

УДК 629.785  
На правах рукописи

ТОПОРКОВ АЛЕКСЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

МЕТОДИКА УЧЁТА И ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ  
ПАРАМЕТРОВ ФУНДАМЕНТАЛЬНОГО КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ  
НАВИГАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Специальность 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением  
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Алексей Геннадьевич Топорков', written in a cursive style.

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: **Корянов Всеволод Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Старков Александр Владимирович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Системный анализ и управление» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Улыбышев Сергей Юрьевич**, доктор технических наук, руководитель проектов по научной работе конструкторского бюро прикладной механики ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики»

Ведущая организация: Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» Министерства обороны Российской Федерации, г. Балашиха

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г. в 14 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.08 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный переулок, дом 10, корпус СМ, ауд. 407м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru) МГТУ им. Н.Э. Баумана.

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

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Учёному секретарю диссертационного совета 24.2.331.08.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.08  
кандидат технических наук, доцент



Луценко А.Ю.

**Актуальность темы исследования.** Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) ГЛОНАСС является одним из ключевых элементов обеспечения национальной безопасности и экономической независимости России, а также соблюдения «навигационного» паритета в мире. Высокоточное позиционирование различных групп потребителей навигационной информации (ПНИ) важно для обеспечения безопасности эксплуатации и обслуживания воздушного, речного и наземного транспорта, а также для развития космических систем различного назначения.

Поддержание конкурентоспособности ГЛОНАСС позволяет снизить зависимость от иностранных навигационных систем. Это позволяет совершенствовать старые и создавать новые функциональные целевые потребительские системы координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) на основе использования высокоэффективных навигационных технологий, при условии, что ГЛОНАСС является ключевым элементом отечественных средств КВНО.

Очевидно, что с учётом растущей интеграции навигационных технологий практически во все ведущие отрасли России, требуется непрерывное и всестороннее совершенствование КВНО ГЛОНАСС, данный вопрос ранее поднимался в работах Глотова В.Д., Красильщикова М.Н., Митрикаса В.В., Пасынкова В.В., Скакуна И.О., Ступака Г.Г. и других.

Необходимо учитывать, что последнее десятилетие количество ПНИ ГЛОНАСС: наземных, морских, воздушных и космических, как подвижных, так и стационарных, ежегодно увеличивается, расширяется номенклатура задач и отраслей для внедрения и применения навигационных данных. Всё это способствует совершенствованию требований к точности и качеству навигационных услуг на всей территории РФ. Поэтому для повышения точности навигационных определений необходимо использовать все доступные методы и технологии.

Альтернативный и нетривиальный вариант улучшения точности навигационных определений ПНИ в абсолютном режиме, в той или иной степени связан с необходимостью повышения уровня достоверности фундаментального координатно-временного обеспечения (ФКВО). Вопросы целесообразности учета достигнутого уровня знаний параметров ФКВО при разработке моделей баллистико-навигационного обеспечения (БНО) создаваемых космических средств и систем нашли отражение в трудах Бартенева В.А., Бетанова В.В., Брагинца В.Ф., Вовасова В.Е., Гаязова И.С., Гречкосеева А.К., Дворкина В.В., Жукова А.Н., Игнатовича Е.И., Красильщикова М.Н., Махненко Ю.Ю., Митрикаса В.В., Пасынкова В.В., Толстикова А.С. и некоторых других.

В частности, одной из важных задач ФКВО ГЛОНАСС является определение и прогнозирование параметров вращения Земли (ПВЗ), а именно двух угловых координат смещения оси полюса Земли ( $x_p$  и  $y_p$ ), а также  $\Delta UT1$  (разность между всемирным астрономическим временем  $UT1$  и всемирным координированным временем UTC). Указанные фундаментальные составляющие являются связующими элементами, которые позволяют обеспечить высокоточное формирование матрицы перехода между инерциальной системой координат (ИСК) и гринвичской системой координат (ГСК). Важно отметить, что полная

информация о ПВЗ включена в состав навигационных сообщений GPS, QZSS, BeiDou и IRNSS. Что касается ГЛОНАСС, то в настоящее время от навигационных космических аппаратов (НКА) к ПНИ передаётся только поправка  $\Delta UT1$ . В рамках комплексного повышения точности системы ГЛОНАСС, актуальной задачей является обеспечение передачи к ПНИ полной информации о ПВЗ.

Принимая во внимание современные требования БНО НКА ГЛОНАСС, вышеизложенное делает актуальным повышение точности прогнозирования параметров движения не только на борту навигационных спутников ГЛОНАСС, но и в аппаратуре потребителя за счёт повышения точности прогнозирования фундаментальных составляющих ПВЗ при условии увеличения продолжительности прогноза.

Вопросом разработки моделей прогнозирования ПВЗ с применением их на борту НКА занимались: Баркин Ю.В., Жуков А.Н., Зотов Л.В., Красильщиков М.Н., Малкин З.М., Пасынок С.Л., Перепёлкин В.В., Тиссен В.М., Толстикова А.С., Филиппова А.С. и другие. Однако, в рамках решения данной задачи в зависимости от типа выбранной модели прогноза, неизбежно появляется неопределенность знания спрогнозированных значений ПВЗ. Проведенные исследования и полученные результаты в этом направлении не являются исчерпывающими. Это делает актуальным оценку влияния неопределенности знания параметров ФКВО на точность прогнозирования движения НКА в интересах различных потребительских систем гражданского назначения.

Вместе с тем, ни в одной из известных автору работ, постановка научно-технической задачи в формулировке настоящего диссертационного исследования не содержалась.

**Целью работы** является повышение точности прогнозирования эфемерид навигационных спутников в интересах гражданских потребителей навигационной информации.

В рамках данной диссертационной работы точность прогнозирования параметров движения НКА количественно оценивается эксплуатационной характеристикой в виде значения эквивалентной погрешности псевдодальности за счёт комического сегмента на основе погрешностей эфемеридной информации (*Signal in space User Range Error, SIS URE*).

Таким образом, **задачи** диссертационной работы:

1. Разработка программно-алгоритмического комплекса имитационного моделирования и прогнозирования параметров движения НКА на основе сформированной математической модели.

2. Проведение комплексного имитационного моделирования возмущений, учитываемых моделью движения НКА, для оценки вклада ПВЗ и остальных возмущающих факторов в ошибку прогнозирования параметров движения НКА.

3. Исследовать возможность решения задачи долгосрочного прогнозирования ПВЗ при помощи метода полиномиальной регрессии с элементами машинного обучения с точностью адекватной значениям Международной службы вращения Земли.

4. Разработка методики оценки влияния неопределённости фундаментальных составляющих ПВЗ на точность прогнозирования орбит НКА.

5. Разработка методики определения степени влияния параметров вращения Земли на значения эквивалентной погрешности псевдодальности за счёт космического сегмента.

**Объектом исследования** в диссертации являются навигационные космические аппараты в составе системы ГЛОНАСС, обеспечивающие определение местоположения различных групп потребителей на поверхности Земли, в воздушном и космическом пространстве.

**Предметом исследования** являются методики, модели, алгоритмы и результаты оценки чувствительности баллистико-навигационного обеспечения спутников ГЛОНАСС к уровню неопределенности знания фундаментальных составляющих ПВЗ.

**Методы исследования.** Основными методами исследования, используемыми в работе, являются методы механики космического полета, методы численного математического моделирования, а также методы долгосрочного прогнозирования временных рядов на основе апостериорных значений. В рамках программно-алгоритмической реализации математического обеспечения использованы методы объектно-ориентированного программирования.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Предложена методика оценки влияния неопределённости параметров фундаментального координатно-временного обеспечения на БНО НКА с учётом применения метода полиномиальной регрессии с элементами машинного обучения.

