерений, рекомендации по местам размещения станций и требования к аппаратным средствам, обеспечивающие решение поставленной задачи по повышению точностных характеристик ГЛОНАСС путем оценки ПВЗ с ошибкой не более первых единиц  $\text{mas}$  (0,95).

Прикладное значение полученных в данной работе результатов состоит в следующем:

1. Создан программный макет, предназначенный для исследования процессов прогнозирования и уточнения ПВЗ на борту НКА и анализа эффективности применяемых при этом методик и алгоритмов.
2. Проведен анализ точностных характеристик результатов прогноза с применением различных моделей эволюции ПВЗ и выбраны наилучшие варианты к использованию на борту.

3. Получены оптимальные в смысле достигаемой точности прогнозирования параметров вращения Земли наборы настроек процедуры прогнозирования, включающие длины интервалов аппроксимации и вид модели. Показано, что существует возможность путем такой настройки существенно улучшить точность прогноза ПВЗ и гарантированно снизить за счет этого ЭППД, получаемую в отсутствие новых пакетов данных, которая через 3 месяца автономной работы составляет менее 14 м с вероятностью 0,95.
4. Подготовлен прототип алгоритма, предназначенного для реализации на борту НКА процессов оценивания ПВЗ на основе обработки измерений псевдодальностей до наземных станций.
5. Получены результаты оценки ПВЗ при различном составе и размещении наземных станций и сформированы рекомендации к их использованию в рабочих циклограммах НКА ГЛОНАСС.
6. Разработанные в процессе исследований алгоритмы отработаны с применением программного макета имитационного моделирования процессов функционирования НКА ГЛОНАСС и существующего и перспективного высокоорбитального сегментов.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ  
ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в изданиях, входящих международные реферативные  
базы данных и системы цитирования перечня ВАК**

1. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Мартынов Е.А., Марарескул Т.А., Муратов Д.С. Совершенствование процессов планирования межспутниковых измерений в интересах повышения точности эфемерид современного и перспективных орбитальных сегментов ГЛОНАСС // Известия РАН. Теория и системы управления №5, 2023, с. 147-159 (10 с.авт., №128, перечень ВАК МРБД от 31.12.2023, личный вклад заключается в представлении процедуры уточнения ПВЗ на борту НКА).
2. Красильщиков М.Н., Кружков Д.М., Мартынов Е.А., Прогнозирование параметров вращения Земли в задачах навигации с учетом феномена эволюции неравномерности вращения Земли // КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, №4, 2021, с. 322-331(8 с.авт., №64, перечень ВАК МРБД от 31.12.2023, личный вклад автора заключается в представлении методов и алгоритмов прогнозирования ПВЗ).
3. Козорез Д.А., Кружков Д.М., Кузнецов К.В., Мартынов Е.А. Исследование характеристик точности прогнозирования параметров вращения Земли с использованием метода наименьших квадратов // СТИН №11, 2021, с.19-23 (3 с.авт., №244, перечень ВАК МРБД от 31.12.2023, личный вклад автора заключается в личный вклад автора заключается в представлении результатов моделирования процесса уточнения ПВЗ на борту НКА).

**Публикации в изданиях, индексируемых в базах Scopus и WoS**

1. Krasilshchikov M.N., Kruzhkov D.M., Martynov E.A. Predicting the Parameters of the Orientation of the Earth in Problems of Navigation Taking into Account the Phenomenon of the Development of Irregularity in the

Earth's Rotation // Cosmic Research, 2023, 61(4), страницы 324–332 (8 с.авт. авт., Scopus).

2. Krasilshchikov M.N., Kruzhkov D.M., Marareskul T.A., Martynov E.A., Muratov D.S., Improvement of Intersatellite Measurements Scheduling to Refine the Accuracy of the Ephemerides of Modern and Prospective GLONASS Orbital Segments // Journal of Computer and Systems Sciences International, 2023, 62(5), страницы 903–913 (8 с.авт., Scopus).

#### **Публикации в материалах конференций**

1. Кружков Д.М., Мартынов Е.А. Разработка модели прогноза эфемерид космического аппарата ГЛОНАСС в задаче автономного уточнения параметров вращения Земли на борту // Молодёжь и будущее авиации и космонавтики, Сборник аннотаций конкурсных работ. Москва, 2021, с. 124-125.
2. Мартынов Е.А., Разработка алгоритма автономного уточнения эфемерид на борту навигационного космического аппарата // СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ И АТМОСФЕРНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ V Всероссийской научно-технической конференции Москва, 8 – 10 ноября 2022 г., с. 87-89
3. Мартынов Е.А., Разработка прототипа алгоритма уточнения эфемерид для перспективного высокоорбитального сегмента системы ГЛОНАСС // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLIX Гагаринские чтения 2023. — М.: Издательство «Перо», 2023, стр. 207-208.
4. Кружков Д.М., Мартынов Е.А. Разработка прототипа бортового алгоритма совместного уточнения параметров вращения Земли и эфемерид на борту космического аппарата // XLVII АКАДЕМИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ ПО КОСМОНАВИТИКЕ Сборник тезисов, т.4.