

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Подзолко Михаила Владимировича «МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ ДЛЯ МЕЖПЛАНЕТНОЙ МИССИИ К СИСТЕМЕ ЮПИТЕРА» представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – «Физика Солнца»

Диссертация посвящена исследованиям радиационной обстановки для космического аппарата «Лаплас», разрабатываемого НПО им. Лавочкина, ИКИ РАН и другими институтами, для исследования спутников Юпитера. Детальные расчеты радиационной обстановки на всех стадиях полета важны для выбора оптимальной траектории аппарата для разработки научной аппаратуры, так и для прогнозирования уровней радиационного воздействия на системы аппарата. Во время полета к Юпитеру могут быть получены данные измерений потоков частиц солнечных и галактических космических лучей на разных расстояниях от Солнца, а также магнитного поля и потоков энергичных частиц в магнитосфере Юпитера, а сами исследования Юпитера и его спутников могут привести к новым открытиям, особенно интригующими являются поиски признаков жизни на спутнике Юпитера Европе, поэтому актуальность работы не вызывает сомнений.

Целью работы было моделирование радиационных условий на различных этапах полета – в магнитосфере Земли, межпланетном пространстве и радиационных поясах Юпитера и поиск путей минимизации рисков радиационных повреждений.

В настоящее время для решения прикладных задач оценки радиационной опасности обычно используют модели AP8/AE8, разработанные еще в 70-х годах прошлого века, и ГОСТы, также основанные на данных, полученных несколько десятилетий назад. Радиационные условия на орбите Юпитера известны только по небольшому ряду измерений, которых было проведено значительно меньше, чем для магнитосферы Земли. Существующие модели не

всегда удовлетворительно воспроизводят радиационные условия в космической среде, поэтому перед автором стояла сложная задача выбора наиболее точных данных и проверки моделей на основе современных данных для получения надежных результатов.

Научная новизна работы определяется тем, что проведен расчет уникального полета космического аппарата (КА) Юпитеру и представлены результаты расчетов радиационной обстановки для предполагаемого старта аппарата в 2026 г., проведен их детальный анализ всех участков орбиты. Выбранные методики позволили оценить вклады в суммарную дозу от ГКЛ и СКЛ, частиц радиационного пояса Земли (РПЗ) и Юпитера и изучить основные факторы, влияющие на риски. Поскольку предполагаемый полет к Юпитеру продлится несколько лет, важно учитывать солнечную модуляцию космического излучения в гелиосфере, что и было осуществлено. Разработанные автором подходы и полученные на основе расчетов зависимости позволили выбрать оптимальные с точки зрения радиационной дозы схемы полета КА.

Практическая значимость работы заключается в том, что проведенные оценки позволили выбрать, возможно близкую к оптимальной, схему полета как для Европы, так и для Ганимеда, что позволит увеличить вес научной аппаратуры, а значит и ценность всей миссии в целом. Разработанные методы могут быть использованы для оценки радиационной обстановки для экспедиций к другим планетам солнечной системы.

Все представленные результаты опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных журналах, которые входят в список ВАК, и были представлены на 7-х российских и международных конференциях.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, перечня основных результатов и списка литературы.

Во **введении** дается общая характеристика работы, обоснована ее актуальность, изложены положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В **первой главе** приводится обзор результатов изучения радиационной обстановки на околоземных орбитах, в межпланетном пространстве и магнитосфере Юпитера. Основной вклад в дозу на орбитальных участках в первые годы полета дают частицы РПЗ, ГКЛ, и СКЛ, потоки которых имеют свои пространственно-временные особенности и закономерности, не полностью отраженные в современных моделях космоса. Автор подробно останавливается на сравнении моделей, и обосновывает, на основе достаточно консервативного подхода, выбор тех из них, которые в дальнейшем используются для вычислений. Наименее изученными являются потоки частиц в магнитосфере Юпитера. В целом из проведенного обзора складывается достаточно полная картина современного состояния моделирования радиационной обстановки на околоземных и межпланетных участках орбит космических аппаратов.

Во **второй главе** приведено описание результатов моделирования для двух вариантов планируемых полетов на околоземном и межпланетном участках орбит. Интересно отметить, что из результатов автора следует, что СКЛ вносят большой вклад в дозу для длительных космических полетов.