2. В алгоритме оценки чувствительности эквивалентной погрешности псевдодальности за счёт космического сегмента к неопределенности знания параметров вращения Земли.

3. В развитии и усовершенствовании методик учета влияния параметров фундаментального координатно-временного обеспечения на точность прогнозирования движения навигационных спутников ГЛОНАСС, в том числе и на высокоэллиптических орбитах из состава высокоорбитального космического комплекса.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что:

1. Выполнена оценка влияния учёта параметров вращения Земли в задаче повышения точности прогнозирования движения НКА ГЛОНАСС.

2. Определена степень влияния фундаментальных составляющих параметров вращения Земли на эквивалентную погрешность псевдодальности за счёт космического сегмента.

3. Разработанные алгоритмы и методики могут быть использованы при совершенствовании бортовых вычислительных комплексов отечественных НКА для повышения точности передаваемой эфемеридной информации от НКА к потребителям.

4. Полученные результаты, позволяют говорить о возможности применения алгоритма прогнозирования ПВЗ в интересах прогнозирования параметров движения НКА ГЛОНАСС не только на борту, но и в аппаратуре гражданских потребителей навигационной информации.

5. Разработанная методика позволяет формировать рекомендации по применению имитационной модели для определения требуемого уровня знания неопределенности параметров ФКВО в интересах различных групп потребителей навигационной информации.

**Реализация результатов диссертационной работы.** Полученные результаты работы были использованы при выполнении составных частей опытно-конструкторских работ «Посылка-МГТУ-1» и «Посылка-МГТУ-ПП», что подтверждается материалами технических отчётов.

Методическая и теоретическая часть учёта параметров вращения Земли, была практически реализована при выполнении гранта УМНИК «Разработка программно-алгоритмического комплекса имитационного высокоточного моделирования условий функционирования космических аппаратов различного назначения» (договор № 13509ГУ/2018).

Результаты исследований, вошедшие в диссертационную работу, используются в учебном процессе на кафедре «Динамика и управления полетом ракет и космических аппаратов» МГТУ им. Н.Э. Баумана при проведении курсового и дипломного проектирования. А также в лекциях по курсам «Устройство и проектирование объектов», «Математические методы анализа и принятия решений в управлении космическими полётами», «Управление полетом космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, навигации и связи».

Некоторые результаты диссертационной работы реализованы в программах для ЭВМ (получены патенты РФ на ПЭВМ [10], [11], [12]).

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика учёта и оценки влияния неопределённости знания параметров фундаментального координатно-временного обеспечения на точность прогнозирования движения навигационных космических аппаратов.

2. Результаты комплексного математического моделирования возмущений движения навигационных спутников, обусловленных параметрами вращения Земли, с применением разработанного программно-алгоритмического комплекса, а также результаты долгосрочного прогнозирования параметров вращения Земли.

3. Методика определения степени влияния параметров вращения Земли на эквивалентную погрешность псевдодальности за счёт космического сегмента.

4. Рекомендации к требуемому уровню неопределенности параметров вращения Земли, для учёта в бортовой модели прогноза ПВЗ, позволяющие обеспечивать навигационные определения различных групп гражданских ПНИ.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов подтверждается: применением актуальных математических методов, основанных на фундаментальных и классических законах механики и использованием точных современных математических моделей движения околоземных космических аппаратов; использованием апробированных методов имитационного математического моделирования; непротиворечивостью отдельных полученных результатов, с частными решениями, опубликованными другими авторами.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и получили одобрения на российских и международных научно-технических конференциях: I и II научных чтениях памяти им. К.Э. Циолковского (г. Калуга, 2015, 2016гг.);

XLII международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2016г.); международной конференции International Conference on Measurement Instrumentation and Electronics, ICMIE (г. Москва, 2016г.); научно-технической конференции «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение в ВНИИФТРИ» (п. Менделеево, 2017г.); XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (г. Королёв, 2017г.); международной конференции 3rd IAA Conference on Dynamics and Control of Space Systems (г. Москва, 2017 г.); XL, XLI, XLIV, XLV, XLVI академических чтениях по Космонавтике, посвященных памяти С.П. Королёва в МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2016, 2017, 2020, 2021, 2022гг.).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 20 научных работах (из них 5 статей [1,2,6,8,9] – в изданиях, входящих в перечень ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, а также, 4 статьи [3,4,5,7] – в журналах из баз данных Web of Science и Scopus).

**Личный вклад автора** заключается в разработке методики, алгоритмов и программно-алгоритмического комплекса для их реализации, математическом моделировании, обработке, анализе, обобщении полученных результатов и формировании рекомендаций по их применению. Все представленные в диссертации результаты получены автором лично.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, перечня сокращений, четырёх глав, общих выводов и заключения, списка литературы, включающего 137 наименований. Текст диссертации изложен на 165 машинописных страницах, содержит 83 рисунка и 20 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, приведены обзор и анализ состояния работ по данному направлению, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость диссертации.

**В первой главе** проведен анализ вопроса совершенствования координатно-временного и навигационного обеспечения. Проанализирован вопрос определения и формирования фундаментальных составляющих параметров вращения Земли на основе доступных современных методов измерений. Показано, что параметры вращения Земли определяются с достаточно высокой точностью ( $\sim 0.03''$ ), однако, в отличие от прецессии и нутации являются трудно прогнозируемыми параметрами. Таким образом, под неопределенностью знания параметров фундаментального координатно-временного обеспечения в данной диссертационной работе понимается ошибка прогнозирования параметров вращения Земли на борту НКА.

Учитывая, что система БНО управления полетом КА широкого назначения рассматривается как потребительская система КВНО, то дополнительно рассмотрены требования к точности технологий БНО полётов перспективных космических средств различного целевого назначения [2,3].

Определено, что в рамках обоснования возможности декомпозиции задачи КВНО на основе анализа выходных точностных характеристик элементов системы можно утверждать, что блок точности БНО по своему входу связан в структурной схеме системы КВНО ПНИ с выходом блока ФКВО, охваченного в свою очередь главной обратной связью, идущей с выхода блока требуемой точности потребительской системы КВНО (Рисунок 1). Поскольку уровень точности и эффективности КВНО, в том числе, определяется уровнем развития ФКВО, поэтому нецелесообразно ставить задачи повышения точности КВНО без их предварительного обеспечения на уровне ФКВО.

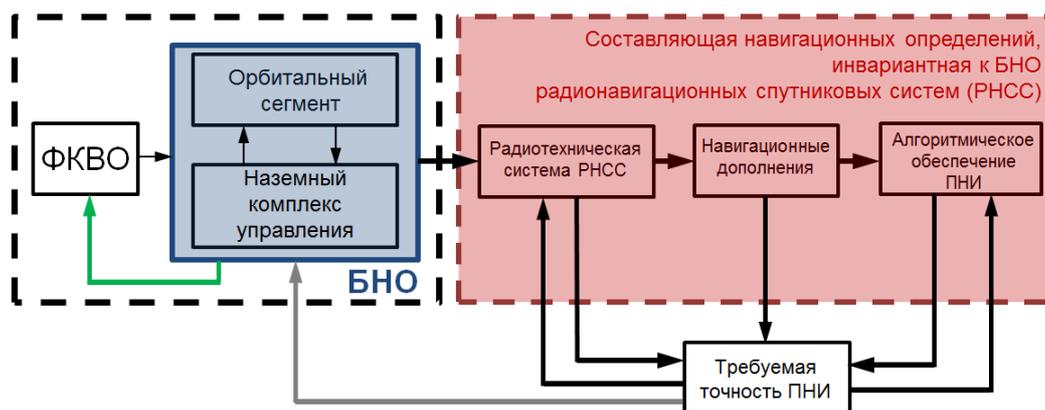


Рисунок 1. Предлагаемая схема декомпозиции системы КВНО ГЛОНАСС

Таким образом, между ФКВО и БНО существует непосредственная «жесткая» прямая взаимосвязь по точностным характеристикам, обусловленная необходимостью знания параметров вращения Земли. Обратная связь определяется требованиями по точности БНО, зависящими от «выходных» требований по точности ПНИ. Вышеизложенное было использовано в качестве основы при разработке методики учёта и оценки влияния неопределённости знания параметров фундаментального координатно-временного обеспечения на точность прогнозирования движения навигационных космических аппаратов.

