

Российская академия наук

«Утверждаю»

Президент Российской академии наук

Академик В.Е. Фортов

---

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

ПРОГРАММА ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ПРЕЗИДИУМА РАН

**Программа № I.7**

**«Экспериментальные и теоретические исследования объектов  
Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и  
взрывные процессы в астрофизике»**

**Аннотационный отчет за 2016 г.**

Кураторы Программы

Академик Л.М. Зеленый

Чл.-корр. Б.М. Шустов

---

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 г.

2016

Программа № 1.7 Президиума РАН была принята постановлением Президиума РАН № 176 от 23.12.2014 «Об утверждении Перечня программ фундаментальных исследований РАН по приоритетным направлениям, определяемым РАН на 2015 год.

В соответствии с постановлением Президиума РАН в перечень программ фундаментальных исследований на 2016 г. включена Программа 1.7 «Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд. Переходные и взрывные процессы в астрофизике» (координаторы - академик Л.М. Зеленый и член-корр. РАН Б.М. Шустов).

## **Структура отчета**

### **Часть 1**

#### **Подпрограмма 1.7а**

#### **Экспериментальные и теоретические исследования объектов Солнечной системы и планетных систем звезд**

координатор акад. Л.М.Зеленый

### **Часть 2**

#### **Подпрограмма 1.7б**

#### **Переходные и взрывные процессы в астрофизике**

координатор чл.-корр. Б.М. Шустов

# Часть 1

## Подпрограмма 1.7а

### Экспериментальные и теоретические исследования объектов

### Солнечной системы и планетных систем звезд

координатор акад. Л.М.Зеленый

## Содержание

	ВВЕДЕНИЕ	4
Направление 1	ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	7
Направление 2	СОЛНЦЕ И ГЕЛИОСФЕРА	25
Направление 3	ЛУНА И ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ, СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПЛАНЕТОЛОГИЯ	84
Направление 4	ПЛАНЕТЫ ГИГАНТЫ,-ИХ СПУТНИКИ И КОЛЬЦА	110
Направление 5	АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ ПЛАНЕТ	130
Направление 6	МАГНИТОСФЕРА	151
Направление 7	ИОНОСФЕРА	174
Направление 8	МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	191
Направление 9	МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	221
Направление 10	ЭКЗОПЛАНЕТЫ	230
Приложение 1	СОСТАВ НАУЧНОГО СОВЕТА ПРОГРАММЫ 1.7	248
Приложение 2	ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ ПО ПРОГРАММЕ 1.7	249

## Введение

### ОСНОВНЫЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОГРАММЫ 1.7а.

Программа направлена на решение или приближение к решению основных фундаментальных проблем исследований и освоения Солнечной системы:

- (1) каким образом Солнечная система образовалась и была сформирована и каковы дальнейшие направления ее эволюции.
- (2) исследования планетных систем около других звезд, сравнительная космогония,
- (3) исследование свойств и характеристик Солнца,
- (4) исследование планет, их спутников, астероидов, комет, других малых тел Солнечной системы, межпланетной среды, сравнительная планетология, приложения к проблемам Земли
- (5) исследование целесообразности и пути возможного освоения ближайших тел - Луны, Марса, околоземных астероидов.

Состав научного совета Программы 1.7а представлен в Приложении 1.

Научный совет Программы определил 10 наиболее актуальных направлений работ по Программе:

1. Формирование и эволюция Солнечной системы
2. Солнце и гелиосфера
3. Луна и планеты земной группы, сравнительная планетология
4. Планеты гиганты, их спутники и кольца
5. Атмосферы и климат планет
6. Магнитосфера
7. Ионосфера
8. Малые тела Солнечной системы
9. Методы исследований Солнечной системы
10. Экзопланеты

В выполнении Программы 1.7. принимали участие следующие институты Российской академии наук:

Институт прикладной математики РАН

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

Институт радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН

Институт космических исследований РАН  
Главная (Пулковская) Обсерватория РАН  
Институт астрономии РАН  
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.  
Н.В.Пушкова РАН  
Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН  
Институт прикладной физики РАН  
Физико-технический институт им. А.Н. Иоффе РАН  
Институт прикладной астрономии РАН  
Объединенный институт высоких температур РАН  
Институт проблем механики РАН  
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН  
Институт динамики геосфер РАН  
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН  
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН  
Полярный геофизический институт КНЦ РАН  
Геологический институт РАН

Кроме того, в работе по данной программе принимали участие (вне рамок целевого финансирования Программы П-7) Институт Солнечно-Земной Физики Сибирского Отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН).

В ходе выполнения Программы коллективами этих институтов в 2016 г. были получены важные и интересные результаты. Результаты работы были представлены в докладах и научных статьях. Общее количество находящихся в печати и вышедших из печати статей составляет 332 названия, кроме того, результаты работы были представлены на российских и международных конференциях.

14 декабря 2016 года состоялась конференция по Программе 1.7а Президиума РАН, на которой были представлены результаты по темам и проектам, включенным в эту программу, выполненные в 2015 г.

Программа конференции представлена в Приложении 2.

Ниже приводятся наиболее важные результаты исследований, полученные в рамках работы по программе фундаментальных исследований Президиума РАН П-7, подпрограмма Б «Переходные и взрывные процессы в астрофизике», в 2016 г., и избранные публикации.

На сайте Программы № 1.7 <http://pr7.cosmos.ru/> представлены все документы Программы ее содержание, информация о конференциях, публикациях, отчет и др.

## НАПРАВЛЕНИЕ 1. Формирование и эволюция Солнечной системы

Кураторы направления акад. М.Я. Маров (ГЕОХИ РАН), А.В. Колесниченко (ИПМ РАН)

1.1	Проект 1.1: Математическое моделирование структурированной турбулентности в немагнитных и магнитных космических средах применительно к проблеме образования и эволюции солнечного протопланетного диска, с учетом процессов объединения пылевых сгущений фрактальной природы в рыхлые прото- планетезимали	ИПМ РАН	Колесниченко А.В.
1.2	Проект 1.2: Космогонические проблемы исследований ГКЛ в ранней и современной Солнечной системе	ГЕОХИ РАН	Алексеев В.А., Устинова Г.К.
1.3	Проект 1.3: Газодинамические и приливные процессы в протопланетных системах	ФИАН	Иванов П.Б.
1.4	Проект 1.4. Моделирование эволюции разреженных сгущений и образования первичных твердых тел в протопланетном диске	ГЕОХИ РАН	М.Я.Маров

**Проект 1.1 Математическое моделирование структурированной турбулентности в немагнитных и магнитных космических средах применительно к проблеме образования и эволюции солнечного протопланетного диска, с учётом процессов объединения пылевых сгущений фрактальной природы в рыхлые прото- планетезимали.**

### 1.1.1 Аннотация.

В рамках формализма неэкстенсивной статистики Тсаллиса, предназначенной для описания поведения аномальных систем – систем с сильным гравитационным взаимодействием отдельных её частей и фрактальным характером фазового пространства, получены модифицированные критерии гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для вращающихся аккреционных дисков с фрактальной структурой фазового пространства.

В рамках формализма неэкстенсивной статистики Тсаллиса, предназначенной для описания поведения аномальных систем – систем с сильным гравитационным взаимодействием отдельных её частей и фрактальным характером фазового пространства получены при учёте диссипативных эффектов линеаризованные уравнения колебаний твердотельно вращающегося аккреционного диска и дан вывод дисперсионного уравнения в *ВКБ*-приближении. На основе выведенных ранее (в рамках проекта) модифицированных гидродинамических уравнений Навье–Стокса (так называемых уравнений *q*-гидродинамики) проведён анализ осесимметричных колебаний астрофизического дифференциально вращающегося газопылевого

космического объекта и получены модифицированные критерии гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для дисков с фрактальной структурой фазового пространства, играющие, как известно, фундаментальную роль во всей расширяющейся вселенной. Показано, что критические значения длины возмущающей волны явно зависят от энтропийного индекса  $q$  и параметра фрактальной размерности  $D$  фазового пространства скоростей, которые, являясь здесь свободными параметрами, должны определяться в каждом конкретном случае эмпирическим путём из статистических или экспериментальных данных.

В работе обобщенные критерии гравитационной неустойчивости получены для фрактальных самогравитирующих космических объектов в случае пренебрежения влиянием всех факторов, кроме самогравитации и теплового (турбулентного) движения частиц. Однако предложенный подход к анализу гравитационной неустойчивости в плоскости астрофизических дисков в рамках статистики Тсаллиса легко может быть распространён на разнообразные ситуации, наиболее адекватно соответствующие природе реальных космических объектов, например, при исследовании динамики возмущений в неоднородных и неизотропных дисковых фрактальных средах, при исследовании гравитационных возмущений в плоскости диска с учетом диссипативных эффектов, при исследовании собственных частот колебаний в вертикально неоднородном диске с учётом магнитного поля, и т.п.

#### **Руководитель проекта:**

Колесниченко Александр Владимирович, д.ф.-м.н., проф.

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН,

[kolesn@keldysh.ru](mailto:kolesn@keldysh.ru)

#### **Публикации:**

1. Колесниченко А. В. Модификация в рамках неаддитивной статистики Тсаллиса критериев гравитационной неустойчивости астрофизических дисков// Математ. Моделирование. 2016. Т.28. № 3 . С. 96–118.
2. Колесниченко А. В. Модификация в рамках статистики Тсаллиса критериев гравитационной неустойчивости астрофизических дисков с фрактальной структурой фазового пространства//MathematicaMontisnigri. 2015. V.32. P. 93-118.
3. Колесниченко А. В., Маров М.Я. Модификация в рамках неэкстенсивной статистики критериев неустойчивости Джинса и Тумре для астрофизических фрактальных объектов//Астроном.вестн. 2016. Т.50. №4 С.268-279.

### **1.1.2 Аннотация.**

В рамках формализма неэкстенсивной статистики Тсаллиса, предназначенной для описания поведения аномальных систем – систем с сильным гравитационным взаимодействием отдельных её частей и фрактальным характером фазового пространства получены критерий термической устойчивости и степенной закон распределения для вращающихся самогравитирующих астрофизических систем.

Длительное динамическое развитие самогравитирующих газообразных астрофизических систем (в частности, эволюция протопланетного аккреционного диска) определяется главным образом относительно быстрыми процессами столкновительной релаксации частиц. Однако более медленные динамические процессы, связанные с силовым (ньютоновским или кулоновским) межчастичным взаимодействием, также могут быть вовлечены в рассмотрение в рамках неэкстенсивной кинетической теории Тсаллиса. В проведенном исследовании была предложена процедура включения ньютоновского потенциала самогравитации и центробежного потенциала в квазиравновесное степенное  $q$ -распределение в фазовом пространстве, полученное в рамках неэкстенсивной статистики на основе модифицированного кинетического уравнения Больцмана с усреднением по ненормированному распределению. Было показано, что если степенное распределение удовлетворяет стационарному  $q$ -кинетическому уравнению, то это уравнение накладывает чётко выраженные ограничения на характер дальнодействующего силового поля, а также на возможную зависимость гидродинамических параметров от координат, тем самым фактически определяя эти параметры единственным образом. Был также выведен термодинамический критерий устойчивости равновесия неэкстенсивной системы. Полученные результаты позволяют более адекватно моделировать эволюцию газообразных астрофизических систем, в частности, гравитационную устойчивость вращающихся протопланетных аккреционных дисков.

#### **Руководитель проекта:**

Колесниченко Александр Владимирович, д.ф.-м.н., проф.

ИПМ им. М.В.Келдыша РАН

[kolesn@keldysh.ru](mailto:kolesn@keldysh.ru)

#### **Публикации:**

1. Колесниченко А. В.К выводу в рамках неэкстенсивной кинетики степенного распределения частиц и критерия термической устойчивости для самогравитирующих астрофизических систем//Москва, Препринт ИПМ 2016. № 78, 39 с.

2. Колесниченко А. В. Степенной закон распределения для самогравитирующих астрофизических систем на основе неэкстенсивной кинетики Тсаллиса // *Астрономический вестник/SolarSystemresearch*. 2017. Т. 51 № 2.

3. Колесниченко А. В. Критерий термической устойчивости и закон распределения частиц для самогравитирующих астрофизических систем в рамках статистики Тсаллиса // *MathematicaMontisnigri*. 2016. V.37.

### **1.1.3 Аннотация**

Применительно к проблеме образования и эволюции Солнечного протопланетного диска выполнены исследования по разработке континуальных полуэмпирических моделей ламинарных и турбулентных течений в многокомпонентных смесях реагирующих газов, в электропроводных и гетерогенных средах – моделей, лежащих в основе постановок и численных расчётов широкого класса актуальных задач, связанных с образованием, структурой и эволюцией различных геофизических объектов.

Проведены исследования по разработке континуальных полуэмпирических моделей ламинарных и турбулентных течений в многокомпонентных смесях реагирующих газов, в электропроводных и гетерогенных средах – моделей, лежащих в основе постановок и численных расчётов широкого класса актуальных задач, связанных с образованием, структурой и эволюцией различных геофизических объектов. Их целью является термодинамическое конструирование природных и космических сред с усложнёнными физико-химическими характеристиками, при описании которых следует учитывать сжимаемость потока, переменность теплофизических свойств, наличие процессов тепло- и массопереноса, химических реакций, фазовых переходов и излучения, а также воздействие гравитационных и электромагнитных сил. На основе методов неравновесной термодинамики разработан феноменологический подход к выводу замыкающих соотношений для ламинарных и турбулентных потоков и сил, описывающих процессы тепло и-массопереноса и химическую кинетику в многокомпонентном континууме. Проблема возникновения и эволюции когерентных вихревых образований в турбулентных течениях рассматривается, исходя из анализа соотношения порядка и хаоса в открытых диссипативных системах с синергетических позиций стохастической нелинейной термодинамики необратимых процессов.

#### **Руководитель проекта:**

Колесниченко Александр Владимирович, д.ф.-м.н., проф. ИПМ им. М.В.Келдыша РАН.

[kolesn@keldysh.ru](mailto:kolesn@keldysh.ru)

### **Публикации:**

1. Колесниченко А. В. Континуальные модели природных и космических сред: Проблемы термодинамического конструирования// М.: ЛЕНАНД, 2016. — 400 с. (Синергетика: от прошлого к будущему. № 79.)
2. Kolesnichenko A. V. Derivation by methods of thermodynamics irreversible processes of generalized Stefan–Maxwell relations for multicomponent diffusion flows in turbulent continuous medium//ПрепринтыИПМим. М. В. Келдыша, 2015, 002/
3. Колесниченко А. В. Модификация метода инвариантного моделирования Дональдсона для турбулентных сдвиговых течений реагирующих газовых смесей//Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2015, 065.

### **Проект 1.2 Космогонические проблемы исследований ГКЛ в ранней и современной Солнечной системе**

#### **Аннотация.**

Разработана постоянная “патрульная служба” по измерению скоростей образования космогенных радионуклидов в трехмерной гелиосфере; разработан количественный подход к анализу роли стохастических факторов в формировании особенностей солнечных циклов по данным о космогенных радионуклидах в хондритах; предложена модель возможных изменений интенсивности галактических космических лучей за последний миллиард лет; продолжены совместно с ФИАН в рамках проекта ОЛИМПИА поиски следов сверхтяжёлых ядер галактических космических лучей.

В эпоху предстоящего освоения планет Солнечной системы особенно актуальным становится вопрос, связанный с радиационной безопасностью космических полетов, так что пространственно-временные вариации интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) во внутренней гелиосфере (до  $\sim 5$  а.е.) приобретают первостепенное значение. Редкие эпизодические измерения на КК не обеспечивают полной информацией из-за солнечной модуляции интенсивности ГКЛ. Между тем, пропорциональные этой интенсивности скорости образования космогенных радионуклидов с разными периодами полураспада ( $T_{1/2}$ ) в постоянно выпадающих на Землю хондритах могут обеспечить полную пространственно-временную картину распределения интенсивности ГКЛ в пределах метеоритных орбит ( $\sim 5$  а.е.). Действительно, измеряемые на момент падения хондритов содержания радионуклидов накапливаются примерно за  $\sim 1.5 T_{1/2}$  каждого радионуклида перед падением каждого хондрита,

что позволяет по уравнениям Кеплера оценить средние гелиоцентрические расстояния орбит в эти периоды (см. рис. 1.1).

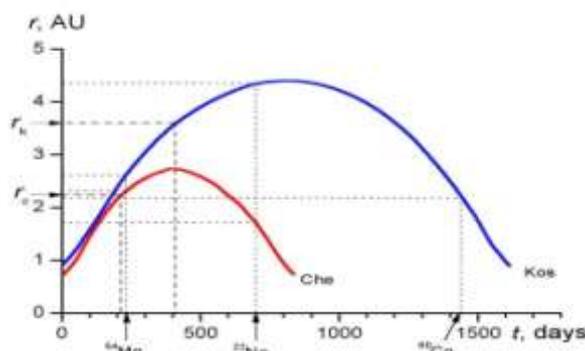


Рис. 1.1

На примере орбит хондритов Chelyabinsk и Kosice показано, что участки накопления космогенных радионуклидов с разными  $T_{1/2}$  в постоянно выпадающих метеоритах с разной длиной орбит определяют уникальный пространственно-временной континуум однородных данных по скоростям образования радионуклидов в межпланетном пространстве на 1.5 – 5 а.е.

Результаты выполненных нами исследований 39 хондритов, выпавших в 1959-2013 гг., насчитывают 78 значений скоростей образования  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{22}\text{Na}$  на разных гелиоцентрических расстояниях и в разные фазы солнечных циклов и 39 определений средних скоростей образования  $^{26}\text{Al}$  за последний 1 млн. лет в разных точках гелиосферы. Статистическое сглаживание этого континуума однородных данных при их прямой пропорциональности интенсивности ГКЛ ( $E > 100$  МэВ) выявляет наиболее важные закономерности процесса солнечной модуляции ГКЛ в гелиосфере на длительной временной шкале, что недоступно другим методам исследования. Полученная информация позволяет исследовать как динамику и эволюцию процессов в межпланетном пространстве в прошлом, так и прогнозировать их тенденцию в будущем.

