

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. Ломоносова

На правах рукописи



**Подзолко Михаил Владимирович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ  
ДЛЯ МЕЖПЛАНЕТНОЙ МИССИИ К СИСТЕМЕ ЮПИТЕРА**

Специальность 01.03.03 – «Физика Солнца»

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018 г.

Работа выполнена в отделе космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

**Научный руководитель**

Панасюк Михаил Игоревич  
доктор физ.-мат. наук, профессор

**Официальные оппоненты**

Мирошниченко Леонтий Иванович  
доктор физ.-мат. наук,  
ИЗМИРАН,  
главный научный сотрудник

Михайлов Владимир Владимирович  
доктор физ.-мат наук,  
НИЯУ МИФИ,  
профессор

Шуршаков Вячеслав Александрович  
кандидат физ.-мат наук, с.н.с,  
ГНЦ РФ – ИМБП РАН,  
вед. научный сотрудник – зав. отделом

Защита диссертации состоится 26 декабря 2018 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.05 Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу:

Ауд. 2-15, 19-й корпус МГУ, Ленинские горы, д. 1, стр. 5, 119991, Москва,  
E-mail: nav19iv@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М. В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»:

<http://istina.msu.ru/dissertations/157334732/>

Автореферат разослан «    » ноября 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

Н. А. Власова

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Актуальность темы исследования**

Настоящая работа посвящена моделированию радиационных условий космической исследовательской миссии, в ходе которой автоматическая межпланетная станция должна быть впервые доставлена на орбиту и поверхность одного из больших спутников Юпитера Европа или Ганимед.

В последние 10 лет разработка проектов таких миссий начата ведущими мировыми космическими агентствами.

На международных научных конференциях Europa-Jupiter International Science Workshop в Риме в 2008 г., European Planetary Science Congress в Потсдаме в 2009 и других было объявлено о разработке совместного проекта NASA и ESA «Europa Jupiter System Mission», предусматривавшего запуск в 2020-х гг. американского и европейского космических аппаратов (КА), которые должны быть выведены на низкие орбиты вокруг Европы и Ганимеда для исследования поверхности этих спутников при помощи приборов дистанционного зондирования в различных диапазонах длин волн. После выхода NASA из этого проекта в 2010 г. Европейским космическим агентством (ESA) продолжена разработка миссии «Jupiter Icy Moon Explorer» к Ганимеду, старт которой в настоящее время планируется на 2022 г. Однако в NASA по-прежнему существуют планы миссии к Европе; так, начиная с 2012 г. разрабатывается проект Europa Clipper искусственного спутника Юпитера, который должен совершить  $\approx 30$  пролётов на расстояниях  $< 100$  км от поверхности Европы; с 2017 г. рассматривается новый проект посадочного аппарата на поверхность Европы.

Одновременно с NASA и ESA Роскосмос также начал разработку миссии «Лаплас», в ходе которой КА должен выйти на низкую орбиту, а затем совершить посадку на поверхность спутника Юпитера. Рассматривались два возможных варианта – посадка на поверхность Европы или Ганимеда. Для разработки этого проекта была сформирована рабочая группа с участием сотрудников ИКИ РАН, НПО им. С. А. Лавочкина, НИИЯФ МГУ, включая автора настоящей работы; и других научных организаций; по заданию Роскосмоса проведены научно-исследовательские работы с целью определения возможного научного и технического облика миссии. При этом велось сотрудничество с аналогичными американской и европейской рабочими группами, включая проведение международных научных конференций в ИКИ РАН в 2009–2016 гг. В настоящее время осуществление российской миссии «Лаплас» отложено на период после 2025 г. после осуществления миссий «Луна-25» и «Венера-Д», и предполагает использование части разработанных для этих миссий технических решений.

Галилеевы спутники Юпитера являются уникальными объектами для изучения. Поверхность трёх из них: Европы, Ганимеда и Каллисто в значительной степени состоит из водяного льда. Наибольший интерес представляет Европа, поскольку на основе фотографий и данных измерений магнитометра космического аппарата «Галилео» предполагается существование под её ледяной поверхностью толщиной до 10 км жидкого океана глубиной до 100 км, в котором, гипотетически, возможно наличие жизни. При этом по наблюдениям КА «Галилео» и космического телескопа «Хаббл» ледяная поверхность Европы, предположительно, из-за влияния мощной гравитации Юпитера подвержена активным геологическим изменениям, включая выход внутреннего вещества на поверхность. Как следствие, может быть поставлена задача поиска в веществе поверхности Европы возможных признаков жизни в подповерхностном океане.

Кроме того, во время миссии 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 (данных таких измерений имеется значительно меньше, чем для магнитосферы Земли).

Однако миссия к спутникам Юпитера сопряжена с очень высокими радиационными рисками. В ходе полёта космический аппарат будет испытывать длительное воздействие солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ) на межпланетной траектории, а затем воздействие мощных радиационных поясов Юпитера. Поэтому для проектирования и осуществления такой миссии крайне актуальными являются оценка радиационных условий для каждой стадии полёта и поиск путей оптимизации траектории полёта, орбит вокруг спутников Юпитера и мест посадки с точки зрения минимизации радиационной опасности.

### **Цели и задачи работы**

Целью работы являлось моделирование радиационных условий для российского проекта миссии «Лаплас» к системе Юпитера.

Миссия включает в себя несколько этапов:

- околоземный (старт миссии, гравитационные манёвры вблизи Земли);
- межпланетный этап полёта;
- гравитационные манёвры в системе Юпитера;
- финальный этап на орбите вокруг спутника Юпитера Европа или Ганимед и на его поверхности.

На каждом из этих этапов КА будет подвергаться воздействию различных популяций энергичных заряженных частиц гелиосферы. На межпланетном и околоземном этапах, соответственно, СКЛ и ГКЛ и

радиационных поясов Земли; в системе Юпитера – энергичных частиц радиационных поясов и «внешней» области магнитосферы Юпитера.