**Во второй главе** подробно рассмотрены частные модели возмущений, системы координат, учитываемые в модели движения НКА, а также принцип построения и структура разработанного программно-алгоритмического комплекса.

Согласно практическим и теоретическим рекомендациям Международного астрономического союза и Международной службы вращения Земли были сформированы модели, описывающие влияние: нецентральности гравитационного поля Земли, гравитационного притяжения планет Солнечной системы [9], ПВЗ [5,6], прецессии и нутации, солнечного давления, приливных возмущений (твердотельных, океанических и атмосферных).

На основе разработанных автором алгоритмов учёта влияния: параметров вращения Земли, прецессии и нутации (Рисунок 2); гравитационного притяжения планет для работы с численными моделями эфемерид планет солнечной системы серии EPM и DE (Рисунок 3); приливных возмущений (Рисунок 5), был создан программно-алгоритмический комплекс имитационного моделирования [1],[10,11,12]. На Рисунке 2 показаны возмущающие ускорения, обусловленные смещением полюса Земли ( $a_{pole}$ ), неравномерностью вращения Земли ( $a_{rot}$ ), прецессией ( $a_{prec}$ ) и нутацией ( $a_{nut}$ ) оси Земли;

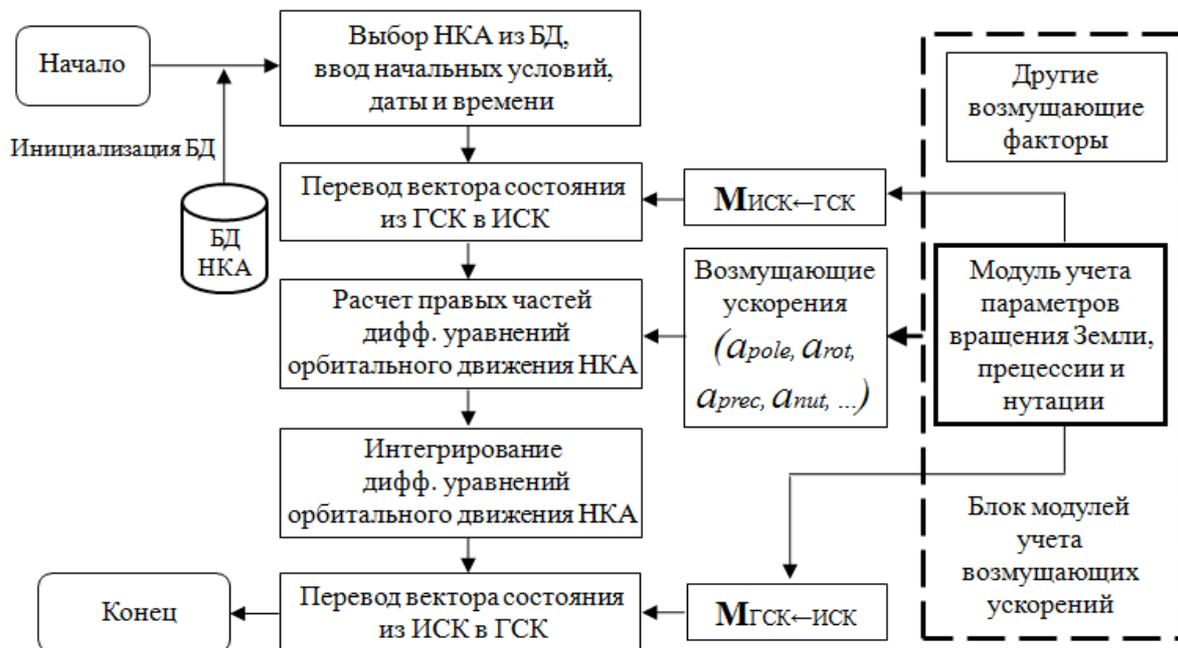


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма учёта возмущающих ускорений от параметров вращения Земли [6]

В третьей главе было проведено комплексное имитационное моделирование для определения вклада возмущений, обусловленных параметрами вращения Земли и остальными возмущающими факторами, в ошибку прогнозирования движения НКА ГЛОНАСС. Дополнительно было проведено моделирование движения НКА орбитального дополнения в виде высокоорбитального космического комплекса [8] на высоких эллиптических орбитах (ВЭО). Было рассмотрено два типа орбит: первый тип ( $e \approx 0.33$ ) и второй тип ( $e \approx 0.072$ ).

Задача комплексного имитационного моделирования очень важна в силу отсутствия исчерпывающих исследований в части оценки влияния возмущений, обусловленных смещением земного полюса и неравномерностью вращения Земли, на точность прогнозирования движения НКА.

Отклонения  $\Delta$  между номинальной невозмущенной орбитой и возмущенной орбитой рассчитаны в орбитальной системе координат, в которой:  $\Delta X$  – продольная дальность,  $\Delta Y$  – вертикаль и  $\Delta Z$  – боковая дальность.

Так, в рамках исследования гравитационного влияния планет Солнечной системы определено, что существенный вклад (десятки километров на 30 суточном интервале моделирования) вносит гравитационное влияние Солнца и Луны. А под влиянием гравитации других планет, уходы параметров орбиты минимальны и имеют порядок десятков и единиц сантиметров (влияние Венеры и Юпитер) и миллиметры (влияние Марса, Меркурия, Урана, Сатурна, Нептуна).

Аналогичное исследование, но для ВЭО позволило сгруппировать отклонения одного порядка: десятки и сотни километров (влияние Солнце и Луны);  $10^{-4}$  км (влияние Венеры и Юпитера);  $10^{-5}$  км (влияние Меркурия, Марса и Сатурна);  $10^{-7}$  км (влияние Урана и Нептуна). В свою очередь, продольная дальность испытывает максимальные возмущения. В общем случае гравитационное влияние планет рассчитывалось на основе разработанного алгоритма (Рисунок 3).