2. Разработан количественный подход к анализу роли стохастических факторов в формировании особенностей солнечных циклов по данным о космогенных радионуклидах в хондритах. По результатам исследования скоростей образования космогенных радионуклидов в хондритах, выпавших на протяжении 5 солнечных циклов (1959-2013 гг.), показано, что нарушение корреляций солнечной активности и градиентов ГКЛ может быть вызвано стохастическими процессами перестройки общего магнитного поля Солнца в максимальные годы солнечных циклов, которые различаются своим характером и длительностью в N- и S-полусферах Солнца, в разных солнечных и магнитных циклах. В табл. 1.1 высокие градиенты скоростей образования  $^{54}\text{Mn}$  в хондрите Челябинск (на гелиоцентрическом расстоянии ~2.35 а.е.) в 14-месячный период одинаковой (положительной) полярности N- и S-полюсов Солнца

(между декабрем 2011 г. и февралем 2013 г.) демонстрируют высокое разрешение и чувствительность метода, т.е. уникальную тонкость реагирования скоростей образования космогенных радионуклидов на малейшие изменения магнитогидродинамических условий в гелиосфере.

Таблица 1.1 – Средние интегральные градиенты ( $G_r$ ) скоростей образования  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{22}\text{Na}$  ГКЛ в хондритах Chelyabinsk, Kosice, Ash Creek и Tamdakht в сравнении с интегральными градиентами ГКЛ по результатам эксперимента Ulysses/Pamela [De Simone N. et al., 2011].

N	Метод	Период времени	$r$ , а.е.	$G_r$ , %/а.е.
1	Chelyabinsk/ $^{54}\text{Mn}$	12. 11 – 02. 13	~2.35	205±118
2	Chelyabinsk/ $^{22}\text{Na}$	06. 09 – 02. 13	~1.63	40±28
3	Kosice/ $^{54}\text{Mn}$	12. 08 – 02.10	~2.67	42±18
4	Ash Creek/ $^{54}\text{Mn}$	12. 07 – 02. 09	~2.51	95±44
5	Tamdakht/ $^{54}\text{Mn}$	10. 07 – 12. 08	~2.42	70±29
6	Kosice/ $^{22}\text{Na}$	04. 06 – 02.10	~4.41	-2.1±3.8
7	Ash Creek/ $^{22}\text{Na}$	04. 05 – 02.09	~3.24	3.1±7.1
8	Tamdakht/ $^{22}\text{Na}$	02. 05 – 12. 08	~2.87	3.2±8.6
9	Ulysses/Pamela	07. 06 – 07. 08	~3.5	2.7±0.2

3. Предложена модель возможных изменений интенсивности галактических космических лучей за последний миллиард лет. На основании анализа литературных данных о радиационных возрастах железных метеоритов, определенных  $^{40}\text{K}/\text{K}$ -методом ( $T_K$ ) и рассчитанных с привлечением короткоживущих космогенных радионуклидов (с периодом полураспада  $T_{1/2} < 1$  млн. лет) в сочетании со стабильными космогенными изотопами благородных газов ( $T_{RS}$ ) сделаны следующие выводы.

1) Распределение  $T_{RS}$ -возрастов (106 значений) имеет экспоненциальный вид, подобный таковому для обыкновенных хондритов, но отличающийся от распределения  $T_K$ -возрастов (80 значений) – рис. 1.2.

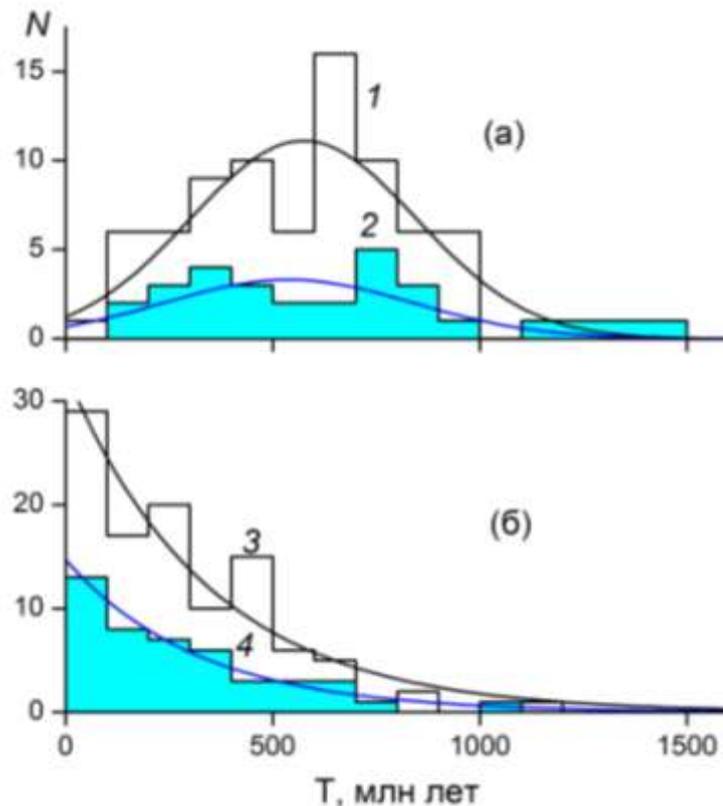


Рис. 1.2 – Распределения радиационных возрастов железных метеоритов. (а) Возрасты определены  $^{40}\text{K}/\text{K}$ -методом; 1 – все метеориты ( $N = 80$ , по данным (Voshage, Feldmann, 1979; Voshage и др., 1983; Voshage, 1984); 2 – то же после исключения парных метеоритов и метеоритов со сложной радиационной историей ( $N = 29$ ). (б) Возрасты определены по короткоживущим радионуклидам; 3 – все метеориты ( $N = 106$ , по данным (Lipschutz и др., 1965; Chang, Waenke, 1969; Hampel, Schaeffer, 1979; Lavielle и др., 1999 и др.)); 4 – то же после исключения парных метеоритов и метеоритов со сложной радиационной историей ( $N = 45$ ). Распределения аппроксимированы "наилучшими" (а) гауссовыми и (б) экспоненциальными кривыми.

Различие обусловлено, вероятнее всего, малым числом данных для метеоритов с низкими значениями  $T_{\text{K}}$ -возрастов (менее  $\sim 200\text{-}300$  млн. лет). Последнее может быть обусловлено сложностью измерений малых количеств космогенных изотопов калия. Это обстоятельство делает непредставительной выборку метеоритов с  $^{40}\text{K}/\text{K}$ -возрастами и ставит под сомнение корректность выводов о вариациях интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ), сделанных на основе анализа распределения этих возрастов.

2) Уточнена величина известного эффекта – систематического завышения  $T_{\text{K}}$ -возрастов по сравнению с  $T_{\text{RS}}$ -возрастами. Для всей совокупности данных получено значение  $k = T_{\text{K}} / T_{\text{RS}} = 1.51 \pm 0.03$ .

3) Для объяснения завышения  $T_K$ -возрастов по сравнению с  $T_{RS}$ -возрастами предложена модель, согласно которой интенсивность ГКЛ в интервале 0-1500 млн. лет экспоненциально увеличивалась согласно зависимости:  $I_T = I_{T=1500} (1 + \alpha \cdot \exp(-\beta T))$ . Для одного из вариантов этой модели интенсивность ГКЛ экспоненциально увеличилась в 2 раза только за последние ~300 млн. лет при приблизительно постоянной интенсивности в остальное время.

4) Продолжены экспериментальные исследования треков галактических космических лучей (ГКЛ) в метеоритных минералах, выполняемые группой авторов ФИАН-ГЕОХИ в рамках проекта ОЛИМПИА (В.Л. Гинзбург, Н.Г. Полухина и др., 2005). Целью исследований является поиск и идентификация треков тяжелых и сверхтяжелых ядер ГКЛ в кристаллах оливина из палласитов. Важнейшими результатами эксперимента являются данные о зарядовом составе ядер ГКЛ с  $Z > 40$  на базе более чем 11.6 тысяч обработанных треков в кристаллах оливина из палласитов Maajalahti и Eagle Station. Идентифицировано 384 ядра, заряд которых оценивается как  $Z \geq 75$ , включая 10 ядер, идентифицированных как актиноиды ( $90 < Z < 103$ ). Три трека были интерпретированы как следы ядер с зарядами  $113 < Z < 129$  (рис. 1.3). Эти ядра могут входить в состав так называемого "острова стабильности" трансфермиевых элементов.

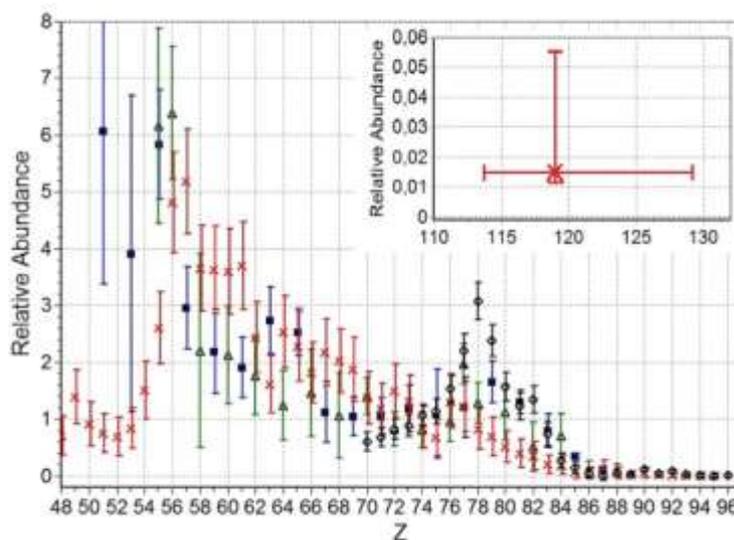


Рис. 1.3 – Относительная распространенность (данные нормированы к содержанию ядер железа  $A_{(26Fe)} = 10^6$ ) тяжелых ядер ГКЛ, зарегистрированных авторами ФИАН-ГЕОХИ (кресты) в сравнении с результатами других экспериментов: ARIEL-6 (треугольники) [Fowler et al., 1987], HEAO-3 (квадраты) [Binns et al., 1989] и UHCRE (круги) [Donnelly et al., 2012]. Вставка показывает три трансфермиевых ядра, зарегистрированных в данной работе.

### **Руководители проекта:**

К. ф.-м. н. В.А. Алексеев, ГЕОХИ РАН, [AVAL37@mail.ru](mailto:AVAL37@mail.ru)

К. ф.-м. н. Г.К. Устинова, ГЕОХИ РАН, [ustinova@dubna.net.ru](mailto:ustinova@dubna.net.ru)

### **Публикации:**

1. Alexeev V., Bagulya A., Chernyavsky M., Gippius A., Goncharova L., Gorbunov S, Gorshenkov M., Kalinina G., Konovalova N., Liu J., Zhai P., Okatyeva N., Pavlova T., Polukhina N., Starkov N., Soe Th. N., Christina Trautmann C., Savchenko E., Shchedrina T., Vasiliev A., and Volkov A. Charge spectrum of heavy and superheavy components of galactic cosmic rays: results of the OLIMPIYA experiment // *Astrophysical Journal*. 2016. V. 829. No. 2. doi:10.3847/0004-637X/829/2/120
2. Устинова Г.К. Закономерности скоростей образования космогенных радионуклидов в гелиосфере и проблемы солнечной модуляции на длительной временной шкале // *Доклады РАН*. 2016. Т. 471. № 3. С. 289-293.
3. Алексеев В.А. К вопросу о временных вариациях интенсивности галактических космических лучей за последний миллиард лет по данным о радиационных возрастах железных метеоритов // *Астрономический вестник*. 2016. Т. 50, № 1. С. 27-36. (Alexeev V.A. On time variations of the intensity of galactic cosmic rays for the recent billion years from data on exposure ages of iron meteorites // *Solar System Research*. 2016. V. 50. No 1. P. 24-32. DOI: 10.1134/S0038094615060015.)
4. Алексеев В.А. Долгопериодические вариации интенсивности галактических космических лучей за последний миллиард лет по данным о радиационных возрастах железных метеоритов // *Геохимия*. 2016. № 1. С. 89-96. (Alexeev V.A. Long-term galactic cosmic ray variations over the last billion years based on the cosmic-ray exposure ages of iron meteorites // *Geochemistry International*, 2016. V. 54. No 1. P. 78-84.)
5. Alexeev V.A Variations in the intensity of galactic cosmic rays during the last billion years according to the cosmic-ray exposure ages of iron meteorites // In: 47<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, March 21-25, 2016. The Woodlands, Texas, USA. # 1014.pdf.
6. Kalinina G.V., Pavlova T.A., Alexeev V.A. Some features of the distribution of VH-nuclei tracks of galactic cosmic rays in ordinary chondrites. // In: 47<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, March 21-25, 2016. The Woodlands, Texas, USA. # 1019.pdf
7. Алексеев В.А., Калинина Г.В., Павлова Т.А. Оценка величины абляции обыкновенных хондритов по трековым данным. Труды ВЕСЭМПГ-2016, с. 76-77.
8. Алексеев В.А., Калинина Г.В., Павлова Т.А. Некоторые особенности абляции обыкновенных хондритов по трековым данным. Материалы XVII Межд. конф. «Физико-химические и

петрофизические исследования в науках о Земле», 26-28 сентября 2016 г., Москва, 2016, с. 29-32.

9. Устинова Г. К. Космогенные радионуклиды в хондритах: зачем и как их надо исследовать. Материалы XVII Межд. конф. «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле», 26-28 сентября 2016 г., Москва, 2016, с. 324-328.

### **Проект 1.3 Газодинамические и приливные процессы в протопланетных системах**

#### **Тема 1.3.1 Динамические приливные взаимодействия**

##### **Аннотация.**

Прояснена причина очень сильного, на несколько порядков, усиления приливной эволюции по сравнению с теорией Зана, в некоторых моделях звезд с реалистической структурой. Построена качественная теория орбитальной эволюции экзопланеты Kepler 91 b за счет динамических приливов.

В этом году мы продолжили изучение динамических приливов в звездных моделях, обладающих реалистической структурой. В предыдущем году мы показали, что в некоторые модели такого рода возможно ускорение приливной эволюции орбитальных параметров на несколько порядков по сравнению с широко используемой теорией Зана. В этом году мы прояснили физический смысл этого эффекта. Оказалось, что он возникает за счет существенного увеличения так называемых «интегралов перекрытия», определяющих интенсивность возбуждения нормальных мод приливным полем, для собственных частот нормальных колебаний в определенном диапазоне. В этом диапазоне частот асимптотическое выражение для интегралов перекрытия, полученное Заном в формальном пределе собственной частоты, стремящейся к нулю, является качественно неверным. Отметим, что увеличение интегралов перекрытия по сравнению с выражением Зана было получено численно и, вероятно, достаточно сложно получить этот эффект в рамках какой-либо аналитической модели. Поэтому для аккуратного расчета приливной эволюции экзопланеты вокруг звезды с реалистической структурой, необходимо рассчитать численно сетку моделей, каждая из которых содержит набор интегралов перекрытия для достаточно большого диапазона собственных частот. Такая стратегия была реализована в случае звезды Kepler 91, которая является сильно проэволюционировавшей звездой массой 1.3 массы Солнца, покинувшей главную последовательность и находящейся на ветви красных гигантов. Около звезды находится планета Kepler 91 b с массой 0.88 массы Юпитера. Она обладает периодом порядка 6 дней и

весьма малым эксцентриситетом 0.066. Оказывается, что существование планеты со столь малым эксцентриситетом можно объяснить динамическими приливами, так как характерное время приливной эволюции большой полуоси (см. рис. 1.4) больше характерного времени эволюции эксцентриситета (см. рис. 1.5), для орбитального периода, равного шести дням. Из этих рисунков также видно, что достаточно сильная приливная эволюция возможна только на самых последних стадиях эволюции звезды, когда она сходит с главной последовательности. Для окончательного прояснения вопроса о роли приливов в изменении орбиты Kepler 91 b необходимо решить динамическую задачу об изменении орбитальных параметров с учетом эволюции звезды, что запланировано на декабрь этого года.

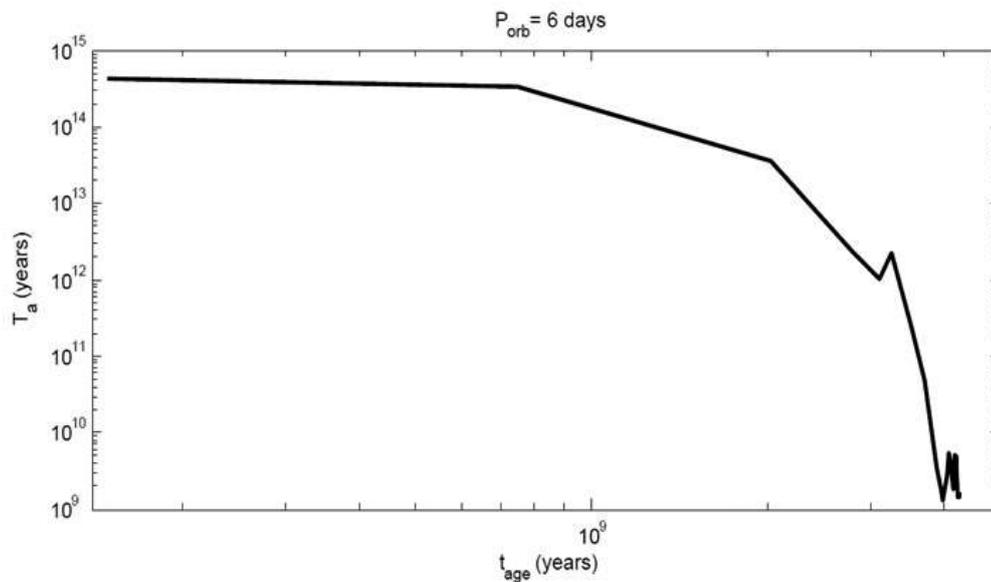


Рис. 1.4 – Характерное время приливной эволюции большой полуоси (в годах) планеты Kepler-91 b, рассчитанное для ее настоящего орбитального периода 6 дней.