Таким образом, задачами работы были получение оценок радиационных условий и поиск путей минимизации радиационных рисков для каждого этапа миссии при помощи модельных расчётов на основе имеющихся экспериментальных и теоретических представлений о потоках энергичных заряженных частиц гелиосферы, которые будут воздействовать на КА на данном этапе полёта.

### **Степень разработанности темы исследования**

Основные теоретические представления и эмпирические модели полей энергичных заряженных частиц гелиосферы и методология расчётов ожидаемых величин потоков этих частиц и доз радиации на траектории полёта КА, которые использовались в данной работе, разработаны за несколько десятилетий после начала космической эры на основе данных спутниковых измерений. Стоит отметить, что большая часть этих измерений получена на околоземных орбитах, тогда как измерений в межпланетном пространстве на гелиоцентрических расстояниях, отличных от 1 а.е., в особенности в магнитосфере Юпитера – существенно меньше.

Оценки радиационных условий для сценариев исследовательских миссий к спутникам Юпитера, в ходе которых КА должен выйти на орбиту вокруг одного из спутников или совершить посадку на его поверхность, были сделаны в последние 10–15 лет, когда появились проекты таких миссий. Практически российской рабочей группой разработка сценариев такой миссии и моделирование радиационных условий осуществлялось независимо и одновременно со специалистами из NASA и ESA (при этом, конечно, происходил обмен информацией и сравнение результатов).

Так, общие оценки доз радиации за разными защитами в области орбиты спутника Юпитера Европа, из которых следует вывод о крайне высоких радиационных рисках миссии к Европе, сделаны, например, в докладах Renard et al. на 55th International Astronautical Congress, 2004, и разработчиками «Europa Jupiter System Mission» на международных конференциях в 2008–2009 гг. одновременно с докладами о наших результатах (A1: Подзолко и др., 2009). На международных научных конференциях в 2008–2015 гг. группами NASA, ESA и Роскосмоса были независимо представлены свои сценарии миссий к спутникам Юпитера, траектории полёта в межпланетном пространстве и магнитосфере Юпитера и соответствующие расчёты радиационных условий.

Имеется публикация Paranicas et al. (Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. P. L15103), где с использованием приближения «ведущего центра» движения частиц на основе анализа их широтного и долготного дрейфа в

магнитном поле Юпитера относительно Европы определены области на высоте 100 км над поверхностью Европы, где присутствуют электроны радиационных поясов Юпитера с энергиями  $\leq 10$  МэВ. Автором настоящей диссертационной работы получены и опубликованы результаты более сложного моделирования потоков электронов вблизи Европы, которое даёт значимые поправки к картине, полученной в вышеупомянутой работе.

### **Научная новизна**

В данной работе проведено моделирование радиационных условий в гелиосфере для всех этапов новой российской космической исследовательской миссии «Лаплас», проект которой разрабатывался в последние 10 лет. В ходе планируемой миссии автоматическая межпланетная станция должна быть впервые доставлена на орбиту и поверхность спутника Юпитера Европа или Ганимед.

Впервые выполнено моделирование пространственных распределений потоков релятивистских электронов и доз радиации на высоте 100 км над поверхностью и на поверхности Европы с учётом нескольких физических факторов: широтный и долготный дрейф частиц относительно Европы, ларморовское движение частиц, анизотропию потоков, отличие плоскости орбиты Европы от плоскости магнитного экватора Юпитера. На основе результатов этого моделирования указаны оптимальные с точки зрения радиационных рисков места посадки на поверхности и параметры орбиты вокруг Европы

Найдены оригинальные параметры траектории выхода на орбиту Юпитера для миссии к Европе (пролёт «под радиационными поясами» на радиальном расстоянии  $< 1.5$  радиусов Юпитера и со значительным наклоном  $\approx 40^\circ$ ), позволяющие оптимизировать одновременно радиационную нагрузку и затраты энергии на коррекцию орбиты. Разработан вариант траектории гравитационных манёвров в системе Юпитера для выхода на орбиту вокруг Ганимеда с низкой радиационной нагрузкой (доза  $< 10$  крад за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$ ) и приемлемыми затратами энергии на коррекцию орбиты за счёт включений двигателя.

### **Научная и практическая значимость работы**

Все расчёты радиационных условий, представленные в данной диссертации, выполнены в рамках государственного задания НИИЯФ МГУ и научно-исследовательских работ по заданию Роскосмоса по определению предварительного облика и требований к проекту новой российской исследовательской миссии «Лаплас» к спутникам Юпитера Европа и Ганимед, и являются необходимыми для проектирования и осуществления этой миссии.

Методика получения модельных оценок радиационных условий на

всех этапах миссии, выработанная в данной диссертации, может быть в дальнейшем использована для анализа радиационных условий других межпланетных миссий. В частности, разработанная методика модельных расчётов пространственных распределений потоков энергичных заряженных частиц в окрестности спутника Юпитера Европа с учётом различных физических факторов может быть в дальнейшем усовершенствована, например, добавлен учёт возмущений магнитного поля и плазмосферы планеты вблизи спутника и др., и использована для создания моделей пространственного распределения потоков частиц в окрестности других больших лун Юпитера и Сатурна, орбиты которых находятся внутри их радиационных поясов.

### **Методология и методы исследования**

Расчёты радиационных условий выполнялись с использованием известных теоретических закономерностей и имеющихся эмпирических моделей пространственного, временного и энергетического распределения потоков энергичных заряженных частиц гелиосферы. Общий метод оценки радиационных условий на траектории полёта КА состоит в расчётах с использованием указанных моделей и зависимостей потоков энергичных частиц для каждой точки траектории, затем путём интегрирования вдоль траектории – расчётах суммарных потоков для каждого типа и энергии частиц, и на основе этих потоков – расчётах проникновения частиц внутрь корпуса КА, поглощённых доз радиации и иных радиационных эффектов.