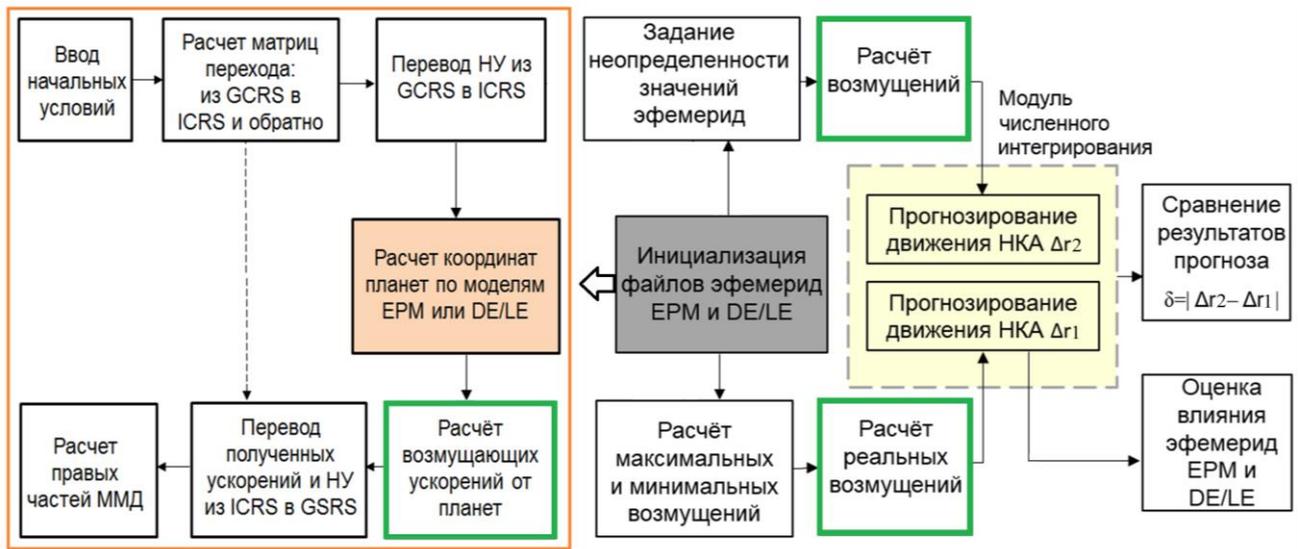


Рисунок 3. Алгоритм расчёта гравитационного влияния планет

Дополнительно, было проанализировано влияние неопределенности значений численных моделей эфемерид на точность прогнозирования орбиты движения НКА. Было проведено сравнение между высокоточными численными эфемеридами серии DE и отечественными EPM, показано, что на интервале 30 суток невязка между DE и EPM составляет не более 0.05% [9]. Полученный результат позволяет равнозначно использовать любые серии эфемерид в рамках рассматриваемых задач. В свою очередь, если на 30 суточном интервале неопределенность эфемерид планет находится в диапазоне  $\pm 5\%$ , то отклонение от номинального прогнозирования орбиты НКА не превышает 17% (что соответствует  $\delta < 0,6$  метра).

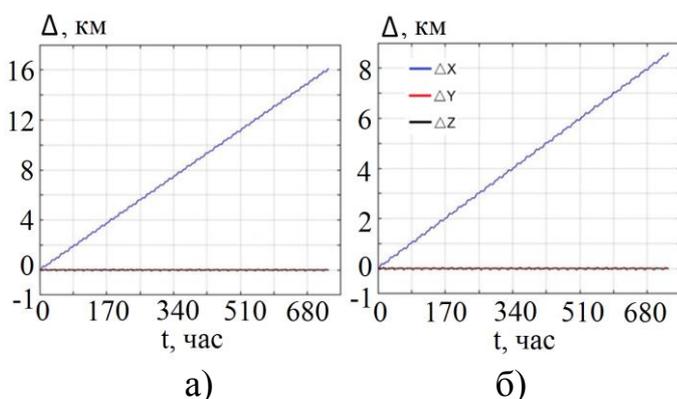


Рисунок 4. Изменения  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ :

- а) дата начала моделирования 25.11.2018;
- б) дата начала моделирования 01.02.2019

$\Delta Z$  на 30 суточном интервале моделирования, обусловленные смещением полюса Земли. Видно, что для продольной дальности наблюдается вековой уход, при этом максимальное отклонение составляет  $\sim 16$  км (для 25.11.2018 г.) и  $\sim 8.85$  км (для 01.02.2019 г.).  $\Delta Y$  и  $\Delta Z$  не имеют вековых уходов и практически не меняются, а значения лежат в диапазоне  $\pm 1$  м.

На Рисунке 5 показаны графики влияния неравномерности вращения Земли, прецессии и нутации на точность прогнозирования НКА для даты начала моделирования 01.02.2019 на интервале 30 суток. Анализируя графики

Далее была проведена серия численных расчётов и последующий анализ возмущений орбиты, обусловленных параметрами вращения Земли, прецессией и нутацией. Определено, что оказываемое влияние зависит от даты начала моделирования и может отличаться практически в два раза, это обусловлено сложностью процессов, происходящих в системе Земля-Луна-Солнце. На Рисунке 4 показаны графики ошибок  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,

(Рисунок 5), можно отметить общие тенденции, так для  $\Delta X$  наблюдается вековой тренд, в то время как  $\Delta Y$  и  $\Delta Z$  не имеют вековых уходов.  $\Delta Y$  практически не меняется, и отклонение не превышает  $\pm 1$  м. При этом  $\Delta Z$  имеет гармонический вид, и амплитуда быстро возрастает. Комплексное влияние прецессии и нутации отклоняет  $\Delta X$  на  $\sim 1170$  метров. А неравномерность вращения Земли обеспечивает ошибку  $\sim 100$  метров.

Также, были получены результаты моделирования вклада ПВЗ, прецессии и нутации в погрешность прогнозирования движения НКА на ВЭО. Показано, что для обоих типов орбит вклад смещения полюса Земли в возмущение  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  составляет  $\sim 84\%$ , а основной вклад ( $\sim 87\%$ ) в возмущение  $\Delta Z$  вносит прецессия и нутация.

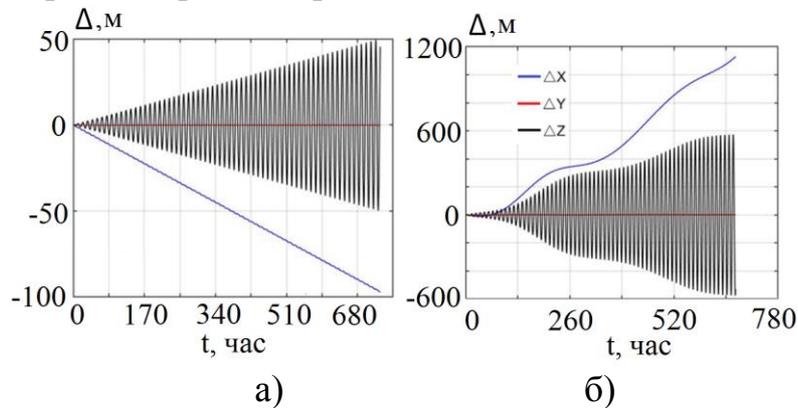


Рисунок 5. Изменения  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$ : а) влияние неравномерности вращения Земли; б) влияние прецессии и нутации оси вращения Земли

В рамках разработанного алгоритма (Рисунок 6) учёта приливных возмущений было проведено численное моделирование и анализ их влияния на точность прогнозирования НКА. В основу алгоритма положен двухэтапный расчёт вариаций нормализованных коэффициентов разложения  $\Delta \bar{C}_{nm} \Delta \bar{S}_{nm}$ .