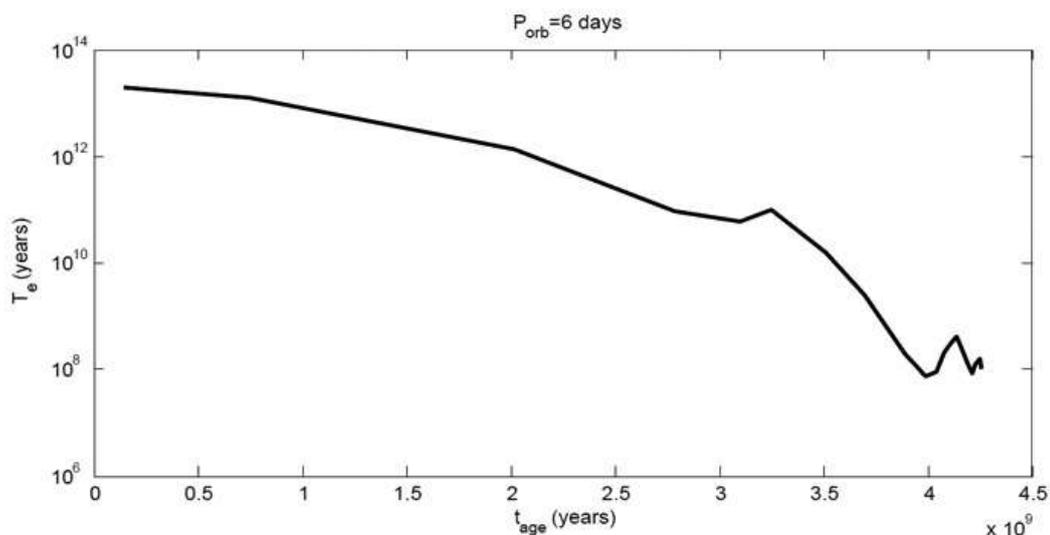


Рис. 1.5 – Характерное время приливной эволюции эксцентриситета (в годах) планеты Kepler-91 b, рассчитанное для ее настоящего орбитального периода 6 дней.

## **Тема 1.3.2 Транзиентный рост крупномасштабных вихрей в аккреционных и протопланетных дисках**

### **Аннотация.**

Показано, что с учетом микроскопической вязкости максимальный оптимальный рост вихревых возмущений достигает наибольшего значения на азимутальном масштабе порядка полутолщины диска, спадая как в сторону больших, так и в сторону меньших значений азимутального масштаба, в согласии с соответствующими аналитическими оценками. Показано, что оптимальный рост увеличивается обратно пропорционально четвертой степени эпициклической частоты в потоках со сверхкеплеровским сдвигом скорости. Полученные результаты позволяют предположить, что число Рейнольдса, при котором может происходить генерация турбулентности в квази-кеплеровском потоке, а также соответствующая безразмерная эффективная вязкость, существенно зависят от градиента угловой скорости.

Продолжено изучение возможности возникновения турбулентности в спектрально-устойчивых моделях газовых дисков. В таких моделях турбулентные движения получают энергию из усредненного потока за счет роста линейных гидродинамических возмущений. В спектрально-устойчивом сдвиговом потоке, каким является однородное кеплеровское течение, возможен только транзиентный рост амплитуды возмущений. Таким образом, отождествление типов транзиентно растущих возмущений, идентификация механизмов отбора ими энергии у усредненного потока, расчет их факторов роста — является актуально задачей теории дисковой аккреции, в которой гидродинамическая турбулентность до сих пор остается гипотетическим явлением. В рамках локальной модели квази-кеплеровского течения, а также с использованием ряда глобальных моделей кеплеровского диска, транзиентный рост возмущений был исследован во всем диапазоне значений их азимутального масштаба, измеряемого в единицах полутолщины диска. Показано, что с учетом микроскопической вязкости максимальный оптимальный рост достигает наибольшего значения на азимутальном масштабе порядка полутолщины диска, спадая, как в сторону больших, так и в сторону меньших значений азимутального масштаба, в согласии с соответствующими аналитическими оценками. Главное внимание уделено т.н. крупномасштабным вихревым гармоникам, обладающим азимутальной длиной волны, превышающей полутолщину диска. Показано, что их оптимальный рост увеличивается обратно пропорционально четвертой степени эпициклической частоты в потоках со сверхкеплеровским сдвигом скорости. При этом, важно, что их на их рост практически не влияет величина второй вязкости, в пользу чего также приведены аналитические аргументы. Полученные результаты

позволяют предположить, что число Рейнольдса, при котором может происходить генерация турбулентности в квази-кеплеровском потоке, а также соответствующая безразмерная эффективная вязкость, существенно зависят от градиента угловой скорости.

### **Тема 1.3.3 Динамические приливы в нетвердотельно вращающихся звёздах**

#### **Аннотация.**

Разработан оригинальный математический подход, который дал новые результаты уже для случая твердотельного вращения. В рамках этого подхода сформулированы своеобразные «правила сумм» – вообще говоря, бесконечные суммы некоторых величин по нормальным модам суммируются точно и выражаются через величины, определяемые приливным потенциалом. Потенциально они могут не только существенно упростить теорию приливных взаимодействий, но и дать новую информацию о спектре колебаний вращающихся звезд.

В рамках этой тематики был разработан оригинальный математический подход, который дал новые результаты уже для случая твердотельного вращения. В предыдущих работах участников данного проекта передача энергии и углового момента за счет приливов выражалась в виде сумм по нормальным модам, содержащих интегралы перекрытия, причем, в случае возбуждения инерциальных колебаний, соответствующие суммы имели бесконечное число членов, что затрудняло их вычисление и делало практически невозможным обобщение разработанного формализма на случай нетвёрдотельного вращения. Нами был исследован другой формализм, применимый тогда, когда период вращения объекта, в котором возбуждаются приливы, достаточно велик, много больше, чем характерное время приливного воздействия. В этом предельном случае задачу о возбуждении приливов можно напрямую проинтегрировать по времени и выразить передачу энергии и углового момента через величины, полученные действием некоторого самосопряженного оператора на приливный потенциал. Так как для твердотельного вращения можно перейти к такому же пределу в суммах по нормальным модам, то, в данном случае, оба подхода должны быть эквивалентны. Это требование приводит к существованию своеобразных «правил сумм» – вообще говоря, бесконечные суммы некоторых величин по нормальным модам суммируются точно и выражаются через величины, определяемые приливным потенциалом. Такие правила сумм были явно получены для модели вращающейся звезды с нулевой частотой Брунта-Вайсалы и невращающейся звезды с частотой Брунта-Вайсалы, отличной от нуля. В настоящее время мы пытаемся получать подобные выражения и для общего случая. Существование подобных правил было не известно до настоящего времени. Потенциально они могут не только существенно упростить теорию

приливных взаимодействий, но и дать новую информацию о спектре колебаний вращающихся звезд.

Дополнительно была профинансирована задача о взаимодействии струи газа, сброшенной звездой, приливно разрушенной черной дырой, с аккреционным диском. Физически аналогичная ситуация может возникнуть и в протопланетных системах, если планета с достаточно малой средней плотностью разрушится центральной звездой.

#### **Руководитель проекта:**

Иванов П. Б., д. ф.-м. н., г.н.с., АКЦ ФИАН [pbi20@cam.ac.uk](mailto:pbi20@cam.ac.uk)

#### **Публикации:**

1. Xiang-Gruess, M., Ivanov, P. B. , Papaloizou, J. C. B., *Baltic Astronomy*, 2016, 25, 304.

#### **Послано в печать:**

2. Transient growth of perturbations on scales beyond the accretion disc thickness в журнал *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

3. «Изменение орбитального периода двойной системы за счет динамических приливов для звезд главной последовательности» в журнал «Письма в Астрономический Журнал», см. ПАЖ, 2017, номер 3.

4. «Теория динамических приливов Зана и ее применение к звездам» послана в ПАЖ.

### **Проект 1.4 Моделирование эволюции разреженных сгущений и образования первичных твердых тел в протопланетном диске**

#### **Аннотация.**

1. Проведены исследования континуальных полуэмпирических моделей ламинарных и турбулентных течений в электропроводных и гетерогенных средах реагирующих газов в протопланетном диске. На основе формализма неэкстенсивной статистики Тсаллиса, предназначенной для описания поведения систем с сильным гравитационным взаимодействием, получены модифицированные критерии гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для вращающихся аккреционных дисков с фрактальной структурой фазового пространства. Получен критерий термической устойчивости и степенной закон распределения для вращающихся самогравитирующих аккреционных дисков.

2. Проведено математическое моделирование столкновительной эволюции первичных пылевых фрактальных кластеров  $R$  с размерами  $\sim 10^{-6}$  м и фрактальной размерности кластера  $D_\beta$  в

приближении модели проницаемых частиц. Исследована внутренняя структура кластера в зависимости от фрактальной размерности, коэффициента восстановления частиц и других параметров модели. Проведено численное моделирование процессов агломерации в среде, содержащей пылевые фрактальные кластеры с различным распределением частиц. Показано, что нейтральные частицы указанных размеров не испытывают никаких дальнедействующих сил взаимодействия и что в таких условиях рост частиц и образование мезо- и макромасштабных структур существенно замедляется.

Основная цель данной работы – моделирование структуры и эволюции аккреционных протопланетных дисков с учетом теории турбулентных гетерогенных сред и разработка математических моделей для описания процесса укрупнения пылевых кластеров в процессе кластер-кластерной коагуляции и образования фрактальных агрегатов в результате протекания физико-химических и гидродинамических процессов. Этот подход лежит в основе формирования пылевых кластеров и последующего роста планетезималей. Методическую основу исследований составляет разработка гидродинамических моделей образования и роста рыхлых пылевых агрегатов в аккреционном протопланетном диске на ранней стадии эволюции и формирования планетезималей на основе фрактальных представлений о свойствах пылевых кластеров.

Получены модифицированные критерии гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для вращающихся аккреционных дисков с фрактальной структурой фазового пространства. В основу положен формализм неэкстенсивной статистики Тсаллиса, предназначенной для описания поведения аномальных систем с сильным гравитационным взаимодействием отдельных её частей и модифицированные гидродинамические уравнения Навье–Стокса (уравнения  $q$ -гидродинамики). Показано, что критические значения длины возмущающей волны явно зависят от энтропийного индекса  $q$  и параметра фрактальной размерности  $D$  в фазовом пространстве скоростей, которые, являющихся свободными параметрами, должны определяться в каждом конкретном случае эмпирическим путём из статистических или экспериментальных данных. Получены обобщенные критерии гравитационной неустойчивости для фрактальных самогравитирующих объектов и показано, что предложенный подход к анализу гравитационной неустойчивости в плоскости астрофизических дисков в рамках статистики Тсаллиса может быть распространён на исследования динамики возмущений в неоднородных и неизотропных дисковых фрактальных средах, исследования гравитационных возмущений в плоскости диска с учетом диссипативных эффектов и исследования собственных частот колебаний в вертикально неоднородном диске с учётом магнитного поля.

Проведено исследование процессов взаимодействия пылевых фрактальных кластеров, заполненных частицами микронных размеров, получены оценки скоростей роста частиц и образования укрупненных макромасштабных структур. Для описания поведения пылевых фрактальных кластеров модельные частицы, представляющие кластеры диаметром  $10^{-6}$  м, наделялись свойствами, зависящими от фрактальной размерности кластера  $D_{\beta}$ . Показано, что при увеличении фрактальной размерности кластера растет заполнение внутреннего пространства охватывающей «частицы», что позволяет использовать метод проницаемых частиц. В данном подходе модельные частицы представляют собой фрактальные пылевые кластеры различной размерности. На данном этапе рассматривалась квазинейтральная пылевая среда, поэтому модельные частицы не испытывают никаких сил взаимодействия на расстояниях превышающие расстояние непосредственного контакта. Динамическое поведение таких частиц при столкновениях характеризуется коэффициентом восстановления частиц из «фрактальной» среды. При столкновениях пылевых фрактальных кластеров в зоне контакта происходит взаимное проникновение и перестройка фрактальных структур, что вызывает возникновение сил взаимодействия, которые, в первом приближении, могут быть описаны как нелинейные упругие силы. Наличие этих сил обеспечивает качественное описание процессов сцепления пылевых фрактальных кластеров при столкновениях с небольшими относительными скоростями.

В результате проведенных исследований получены обобщенные критерии гравитационной неустойчивости для фрактальных самогравитирующих объектов и показано, что предложенный подход к анализу гравитационной неустойчивости в плоскости астрофизических дисков в рамках статистики Тсаллиса может быть распространен на исследования динамики возмущений в неоднородных и неизотропных дисковых фрактальных средах, исследования гравитационных возмущений в плоскости диска с учетом диссипативных эффектов и исследования собственных частот колебаний в вертикально неоднородном диске с учётом магнитного поля. Проведён анализ осесимметричных колебаний астрофизического дифференциально вращающегося газопылевого диска и получены модифицированные критерии гравитационной неустойчивости Джинса и Тумре для дисков с фрактальной структурой фазового пространства.

Проведено исследование процессов взаимодействия пылевых фрактальных кластеров, заполненных частицами микронных размеров, получены оценки скоростей роста частиц и образования укрупненных макромасштабных структур. Показано, что при увеличении фрактальной размерности кластера растет заполнение внутреннего пространства охватывающей «частицы», что позволяет использовать метод проницаемых частиц. В данном подходе

модельные частицы представляют собой фрактальные пылевые кластеры различной размерности.

**Руководитель проекта:**

академик Маров Михаил Яковлевич, ГЕОХИ РАН, [marovmail@yandex.ru](mailto:marovmail@yandex.ru)

**Состав группы:**

Маров М.Я., Девина О.А., с.н.с., к.х.м., Русол А.В., с.н.с., к.т.н., Кукса М.М., ведущий программист б/уч.

**Публикации:**

1. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Модификация в рамках неэкстенсивной статистики критериев неустойчивости Джинса и Тумре для астрофизических фрактальных объектов. *Астрономический вестник. Исследования Солнечной системы*, 2016, том 50, № 4, с. 1–12.
2. Kolesnichenko, A. V.Marov, M. Ya. Modification of the Jeans and Toomre instability criteria for astrophysical fractal objects within nonextensive statistics//*Solar System Research*, 2016. V. 50. № 4. P.251-261.
3. Маров М.Я., Русол А.В. Некоторые проблемы математического моделирования газопылевых протопланетных дисков. Конференция, посвященная 110-летию академика А.Н. Тихонова, ВМК МГУ им. Ломоносова, 1 ноября 2016 г. Сборник тезисов.

## 2. Солнце и гелиосфера

Кураторы направления: Ю.И. Ермолаев (ИКИ), А.В. Степанов (ГАО).

2.1	Проект 2.1: Солнечные вспышки, сопровождающиеся жестким гамма излучением > 100 МэВ	Струминский А.Б., Зимовец И.В., Ерохин Н.С.
2.2	Проект 2.2: Влияние анизотропии свойств переноса в магнитном поле на взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой, планетами и кометами	Баранов В.Б.
2.3	Проект 2.3: Исследование формирования солнечного ветра в короне и статистических параметров его турбулентности в гелиосфере	Слемзин В.А., Чашей И.В.
2.4	Проект 2.4: Исследование явлений нестационарного взаимодействия солнечного ветра с околоземной ударной волной	Вайсберг О.Л.
2.5	Проект 2.5: Поиск механизмов ускорения солнечного ветра на основе материалов радиозондирования, полученных с использованием космических аппаратов в течение трех циклов солнечной активности (1975-1984; 1994-2005; 2006-2013)	Яковлев О.И., Ефимов А.И.
2.6	Проект 2.6: Исследование пространственного и энергетического распределения межзвездного водорода в солнечном ветре	Измоденов В.В.
2.7	Проект 2.7: Новые методы и технологии построения изображений Солнца со сверхвысоким пространственным разрешением в ходе космических экспериментов	Кузин С.В., Богачев С.А.
2.8	Проект 2.8: Теория, экспериментальные исследования и численное моделирование магнитогидродинамической турбулентности в солнечном ветре и образование ударных волн в астрофизических объектах	Сон Э.Е.
2.9	Проект 2.9: Средние физические характеристики пятен в изменениях солнечной активности	Наговицын Ю.А., Тлатов А.Г.
2.10	Проект 2.10: Исследования процессов ускорения ионов и электронов в солнечных вспышках по результатам измерений рентгеновского и гамма-излучения в российско-американском эксперименте КОНУС-ВИНД и в экспериментах ГЕЛИКОН и ИРИС на солнечной обсерватории «КОРОНАС-Ф»	Чариков Ю.Е.
2.11	Проект 2.11: Выявление вклада естественных и антропогенных факторов в изменения глобального климата Земли, оценка возможных климатических последствий различных солнечно-космических явлений и разработка сценариев возможной эволюции климата Земли в 21-м веке на основе анализа инструментальных, исторических и палеоданных об изменении ряда природных характеристик	Дергачев В.А.
2.12	Проект 2.12: Исследование ультратонких хромосферных петель и их вспышечной активности	Зайцев В.В.
2.13	Проект 2.13: Глобальные комплексы активности и соотношение магнитных полей различных пространственных масштабов	Обридко В.Н., Кузнецов В.Д.

2.14	Проект 2.14: Исследование геоэффективности крупномасштабных структур солнечного ветра	Ермолаев Ю.И., Веселовский И.С., Застенкер Г.Н.
2.15	Проект 2.15: Эруптивные явления на Солнце и их роль в формировании космической погоды	Фомичев В.В., Белов А.В.
2.16	Проект 2.16: Физические процессы в атмосфере Солнца: плазменные неустойчивости, МГД-волны, нагрев плазмы и электромагнитное излучение	Степанов А.В.
2.17	Проект 2.17: Физика магнитосфер активных областей в переходной области хромосфера-корона и нижней короны Солнца по микроволновым наблюдениям	Богод В.М.
2.18	Проект 2.18: Ускорение заряженных частиц, нагрев плазмы в нестационарных процессах на Солнце и новые физические модели активных образований	Соловьев А.А.