Модели потоков разных популяций гелиосферных частиц имеют различную структуру и используют разные системы координат. Модели потоков энергичных частиц СКЛ, инжектируемых во время мощных солнечных вспышек, имеют вероятностный характер, а также зависимость от солнечной активности и гелиоцентрического расстояния. Потоки частиц ГКЛ также испытывают модуляцию в зависимости от солнечной активности и гелиоцентрического расстояния (последний фактор в пределах орбиты Юпитера имеет малое влияние). Модели потоков энергичных захваченных протонов и электронов радиационных поясов планет описываются в  $L, B$ -координатах Мак-Илвайна (координата  $L$  «нумерует» квази-дипольные дрейфовые оболочки движения частиц,  $B$  – величина индукции магнитного поля), для расчёта которых в свою очередь использовались модели главного магнитного поля Земли и Юпитера. Также использовались имеющиеся в публикациях экспериментальные оценки потоков релятивистских электронов в протяжённой «внешней» области магнитосферы Юпитера, и теоретические оценки проникновения СКЛ и ГКЛ в магнитосферу Юпитера. Детальные сведения об используемых моделях потоков гелиосферных частиц приводятся в 1-ой главе настоящей диссертационной работы.

Моделирование пространственных распределений потоков релятивистских электронов вблизи Европы и на её поверхности осуществлялось методом трассировки траекторий частиц радиационных поясов Юпитера, пересекающих Европу, с учётом известных теоретических законов движения захваченных частиц в магнитном поле планеты; параметры этого движения также рассчитаны нами для разных значений энергий электронов с использованием модели главного магнитного поля Юпитера. При этом расчёты проводились в несколько итераций, на каждой из которых добавлялся учёт новых физических факторов и определялись количественные и качественные поправки к физической картине, полученной на предыдущем шаге расчётов.

Расчёты потоков частиц за защитой КА и поглощённых доз радиации выполнялись с применением стандартно используемых программ Shieldose2 (Seltzer, NIST Publication NISTIR 5477, Gaithersburg, MD, 1994) и COSRAD, разработанной в НИИЯФ МГУ и используемой Роскосмосом (Кузнецов и др. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2011. № 2. С. 72–78) для «эталонной» сферической конфигурации защиты.

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

1. Радиационные условия на околоземном и межпланетном этапах миссии к Юпитеру, рассчитанные на основе имеющихся моделей потоков энергичных частиц солнечных и галактических космических лучей и радиационных поясов Земли.

2. Степень радиационной опасности миссий к спутникам Юпитера Европе и Ганимеду на основе расчёта радиационных условий в области орбит спутников с использованием имеющихся моделей радиационных поясов Юпитера.

3. Оптимальные с точки зрения радиационной опасности районы посадки на поверхности и параметры низкой орбиты вокруг Европы, выбранные на основе моделирования пространственных распределений потоков релятивистских электронов в окрестности Европы с учётом различных физических факторов.

4. Найденные оригинальные параметры траектории выхода на орбиту вокруг Юпитера для миссии к Европе, при которых обеспечивается минимизация радиационной нагрузки и затрат энергии на коррекцию орбиты.

5. Разработанный оригинальный вариант траектории полёта в магнитосфере Юпитера для выхода на орбиту вокруг Ганимеда с низкой радиационной нагрузкой и приемлемыми затратами энергии на коррекцию орбиты.



### **Степень достоверности и апробация результатов**

Результаты, полученные в работе, не обнаружили внутренних противоречий и согласуются с данными, имеющимися в литературе.

Результаты докладывались на совещаниях и семинарах в НИИЯФ МГУ и ИКИ РАН, включая заседания Совета РАН по космосу, а также на международных научных конференциях:

1. International Europa Lander Workshop: Science Goals and Experiments, IKI, Moscow, Russia, 9–13 February 2009.

2. European Planetary Science Congress, Potsdam, Germany, 13–18 September, 2009; Rome, Italy, 19–24 September, 2010.

3. 2nd Moscow Solar System Symposium (2M-S3): Moons of planets, IKI, Moscow, Russia, 10–13 October, 2011.

4. 3rd Moscow Solar System Symposium (3M-S3), IKI, Moscow, Russia, 8–12 October, 2012.

5. International Colloquium and Workshop “Ganymede Lander: Scientific Goals and Experiments”, IKI, Moscow, Russia, 4–8 March 2013.

6. 40th COSPAR Scientific Assembly, MSU, Moscow, Russia, 2–10 August, 2014.

7. 6th Moscow Solar System Symposium (6M-S3), IKI, Moscow, Russia, 5–9 October 2015.

### **Личный вклад автора**

Все основные результаты работы получены лично автором или при его активном участии.

Автором выполнены все модельные расчёты потоков энергичных заряженных частиц и доз радиации.

Автор принимал активное участие в расчётах параметров траекторий полёта КА в системе Юпитера.

Подготовка основных публикаций (A1–A5), докладов на международных конференциях и научно-технических отчётов выполнена лично автором или при его активном участии.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Работа содержит 130 страниц, 36 рисунков, 6 таблиц, 83 ссылки на литературу.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, изложены цели и задачи работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, показана новизна и научная и практическая значимость полученных результатов. Описана структура диссертационной работы.

**В первой главе** приводится обзор имеющихся моделей пространственного, временного и энергетического распределения потоков энергичных заряженных частиц гелиосферы, которые использовались в данной работе для расчётов радиационных условий на всех этапах межпланетной миссии к Юпитеру.