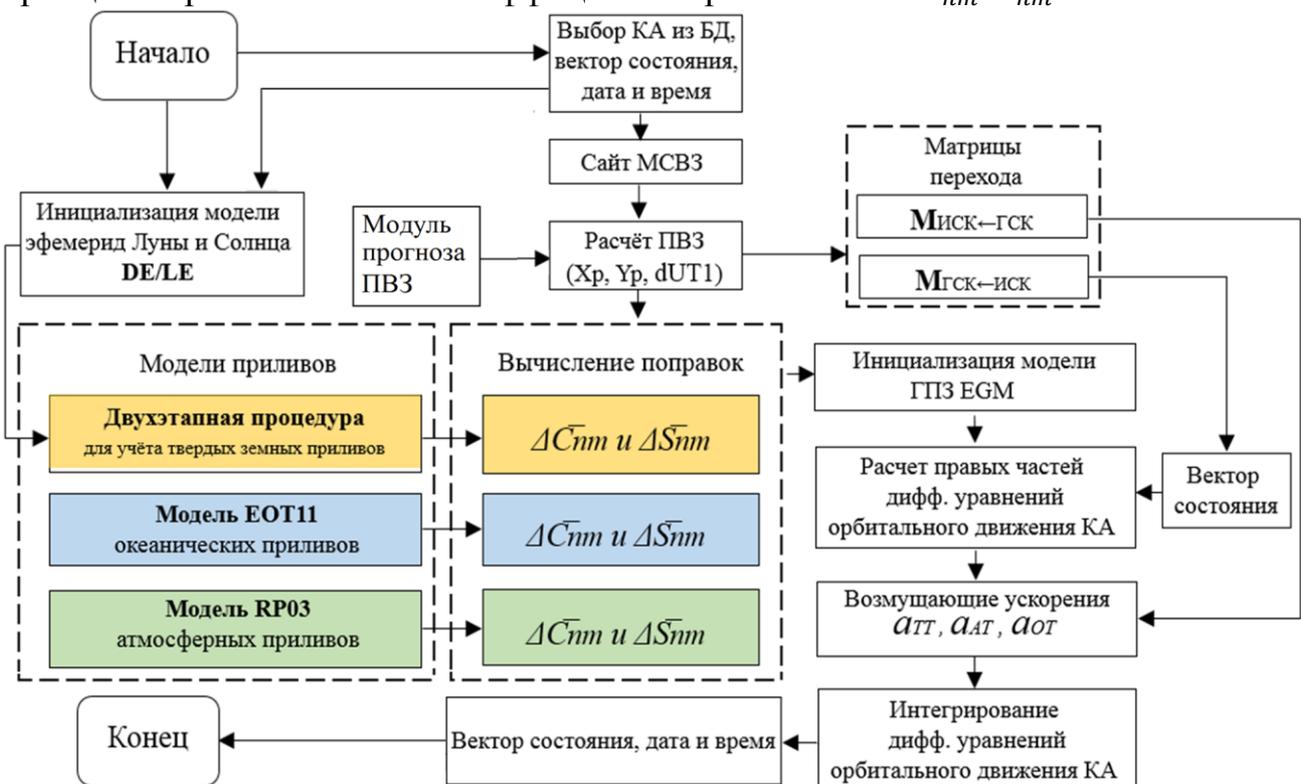


Рисунок 6. Алгоритм учёта приливных возмущений

Анализ результатов серии численных расчётов показал, что на 30 суточном интервале влияние твердых приливов на ошибку прогнозирования радиус-вектора не превышает 35 метров, океанических приливов не превышает 26 метров и атмосферных приливов не превышает 3 м.

Для обоснования эффективности применения моделей учёта ПВЗ была проведена оценка влияния ПВЗ на точность прогнозирования движения навигационных спутников ГЛОНАСС с учётом различной частоты обновления эфемерид на борту НКА: 30 минут, 1 час, 3 часа, 6 часов, 12 часов и 24 часа.

Оценка проводилась при сравнении отклонений компонентов координат

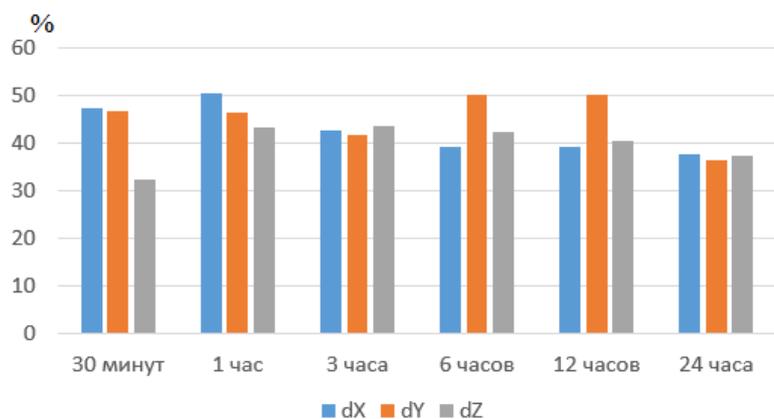


Рисунок 7. Уменьшение погрешности прогнозирования за счёт учёта ПВЗ

учёта ПВЗ в уменьшение погрешности прогнозирования становится более заметным.

Для подтверждения достоверности и адекватности разработанных математических моделей и алгоритмов было проведено сравнение результатов имитационного моделирования для всей группировки ГЛОНАСС с высокоточной апостериорной эфемеридной информацией для НКА ГЛОНАСС. Так, на интервале прогнозирования 7 суток средние максимальные отклонения для всей группировки ГЛОНАСС для координат не превышают: 14.5 м по X, 21 м по Y, ~16 м по Z. Таким образом, процентная ошибка относительно эталонных значений на интервале 7 суток не превышает 1% по координатам. Метровый уровень ошибки относительно высокоточной информации обусловлен погрешностью используемой упрощённой одномерной модели радиационного давления Солнца.

**В четвертой главе** рассмотрена предлагаемая методика (Рисунок 8) учёта и оценки влияния неопределённости знания параметров ФКВО на точность прогнозирования движения НКА на основе долгосрочного прогнозирования фундаментальных составляющих параметров вращения Земли. Разработанная методика объединяет в себе решение двух актуальных научных задач, а именно долгосрочное прогнозирование параметров вращения Земли с применением метода полиномиальной регрессии с элементами машинного обучения и учёт ПВЗ. Комплексное решение этих задач обеспечивает эффективное применение разработанной методики для:

1. Формирования требований к значениям ПВЗ, которые позволяют обеспечить заданный уровень моделируемой точности параметров орбиты НКА ГЛОНАСС и как следствие точности позиционирования гражданских ПНИ.

2. Осуществления выбора рациональных требований к БНО НКА ГЛОНАСС, в том числе и перспективных НКА.

3. Оценки возможностей навигационной системы в части чувствительности БНО к неопределённости знания ФКВО.