## **Проект 2.1 Солнечные вспышки и космические лучи**

### **Тема 2.1.1 Отклик в атмосфере Земли и лунном грунте на приход солнечных протонов с предельным спектром**

#### **Аннотация.**

Вычислены возможные величины наземных возрастных интенсивности солнечных космических лучей (GLE), а также производства радионуклидов в атмосфере Земли и лунном грунте, для предельных спектров солнечных протонов. Полученные нижние пределы соответствуют величинам GLE, уже наблюдавшимся в истории, а верхние пределы примерно на два порядка их выше. События с предельным спектром в современную эпоху еще не наблюдались, возможным кандидатом является событие 775 AD, обнаруженное радиоуглеродным методом. Наблюдаемое соотношение между изотопами  $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$  and  $^{36}\text{Cl}$  на Земле и их распределение по глубине в лунном грунте не противоречит гипотезе их происхождения в редких солнечных протонных событиях с предельным жестким спектром.

#### **Руководитель темы:**

д.ф.-м.н. Струминский Алексей Борисович, ИКИ РАН, astrum@iki.rssi.ru

#### **Подано в печать**

1. Белов А.В и Струминский А.Б. предельные наземные возрастные интенсивности солнечных космических лучей, Известия РАН, Серия Физическая, 2017, 2.

2. Васильев Г.И., Остряков В.М., Павлов А.К., **Струминский А.Б.**, Фролов Д.А. Изотопные следы сверхмощных солнечных событий Сборник трудов XX Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца “Солнечная и солнечно-земная физика – 2016”, 10-14 октября 2016, ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия. Ред.: А.В. Степанов и Ю.А. Наговицын.

**Доклады:**

1. Белов А.В и **Струминский А.Б.** Предельные наземные возрастания интенсивности солнечных космических лучей, **ВККЛ2016.**
2. Pavlov, A. K., Frolov, D. A., Ostryakov, V. M., Vasilyev, G. I. **Struminsky A.B.** Analysis of Superflare “Isotopic Imprints” in Lunar and Terrestrial Samples, **ECRS2016.**
3. Belov A.V. and **Struminsky A.B.** Ultimate Ground Level Enhancements of Solar Cosmic Rays, **ECRS2016, Torino, Italy.**

**Тема 2.1.2 Звездные космические лучи в зоне обитания**

**Аннотация.**

Сделаны энергетические оценки напряженности магнитного поля в трубке в фотосфере для О-М звезд. На их основе оценены возможные энергии вспышек и количество ускоренных протонов. Полученные значения для Солнца по порядку величины соответствуют наблюдениям, что обосновывает оценки для других звезд. Величины магнитного поля в трубке различаются менее чем в пять раз (700 и 3500 Гс) для О и М звезд, но соответствующие энергии вспышек и числа ускоренных протонов на пять порядков больше для О звезд. Напротив потоки звездных протонов в зоне обитания О звезд оказываются на пять порядков меньше.

**Руководитель темы:**

д.ф.-м.н. Струминский Алексей Борисович, ИКИ РАН, astrum@iki.rssi.ru

**Подано в печать:**

**Struminsky A. and Sadovski A.** Stellar Cosmic Rays in a Habitable Zone, APS Conference series, 2017.

## **Доклад:**

**А. Струминский** «Stellar Cosmic Rays in a Habitable Zone» на конференции «Физика звезд: от коллапса до коллапса», САО РАН, Нижний Архыз, 2-8 октября 2016 г.

### **Тема 2.1.3 Анализ серфотронного ускорения тяжелых ядер в космической плазме и возникновения вариаций потоков космических лучей**

#### **Аннотация.**

На основе экспериментальных данных исследовались энергетические спектры (ЭС) потоков космических лучей (КЛ) ядер H, He, Si, Fe с величиной отношения энергии ядра к заряду ( $E/Z$ ) в диапазоне  $\sim (10^5 \div 5 \cdot 10^7)$  ГэВ. Рассмотрены опубликованные данные проектов AMS-02, CREAM, Tibet AS $\gamma$ , Tibet (hybrid), GRAPES-3, KASCADE, KASCADE-GRANDE. При сравнении потоков ядер H и He КЛ по данным KASCADE и KASCADE-GRANDE (для различных моделей восстановления спектров КЛ) с данными Tibet AS $\gamma$  и Tibet (hybrid) (полученными в другое время) в области  $E / Z \sim 3 \cdot 10^6$  ГэВ (колени ЭС КЛ) наблюдается избыток по сравнению со стандартными значениями, т.е. переменность потока. Наиболее отчетливо эта особенность (широкий квази-пик) ЭС КЛ наблюдается в спектрах тяжелых ядер Si и Fe по данным KASCADE-GRANDE и GRAPES-3. На примере экспериментов Yakutsk EAS, CASA-BLANCA, Tibet-III было выявлено существование переменности в ЭС всех КЛ в окрестности “колена”. Переменность потока КЛ на временной шкале порядка нескольких лет возможна, только если источник, соответствующий квази-пику, находится на расстоянии не далее  $\sim 1$  пк. В рамках быстрого (серфотронного) механизма ускорения таким источником может быть объект, находящийся в каком-либо из ближайших к Солнцу сталкивающихся межзвездных облаков (LIC и G). Следовательно, существование серфотронных ускорителей КЛ в ближайших межзвездных облаках (МО) позволяет естественным образом объяснить существование “колена” в ЭС КЛ и переменность спектра в диапазоне  $\sim 10^3$  ГэВ  $< E/Z < 10^8$  ГэВ при реализации серфинга в относительно спокойной космической плазме. На основе численных расчетов проведен анализ условий захвата ядер гелия и железа электромагнитной волной в космической плазме, динамики компонент скорости и импульса частицы, зависимости темпа ее ускорения от исходных параметров задачи. Исследована структура фазовой плоскости ускоряемого ядра железа. Сформулированы оптимальные условия для реализации ультрарелятивистского серфотронного ускорения ядер Fe электромагнитной волной: амплитуда волны должна быть выше некоторого

критического значения, когда реализуется захват частиц в эффективную потенциальную яму с последующим сильным ускорением. Кроме того захват заряженной частицы волной происходит при благоприятной фазе волны на траектории заряда. Если при этом знак скорости частицы вдоль волнового фронта благоприятен, то последует сильное ускорение. Для неблагоприятного знака этой компоненты скорости заряд оставаясь захваченным волной, тормозится, меняет знак компоненты своей скорости вдоль волнового фронта и далее ускоряется. В отличие от электронов и позитронов, у которых период циклотронного вращения значительно меньше, для сильно релятивистской начальной энергии тяжелой частицы обнаружен новый эффект. Частица ускоряется значительно, но позднее вылетает из черенковского резонанса с волной и ускорение прекращается. Эта особенность, видимо, обусловлена большой массой частицы (например, ядра железа), что сильно увеличивает период циклотронного вращения и резко замедляет отстройку от черенковского резонанса при взаимодействии волна-частица. Поэтому происходит большой рост энергии частицы. Данную особенность серфотронного ускорения предстоит детально исследовать на следующем этапе работ, но здесь требуется сильное увеличение времени численных расчетов и возможно потребуется использование суперкомпьютерной техники. Как и ранее, расчеты показали выход характеристик захваченных в режим серфинга частиц на асимптотики, в частности, наблюдается постоянный темп ускорения этих частиц, на фазовой плоскости, траектория изображающей точки по спирали приближается к особой точке типа устойчивый фокус, соответствующий дну эффективной потенциальной ямы, а поперечные к магнитному полю компоненты скорости заряда выходят на постоянные значения.

**Руководитель темы:**

д.ф.м.н. Ерохин Николай Сергеевич, ИКИ РАН, [nerokhin@mx.iki.rssi.ru](mailto:nerokhin@mx.iki.rssi.ru)

**Состав группы:**

Лозников В.М., Зольникова Н.Н., Михайловская Л.А.

**Публикации:**

1. В. М. Лозников, Н. С. Ерохин, Н. Н. Зольникова, Л. А. Михайловская. Серфотронный ускоритель в местном межзвездном облаке. Физика плазмы, 2017, т.43, № 1.
2. V. M. Loznikov, N. S. Erokhin, N. N. Zol'nikova, and L. A. Mikhailovskaya. On the Reason for the Kink in the Rigidity Spectra of Cosmic-Ray Protons and Helium Nuclei near 230 GV. Plasma Physics Reports, 2016, Vol. 42, No. 7, pp. 658–665.

3. A. N. Erokhin, N. N. Zol'nikova, and N.S. Erokhin. Analysis of the Dependence of Surfatron Acceleration of Electrons by an Electromagnetic Wave in Space Plasma on the Particle Momentum along the Wave Front. Plasma Physics Reports, 2016, Vol. 42, No. 1, pp. 32–37.

**Устные доклады:**

1. Мкртчян Г. С., Ерохин Н. С. Численная модель механизма серфотронного ускорения релятивистских позитронов в космической плазме электромагнитной волной. Доклад на Всероссийской конференции по проблемам динамики, физики частиц, физики плазмы и оптоэлектроники, Россия, г. Москва, 17-19 мая 2016 г.
2. Н.С. Ерохин, В.М. Лозников, Н.Н. Зольникова, Л.А. Михайловская. Серфотронное ускорение протонов и ядер гелия в космической плазме. Одиннадцатая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе 2016", секция "Теория космической плазмы", Москва, ИКИ РАН, 15-20 февраля 2016 г.
3. Shkevov R., Erokhin N.S., Loznikov V. M., Zolnikova N.N., Mikhailovskaya L.A. Surfatron acceleration of relativistic protons by electromagnetic wave in space plasma. International Symposium on Recent Observations and Simulations of the Sun–Earth System III, Golden Sands, Bulgaria, September 12-16, 2016.

**Тема 2.1.4 Развитие методов модуляционных коллиматоров для солнечных телескопов жесткого рентгеновского диапазона**

**Аннотация.**

Разработаны математические методы и программное обеспечение для расчета функций рассеяния точки модельных телескопов жесткого рентгеновского излучения на основе модуляционных коллиматоров Фурье (синусного и косинусного) типа. Выполнено моделирование и подобраны параметры модуляционной коллиматорной системы, которая может быть использована для разработки солнечного телескопа-спектрометра жесткого рентгеновского излучения СОРЕНТО, разрабатывающегося для космического проекта Интергелиозонд.

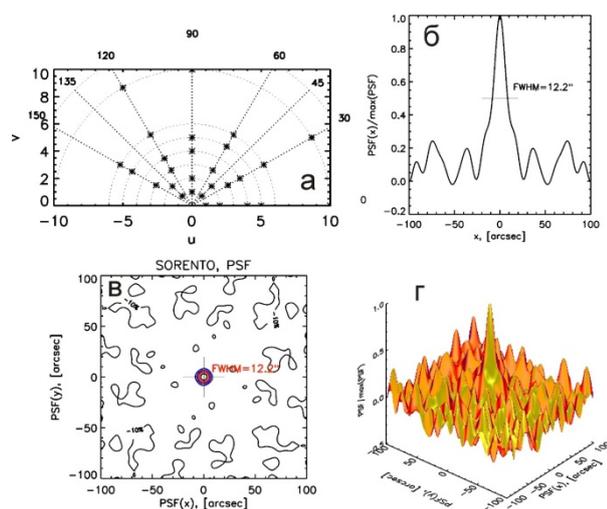


Рис. 2.1 – Пример подбора параметров коллимационной системы компактного солнечного телескопа-спектрометра жесткого рентгеновского излучения с модуляционными коллиматорами синусного и косинусного типа и результаты расчета его функции рассеяния точки. (а) Заполнение U-V (Фурье плоскости); (б)-(г) визуализация функции рассеяния точки вдоль одной оси координат, на плоскости X-Y и в 3D.

**Руководитель темы:**

Зимовец Иван Викторович, ИКИ РАН, [ivanzim@iki.rssi.ru](mailto:ivanzim@iki.rssi.ru)

**Тема 2.1.5 О механизме ускорения космических лучей**

**Аннотация.**

Столетнее исследование космических лучей не привело к пониманию физики ускорения регистрируемых частиц. Возможные механизмы ускорения космических лучей в ударных волнах остаются только гипотезами. Они основаны на ряде ничем не обоснованных предположений. Исследования солнечных космических лучей с использованием мировой сети нейтронных мониторов и на аппаратах GOES убедительно показали, что ускорение протонов происходит при распаде вспышечного токового слоя. Ускоренные "быстрые (prompt)" протоны приходят к Земле от вспышки, распространяясь вдоль линий межпланетного магнитного поля без столкновений. Регистрация нейтронными мониторами протонов с энергией до 20 ГэВ, обнаруженных на Солнце, вселяет надежду на получение новой информации о механизме генерации космических лучей. Невозможно исключить возможность ускорения солнечных космических лучей и космических лучей,

приходящих из далеких областей космоса, единым физическим механизмом. Ускоряемые частицы обладают экспоненциальным спектром, который затем трансформируется при развитии пучковой неустойчивости. В формировании спектров частиц, измеряемых на орбите Земли, играют как механизм ускорения, так и распространение частиц в замагниченной плазме межпланетной среды.

Примеры потоков протонов от западной (а) и восточной (б) вспышек:

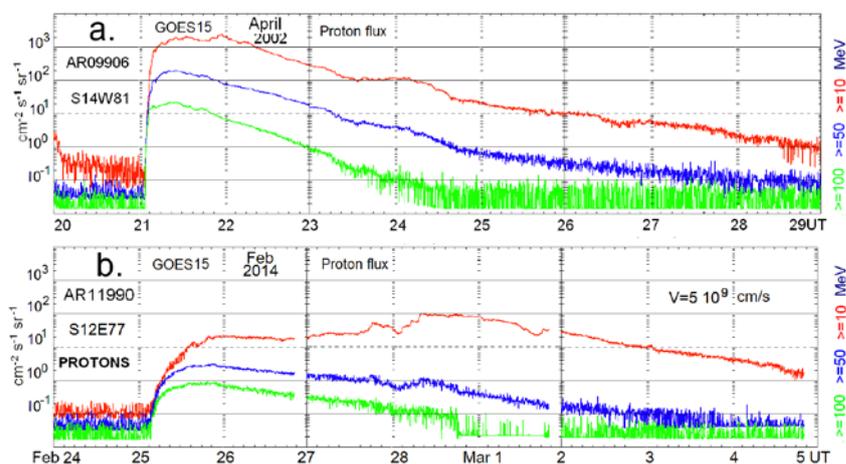


Рис. 2.2 – а) Поток протонов от вспышки на западе Солнца, имеет крутой фронт длительностью 10 – 15 минут. Поток от западной вспышки приходит к Земле с задержкой около 30 мин. Задержка определяется временем пролета частицы от Солнца до Земли без столкновений вдоль линии магнитного поля по спирали Архимеда.

б) Протоны от восточных вспышек регистрируются с запаздыванием в несколько часов.

Фронт потока никогда не бывает крутым. Они переносятся солнечным ветром и диффузией поперек магнитного поля.

#### Руководитель темы:

Подгорный И.М., ИНАСАН, podgorny@inasan.ru

#### Состав группы:

Подгорный А.И., ФИАН.

#### Публикации:

1. Podgorny I.M., Podgorny A.I. Sun and Geosphere. 11, № 2, 85-90. 2016.
2. Podgorny I.M., Minami S., Podgorny A.I In Proceeding of 8-th Workshop. Bulgaria, Sunny Beach. May 30. P. 96 – 102. 2016.
3. Подгорный И.М., Подгорный А.И. Известия КрАО 112, №2, 86 – 97. 2016.

## **Тема 2.1.6 Разработка системы графического вывода результатов МГД моделирования процессов в солнечной короне**

### **Аннотация.**

Трехмерную конфигурацию поля в короне можно определить только путем МГД моделирования. Сложная конфигурация магнитного поля вблизи реального токового слоя не позволяет легко обнаружить положение токового слоя. Разработанная система наглядно демонстрирует накопление магнитной энергии для солнечной вспышки в токовом слое, образуемом в окрестности особой X-линии, а также конфигурацию магнитного поля в источниках теплового и пучкового рентгеновского излучения вспышки. Ввиду сложности конфигурации магнитного поля в короне, изучение физических процессов, происходящих во время вспышек невозможно без использования разработанной системы визуализации и поиска, которая осуществляет поиск положений вспышечного энерговыделения.

### **Руководитель темы:**

Подгорный И.М., ИНАСАН, podgorny@inasan.ru

### **Состав группы:**

Подгорный А.И., ФИАН.

### **Публикация:**

Подгорный А.И., Подгорный И.М, Мешалкина Н.С. "Physics of Auroral Phenomena", Proc. 39 ANNUAL SEMINAR, APATITY. 2016.

## **Проект 2.2 Влияние анизотропии свойств переноса в магнитном поле на взаимодействие солнечного ветра с межзвездной средой, планетами и кометами**

### **Аннотация.**

Рассчитано распределение концентраций протонов и кометных тяжелых ионов во внешнем ударном слое (области между головной ударной волной и кометной ионопаузой) при различных физических условиях в солнечном ветре, соответствующих исследованию этого взаимодействия при помощи космических аппаратов во время их пролета около

комет Галлея (март 1986 года), Григга-Шеллерупа (июль 1992 года) и Чурюмова-Герасименко (август 2015 года).

1. В рамках плана Программы, в 2015 году были опубликованы три работы по магнитогидродинамическому (МГД) взаимодействию солнечного ветра с кометными атмосферами (Алексашов и др., Известия РАН, МЖГ; Baranov et al., MNRAS; Lebedev et al., Earth, Moon and Planets). Эти работы были выполнены в так называемом одножидкостном приближении, в котором плазменная компонента рассматривалась как одна жидкость, состоящая из электронов, протонов и «нагруженных» кометных ионов, возникающих в солнечном ветре вследствие фотоионизации кометных нейтралов с последующим захватом их солнечным ветром. Качественная картина такого течения была впервые предложена в работе Бирмана, Бросовского и Шмидта (Solar Physics, 1967) и представлена на рис. 2.3. Здесь зеленым цветом окрашен газ, вытекающий из ядра кометы, желтым цветом окрашена плазма солнечного ветра, нагруженная кометными ионами, BS и IS – головная и кометная ударные волны торможения сверхзвуковых потоков солнечного ветра и плазменной компоненты кометного газа, соответственно, CD – контактный разрыв. В отличие от картины, представленной на рис. 2.3, в упомянутых выше работах за 2015 год учитывалось влияние межпланетного магнитного поля в солнечном ветре.