Для расчётов потоков энергичных заряженных частиц СКЛ и ГКЛ на межпланетном этапе полёта использовались модели, разработанные в НИИЯФ МГУ и включённые в международные стандарты, соответственно, ISO/TR 18147-2014 и ISO 15390-2004, а также модель (Подзолко, Гецелев, Труды XI Пулковской конференции по физике Солнца, 2005. С. 99–103; А2: Гецелев и др., 2009), разработанная автором.

Потоки протонов и электронов радиационных поясов Земли для околоземного этапа полёта рассчитывались при помощи наиболее широко используемых моделей AP8/AE8. Также учитывались экспериментальные данные о вариациях потоков частиц радиационных поясов Земли (А4: Панасюк, Подзолко, 2015; А5: Panasyuk et al., 2017).

Для расчётов потоков частиц на этапах полёта в системе Юпитера использовалась модель потоков протонов и электронов радиационных поясов и электронов «внешней» области магнитосферы Юпитера (Divine, Garrett. J. Geophys. Research. 1983. V. 88. No. 9. P. 6889–6903), основанная на данных измерений КА «Pioneer-10» и 11 и «Voyager-1» и 2. Проводились сопоставления результатов расчётов другими моделями: GIRE (Garrett et al., JPL publication 03-006, 2003; JPL publication 12-9, 2012), (Garrett et al., Geophys. Research Letters, 2005. V. 32, P. L04104), (Sicard-Piet et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011. V. 58. No. 3. P. 923–931.), учитывающими данные измерений КА «Galileo», «Cassini» и др. Также использовались теоретические расчёты (Selesnick, Geophys. Research Letters, 2002. V. 29. No. 9. P. 12-1–12-4) проникновения СКЛ и ГКЛ в магнитосферу Юпитера.

**Во второй главе** приводятся результаты моделирования радиационных условий на межпланетном и околоземном этапах полёта.

Межпланетный перелёт к Юпитеру продлится  $\geq 6$  лет и будет включать несколько гравитационных манёвров вблизи Венеры и Земли. В настоящей диссертационной работе моделировались радиационные условия для нескольких вариантов межпланетных траекторий, рассчитанных российскими и европейскими разработчиками миссий к Юпитеру, для которых старт и наиболее радиационно-опасная фаза полёта на гелиоцентрических расстояниях 0.6–2 а.е. приходится на разные фазы цикла солнечной активности.

Кроме того, во время гравитационных манёвров в системе Юпитера на высокоэллиптических витках орбиты КА будет более года находиться за пределами орбиты спутника Юпитера Каллисто, куда проникают частицы космических лучей с энергиями свыше нескольких десятков МэВ. Эта фаза полёта также учитывалась при расчетах потоков и доз СКЛ и ГКЛ за время миссии к спутникам Юпитера (рис. 1).

Для наиболее радиационно-опасного из рассмотренных вариантов межпланетных траекторий доза радиации от частиц СКЛ и ГКЛ за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$  составит  $\approx 1.5$  крад, что существенно меньше по сравнению с дозами, которые КА получит в околопланетной области Юпитера.

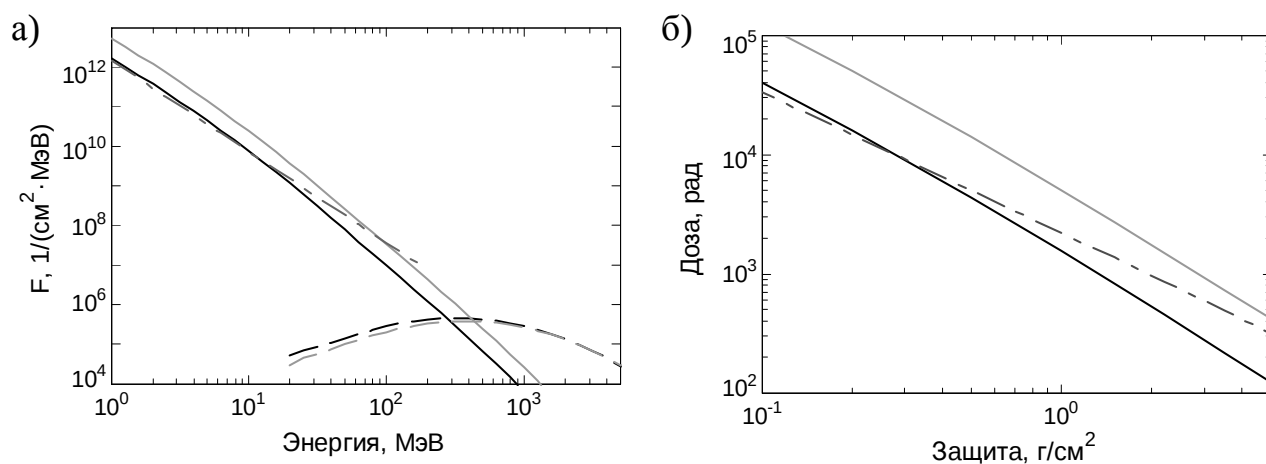


Рис. 1. а) Дифференциальные энергетические спектры флюенсов протонов СКЛ (сплошные линии) и ГКЛ (пунктирные) по моделям ISO/TR 18147-2014 и ISO 15390-2004 для вариантов траектории НПО им. С. А. Лавочкина (тёмные кривые) и ESA (светлые), и суммарных 8-летних флюенсов протонов СКЛ и ГКЛ на орбите Земли по модели (Подзолко, Гецелев, 2005; А2: Гецелев и др., 2009; пунктирно-точечные); б) дозы радиации за защитами разной толщины, рассчитанные для этих значений потоков.

Околоземный этап миссии включает вывод КА с Земли на межпланетную траекторию и пролёты вблизи Земли во время последующих гравитационных манёвров, во время которых КА будет пересекать радиационные пояса Земли. Расчеты показали, что за время этих пролётов КА не получит существенную дозу радиации по сравнению с другими этапами миссии. Однако, с учётом возможных вариаций потоков электронов внешнего пояса, для элементов КА за защитой  $\leq 1\text{--}1.5 \text{ г/см}^2$  будет существовать опасность возникновения явлений внутренней электризации.