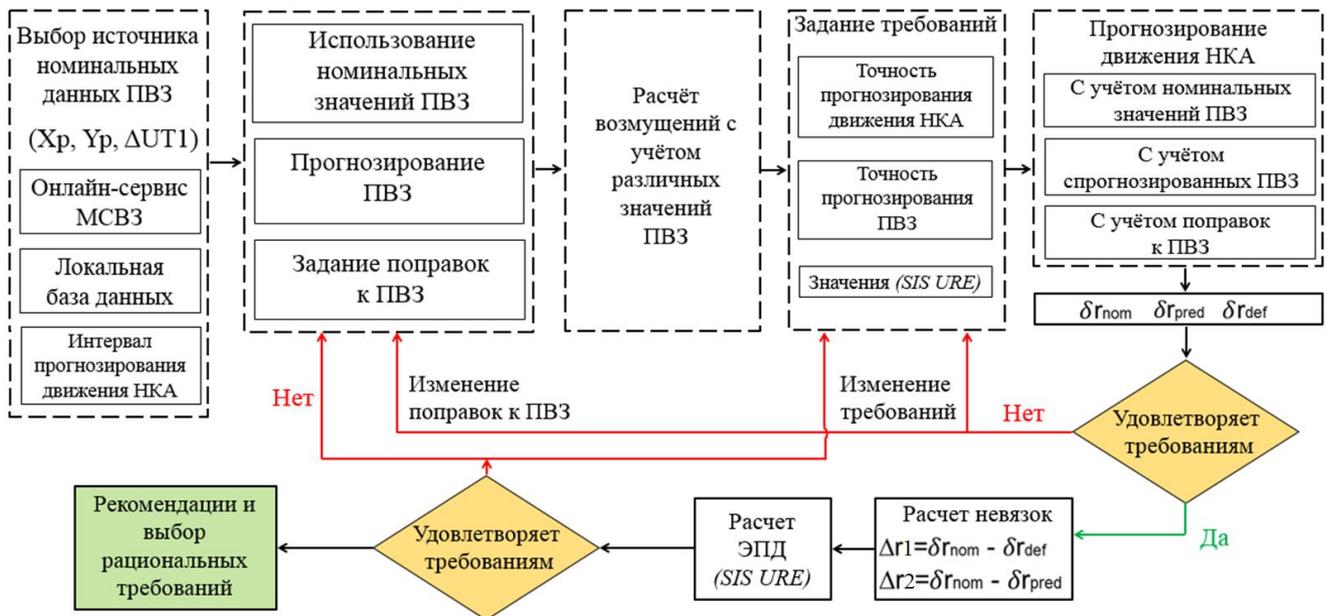


Рисунок 8. Предлагаемая методика

Для долгосрочного прогнозирования ПВЗ был реализован метод полиномиальной регрессии с элементами машинного обучения [12] PolynomialFeatures. Сравнение высокоточных измеренных и спрогнозированных значений ПВЗ было проведено на четырех разных временных интервалах с продолжительностью до 180 суток: период с 15.02.2014 по 13.08.2014; период с 31.03.2017 по 27.09.2017; период с 27.10.2020 по 25.04.2021; период с 13.04.2023 по 10.10.2023. Тренировочными данными послужили апостериорные значения МСВЗ серии С04 в период с 1960-х годов. Всего было проведено 100 численных экспериментов прогнозирования.

Так, на полугодовом интервале максимальные невязки для  $x_p$  и  $y_p$  не превышают  $0,07''$ , а для  $\Delta UT1$  не превышают  $0.06$  с. Таким образом, можно сделать вывод, что полученные результаты, обеспечивают высокую точность прогнозирования и на интервале 3 месяца прогноз ПВЗ будет не хуже  $0,03''$ . Это позволит формировать на борту НКА матрицу перехода из небесной в земную СК и обратно, без необходимости задействования наземного комплекса управления.

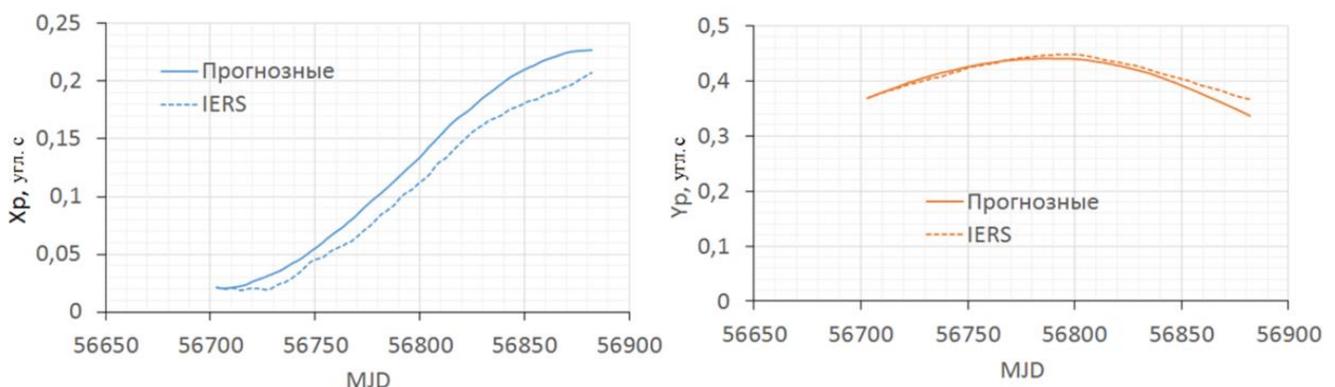


Рисунок 9. Пример сравнения реальных и спрогнозированных значений  $x_p$ ,  $y_p$  в период с 15.02.2014 по 13.08.2014

Значения среднеквадратических отклонений представлены в Таблице 1. Как показал анализ, полученные результаты прогнозирования, соизмеримы с

доступными высокоточными решениями (в частности ВНИИФТРИ), а иногда и превосходят решения, полученные с применением аналитических моделей, что подтверждает корректность и высокую точность прогнозных значений ПВЗ.

Таблица 1.

Интервал прогнозирования	$\sigma_x$ , угл.мс	$\sigma_y$ , угл.мс	$\sigma_{dUT1}$ , мс
15 дней	1,4739	0,9080	1,5461
30 дней	4,6466	2,3100	3,5579
60 дней	6,4715	3,1318	9,3924

На Рисунке 10 представлены, полученные в результате моделирования, радиус-векторы в орбитальной системе координат на основе номинальных апостериорных значений ПВЗ предоставляемых МСВЗ и спрогнозированных значений ПВЗ в соответствии с методом полиномиальной регрессии с элементами машинного обучения.

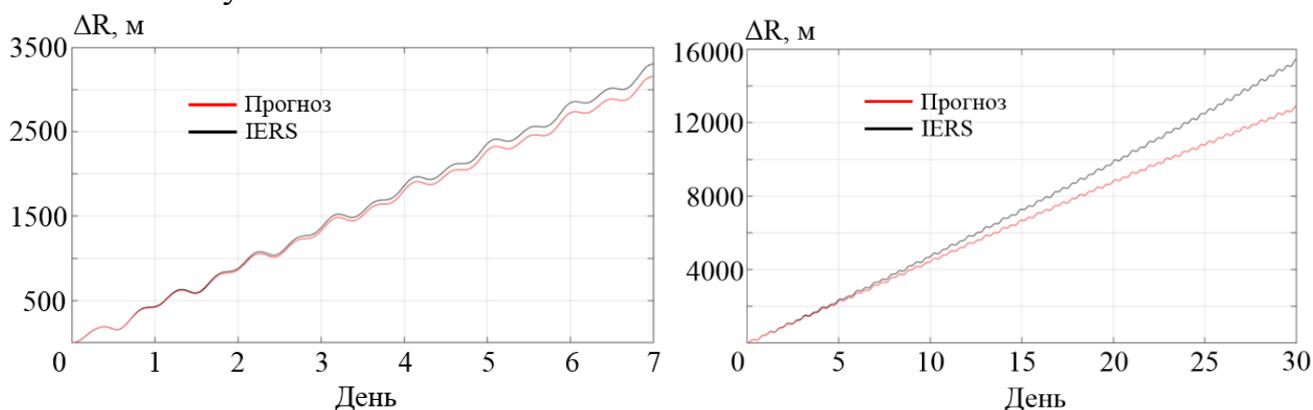


Рисунок 10. Радиус-векторы, полученные на основе данных МСВЗ и спрогнозированных данных на 7 суток и 30 суток. Время начала моделирования 13.04.2023.

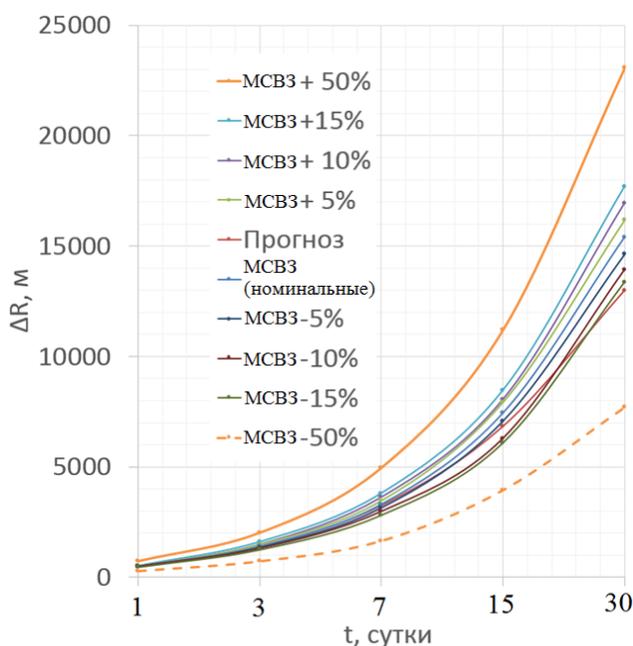


Рисунок 11. Смоделированные значения радиус-вектора

Анализируя полученные результаты (Рисунок 10) видно, что на 30 суточном интервале невязка радиус-вектора  $\Delta R$  не превышает 16%. На 15 суточном интервале прогнозирования, ошибка прогноза  $\Delta R$  находится на уровне 8%. А для 7 суточного интервала прогнозирования, ошибка прогноза  $\Delta R$  не превышает 2%.