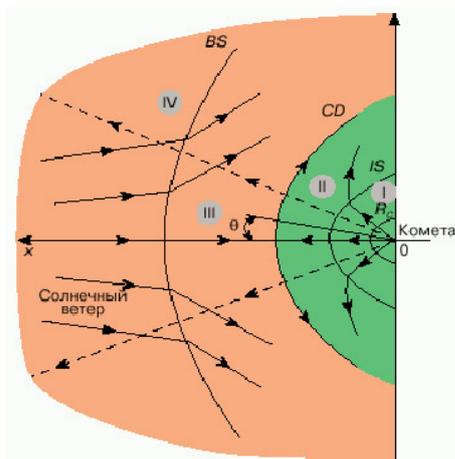


Рис. 2.3

В отчетном году был предложен метод отдельного определения концентраций протонов и кометных ионов при использовании результатов работ, опубликованных в 2015 году. Были проведены расчеты при различных значениях параметров натекающей на кометную ионосферу плазмы солнечного ветра и магнитного поля, соответствующих исследованию комет при помощи космических аппаратов во время их пролета около комет Галлея (март 1986 года), Григга-Шеллерупа (июль 1992 года) и Чурюмова-Герасименко (август 2015 года). В частности, было показано, что обнаруженная в экспериментах по исследованию

кометы Галлея на аппарате «Вега» точка «исчезновения» протонов солнечного ветра и названная «кометопаузой», является узкой областью, в которой начинается резкое возрастание концентрации кометных ионов по сравнению с убыванием концентрации протонов вблизи ионопаузы (CD на рис. 2.3), которая в МГД модели является тангенциальным, а не контактным, разрывом (в МГД эти поверхности сильного разрыва имеют разные свойства). На рис. 2.4 представлен результат расчета концентрации протонов и «нагруженных» кометных ионов воды во внешнем ударном слое (области между BS и CD на рис. 2.3) в период нахождения кометы Чурюмова-Герасименко в перигелии во время маневров вокруг нее аппарата «Розетта». На нем указана точка, в которой концентрация протонов солнечного ветра равна концентрации водяных ионов, после которой концентрация ионов начинает резко возрастать при приближении к ионопаузе (тангенциальному разрыву). К сожалению, результат, показанный на рис. 2.4, носит предсказательный характер, поскольку траектория аппарата «Розетта» не проходила через внешний ударный слой, где справедливы наши теоретические результаты.

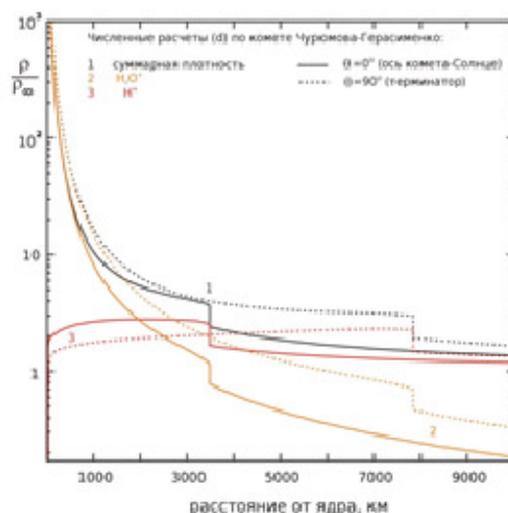


Рис. 2.4 – Распределение плотности заряженных частиц в окрестностях кометы Чурюмова-Герасименко, полученное в МГД-модели вдоль направления комета – Солнце и вдоль терминатора (Баранов, Алексашов, Письма в АЖ, 2017). Угол между магнитным полем и вектором скорости солнечного ветра равен  $52^\circ$ .

2. В декабре 2004 г. и в августе 2007 г. аппараты Вояджер 1/2 пересекли гелиосферную ударную волну. Одним из интригующих результатов, полученных на Вояджере 1 (правда, косвенным методом), являлось обнаружение переходной области во внутреннем ударном слое (на расстоянии около 113 а.е. от Солнца), с нулевой радиальной скоростью солнечного ветра. Причем до этого момента скорость падала почти по линейному закону. В рамках упрощенной одномерной численной модели мы показали, что такое поведение

скорости можно объяснить с учетом многокомпонентности солнечного ветра – тепловые протоны и электроны и энергичные межзвездные протоны (захваченные протоны), рождающиеся с гелиосфере вследствие перезарядки солнечных протонов и межзвездных атомов водорода. Средняя тепловая энергия захваченных протонов за фронтом гелиосферной ударной волны может лежать в диапазоне от нескольких кЭв до десятка кЭв. Существование высокоэнергичной компоненты протонов в солнечном ветре приводит к увеличению силы трения между солнечным ветром и межзвездными атомами водорода, связанной с перезарядкой. На рисунке 2.5 показана скорость солнечного ветра (нормированная на скорость атомов) за фронтом ударной волны как функция расстояния от ударной волны для различных значений средней энергии захваченных протонов. При больших значениях этой энергии видно формирование переходной области – области с почти нулевой радиальной скоростью.

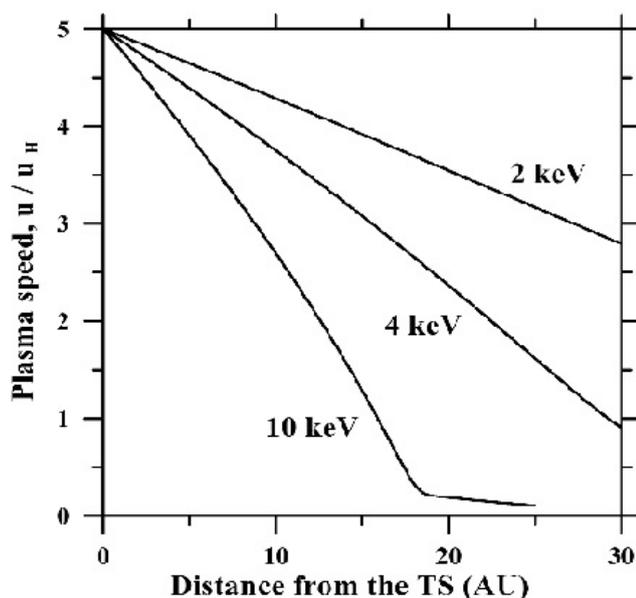


Рис. 2.5

**Руководитель проекта:**

д.ф.-м.н., профессор В.Б. Баранов, ИПМех РАН, [baranov@ipmnet.ru](mailto:baranov@ipmnet.ru)

**Принята к публикации:**

статья в журнал «Письма в АЖ»

**Прочитана приглашенная лекция** на конференции «Современные проблемы аэрогидродинамики», посвященной 60-летию «Национального комитета по теоретической и прикладной механике» и 125-летию со дня рождения первого председателя академика

АН СССР Н.И. Мухелишвили (5-15 сентября 2016 г., Сочи, Пансионат «Буревестник» МГУ).

## **Проект 2.3 Исследование формирования солнечного ветра в короне и статистических параметров его турбулентности в гелиосфере**

### **2.3.1 Аннотация.**

В целях развития методов прогнозирования геоэффективных потоков солнечного ветра составлена и проанализирована база данных межпланетных корональных выбросов массы, включающая параметры ионного состава, и их солнечных источников – корональных выбросов и вспышек в 24-м солнечном цикле (2009-2015).

Межпланетные корональные выбросы массы (МКВМ) являются наиболее геоэффективными транзитными потоками солнечного ветра, связанными с процессами спонтанной солнечной активности. Для моделирования МКВМ и предсказания вызываемых ими геомагнитных бурь необходимо изучение зависимостей между характеристиками корональных источников и параметрами МКВМ. Обычно источники МКВМ идентифицируются на основе анализа временных соотношений между проявлениями характерных кинематических и магнитных признаков МКВМ, таких как повышенная напряженность магнитного поля, спадающий профиль скорости протонов, пониженная протонная температура, и предшествующих им явлений солнечной активности – вспышек и КВМ. Однако, из-за взаимодействия транзитных потоков в гелиосфере с фоновым ветром и другими потоками, например, высокоскоростными потоками из корональных дыр, эти признаки могут сдвигаться по времени или исчезать, и идентификация источника МКВМ оказывается неоднозначной. В дополнение к указанным выше методам идентификации источников МКВМ представляется перспективным использование физически обусловленных связей между измеряемыми около Земли параметрами ионного состава транзитных потоков и параметрами плазмы корональных источников – КВМ и вспышек. Благодаря эффекту «замораживания» ионного состава транзитных потоков на расстояниях в несколько солнечных радиусов от центра Солнца, он остается практически неизменным во время прохождения через гелиосферу до Земли.

В данной работе были определены источники МКВМ 24-го солнечного цикла из наиболее полной базы данных Ричардсона и Кейн (Richardson&Cane), проанализирован ионный состав МКВМ и исследована корреляция ионных параметров МКВМ с характеристиками

источников: рентгеновскими потоками вспышек и скоростью КВМ. Составлена комбинированная база данных за период 24 цикла (2009-2015 гг.), включающая данные о 165 МКВМ (времена начала и окончания, скорость, ионный состав) и корональных источниках (времена начала КВМ и вспышек, скорость КВМ, балл вспышки), и проанализирована корреляция параметров МКВМ с параметрами источников и уровнем солнечной активности (среднегодовым числом солнечных пятен). Анализ показал, что за первые 7 лет солнечного цикла (2009-2015) число МКВМ в 24-м цикле уменьшилось на 25% по сравнению с таким же периодом 23 цикла, притом, что число КВМ увеличилось на 80%, а число вспышек уменьшилось незначительно (-15%). Доля МКВМ, определяемых как магнитные облака, выросла с 61 до 78%. Это означает, что МКВМ, и особенно, магнитные облака, наиболее эффективно возникают в результате КВМ, сопряженных со вспышками. Распределения значений ионных параметров МКВМ в 24 цикле показали, что ионизационное состояние углерода, кислорода и железа для магнитных облаков соответствуют более высокой температуре источников, чем для общей массы транзиентов. Распределение температурно-зависимого параметра – отношения плотностей ионов  $O^{7+}/O^{6+}$  относительно скорости протонов в 24 цикле, в целом, соответствует зависимости, ранее установленной по данным 23 цикла (Richardson&Cane 2004), однако степень корреляции между этими параметрами невысокая (0.23). Аналогично, подтверждается зависимость среднего заряда ионов железа в МКВМ от рентгеновского потока ассоциированных вспышек (Gopalswamy et al. 2013). В то же время скорость протонов МКВМ практически не коррелирует со скоростью исходных КВМ. Результаты проведенного исследования будут использованы при выборе оптимальных параметров источников для прогнозирования параметров МКВМ.

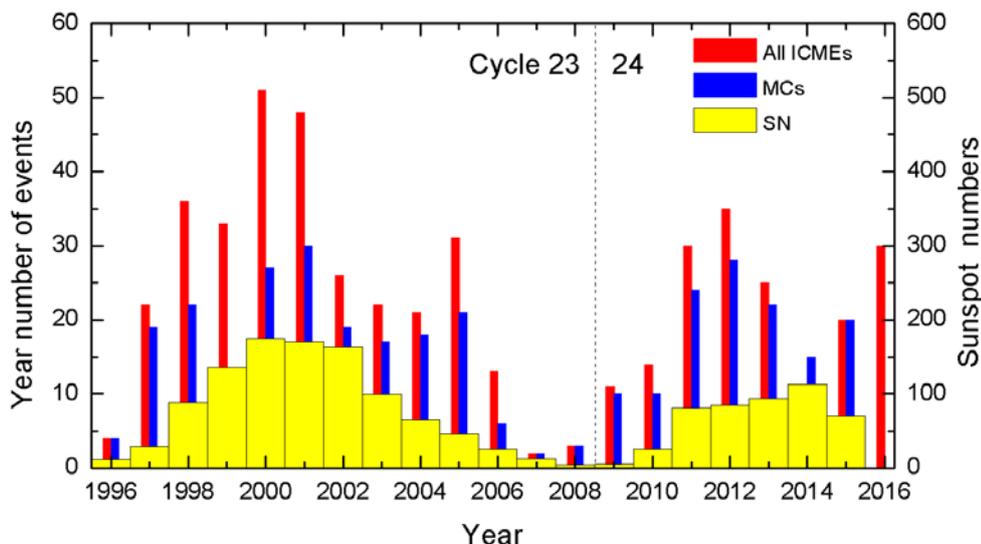


Рис.

Рис. 2.6 – Распределение числа МКВМ по годам в 23 и 24 солнечных циклах в сравнении со среднегодовым числом солнечных пятен.

**Руководитель темы:**

Слемзин Владимир Алексеевич, ФИАН, [slem@sci.lebedev.ru](mailto:slem@sci.lebedev.ru)

**Публикация:**

V. A. Slemzin, D. G. Rodkin, F. F. Goryaev, Yu. S. Shugay, I.S. Veselovsky. Solar Origins of Interplanetary Coronal Mass Ejections in Cycle 24 // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2017 (в печати).

**Аннотация 2.3.2.**

На основании данных мониторинга межпланетных мерцаний 2015 г. показано, что глобальная структура распределения турбулентного солнечного ветра на фазе спада солнечной активности близка к сферически симметричной.

По наблюдениям мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН исследованы пространственные распределения среднего уровня мелкомасштабной турбулентности солнечного ветра на фазе спада 24 цикла солнечной активности. Обработаны данные наблюдений 2015 г., выполненных на многолучевом радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Ежедневно в течение 24 часов в зоне склонений от  $-8^\circ$  до  $+42^\circ$  на гелиоцентрических расстояниях от 0.4 до 1 а.е. регистрировались мерцания

около 5 000 компактных радиоисточников. Среднемесячные распределения уровня мерцаний приведены на рис. 2.7.

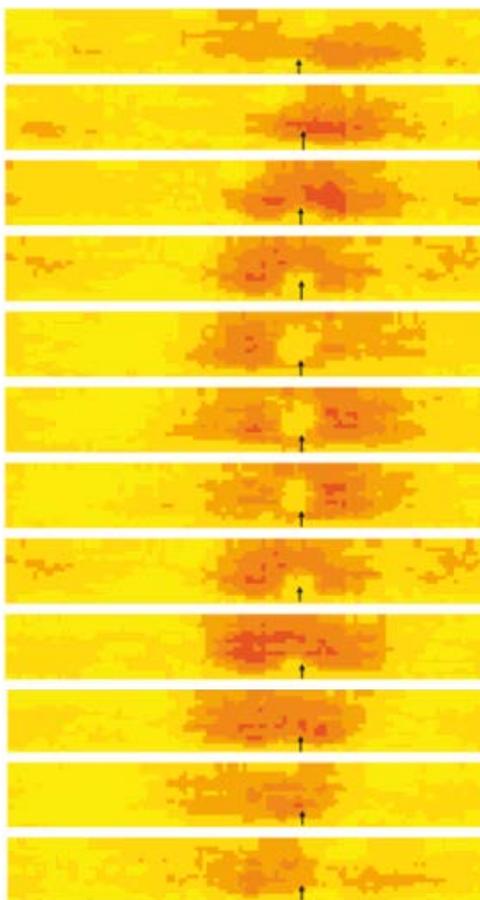


Рис. 2.7 – Усредненные по месяцам уровни межпланетных мерцаний, на панелях сверху вниз январь 2015 г. – декабрь 2015 г., оттенки от желтого до красного соответствуют усилению мерцаний, стрелкой указано положение Солнца. В зимние месяцы (январь-март, ноябрь-декабрь) Солнце расположено ниже зондируемой полосы склонений.

Светлое примерно круговое пятно в центральной части панелей соответствует режиму насыщения, в котором мерцания подавлены за счет собственных размеров источников. Область насыщения окружена кольцом, в котором уровень мерцаний максимален. За пределами кольца мерцания ослабляются из-за удаления зондируемой области от Солнца. Наиболее четко описанная структура видна в летние месяцы. Из приведенных на рисунке данных следует, что глобальное распределение турбулентного солнечного ветра на фазе спада солнечной активности близко к сферически симметричному и качественно мало отличается от аналогичных распределений, полученных нами ранее для периода максимума активности.

**Руководитель темы:**

Чашей Игорь Владимирович, ФИАН, [chashey@prao.ru](mailto:chashey@prao.ru)

**Публикация:**

Глянцев А.В., Тюльбашев С.А., Чашей И.В., Шишов В.И., Потапова Л.Б. Короткие структуры в солнечном ветре по наблюдениям межпланетных мерцаний на больших элонгациях на частоте 111 МГц // Астрон. Журн.

**Проект 2.4 Исследование явлений нестационарного взаимодействия солнечного ветра с околоземной ударной волной****Аннотация.**

С целью изучения взаимодействия токового слоя с околоземной ударной волной проведен анализ плазменного и магнитного давлений в аномалии горячего потока (Hot Flow Anomaly), зарегистрированной 22.12.2008 на космическом аппарате CLUSTER. На основании оценки динамического давления солнечного ветра проведена оценка положения околоземной ударной волны, полученные результаты сопоставлены с оценкой положения по плазменным данным прибора CIS. Проведены расчёты возможных ошибок при определении ориентации токового слоя по магнитным полям.