В этой главе использованы результаты, опубликованные в работах (А2, А4, А5).

**В третьей главе** приводятся результаты моделирования радиационных условий на орбитах спутников Юпитера Европа и Ганимед.

Расчёты потоков энергичных частиц и доз радиации в области орбиты Европы с использованием имеющихся моделей радиационных поясов Юпитера (рис. 2а,б) позволяют сделать вывод том, что миссия к Европе сопряжена с чрезвычайно высокой радиационной опасностью. В частности, доза радиации в области орбиты Европы радиусом  $\approx 9.5$  радиусов Юпитера ( $R_J$ ) за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$ , эквивалентной защите 1-го искусственного спутника Юпитера «Galileo», за 2 месяца достигает 1 Мрад. Это чрезвычайно высокое значение даже для радиационно-стойкой электроники. Основной вклад в дозу радиации вносят потоки релятивистских электронов. Флюенс электронов за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$  в области орбиты Европы составляет  $\approx 10^{12}$  частиц/( $\text{см}^2 \cdot \text{сутки}$ ), что влечёт очень высокий риск возникновения явлений внутренней электризации на борту КА. Потоки электронов и дозы радиации в области орбиты Ганимеда ( $\approx 15 R_J$ ) меньше на 2 порядка величины, поэтому миссия к Ганимеду может быть осуществлена со значительно меньшими радиационными рисками.

Однако вблизи спутников потоки и дозы радиации будут ниже, за счёт экранирования ими части потока. Пространственное распределение потоков частиц в окрестности спутников является неравномерным и зависит от типа частиц, энергетического и pitch-углового распределения потоков, и от параметров разных компонентов движения частиц в магнитном поле Юпитера относительно спутника.

В настоящей работе проведено численное моделирование пространственных распределений потоков релятивистских электронов и доз радиации на высоте 100 км над поверхностью и на поверхности Европы, путём построения траекторий частиц радиационных поясов Юпитера, пересекающих окрестность Европы (рис. 2в–е). При моделировании учитывалось несколько факторов: долготный и широтный дрейф частиц радиационных поясов Юпитера относительно Европы, ларморовское спиральное движение частиц вблизи Европы, анизотропия потоков, отличие плоскости орбиты Европы от плоскости магнитного экватора Юпитера.

Имеется публикация (Paranicas et al., 2007), где с учётом только широтного и долготного дрейфа электронов относительно Европы в приближении «ведущего центра» определены области локализации потоков электронов радиационных поясов с энергиями  $\leq 10 \text{ МэВ}$  на высоте 100 км над поверхностью Европы. Однако моделирование, проведённое в настоящей работе, учитывающее несколько физических факторов, выполнено и опубликовано впервые (АЗ: Podzolko et al., 2011).