На Рисунке 11 представлены, полученные в результате комплексного моделирования, значения радиус-вектора в орбитальной системе координат на основе: номинальных значений МСВЗ, спрогнозированных данных смещения полюса Земли, а также данных МСВЗ с различными поправками [ $\pm 5\%$ ;  $\pm 50\%$ ]. Анализируя полученные результаты,

можно оценить влияние неопределенности знания ПВЗ на точность прогнозирования радиус-вектора (Рисунок 11).

Видно (Рисунок 11), что радиус-вектор, полученный на основе спрогнозированных данных, лежит в пределах 5% ошибки прогнозирования ПВЗ в интервале до 7 суток моделирования, в пределах 10% неопределенности знания ПВЗ в интервале до 23 суток моделирования и в пределах 16% неопределенности знания ПВЗ в интервале до 30 суток моделирования.

При этом вклад только неравномерности вращения Земли совсем незначителен и на недельном интервале в условиях 5% неопределённости составляет всего лишь 1.2 метра.

На заключительном этапе исследования была разработана методика [12] определения степени влияния параметров вращения Земли на эквивалентную погрешность псевдодальности *SIS URE* (Рисунок 12). *SIS URE* является одной из важных составляющих эксплуатационной характеристики точности сигнала в пространстве для системы ГЛОНАСС.

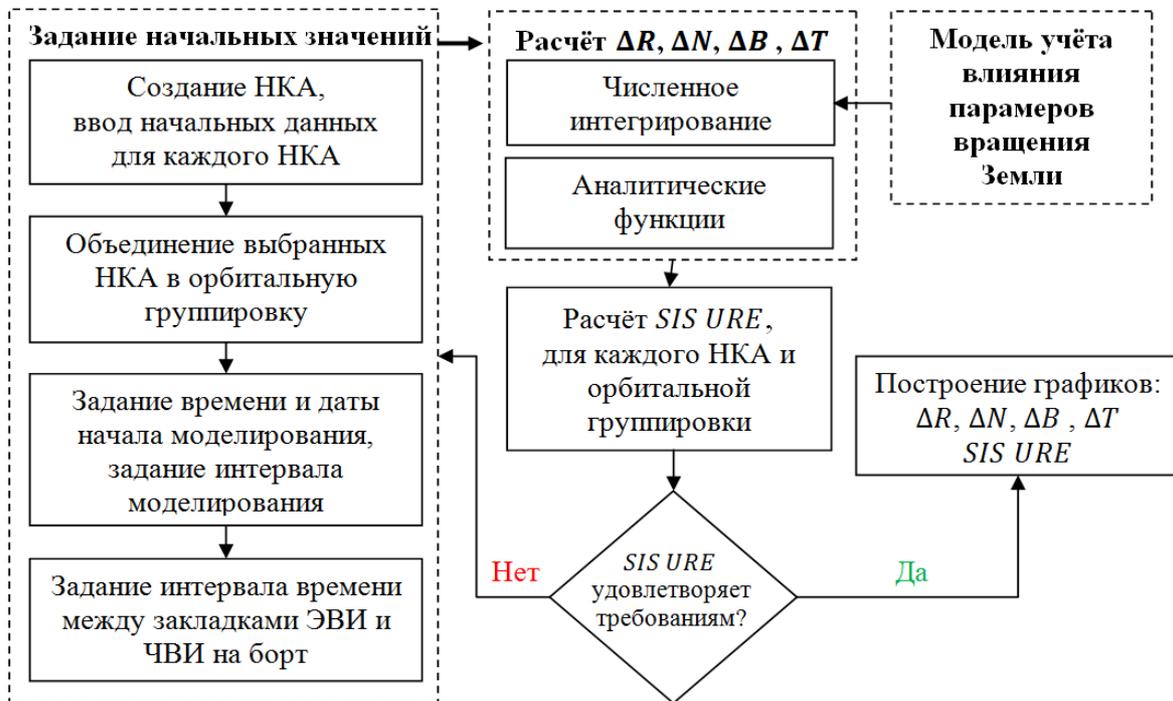


Рисунок 12. Блок-схема методики определения степени влияния ПВЗ на *SIS URE*

В соответствии с методикой, предполагается, что начальные данные для каждого НКА задаются, либо в виде вектора состояния, либо в виде 16 коэффициентов, характеризующих функции ошибки (погрешности бортовых эфемерид НКА) по следующим параметрам:  $\Delta R$  (ошибка по радиусу);  $\Delta B$  (ошибка по бинормали);  $\Delta N$  (ошибка по нормали)  $\Delta T$  (ошибка бортовых часов). *SIS URE* рассчитывается в соответствии с формулой

$$SIS URE = \sqrt{(0.98 \cdot \Delta R - c \cdot \Delta T)^2 + 0.19^2 \cdot (\Delta N^2 + \Delta B^2)},$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Ниже представлены графики с результатами моделирования *SIS URE* на 7 суток (Рисунок 13) для всей группировки ГЛОНАСС на дату начала 13.04.2023 г.

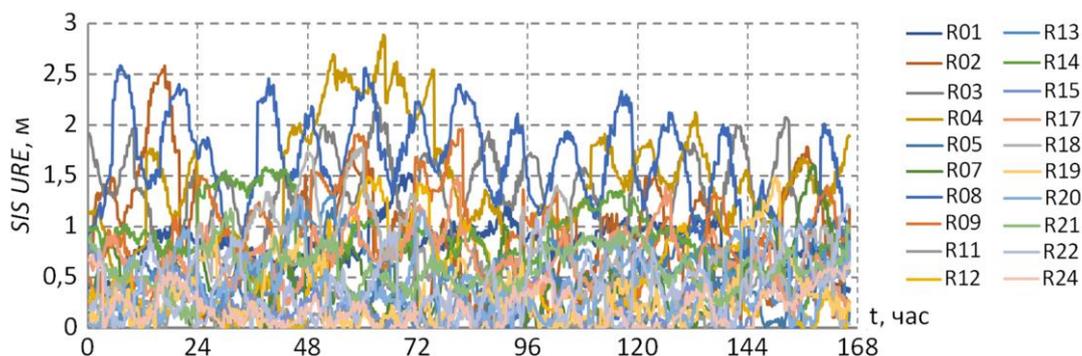


Рисунок 13. Пример рассчитанных значений  $SIS\ URE$  с учётом влияния ПВЗ на 1 неделю