**Руководитель проекта:**

Вайсберг Олег Леонидович, ИКИ РАН, [olegv@iki.rssi.ru](mailto:olegv@iki.rssi.ru)

**Публикация.**

O.L. Vaisberg, S.D. Shuvalov, A.Yu. Shestakov, Y.M. Golubeva, Origin of the backstreaming ions in a young Hot Flow Anomaly, Planetary and Space Science, Volume 131, 15 October 2016, Pages 102-110, ISSN 0032-0633, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2016.08.003>

## **Проект 2.5 Поиск механизмов ускорения солнечного ветра на основе материалов радиозондирования, полученных с использованием космических аппаратов в течение трех циклов солнечной активности (1975-1984; 1994-2005; 2006-2013)**

### **Аннотация.**

В коротирующих (вращающихся с Солнцем) плазменных потоках наблюдаются квазипериодические колебания частоты зондирующих плазму радиоволн с характерными периодами около 5 минут.

В настоящее время рассматриваются различные механизмы нагрева солнечной короны и ускорения солнечного ветра [U. Narain, P. Ulmschneider. Chromospheric and coronal heating mechanisms // Space Science Reviews. 1990. V. 54. P. 377-445]. Среди основных кандидатов на эту роль являются различного типа волны – акустические, быстрые и медленные магнитогидродинамические (МГД) и альвеновские. Радиозондирование околосолнечной плазмы сигналами европейского космического аппарата MARS EXPRESS позволило получить информацию о магнитогидродинамических волнах во внутренней гелиосфере.

Космические аппараты (КА) нового поколения, запущенные Европейским космическим агентством в период с 2003 г. по 2005 г., обеспечили существенный прогресс в изучении солнечного ветра методом радиопросвечивания. Начиная с 2001 г., крупномасштабные циклы радиозондирования околосолнечной плазмы выполнялись регулярно с периодичностью 1-2 года. В общей сложности было проведено 9 циклов радиопросвечивания околосолнечной плазмы.

Специфика экспериментов радиозондирования, осуществленных в 2010-2011 гг., заключалась в непрерывном слежении за зондирующими солнечный ветер сигналами КА ROSETTA и MARS EXPRESS в течение длительного промежутка времени с 3 октября 2010 г. по 27 марта 2011 г., т.е. за интервал времени, превышающий 6 периодов вращения Солнца [1].

Основным результатом выполненного исследования является доказательство существования в течение длительного времени (более 5 месяцев) специфической области на Солнце, создающей повышенные флуктуации зондирующих околосолнечную плазму радиоволн как к востоку от центра Солнца, так и к западу от него.

Другим интересным результатом является обнаружение цугов квазипериодических колебаний частоты 5-минутного диапазона, наблюдавшихся при возмущенных условиях в околосолнечной плазме.

Рис. 2.8. дает информацию об основных характеристиках такого рода колебаний:

– количество колебаний в одном цуге 3-4;

– период колебаний  $T$  изменяется от 285 до 356 сек (среднее значение  $\langle T \rangle = 311$  с = 5.2 минут).

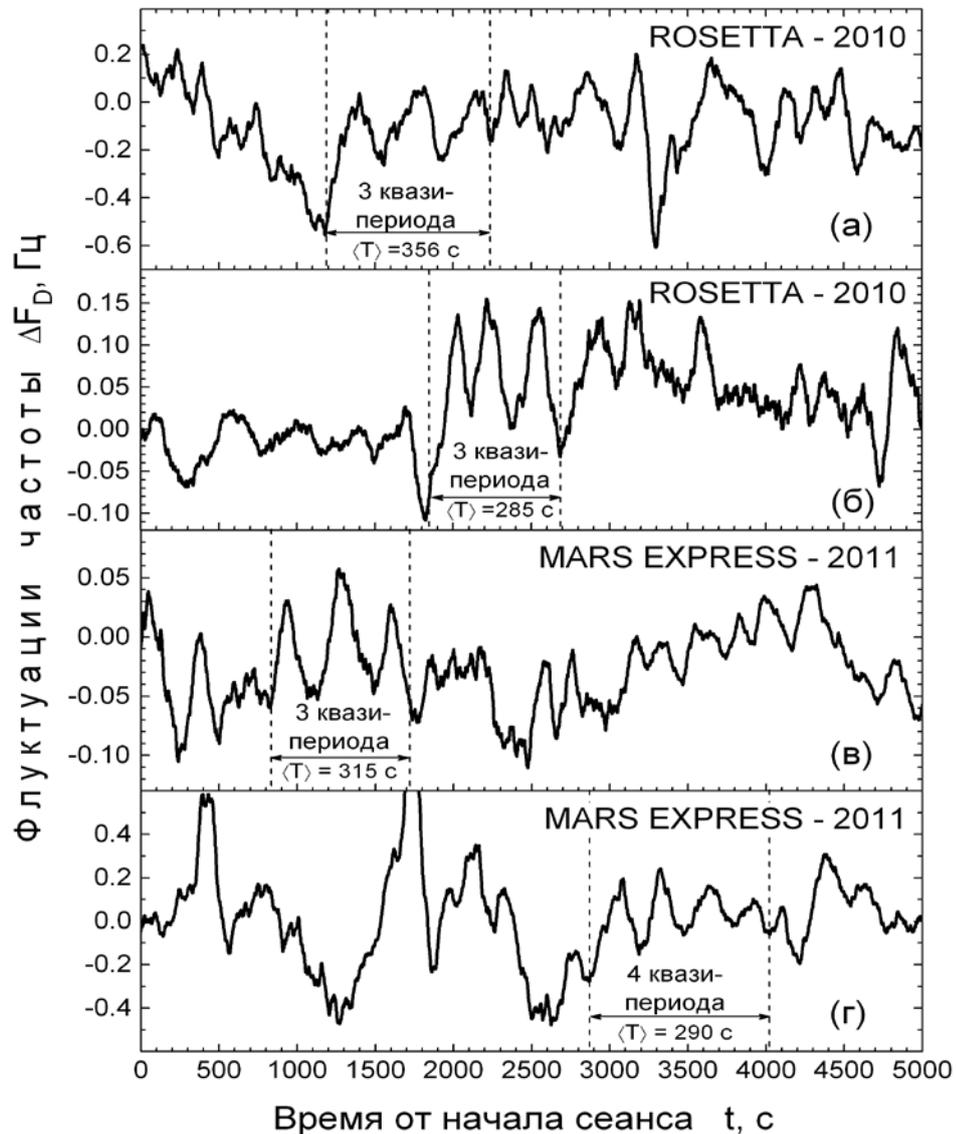


Рис. 2.8 – Квазипериодические флуктуации частоты 5-минутного диапазона, наблюдавшиеся при возмущенных условиях в околосолнечной плазме.

(а) – *Rosetta*, 11.10.2010 г.,  $R=13.53R_S$ , восточный лимб;

(б) – *Rosetta*, 24.10.2010 г.,  $R=21.88R_S$ , западный лимб;

(в) – *Mars Express*, 31.12.2010 г.,  $R=30.78R_S$ , восточный лимб;

(г) – *Mars Express*, 09.03.2011 г.,  $R=26.4R_S$ , западный лимб.

Подобные исследования квазипериодических вариаций частоты зондирующих солнечный ветер сигналов регулярно проводились и ранее с использованием не только космического аппарата MARS EXPRESS, но также при реализации проектов VENUS EXPRESS (спутник Венеры) и ROSETTA (кометный зонд). Результаты исследований опубликованы в обзорной статье [2].

#### **Руководители проекта:**

д.т.н. Яковлев Олег Изосимович, ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
[oiy117@ire216.msk.su](mailto:oiy117@ire216.msk.su)

к.т.н. Ефимов Анатолий Иванович, ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН,  
[efimov@ms.ire.rssi.ru](mailto:efimov@ms.ire.rssi.ru) )

#### **Публикации:**

1. Ефимов А.И., Луканина Л.А., Самознаев Л.Н., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М. Наблюдения коротящих структур солнечного ветра при радиозондировании сигналами космических аппаратов *ROSETTA* и *MARS EXPRESS* // Космические Исследования. 2016. Т. 54. № 3. С. 195-203. ISSN 0023-4206 DOI 10.7868/S0023420616010076.

<http://www.adobe.com/products/acrobat/readstep2.html>

2. M. Pätzold, B.Häusler, G.L.Tyler, T.Andert, S.W.Asmar, M.K.Bird, V.Dehint, D.P.Hinson, P.Rosenblatt, R.A.Simpson, S.Tellmann, P.Withers, M.Beuthe, A.I.Efimov, M.Hahn a, D.Kahan, S.LeMaistre, J.Oschlisniok, K.Peter, S.Remus. Mars Express 10 years at Mars: Observations by the Mars Express Radio Science Experiment (MaRS) // Planetary and Space Science. 2016. V. 127. P. 44-90.

[http://ac.els-cdn.com/S0032063316000489/1-s2.0-S0032063316000489-main.pdf?tid=bc8ca856-693e-11e6-a8df-00000aab0f26&acdnat=1471963065\\_ea4f1b3e9d48fd35ab73421037d56868](http://ac.els-cdn.com/S0032063316000489/1-s2.0-S0032063316000489-main.pdf?tid=bc8ca856-693e-11e6-a8df-00000aab0f26&acdnat=1471963065_ea4f1b3e9d48fd35ab73421037d56868)

#### **Проект 2.6 Исследование пространственного и энергетического распределения межзвездного водорода в солнечном ветре**

##### **Аннотация.**

Проведена калибровка и первичный анализ данных MAVEN/IUVS по спектрам рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения в гелиосфере.

Одним из наиболее эффективных способов диагностики энергетического распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере является измерение спектров рассеянного на атомах солнечного Лайман-альфа излучения. Спектральные характеристики (доплеровский сдвиг и ширина линии) напрямую зависят от скорости и температуры рассеивающих атомов водорода. Ранее спектры рассеянного в гелиосфере Лаймана-альфа излучения напрямую измерялись только на Hubble Space Telescope (приборы GHRS и STIS), и это были единичные измерения в одном направлении. В 2016 г. появились первые результаты измерений спектров на аппарате MAVEN (прибор IUVS) с использованием дифракционной решетки. Измерения проводились с декабря 2013 г. по июнь 2014 г. во время движения аппарата к Марсу, а также начиная с октября 2015 г. на орбите Марса. На рис. 2.9 представлены примеры спектров рассеянного солнечного Лайман-альфа излучения, полученные для различных лучей зрения.

Рис. 2.9 – Примеры спектров Лайман-альфа излучения, полученные MAVEN/ IUVS-Echelle в 2013-2016 гг. для различных направлений луча зрения. Справа отмечены абсолютные значения интенсивности (в рэляях) для данных направлений, а также расстояние от Солнца до аппарата в момент измерения.

Мы провели первичный анализ полученных спектров с помощью разработанной нами численной модели. А именно, использовалась трехмерная нестационарная кинетическая модель распределения межзвездных атомов водорода в гелиосфере, а также модель переноса излучения с учетом многократного рассеяния. Для проведения калибровки прибора IUVS использовались перекрестные наблюдения с помощью данных SOHO/SWAN (cross-calibration). Были найдены направления луча зрения, для которых

существуют одновременные измерения интенсивности прибором SWAN на аппарате SOHO. Затем с помощью нашей модели были вычислены коррекционные множители интенсивности, связанные с различием положений аппаратов SOHO и MAVEN в момент измерения. Таким образом, были найдены абсолютные значения интенсивностей, соответствующих данным IUVS. Этот алгоритм был применен для нескольких измерений, в результате чего определен стабильный калибровочный фактор прибора. Кроме того, мы провели сравнение полученных спектров с результатами численного моделирования. Показано, что модель дает отличное совпадение с данными по величине доплеровского сдвига (первый момент спектра), который связан со средней скоростью атомов водорода в гелиосфере. В то же время, модель предсказывает систематически заниженную ширину линии (второй момент спектра) по сравнению с данными наблюдений. Это может быть связано с техническими особенностями прибора и требует уточнения используемой приборной функции чувствительности (Line Spread Function).

#### **Руководитель проекта:**

Измоденов Владислав Валерьевич, ИКИ РАН, [izmod@iki.rssi.ru](mailto:izmod@iki.rssi.ru)

#### **Публикации:**

1. Mauryasi M., Clarke J., McClintock B., Stewart I., Holsclaw G., Deighan J., Schneider N., Jakosky B., Bhattacharyya D., Quemerais E., **Katushkina O.**, Chaufray J.-., Bertaux J.-L., and the IUVS Team, IUVS Echelle/Mode Observations of Interplanetary Hydrogen: Standard for Calibration and Reference for Cavity Variations between Earth and Mars during MAVEN Cruise, *Journal of Geophys. Res.*, in press.
2. **Katushkina, O. A.**, Quémerais, E., **Izmodenov, V. V.**, **Alexashov, D. B.**, Sandel, B. R., Remote diagnostic of the hydrogen wall through measurements of the backscattered solar Lyman alpha radiation by Voyager 1/UVS in 1993-2003, *J. of Geophys. Res.*, Volume 121, Issue 1, pp. 93-102, 2016.

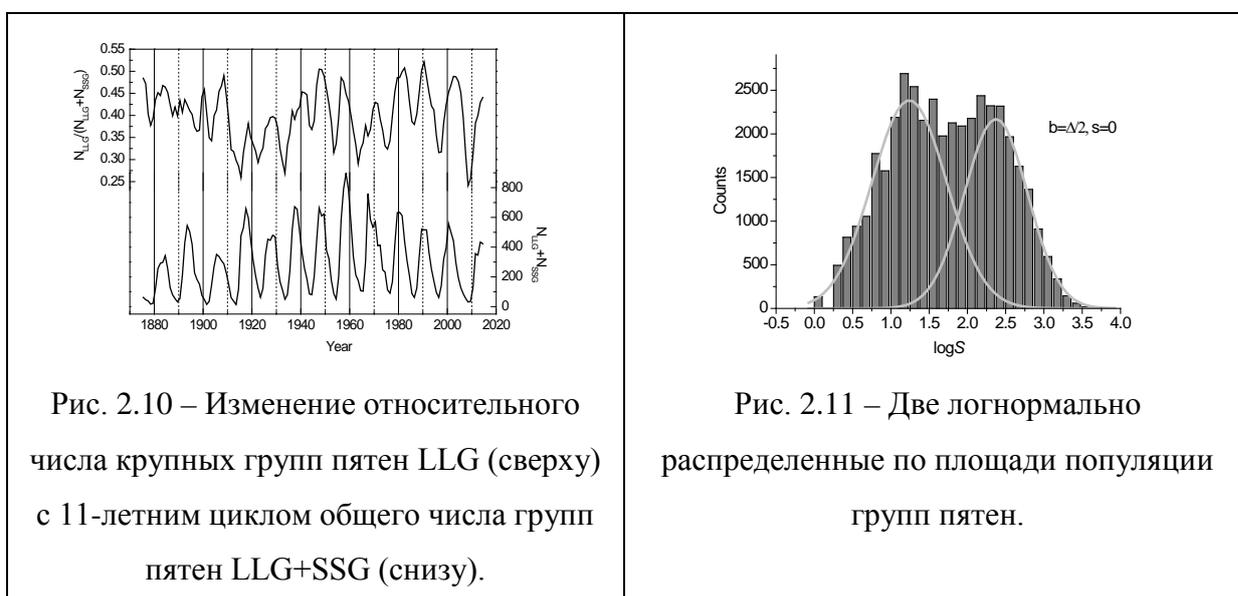
## Проект 2.9 Средние физические характеристики пятен в изменениях солнечной активности

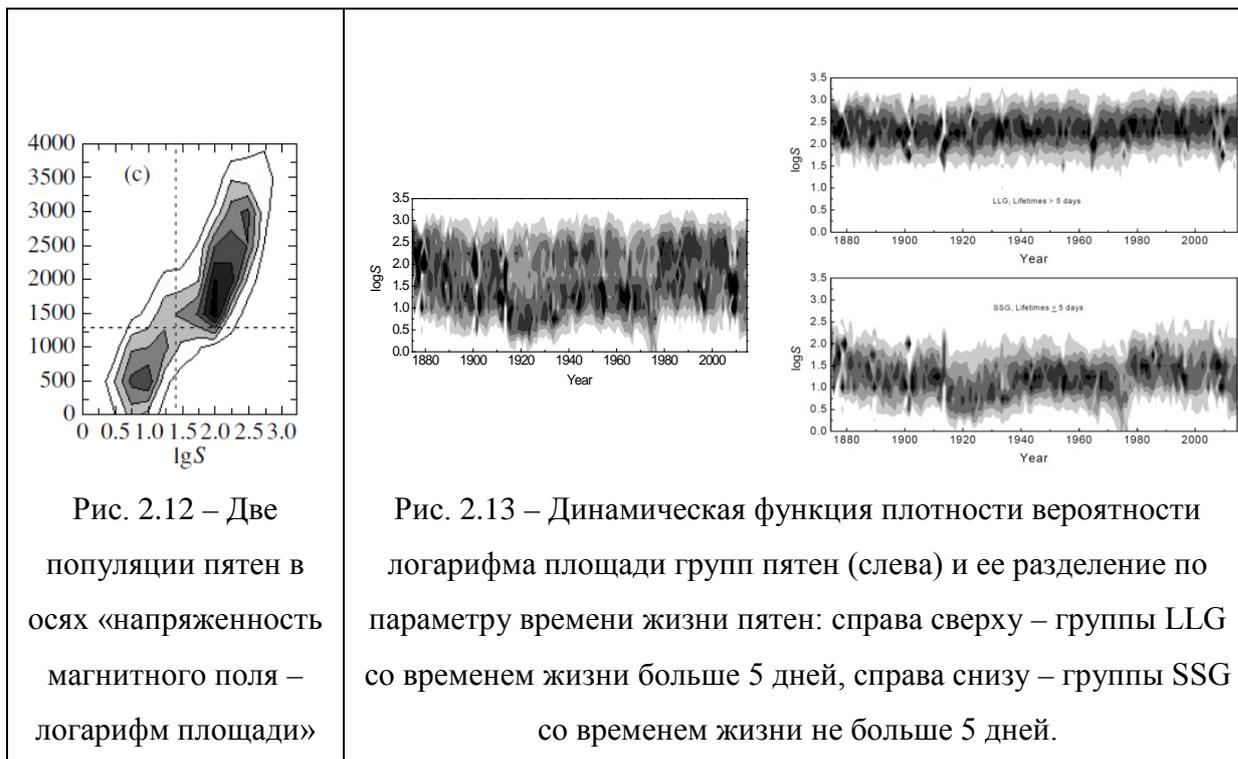
### Аннотация.