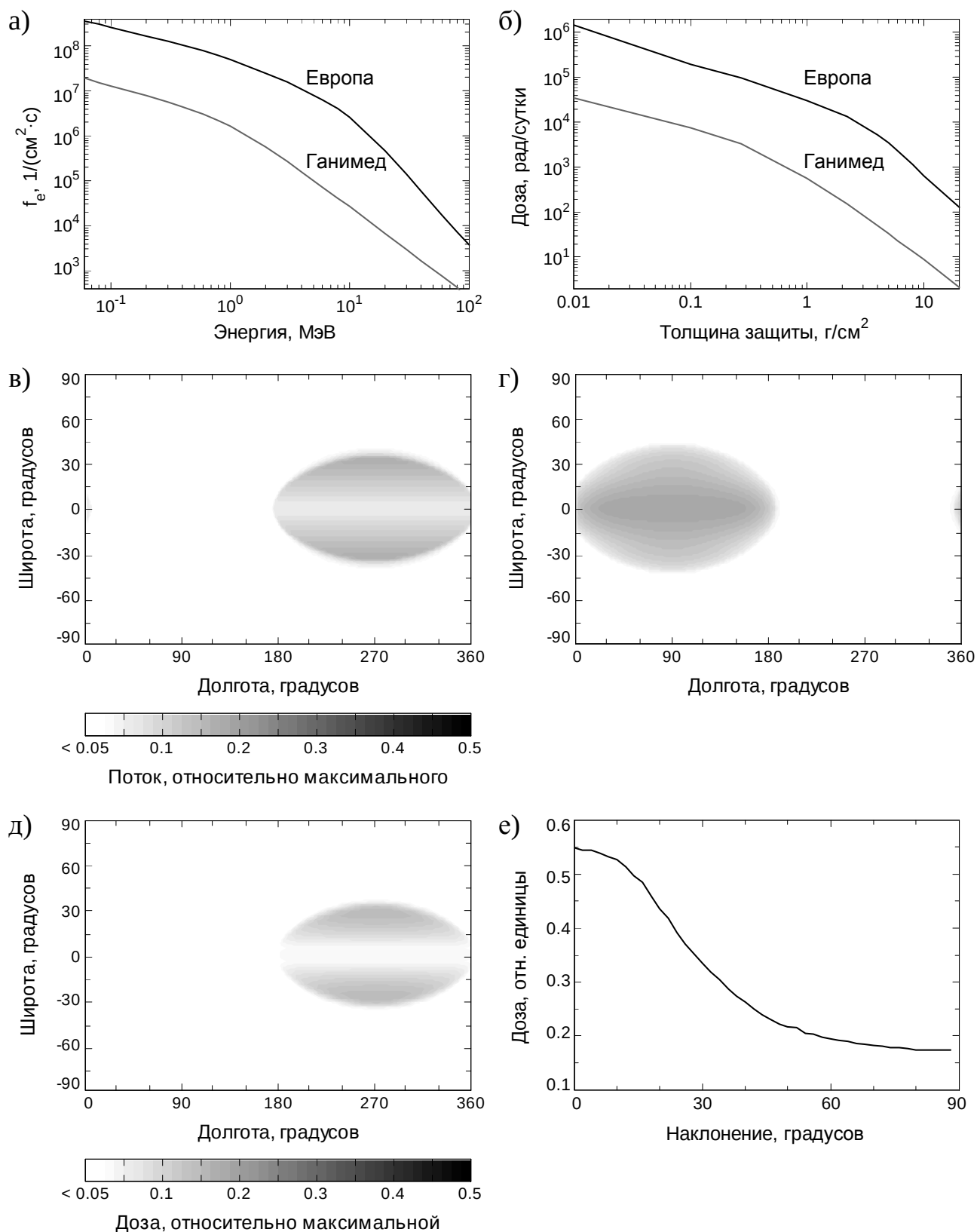


Рис. 2. а) Поток электронов и б) дозы радиации в области орбит Европы и Ганимеда; распределения потоков электронов с энергиями в) 5 МэВ и г) 50 МэВ на поверхности Европы, и доз радиации за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$  д) на поверхности Европы и е) на орбите высотой 100 км с учётом экранирующего воздействия Европы на потоки энергичных заряженных частиц.

На основании полученных пространственных распределений потоков и доз выбраны оптимальные с точки зрения радиационной нагрузки районы посадки на поверхности Европы и параметры орбиты высотой 100 км вокруг Европы. Оптимальными областями посадки являются передняя сторона Европы относительно направления её движения по орбите, высокоширотные области и центр задней полусферы. Для низкой орбиты оптимальным будет наклонение  $>50^\circ$ . Указанные места посадки и орбиты дают уменьшение флюенсов электронов и доз радиации за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$ , соответственно, в  $\geq 10$  и  $\geq 4$  раз по сравнению с начальными оценками без учёта экранирующего влияния Европы.

В этой главе использованы результаты, опубликованные в работах (А1, А3).

**В четвёртой главе** приводятся результаты моделирования радиационных условий на траекториях полёта в системе Юпитера.

Полёт в системе Юпитера включает в себя два этапа: 1) первое сближение и выход на высокоэллиптическую орбиту вокруг Юпитера, 2) серию гравитационных манёвров с использованием больших спутников Юпитера для понижения орбиты и выход на низкую орбиту вокруг Европы или Ганимеда. В работе проанализированы характеристики траектории каждого из этих двух этапов с точки зрения минимизации радиационной нагрузки и затрат энергии на коррекцию орбиты за счёт включений двигателя (затрат характеристической скорости).

Для миссии к Европе найден оригинальный вариант траектории 1-го витка: пролёт на радиальном расстоянии  $<1.5$  радиусов Юпитера с наклонением  $\approx 40^\circ$ , доза радиации за время которого за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$  составит  $\approx 20$  крад. В перицентре такой траектории КА пролетает «ниже» радиационных поясов, а до и после него пересекает пояса на удалении от экватора, где потоки частиц существенно ниже, чем на экваторе. Затраты характеристической скорости (сумма импульсов в перицентре и апоцентре витка) также снижаются с уменьшением перицентра (рис. 3).

Для миссии к Ганимеду для снижения общего уровня радиационной нагрузки перицентр 1-го сближения с Юпитером должен находиться за пределами орбиты Европы.

Расчёты радиационных условий для различных вариантов последующей траектории гравитационных манёвров, с использованием имеющихся моделей потоков частиц в магнитосфере Юпитера, показали, что для минимизации радиационной нагрузки должны выбираться гравитационные манёвры с использованием Ганимеда или Каллисто. Так, в случае манёвров с использованием Ио КА получит дозу радиации за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$  свыше 500 крад на этом этапе полёта.

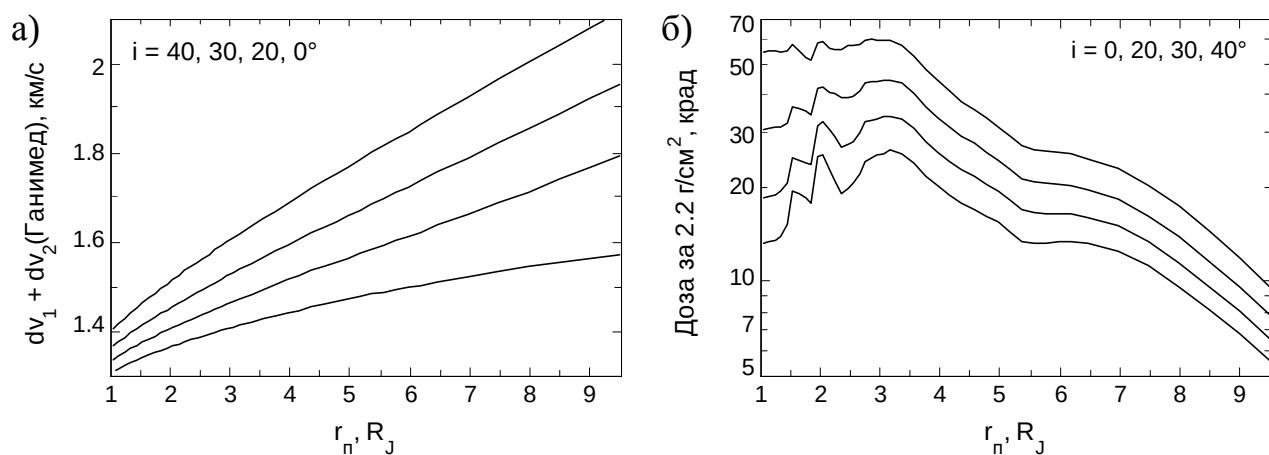


Рис. 3. Зависимость а) суммы импульсов  $dv_1$  выхода на высокоэллиптическую орбиту вокруг Юпитера в перигентре 1-го пролёта Юпитера и  $dv_2$  подъёма перигентра до орбиты Ганимеда в апоцентре 1-го витка орбиты, и б) дозы радиации за 1-й пролёт Юпитера за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$  от радиального расстояния перигентра для разных наклонений орбиты. (Здесь начальная асимптотическая скорость относительно Юпитера  $v_\infty = 5.9 \text{ км/с}$ , период 1-го витка орбиты – 90 суток.)