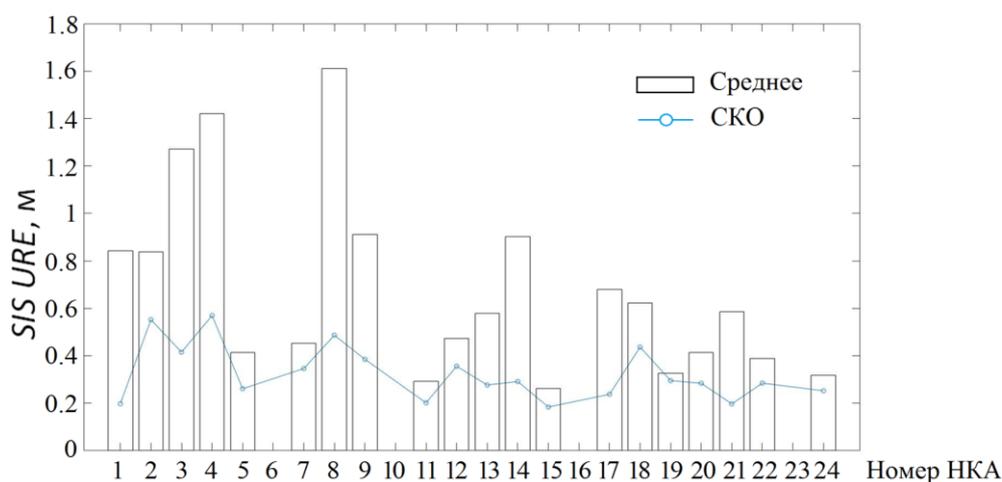


Рисунок 14. Средние значения и SKO для  $SIS\ URE$  с учётом влияния ПВЗ на 1 неделю

Так, в результате проведения 100 численных экспериментов, на интервале моделирования 1 сутки: среднее значение  $SIS\ URE$  для всей ОГ  $\sim 0.6$  м, а SKO составляет 0.037 м. А на интервале моделирования 7 суток (Рисунок 14): среднее значение  $SIS\ URE$  для всей ОГ  $\sim 0.67$  м, а SKO составляет 0.323 м.

Это актуально при условии выхода значений эквивалентной погрешности псевдодальности за счёт космического сегмента на субметровый уровень точности на суточном интервале. В свою очередь ошибки бортовых часов  $\Delta T$  на уровне  $\pm 5$  нс, позволяют обеспечить средние значения эквивалентной погрешности псевдодальности за счёт космического сегмента также не более 1 метра.

**В общих выводах и заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки методики учёта и оценки влияния неопределенности знания параметров ФКВО на точность прогнозирования движения НКА, что позволило достичь поставленной цели.

При этом основные выводы и результаты работы состоят в следующем:

1. Предложенная методика учёта и оценки влияния неопределенности знания параметров ФКВО на точность прогнозирования движения НКА с учётом долгосрочного прогнозирования фундаментальных составляющих параметров

вращения Земли представляет собой значительный практический интерес, учитывая потребность совершенствования системы ГЛОНАСС с целью повышения точности навигационных определений.

2. Разработанная методика определения степени влияния параметров вращения Земли на значения эквивалентной погрешности псевдодальности за счёт космического сегмента позволяет повысить точность SIS URE. Так, на интервале 1 сутки на ~2,8% (что соответствует ~7 см), на интервале 3 суток составляет ~4.3% (что соответствует ~16 см), на интервале 7 суток улучшение составляет 10% (что соответствует ~27 см), а на месячном интервале прогнозирования движения НКА улучшение SIS URE достигает 38%.

3. Ошибка моделирования значений эфемеридной информации НКА на основе долгосрочного прогнозирования фундаментальных составляющих параметров вращения Земли при помощи метода полиномиальной регрессии с элементами машинного обучения на 1 сутки не превышает 0,5%, а на интервале 30 суток не превосходит 16%.

4. Применение метода полиномиальной регрессии с элементами машинного обучения позволяет получать результаты долгосрочного прогноза фундаментальных составляющих параметров вращения Земли, имеющие высокую точность и достоверность на интервале до 90 суток. Таким образом, реализованный метод прогнозирования ПВЗ может быть использован на борту навигационных спутников для повышения точности определения эфемеридной информации.

5. На основе разработанных алгоритмов и методик был создан программно-алгоритмический комплекс, как инструмент для проведения численного имитационного моделирования. В основу программно-алгоритмического комплекса была положена универсальность и масштабируемость.

6. Предложенные алгоритмы, методики и программно-алгоритмический комплекс носят универсальный характер, поэтому могут быть применены для оценки возможностей любой зарубежной навигационной системы, а также могут быть использованы при проектировании перспективного высокоорбитального космического сегмента ГЛОНАСС.

При этом в качестве дальнейшего развития и исследования определены следующие вопросы:

- применение в разработанной методике высокоточной согласующей трёхмерной модели радиационного солнечного давления.

- разработка специальных теоретических и методических разработок в области теории чувствительности параметров БНО по отношению к варьлируемым уровням параметров ФКВО.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Лысенко Л.Н., Корянов В.В., Топорков А.Г. Концепция разработки программно-методического обеспечения комплекса имитационного моделирования условий функционирования орбитального сегмента глобальных навигационных и телекоммуникационных геостационарных спутниковых систем // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. Вып.5. С.1-26 (1,6 п.л./0,5 п.л.).

2. Лысенко Л.Н., Корянов В.В., Топорков А.Г. Об оценке требований к точности спутниковой навигации на основе анализа современного состояния КВНО потребительских систем гражданского назначения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. Вып.5. С.47-61 (0.8 п.л./0.25 п.л.).
3. Lysenko L.N., Koryanov V.V., Toporkov A.G. Analysis of the reasonableness of the current level of required accuracy of satellite navigation of consumer systems civil mobile means // MATEC Web Conf. 2016 International Conference on Measurement Instrumentation and Electronics. 2016. Volume 75. P.1-5. DOI: 10.1051/mateconf/20167505006. (0.6 п.л./0.2 п.л.).
4. Lysenko L.N., Koryanov V.V., Toporkov A.G. The analysis of possibility of integration the global information satellite systems second generation with regional systems on the basis of modern small and micro spacecrafts // 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering, ICMSC 2017. 2017. P.310-318. DOI: 10.1109/ICMSC.2017.7959492 (1 п.л./0.35 п.л.).
5. Toporkov A.G., Koryanov V.V. Influence of the Earth rotation parameters on the accuracy of predicting the motion of satellite GLONASS // Third IAA Conference on dynamics and control of space systems 2017, DyCoSS 2017. AAS 17-871. Volume 161. P.295-302 (1 п.л./0.7 п.л.).
6. Топорков А.Г., Корянов В.В., Ду Ч. Учет параметров вращения Земли для высокоточного имитационного моделирования движения спутников ГЛОНАСС в интересах гражданских потребителей // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. Вып.10. С.1-21. DOI: 10.18698/2308-6033-2020-10-2025 (1.3 п.л./0.6 п.л.).
7. Toporkov A.G., V. V. Koryanov, E. M. Gashimov. Research of the possibility of increasing the accuracy and availability of the GLONASS system by building a high-orbit space complex // AIP Conference Proceedings. 2023. Volume 2549, Issue 1. P. 1-9. DOI: 10.1063/5.0107884 (1 п.л./0.6 п.л.).
8. Топорков А.Г. Повышение точности и доступности системы ГЛОНАСС для гражданских потребителей за счет высокоорбитального космического комплекса // Инженерный журнал: наука и инновации. 2023. Вып.7. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-7-2294 (1.25 п.л./1.25 п.л.).
9. Топорков А.Г., Козлов Е.А. Комплексная оценка аналитических и численных моделей эфемерид планет Солнечной системы на примере околоземных КА // Инженерный журнал: наука и инновации, 2023, Вып.8. DOI: 10.18698/2308-6033-2023-8-2300. (1.1 п.л./0.7 п.л.).
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020617414 Российская Федерация. СПУТНИК-ИВМ: №2020616468: заявл. 17.06.2020: опубл. 06.07.2020 / Топорков А.Г.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021662117 Российская Федерация. ГЛОНАСС-параметры вращения Земли: №2021661327: заявл. 20.07.2021: опубл. 22.07.2021 / Топорков А.Г.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024613038 Российская Федерация. Прогнозирование параметров вращения Земли. Высокоточное прогнозирование движения навигационных спутников ГЛОНАСС: № 2024611307: заявл. 24.01.2024: опубл. 08.02.2024 / Топорков А.Г.