В **третьей главе** Особую опасность представляют собой участки траектории аппарата около Юпитера с его протяженными радиационными поясами, наполненными высокоэнергетическими электронами. С использованием модели радиационных поясов Юпитера рассчитаны потоки энергичных электронов, которые в магнитосфере Юпитера дают наибольший вклад в дозы радиации за защитами, и величины доз в области орбит Европы и Ганимеда. Показано, что в силу долготного дрейфа электронов в магнитном поле Юпитера относительно Европы электроны с энергиями $<25-30$ МэВ, дающие основной вклад в дозу, высыпаются на задней стороне Европы относительно направления её движения по орбите, а электроны бóльших энергий – не её передней стороне. Учёт факторов ларморовского движения вблизи поверхности, анизотропии потоков и отличия плоскости орбиты Европы от плоскости магнитного экватора Юпитера даёт существенные уточнения этой

картины и позволяет определить, что оптимальными местами посадки являются передняя сторона Европы относительно направления её движения по орбите, околополярные области и область в центре задней полусферы.

Четвертая глава посвящена радиационным условиям на траектории полёта в системе Юпитера и оптимизации маневров для выхода на орбиту вокруг Европы и Ганимеда. Для миссии к Европе найдены оригинальные параметры траектории 1-го витка орбиты вокруг Юпитера, при которых достигается минимизация радиационной нагрузки и затрат энергии на коррекцию орбиты когда сначала КА пролетает «ниже» радиационных поясов, а до и после первого витка пересекает пояса на удалении от экватора, где потоки частиц существенно ниже, чем на экваторе. Разработан оригинальный вариант траектории гравитационных манёвров в системе Юпитера для выхода на орбиту вокруг Ганимеда со значительно более низкой радиационной нагрузкой, чем осуществленные полеты, и приемлемыми затратами энергии на коррекцию орбиты. Уменьшение нагрузки достигается за счет увеличения перицентра орбиты при маневрах и включения двигателей при прохождении апоцентров, за счёт чего радиальное расстояние на всех витках орбиты (кроме 1-го) превышает 14.5 радиусов Юпитера.

Диссертация написана ясным и понятным языком. Основные положения диссертационной работы подробно объяснены и аргументированы. Необходимые для понимания текста формулы представлены. Таблицы и графики, иллюстрирующие результаты и выводы работы, даны с достаточной полнотой.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

По существу представленной работы можно сделать следующие замечания.

1. В первой главе, на мой взгляд, мало внимания, уделено сравнению использованных моделей с данными современных измерений на КА. Так, прецизионные измерения потоков галактических космических лучей проведены в последние годы в экспериментах BESS, PAMELA, AMS02 в разные периоды

солнечной модуляции. Во многом они подтвердили действующий международный стандарт ISO 15390-2004, но точность измерений значительно превышает точность данных КА IMP-8. Было бы полезно сравнить полученные результаты расчетов по этим моделям с новыми данными, или хотя бы привести ссылки на такие сравнения. То же самое относится и к СКЛ.

2. В работе показано, что основной вклад в дозу на поверхности Европы вносят электроны и за счет экранирующего эффекта, который зависит от скорости долгого дрейфа, есть области, где потоки электронов значительно, в несколько раз, уменьшаются. При этом неясным остается вопрос о роли протонов в этих областях: ларморовский радиус протонов и скорость дрейфа значительно отличаются и их распределение по поверхности будет, по видимому, более равномерным. Так, в работе (Nordheim et al., 2018 *Nature Astronomy* 2, 673–679) предполагается, что вклад их может быть существенным, по крайней мере, для незащищенных элементов конструкции КА. Для будущего продолжения работы можно рекомендовать рассмотреть вклад потоков протонов радиационного пояса Юпитера более детально.

3. Данные по угловому распределению электронов в радиационных поясах Юпитера приведены только в гл. 1, формулы на стр. 43. Не совсем понятно как они были использованы для расчетов анизотропных распределений в п.п 3.4 и насколько точно они описывают реальные потоки в магнитосфере Юпитера.

4. Еще несколько замечаний по оформлению работы:

Некоторые из приведенных автором иллюстраций не имеют ссылок на приведенные на них данные (например, рис. 1.1, 1.4), на других трудно соотнести подписи с кривыми на рисунках (рис. 2.2). В тексте работы встречаются повторяющиеся фрагменты (стр. 21 и 27, 29 и 56). Есть опечатки на стр. 50–51, 68 и некоторых других.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует

паспорту специальности 01.03.03 – «Физика Солнца» (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 приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Михаил Владимирович Подзолко заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.03 – «Физика Солнца».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, профессор Отделения ядерной физики и технологий офиса образовательных программ Национального исследовательского ядерного университета (НИЯУ МИФИ)

Михайлов Владимир Владимирович

11 декабря 2018 г.

Контактные данные: тел.: _____, e-mail: _____

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

Адрес места работы: 115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, д. 31

НИЯУ МИФИ

Тел. _____, e-mail: _____

Подпись удостоверяю
Заместитель начальника отдела
документационного обеспечения
НИЯУ МИФИ

А.А. Абатурова

Подпись сотрудника НИЯУ МИФИ В.В. Михайлова удостоверяю