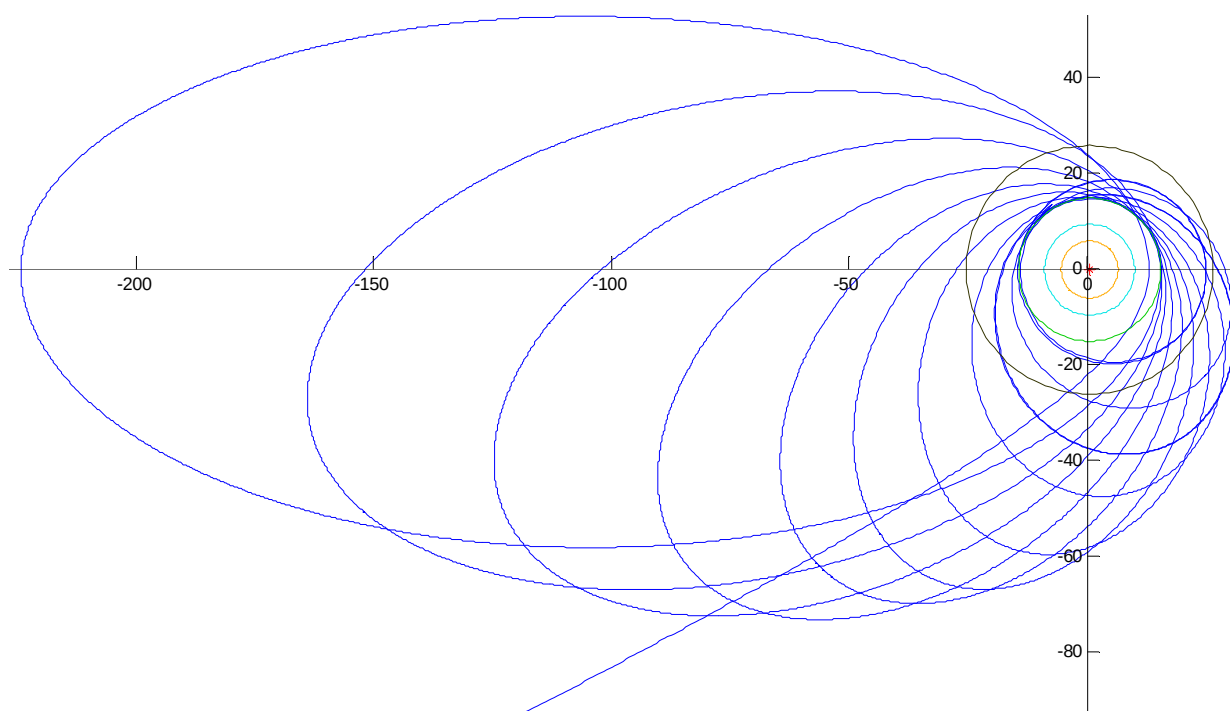


Рис. 4. Разработанный вариант траектории гравитационных манёвров в системе Юпитера для выхода на орбиту вокруг Ганимеда с низкой радиационной нагрузкой и приемлемыми затратами энергии на коррекцию орбиты. Показано расстояние от центра планеты в радиусах Юпитера, а также орбиты лун Ио, Европа, Ганимед и Каллисто.

Для миссии к Ганимеду разработан оригинальный вариант траектории гравитационных манёвров с низкой радиационной нагрузкой (доза  $<10$  крад за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$ ) и приемлемыми затратами энергии на коррекцию орбиты (рис. 4). Уменьшение дозы радиации достигается за счёт импульсов подъёма перицентра орбиты до радиуса орбиты Ганимеда в апоцентре каждого витка, в результате на всех витках кроме 1-го КА будет находиться на удалении  $>14.5 R_J$  от Юпитера. Для вариантов гравитационных манёвров, предложенных другими разработчиками, рассчитанные дозы радиации оказываются в несколько раз выше.

В этой главе использованы результаты, опубликованные в работе (А3).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы при помощи модельных расчётов на основе имеющихся экспериментальных и теоретических представлений о потоках энергичных заряженных частиц в гелиосфере получены оценки радиационных условий для каждого этапа миссии к спутникам Юпитера Европа и Ганимед:

1. С использованием имеющихся моделей солнечных и галактических космических лучей получены расчётные оценки потоков энергичных частиц и доз радиации для разных вариантов межпланетной траектории на разных фазах цикла солнечной активности. Показано, что даже для наиболее радиационно-опасного из рассмотренных вариантов межпланетных траекторий дозовая нагрузка существенно меньше по сравнению с дозами, которые КА получит в околопланетной области Юпитера.

С использованием имеющихся моделей радиационных поясов Земли и экспериментальных данных о возможных вариациях потоков получены расчётные оценки потоков частиц и доз радиации на околоземном этапе, включающем старт миссии и гравитационные манёвры вблизи Земли. Показано, что за время пролётов вблизи Земли КА получит незначительную дозу радиации. Тем не менее, для элементов КА, которые могут иметь защиту  $\leq 1\text{--}1.5 \text{ г/см}^2$ , во время этих пролётов будет существовать опасность возникновения явлений внутренней электризации.