Две популяции групп солнечных пятен (цикл работ).

Показано, что группы солнечных пятен образуют две физически разные популяции, различающиеся по свойствам: площади, времени жизни, магнитным полям основных пятен и магнитному потоку. Это свидетельствует в пользу действия на Солнце пространственно-распределенного динамо с двумя областями генерации: глубинной – тахоклином и приповерхностной – лептоклином.

В работах [1, 3, 4] было показано, что *средние* магнитные поля пятен изменяются с 11-летним циклом, что поставило под сомнение результат Ливингстона и Пена о вековом падении этой характеристики. В [2, 5, 6-8], с другой стороны, было показано, что пятна образуют две отдельные популяции: крупные с сильными магнитными полями и мелкие – со слабыми, так что результаты [1, 3, 4] можно объяснить относительным изменением вклада крупных пятен с циклом [9] – рис. 2.10. Крупным и мелким пятнам (и их группам LLG и SSG) соответствуют два различных логнормальных распределения площадей (рис. 2.11) и два различных нормальных распределения напряженностей магнитных полей [7,8] – см. двумерную гистограмму на рис. 2.12. Группы пятен разделяются по параметру времени жизни (короче и дольше 5 дней) [9] – рис. 2.13. Все это свидетельствует в пользу действия на Солнце пространственно-распределенного динамо, так что двум популяциям соответствуют две области генерации: глубинная – тахоклин и приповерхностная – лептоклин.





Результаты докладывались на 6 конференциях в РФ, а также в США, Бельгии, Швейцарии, Финляндии и Португалии.

#### Руководители проекта:

Ю.А.Наговицын, А.Г.Тлатов. ГАО РАН. [nag@gao.spb.ru](mailto:nag@gao.spb.ru)

#### Литература:

1. Pevtsov A.A., Nagovitsyn Y.A., Tlatov A.G., and Rybak A.L., Long-term trends in sunspot magnetic fields. // **The Astrophysical Journal Letters**, 742:L36, 2011.
2. Nagovitsyn, Yury A.; Pevtsov, Alexei A.; Livingston, William C. On a Possible Explanation of the Long-term Decrease in Sunspot Field Strength // **The Astrophysical Journal Letters**, Volume 758: L20, 5 pp. (2012).
3. Georgieva, K.; Kirov, B.; Nagovitsyn, Yu. A. Long-term variations of solar magnetic fields derived from geomagnetic data // **Geomagnetism and Aeronomy**, Volume 53, Issue 7, pp.852-856, 2013.
4. Pevtsov Alexei A., Bertello Luca, Tlatov Andrey G., Kilcik Ali, Nagovitsyn Yury A., Cliver Edward W. Cyclic and Long-term Variation of Sunspot Magnetic Fields // **Solar Physics**, Volume 289, Issue 2, pp.593-602, 2014.
5. Tlatov, Andrey G.; Pevtsov, Alexei A. Bimodal Distribution of Magnetic Fields and Areas of Sunspots // **Solar Physics**, Volume 289, Issue 4, pp.1143-1152, 2014

6. Muñoz-Jaramillo, Andrés; Senkpeil, Ryan R.; Windmueller, John C.; Amouzou, Ernest C.; Longcope, Dana W.; Tlatov, Andrey G.; Nagovitsyn, Yury A.; Pevtsov, Alexei A.; et al. Sunspot Groups, and Sunspots: A Multi-database Study // **The Astrophysical Journal**, Volume 800, Issue 1, article id. 48, 19 pp. (2015).

#### **Публикации 2016 г.**

7. Наговицын Ю. А., Певцов А. А., Осипова А. А., Тлатов А. Г., Милецкий Е. В., Наговицына Е. Ю. Две популяции солнечных пятен и вековые изменения их характеристик // **Письма в Астрон. журн.** том 42, №10, с. 773–782, 2016.

8. Nagovitsyn, Yury A.; Pevtsov, Alexei A.; Osipova, Aleksandra A. Long-term variations in sunspot magnetic field – area relation // accepted for publication in **Astron. Nachrichten** (arXiv:1608.01132).

9. Nagovitsyn, Yury A.; Pevtsov, Alexei A.; On the presence of two populations of sunspots // [accepted](#) for publication in **The Astrophysical Journal**.

#### **Проект 2.10 Исследования процессов ускорения ионов и электронов в солнечных вспышках по результатам измерений рентгеновского и гамма– излучения в российско-американском эксперименте КОНУС-ВИНД и в экспериментах ГЕЛИКОН и ИРИС на солнечной обсерватории КОРОНАС-Ф»**

##### **Аннотации:**

**2.10.1.** Использованы данные Конус-Винд в жестком рентгеновском диапазоне при анализе солнечной вспышки 10 марта 2002 г. с относительно низкой интенсивностью в мягком рентгеновском излучении. Такие вспышки названы “холодными”. В результате моделирования было установлено, что низкий поток в мягком рентгеновском излучении, возможно, связан с конфигурацией магнитного поля – наличием соседствующих малой и большой вспышечной петель.

**2.10.2.** Исследованы спектральные и пространственные характеристики квазипериодических пульсаций во вспышке 18 августа 2012 г. с использованием данных ССРТ и Конуса – Винд. Последовательность импульсов с периодом примерно 10 секунд в течение минуты наблюдалась в жестком рентгене и в микроволнах. Квазипериодические пульсации предположительно возникли из-за модулированных процессов ускорения в области выделения энергии.

**2.10.3.** Проведено восстановление энергетических распределений электронов, ускоренных во время солнечной вспышки 15 апреля 2002 г., на основе данных рентгеновского спектрометра ИРИС на спутнике КОРОНАС-Ф. Использование метода решения обратной задачи реконструкции позволило выявить особенность в спектре электронов, связанную с наличием локального минимума в области энергий 40–60 кэВ, которая не может быть выявлена прямым методом.

**2.10.4.** Исследовано влияние процесса рассеяния ускоренных электронов на магнитных неоднородностях и ионно-звуковой моде в плазме вспышечных петель. Для выбранных уровней плотности энергии турбулентности в случае магнитных флуктуаций  $\delta B/B = 10^{-3}$ , и в случае ионного звука  $W^s / nk_B T_e = 10^{-3}$  показано, что при инжекции в петлю изотропного распределения электронов оба типа турбулентности приводят к качественному изменению распределения жесткого рентгеновского излучения вдоль петли. Причем, действие этих типов турбулентности оказывается различным. В случае же анизотропного источника электронов рассеяние на магнитных флуктуациях приводит к качественно иному распределению яркости рентгеновского излучения вдоль петли в сравнении с предыдущим случаем. Различное влияние обоих типов турбулентности также сказывается и на спектре излучения. Всё это вместе позволяет накладывать ограничения на питч-угловую функцию распределения источника электронов при моделировании вспышечного события.

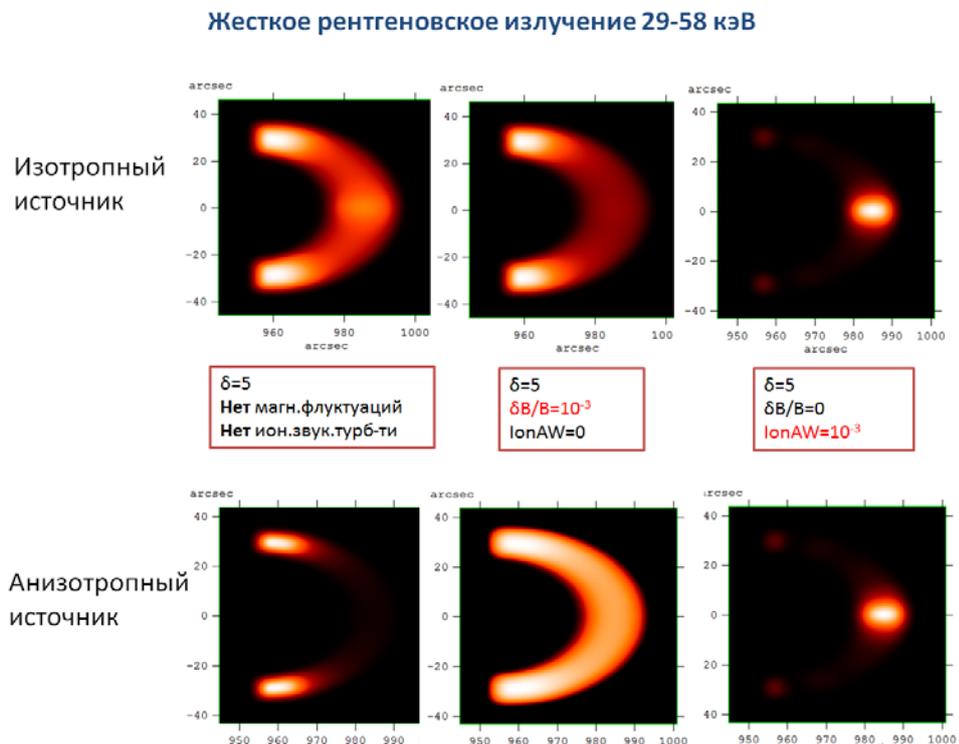


Рис. 2.14 – к пункту 2.10.4.

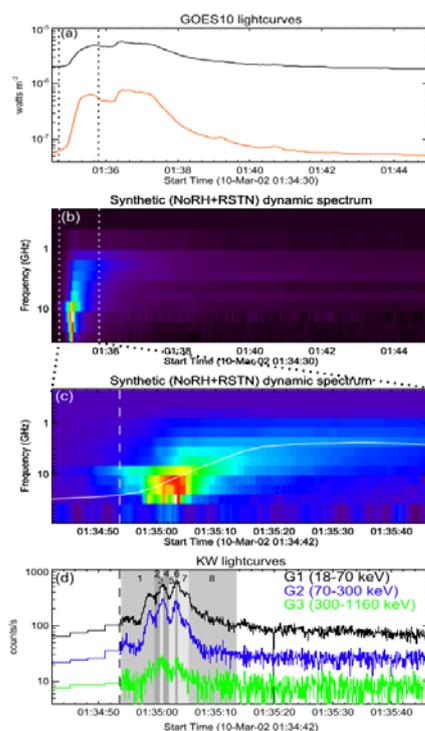


Рис. 2.15 – К пункту 2.10.1 (на первой панели отметим очень низкие значения потока мягкого рентгеновского излучения, а жесткого – нижняя панель, достаточно большие) – признаки “холодных” вспышек.

#### Руководитель проекта:

Чариков Юрий Евгеньевич, ФТИ им. Иоффе, [Yu.Charikov@mail.ioffe.ru](mailto:Yu.Charikov@mail.ioffe.ru)

#### Публикации:

1. Gregory D. Fleishman, Valentin D. Pal'shin, Natalia Meshalkina, Alexandra L. Lysenko, Larisa K. Kasharova, and Alexander T. Altyntsev, A Cold Flare with Delayed Heating/ The Astrophysical Journal, Volume 822, Issue 2, article id. 71, 2016
  - 2 A. Altyntsev, N. Meshalkina, H. Mészárosová, M. Karlický, V. Palshin, S. Lesovoi, Sources of Quasi-periodic Pulses in the Flare of 18 August 2012 / Solar Physics, Volume 291, Issue 2, pp.445-463
  3. Г.Г.Моторина, И.В.Кудрявцев, В.П. Лазутков, М.И.Савченко, Д.В.Скородумов, Ю.Е.Чариков, Реконструкция энергетического спектра электронов, ускоренных во время солнечной вспышки 15 апреля 2002 года, на основе измерений рентгеновским спектрометром ИРИС, ЖТФ, 2016, Т.86, Вып. 4, С. 47-52.
  4. Yu. E. Charikov, A. N. Shabalin, Hard X-Ray Generation in the Turbulent Plasma of Solar Flares/ Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 56, No. 8, 2016
- Представлено 11 докладов на международных и российских конференциях,

**Проект 2.11 Выявление вклада естественных и антропогенных факторов в изменения глобального климата Земли, оценка возможных климатических последствий различных солнечно-космических явлений и разработка сценариев возможной эволюции климата Земли в 21-м веке на основе анализа инструментальных, исторических и палеоданных об изменении ряда природных характеристик**

**Аннотация.**

Выявлен вклад солнечной активности в вариации температуры высокоширотной части Северного полушария Земли на вековой временной шкале.

**2.11.1.** Исследованы пять реконструкций температуры средних и высоких широт Северной Америки ( $\varphi > 50^\circ$ ), которые были получены с помощью данных по кольцам деревьев и ленточным глинам и охватывают последние 3-5 веков. Было показано, что реконструкции температуры канадских Скалистых гор ( $52.15^\circ \text{ N}$ ,  $117.15^\circ \text{ W}$ ) и северо-восточной Аляски ( $68.8^\circ \text{ N}$ ,  $142.3^\circ \text{ W}$ ) заметно коррелируют с числами Вольфа и концентрацией  $^{10}\text{Be}$  на длительных ( $T > 13$  лет) временных шкалах. Эта корреляция слабее для реконструкции температуры северо-восточной Канады ( $68.25^\circ \text{ N}$ ,  $133.33^\circ \text{ W}$ ). Температура Баффиновой Земли ( $66.6^\circ \text{ N}$ ,  $61.3^\circ \text{ W}$ ) и залива Аляска ( $49\text{--}62^\circ \text{ N}$ ,  $123\text{--}145^\circ \text{ W}$ ) не коррелирует с солнечной активностью. Полученные результаты указывают на отчётливый региональный характер отклика климата на активность Солнца.

**2.11.2.** Результаты проведенного исследования показали, что в умеренных широтах  $30\text{--}60^\circ\text{N(S)}$  связи, наблюдаемые между аномалиями нижней облачности (LCA) и потоками ГКЛ в 11-летнем солнечном цикле, имеют опосредованный характер и обусловлены влиянием ГКЛ на развитие внетропических барических систем (циклонов и ложбин), формирующих поле облачности. Изменение роли ГКЛ в развитии циклонических процессов и аномалий облачности в начале 2000-х гг. произошло, по всей видимости, вследствие изменения интенсивности стратосферных циркумполярных вихрей, определяющих характер взаимодействия тропосферы и стратосферы. Анализ вариаций скорости западных ветров в высокоширотной стратосфере выявил значительное усиление циркумполярных вихрей северного и южного полушарий в  $\sim 1980\text{--}1990$ -х гг. и их резкое ослабление около 2000-го года. Показано, что высокая корреляция LCA-ГКЛ в обоих полушариях наблюдалась при сильных вихрях, когда увеличение потока ГКЛ сопровождалось интенсификацией циклонических процессов (понижением давления) в

умеренных широтах. Нарушение корреляции между интенсивностью циклогенеза и потоками ГКЛ и, как следствие, между аномалиями облачности и потоками ГКЛ произошло при резком ослаблении циркумполярных вихрей обоих полушарий. Результаты исследования свидетельствуют о важной роли циркумполярного вихря как возможной причины временной изменчивости солнечно-атмосферных связей.

**2.11.3.** Изучалось влияние тонких магнитных структур на само крупномасштабное магнитное поле и особенности прохождения ионами фронта ударной волны. Ионы, испытывающие ускорение Ферми первого рода, рассеиваются на неоднородностях в областях upstream и downstream. Для ионов с высокими энергиями это рассеяние наиболее эффективно происходит на пространственных шкалах, существенно превышающих гирорадиус ионов. Переход из одной области в другую происходит при пересечении фронта ударной волны, при этом на динамические характеристики иона наибольшее влияние оказывает величина изменения крупномасштабного магнитного поля. Показано, что уже при скоростях ионов, превышающих величину скорости потока плазмы в области upstream, умноженную на пять, тонкие пространственные и временные структуры фронта ударной волны оказывают незначительное влияние на зависимость вероятности отражения иона от фронта ударной волны от его питч-угла.

**2.11.4.** Приведены результаты реконструкции гелиосферного модуляционного потенциала с конца 14-го по середину 19-го века. Данный временной интервал включает в себя как минимумы солнечной активности Шперера, Маундера, Дальтона, так и малый ледниковый период. В течение этого периода происходили изменения концентрации углекислого газа в атмосфере и глобальной температуры, которые учитывались при реконструкции модуляционного потенциала. Показано, что игнорирование влияния температуры на скорость перехода радиоуглерода из поверхностного слоя океана в атмосферу Земли будет искажать результаты реконструкции.

**2.11.5.** Квазигармонические компоненты с периодами, близкими к основным современным солнечным циклам, то есть Швабе и Хейл циклы (~11 и 22 года) и цикл Брикнера (~30 лет), и также 7-и 8-летние периоды были выявлены в данных по изменению ширины колец окаменевших деревьев возрастом приблизительно 100-150 миллионов лет, произрастающих в пустыне Гоби (Монголия). Сравнение результатов, полученных в результате обработки изменений в ширине колец окаменевших деревьев и современных деревьев, произрастающих в республике Коми, приводит к выводу, что полный цикл

инверсии полярности магнитного поля Солнца (~22 года) ясно проявляется в настоящее время и 100-150 миллионов лет назад, а инверсия полярности солнечных пятен в цикле Швабе не является столь регулярной.

