

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Шайхутдинова Альберта Рузалевича
на тему «Методы решения задач баллистики и навигации космических
аппаратов»
по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия**

Диссертация Альберта Рузалевича Шайхутдинова посвящена разработке, совершенствованию и реализации методов решения определенных задач в рамках баллистико-навигационного обеспечения (БНО) полета космического аппарата (КА), а также применению реализованных подходов для разработки предложений по улучшению характеристик конкретных космических проектов. К последним следует отнести задачу предложения оптимальной орбиты космического радиотелескопа с точки зрения UV-заполнения для выбранных источников и задачу выбора стратегии передачи данных группировки космических аппаратов ДЗЗ.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы и программного обеспечения, 3 глав, заключения, словаря терминов, списка литературы и приложения. Диссертация содержит 137 страниц с 28 рисунками и 9 таблицами. Список литературы включает 125 наименований.

Во **введении** представлен обзор существующих средств программно-математического обеспечения для решения некоторых задач БНО, кратко описан контекст задач баллистического проектирования К-РСБД миссий и организации передачи информации группировкой спутников ДЗЗ. Помимо этого обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы, сформулированы ее цели и положения, выносимые на защиту. В **первой главе** описывается структура программного комплекса для решения задач, связанных с БНО полета и реализованные в нем алгоритмы. В

том числе описывается алгоритм параллельного расчета гравитационного потенциала, представленного в виде разложения по сферическим гармоникам, и его градиента. **Во второй** главе рассматривается задача выбора орбиты космического радиотелескопа в К-РСБД проекте на примере "Миллиметрона". **В третьей** главе решается задача определения режима работы группировки спутников ДЗЗ.

Тема работа является, безусловно, **актуальной** благодаря постоянно возникающим, в том числе на этапе проектирования, новым задачам БНО полета КА. Решение таких задач требует проработанного, надежного и расширяемого программно-математического обеспечения. Эффективность разработанных методик подтверждена соискателем при решении некоторых актуальных задач БНО проектируемых космических миссий Мииллиметрон и группировки ДЗЗ Ситроникс.

Среди **новых** результатов автора следует отметить алгоритм параллельного расчета возмущения, обусловленного гравитационным потенциалом, разложенным по сферическим функциям. Предложенный подход действительно с одной стороны использует сильные стороны факторизации, предложенной Холмсом для снижения ограничений на численные расчеты с присоединенными функциями Лежандра, а с другой стороны позволяет использовать более одного вычислительного потока для суммирования ряда разложения гравитационного потенциала или его градиента. Также следует отметить новые результаты автора в части предложения по выбору орбиты космического радиотелескопа проекта «Миллиметрон», исходя из улучшения UV-покрытия для целевых источников.

Для получения результатов диссертационной работы автор использует апробированные модели и методы, в том числе реализованные в проверенных сторонних библиотеках, для расчета траекторий космических аппаратов,

характеристик UV-покрытий и зон видимости с наземных станций. В пользу **обоснованности** полученных результатов также свидетельствует использование исходных данных о соответствующих космических проектах, предоставленных автору АКЦ ФИАН и АО Ситроникс.

Результаты, полученные в диссертационной работе, были опубликованы в авторитетных рецензируемых научных изданиях, а также представлены в докладах на российских и международных конференциях. А.Р.Шайхутдинов внес основной вклад в получение выносимых на защиту результатов, в трех работах вклад диссертанта является определяющим. О **достоверности** полученных результатов также свидетельствует сравнение реализованных траекторных расчетов с аналогичными расчетами ЦНИИмаш и ИПМ М.В. Келдыша РАН, а также с использованием GMAT.

К работе есть ряд замечаний:

1. Во введении среди перечня решаемых задач и в первом пункте выносимых на защиту положений фигурируют задачи баллистики и навигации КА без необходимой в данном случае их конкретизации. Полный объем задач БНО определенно выходит за рамки данной диссертационной работы, представление о которых формируется лишь после ознакомления с первой главой работы.
2. Рекуррентные соотношения (1.1) – (1.3), приведенные в разделе описания алгоритма Холмса, не соответствуют новым алгоритмам, представленным в работе Холмса [70].
3. Следовало избежать использования одинакового обозначения для нормированных присоединенных функций Лежандра от аргументов $\sin\varphi$ и θ , так как в действительности имеются в виду разные функции.

4. В разделах 1.2.7 и 1.2.9 используются матрицы поворота вокруг j -й оси на заданный угол $R_j(\phi)$ без введения соответствующего обозначения (последнее дается только в разделе 2.3.3).
5. Результат сравнения быстродействия преобразования систем координат BCRF в ITRF с использованием новой методики и прямого расчета, приведенный в разделе 1.3.3, является малоинформативным. Хотелось бы увидеть сравнение в одинаковых условиях, где прямой расчет также использует преимущества кэширования полученных результатов.
6. В разделе 2.2.9 формулируется утверждение о том, что текущая номинальная орбита КА «Спектр-М» идеально подходит для режима одиночной антенны. Там же в качестве недостатка для К-РСДБ указывается ограниченная радиовидимость с перечня наземных станций. Если эти ограничения по какой-то причине не распространяются на режим одиночной антенны, это следовало упомянуть.
7. Значение угла между нормалью к плоскости орбиты и направлением на источник (уравнение (2.4)) выражается через элементы матрицы, зависящей, в том числе, от аргумента перицентра ω , не влияющего на данный угол. Выражение (2.4) следовало раскрыть и упростить.
8. Для слагаемых K_i ряда в выражении (2.5) отсутствует описание аргумента β .
9. В описании модели сил в разделе 2.3.5:
 - Указана динамическая модель атмосферы, но нет упоминания используемого значения баллистического коэффициента и необходимых данных о солнечной и геомагнитной активности.

- Для давления солнечного излучения приведены параметры, позволяющие оценить силу, но не ускорение движения центра масс, поскольку не указана масса КА.

10. В начале раздела 3.2.4 отмечено, что расчеты по моделированию группировки проводились на интервале с 1 июня 2027 г по 13 июня 2028 г. Последующее содержание раздела указывает на длину интервала моделирования в 13 суток.

Вместе с тем, указанные замечания ни в коей мере не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1–2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Шайхутдинов Альберт Рузалевич безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.1. Физика космоса, астрономия.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,

Старший научный сотрудник отдела № 5 «Механика космического полета и управление движением» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

ЗАХВАТКИН Михаил Витальевич

«__» декабря 2023 г.

Контактные данные:

тел.: +7(499)2207996, e-mail: zakhvatkin@kiam1.rssi.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.02.01 — теоретическая механика

Адрес места работы:

125047, Москва, Миусская пл., д.4,

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

тел.: +7 499 978-13-14, e-mail: office@keldysh.ru

Подпись сотрудника ИПМ им. М.В. Келдыша РАН М.В. Захваткина
удостоверяю

Ученый секретарь

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

к.ф.-м.н.

А.А. Давыдов

«__» декабря 2023 г.