2. С использованием имеющихся моделей радиационных поясов Юпитера рассчитаны потоки энергичных заряженных частиц и дозы радиации в области орбит Европы и Ганимеда. Показано, что миссия к Европе сопряжена с чрезвычайно высокой радиационной опасностью. Доза радиации в области орбиты Европы за защитой  $2.2 \text{ г/см}^2$ , эквивалентной защите КА «Galileo», за 2 месяца достигает 1 Мрад. Основной вклад в дозу вносят потоки релятивистских электронов. Флюенс электронов за защитой



2.2 г/см<sup>2</sup> в области орбиты Европы составит  $\approx 10^{12}$  частиц/(см<sup>2</sup>·сутки), что влечёт высокий риск возникновения явлений внутренней электризации. Миссия к Ганимеду может быть осуществлена со значительно меньшими радиационными рисками, т. к. потоки частиц и дозы радиации в области орбиты Ганимеда меньше на 2 порядка величины.

3. Впервые проведено численное моделирование пространственных распределений потоков энергичных электронов и доз радиации на поверхности Европы и на высоте 100 км над поверхностью с учётом нескольких физических факторов: долготного и широтного дрейфа электронов в магнитном поле Юпитера относительно Европы, их ларморовского движения вблизи поверхности, анизотропии потоков и отличия плоскости орбиты Европы от плоскости магнитного экватора Юпитера.

Показано, что оптимальными местами посадки на поверхности Европы являются передняя сторона относительно направления её движения по орбите, околополярные области центр задней полусферы. Оптимальными орбитами вокруг Европы высотой 100 км будут орбиты с наклоном  $>50^\circ$ . Указанные места посадки и орбиты дают уменьшение флюенсов электронов и доз радиации за защитой 2.2 г/см<sup>2</sup>, соответственно, в  $\geq 10$  и  $\geq 4$  раз по сравнению с начальными оценками без учёта экранирующего влияния Европы.

4. Найденные оригинальные параметры траектории выхода на орбиту вокруг Юпитера для миссии к Европе, при которых достигается минимизация радиационной нагрузки и затрат энергии на коррекцию орбиты – пролёт на радиальном расстоянии  $< 1.5$  радиусов Юпитера с наклоном  $\approx 40^\circ$ . Последующие гравитационные манёвры для минимизации радиационной нагрузки должны проходить с использованием Ганимеда или Каллисто.

5. Разработан оригинальный вариант траектории гравитационных манёвров в системе Юпитера для выхода на орбиту вокруг Ганимеда с низкой радиационной нагрузкой (доза  $< 10$  крад за защитой 2.2 г/см<sup>2</sup>) и приемлемыми затратами энергии на коррекцию орбиты.

В качестве направлений дальнейших исследований по теме настоящей работы можно указать совершенствование методов моделирования пространственного распределения потоков энергичных заряженных частиц вблизи спутников Юпитера, в том числе с учётом возмущений магнитного поля Юпитера в их окрестности; а также дальнейший поиск путей минимизации радиационных рисков при продолжении работы над российским проектом «Лаплас» миссии к спутникам Юпитера.

## Основные публикации автора по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в журналах из списка Scopus, Web of Science, RSCI:

- A1. Гецелев И. В., Подзолко М. В., Губарь Ю. И., Веселовский И. С. Радиационные условия миссии к Юпитеру и Европе // *Астрономический вестник*. 2009. Т. 43. № 2. С. 125–129. (Solar System Research. (Impact Factor = 0.527.) P. 116–120. doi:10.1134/S0038094609020038)
- A2. Гецелев И. В., Подзолко М. В., Веселовский И. С. Оптимизация базы данных по потокам межпланетных энергичных протонов и её применение для моделирования радиационных условий // *Астрономический вестник*. 2009. Т. 43. № 2. С. 145–151, 2009. (Solar System Research. (Impact Factor = 0.527.) P. 136–142. doi:10.1134/S0038094609020063)
- A3. Podzolko M. V., Getselev I. V., Gubar Yu. I., Veselovsky I. S., Sukhanov A. A. Charged particles on the Earth-Jupiter-Europa spacecraft trajectory // *Advances in Space Research*. (Impact Factor = 1.529.) 2011. V. 48. No. 4. P. 651–660. doi:10.1016/j.asr.2010.11.011
- A4. Панасюк М. И., Подзолко М. В., Ковтюх А. С. и др. Оперативный радиационный мониторинг в околоземном космическом пространстве на базе многоярусной группировки малых космических аппаратов // *Космические исследования*. 2015. Т. 53. № 6. С. 461–468. (Cosmic Research. (Impact Factor = 0.444.) P. 423–429. doi:10.1134/S0010952515060039)
- A5. Panasyuk M. I., Kalegaev V. V., Myagkova I. N., Kuznetsov N. V., Podzolko M. V. Radiation environment at the end of active functioning of “Vernov” satellite // *Cosmic Research*. (Impact Factor = 0.444.) 2017. V. 55. No. 2. P. 79–87. doi:10.1134/S0010952516060071

## Благодарности

Выражаю благодарность профессору М. И. Панасюку, профессору И. В. Гецелеву и профессору И. И. Алексееву, НИИЯФ МГУ, за привлечение меня к работе по данной теме; а также академику Л. М. Зелёному, проф. А. А. Петруковичу, д.ф.-м.н. О. И. Кораблеву, д.ф.-м.н. А. А. Суханову, к.ф.-м.н. К. И. Марченкову, ИКИ РАН, д.ф.-м.н. А. В. Грушевскому, ИМП им. М. В. Келдыша, коллегам из НПО им. С. А. Лавочкина и другим участникам рабочей группы по разработке российского проекта «Лаплас» миссии к спутникам Юпитера. Отдельно благодарю к.ф.-м.н. Ю. И. Губаря, НИИЯФ МГУ, за ценные теоретические пояснения и ссылки на литературу по потокам энергичных заряженных частиц в магнитосфере Юпитера.