**Руководитель проекта:**

Дергачев Валентин Андреевич, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе,  
v.dergachev@mail.ioffe.ru

**Публикации:**

1. Ogurtsov, M., Veretenenko, S., Lindholm, M., Jalkanen, R. 2016. Possible solar-climate imprint in temperature proxies from the middle and high latitudes of North America. *Advances in Space Research*. 2016. V. 57, I. 5. P. 1280-1283.
2. Огурцов, М.Г. 2016. Возможный вклад гравитационного влияния Юпитера и Сатурна в 60-летнюю вариацию глобальной температуры. *Геомагнетизм и Аэронаука*. 2016. V. 56 (в печати).
3. Veretenenko S., Ogurtsov M. 2016. Cloud cover anomalies at middle latitudes: Links to troposphere dynamics and solar variability, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2016. V.149. P.207-218. doi:10.1016/j.jastp.2016.04.003.
4. Gedalin M, Dröge W., Kartavykh Y. Y. 2016. Dynamics of high energy ions at a structured collisionless shock front. *The Astrophysical Journal*. 2016, V. 825, P. 149. doi:10.3847/0004-637X/825/2/149.
5. Kudryavtsev, I. V., Dergachev, V. A., Kuleshova, A. I., Nagovitsyn, Yu. A., Ogurtsov, M. G. 2016. Reconstructions of the heliospheric modulation potential and Wolf numbers based on the content of the <sup>14</sup>C isotope in tree rings during the Maunder and Spörer minimums, *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. V. 56. No. 8 (в печати).
6. Dergachev V.A., Tyasto M.I., Dmitriev P.B. 2016. Palaeoclimate and solar activity cyclicity 100–150 million years ago. *Advances in Space Research*. 2016. V. 57. P. 1118–1126.

## Проект 2.12 Исследование ультратонких хромосферных петель и их вспышечной активности

### Тема 2.12.1 Генерация супердрайсеровских электрических полей в солнечной хромосфере

#### Аннотация

Рассмотрена генерация электрического поля на фронте импульса тока, возникающего в корональной магнитной петле в результате развития в ее основаниях магнитной неустойчивости Релея-Тэйлора. При этом за время порядка  $\tau_A \approx l/V_A \approx 5 \div 25$  сек (где  $l = (1 \div 5) \times 10^7$  cm – протяженность по высоте языка плазмы, вторгающегося в магнитную петлю в результате неустойчивости Релея-Тэйлора) возмущение, связанное с натяжением магнитного поля  $B_\phi(r, t)$ , "убегает" из области неустойчивости с альфвеновской скоростью. В результате вдоль магнитной петли начинает распространяться импульс электрического тока  $I_z(z - V_A t)$  с характерным масштабом  $\Delta z \approx l$ , на фронте которого, согласно закону Фарадея, возможна генерация индукционного электрического поля  $E_z$ , направленного вдоль оси магнитной трубки, т.е. способного ускорять частицы. Показано, что в случае слабых токов, когда  $B_\phi^2 / 8\pi \approx (I_z^2 / 2\pi c^2 a^2) \ll p$ , где  $a$  – полутолщина трубки,  $p$  – давление плазмы, продольное электрическое поле не возникает, т.е. импульс тока в этом случае представляет обычную линейную альфвеновскую волну, распространяющуюся вдоль магнитного поля. В случае достаточно больших токов, когда  $B_\phi^2 / 8\pi > p$ , возникает нелинейный режим распространения импульса электрического тока и генерируется относительно большое продольное электрическое поле  $E_z \approx 2I_z^3 V_A / c^4 a^2 B_z^2 l$ , которое в зависимости от величины электрического тока может превышать поле Драйсера.  $E_D = 6 \times 10^{-8} n_e / T$  volt/cm. В этом случае все электроны в области локализации импульса тока будут находиться в режиме убегания и мощность энерговыделения в хромосфере может существенно возрасти. Супердрайсеровские электрические поля необходимы также для инъекции протонов в режим ускорения ленгмюровской турбулентностью, генерируемой быстрыми электронами, возникающими на фронте импульса электрического тока. В условиях солнечной хромосферы электрическое поле на фронте импульса при токах  $I \approx 4 \times 10^{10}$  А начинает превышать поле Драйсера, начиная с высот, для которых  $n < 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>. При меньших значениях тока

супердрейсеровский режим начинает выполняться на более высоких уровнях хромосферы, для которых  $n < 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  (при токах  $I \approx 1.3 \times 10^{10} \text{ A}$ ).

#### **Публикации:**

1. V.V. Zaitsev, A.V. Stepanov and P.V. Kronshtadnov, Generation of Super Dreicer Electric Fields in the Solar Chromosphere, Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 56, No.7, pp903-907, Pleiades Publishing, Ltd., 2016, DOI: 10.1134/S0016793216070197, Impact Factor 0,556
2. Zaitsev, V.V., Kronshtadnov, P.V. & Stepanov, A.V., Rayleigh–Taylor Instability and Excitation of Super-Dreicer Electric Fields in the Solar Chromosphere, Solar Physics, Bibl. Code 2016SoPh.tmp.153Z, 2016, Springer Netherlands, DOI: 10.1007/s11207-016-0983-1, Impact Factor 2,862.

#### **Тема 2.12.2 Механизм накачки корональных магнитных петель энергичными частицами**

##### **Аннотация.**

Предложен механизм накачки корональных магнитных петель энергичными частицами, связанный с колебаниями токонесущей магнитной петли как эквивалентного электрического контура. Собственная частота такого контура зависит от величины постоянной составляющей электрического тока. С колебаниями электрического тока в контуре связаны колебания азимутальной компоненты магнитного поля в магнитной петле. Эти колебания, в свою очередь, приводят к генерации направленного вдоль оси трубки электрического поля, способного ускорять частицы. Показано, что ускоряющие электрические поля в условиях солнечной короны и корон звезд поздних спектральных классов могут быть достаточно большими и даже супердрейсеровскими, что обеспечивает значительные концентрации энергичных частиц и, следовательно, большие значения яркостных температур радиоизлучения при реализации, например, плазменного механизма радиоизлучения.

##### **Руководитель проекта:**

В.В. Зайцев, ИПФ РАН, [za130@appl.sci-nnov.ru](mailto:za130@appl.sci-nnov.ru)

**Публикация:**

В.В.Зайцев, А.В.Степанов, О происхождении интенсивного радиоизлучения коричневых карликов, Известия вузов. Радиофизика, Т.59, № 11, 2016. Импакт Фактор 1,06.

**Проект 2.13 Глобальные комплексы активности и соотношение магнитных полей различных пространственных масштабов****Аннотация**

Данные наблюдений магнитных полей и плазмы солнечного ветра на 1 а.е показывают, что присутствие мелкомасштабных магнитных островов с размерами порядка 0.01 а.е. рядом с гелиосферным токовым слоем или в любой естественной магнитной ловушке, ограниченной сильными токовыми слоями, ассоциируется с нетипичными увеличениями потоков заряженных частиц с энергиями до нескольких МэВ. Нетипичность этого явления заключается в том, что ранее считалось, будто частицы могут ускоряться до таких энергий либо на Солнце во время вспышек, либо на ударной волне выброса корональных масс (также вблизи Солнца), либо на 2-3 а.е. на фронтах ударных волн, сформированных потоками из корональных дыр – т.е. далеко от земной орбиты. В то же время наблюдаются все признаки локального ускорения энергичных частиц, поскольку области, заполненные ускоренными частицами, перемещаются вместе с окружающим солнечным ветром, что отчетливо трассируется несколькими космическими аппаратами. Показано, что частицы приобретают дополнительную энергию благодаря комбинации любого классического механизма (ударные волны, магнитное пересоединение) со стохастическим ускорением в магнитных островах, испытывающих слияние или сжатие [2, 3], а магнитные ловушки усиливают эффект.

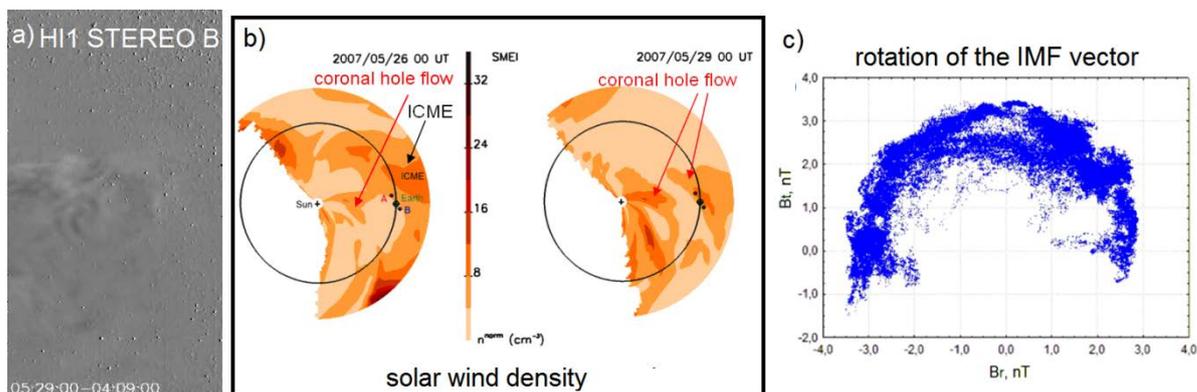


Рис. 2.16 – Условия в межпланетной среде, обусловившие ускорение частиц в магнитной ловушке, наблюдавшейся 27-29 мая 2007 [1]. (а) Разностное изображение вихреобразного образования в межпланетной среде, образованного в результате взаимодействия разноскоростных потоков (данные HI1-STEREO B) (б) Восстановленный профиль плотности солнечного ветра между Солнцем и земной орбитой по данным SMEI, иллюстрирующий образование магнитной полости; (с) годограф магнитного поля на  $\sim 1$  а.е., соответствующий вращению магнитного поля при пересечении магнитной полости, заполненной магнитными островами (8:38-12:18 UT, 28 мая 2007, 1-сек данные).

#### Руководители темы:

Обридко Владимир Нухимович, [obridko@izmiran.ru](mailto:obridko@izmiran.ru);

Кузнецов Владимир Дмитриевич [kvd@izmiran.ru](mailto:kvd@izmiran.ru), ИЗМИРАН.

#### Публикации:

1. Khabarova O.V., G.P. Zank, G. Li, O.E. Malandraki, le Roux J.A., and Webb G.M., Small-scale magnetic islands in the solar wind and their role in particle acceleration. II. Particle energization inside magnetically confined cavities. 2016, The Astrophysical Journal, 827, 122 (21pp), doi:10.3847/0004-637X/827/2/122
2. Zank G. P., P. Hunana, P. Mostafavi, J. A. le Roux, G. M. Webb, O. Khabarova, A. C. Cummings, E. C. Stone and R. B. Decker, Particle acceleration and reconnection in the solar wind. in AIP Conf. Proc. 1720, Solar Wind 14: Proceedings of the Fourteenth International Solar Wind Conference, ed. L. Wang et al. (New York: AIP), 2016, 1720, 070011, <http://dx.doi.org/10.1063/1.4943848>
3. le Roux J. A., G. P. Zank, G. M. Webb, and O. V. Khabarova (2016), Combining diffusive shock acceleration with acceleration by contracting and reconnecting small-scale flux ropes at heliospheric shocks, The Astrophysical Journal, 827, 47 (28pp), doi:10.3847/0004-637X/827/1/47

4. O. G. Badalyan, and V. N. Obridko. North-South asymmetry of the solar activity as a superposition of two realizations -- the sign and absolute value, Astronomy and Astrophysics.(в печати)
5. A.S. Shibalova, V.N. Obridko, D.D. Sokoloff .Intermittency of solar magnetic field and solar magnetic activity cycle, Sol.Phys. (В печати)

## **Проект 2.14 Исследование мелкомасштабных и крупномасштабных структур солнечного ветра**

### **Тема 2.14.1 Связь фазы восстановления магнитной бури с крупномасштабной структурой солнечного ветра**

#### **Аннотация.**

Для периода 1976-2000 гг. проанализированы экспоненциальные времена фазы восстановления для магнитных бурь, генерированных четырьмя крупномасштабными типами солнечного ветра: областями сжатия перед быстрыми потоками солнечного ветра (CIR), межпланетными проявлениями выбросов корональной массы (ICME, включающие MC и Ejecta) и области сжатия перед ICME (Sheath). Результаты статистического анализа показали, что эти времена зависят от типа солнечного ветра и являются функцией скорости нарастания магнитной бури на ее главной фазе. Таким образом, магнитная буря "помнит" о типе межпланетного драйвера на фазе восстановления, т.е. через 0,5 – 1 суток после ее начала.

#### **Руководитель темы:**

Ермолаев Юрий Иванович, ИКИ РАН, [yermol@iki.rssi.ru](mailto:yermol@iki.rssi.ru)

#### **Публикация:**

Ю. И. Ермолаев, И. Г. Лодкина, Н. С. Николаева, М. Ю. Ермолаев

Зависит ли длительность фазы восстановления магнитной бури от скорости развития бури на ее главной фазе? 2. Новый метод, Геомагнетизм и аэрномия, 2016, том 56, № 3, с. 296–301.

## **Тема 2.14.2 «Тень» Меркурия в солнечном ветре не влияет на космическую погоду вблизи Земли**

### **Аннотация.**

Теоретически и наблюдательно показана полная ошибочность представлений о том, что Меркурий в нижней точке соединения с Землей оказывает заметное влияние на плотность и скорость солнечного ветра, тем самым, на космическую погоду в околоземном пространстве. «След» Меркурия здесь практически уже совершенно незаметен на фоне более сильных естественных неоднородностей и флуктуаций в плазме солнечного и гелиосферного происхождения. Этим вкладом, составляющим ничтожные доли процента, можно пренебречь. Для прогнозов он не имеет никакого практического значения. Ошибка в прежних опубликованных работах состояла в некорректном использовании метода наложенных эпох, когда коротирующие потоки и области взаимодействия солнечного происхождения, действительно создающие очень заметные неоднородности порядка десятков и сотен процентов в параметрах движущейся плазмы от Солнца, принимались за «сигнал» от Меркурия в силу близости их периодического появления.

### **Руководитель темы:**

Веселовский Игорь Станиславович, ИКИ РАН, НИИЯФ МГУ, [veselov@dec1.sinp.msu.ru](mailto:veselov@dec1.sinp.msu.ru)

### **Публикация:**

Веселовский И.С., Шугай Ю.С., Об отсутствии статистически значимого влияния Меркурия на скорость солнечного ветра вблизи орбиты земли, 2016 (Veselovskii I.S., Shugai Yu S. On the Lack of Any Statistically Significant Effect of Mercury on the Solar Wind Velocity near the Orbit of the Earth. *Solar System Research*, v.50, № 6, с. 447-450. DOI 10.1134/S003809461606006X)

## **Тема 2.14.3 Сопоставление характеристик мелкомасштабных флуктуаций потока ионов в солнечном ветре и магнитослое**

### **Аннотация.**

Проведено сравнение спектральных и статистических характеристик мелкомасштабных флуктуаций потока ионов в солнечном ветре (СВ) и во фланговом магнитослое (МСЛ) по

данным измерений спектрометра БМСВ (КА СПЕКТР-Р) с временным разрешением в 32 мс. Показано, что спектры флуктуаций в МСЛ подобны спектрам флуктуаций в СВ и также имеют характерный излом при переходе от инерционных масштабов (с наклоном близким к Колмогоровскому) к диссипативным масштабам (где наклон спектра увеличивается почти вдвое). При этом частота излома спектра флуктуаций в солнечном ветре составляет порядка 1-2 Гц, тогда как для магнитослоя излом спектра наблюдается на частотах вдвое меньших. В МСЛ также как и в СВ наблюдается высокий уровень перемежаемости потока ионов. Расширенное самоподобие турбулентного потока ионов является типичным для МСЛ, как это ранее было показано для СВ.

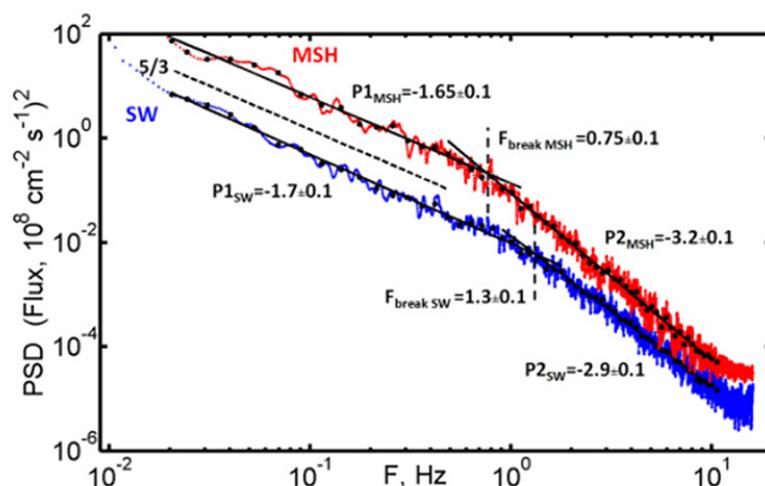


Рис. 2.17 – Сравнение типичных спектров флуктуаций в МСЛ (24 октября 2012, 0841-0858 UT – красные точки) и в СВ (28 сентября 2011, 0903-0920 UT – синие точки).

**Руководитель темы:**

Застенкер Георгий Наумович, ИКИ РАН, gzastenk@iki.rssi.ru

**Публикация:**

Riazantseva, M.O., Budaev, V.P., Rakhmanova, L.S., Zastenker G.N., Safrankova J., Nemecek Z., Prech L., Comparison of properties of small-scale ion flux fluctuations in the flank magnetosheath and in the solar wind. Adv. Space Res. V.58 №2, pp.166-174, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.12.022>,

## **Проект 2.15 Эруптивные явления на Солнце и их роль в формировании космической погоды**

### **Аннотация 2.15.1.**

Впервые обнаружена перестройка системы силовых линий и бессиловых токов вдоль них в области вспышечного энерговыделения. Этот эффект получен в результате анализа полного вектора магнитного поля и многоволновых наблюдений вспышки с источником возмущений, направленных вверх и вниз. Таким образом, подтверждена связь всего нестационарного процесса с формированием и выбросом крупномасштабных замагниченных жгутов, по крайней мере, в мощных сигмоидных вспышках.

Изучены данные о вспышке M5.7 10 мая 2012 года в активной области (АО) NOAA 11476. В этом событии впервые наблюдалось всплытие поля в небольшом пятне, одновременно с жёстким рентгеновским всплеском и развитием акустического возмущения (солнцетрясения – sunquake). В области основного энерговыделения возникла структура типа небольшого сигмоида (см. рис. 2.18), но начавшаяся "сигмоидная вспышка" не получила дальнейшего обычного развития. По векторной магнитограмме в 04:12 UT (данные SDO/HMI) в фотосфере были рассчитаны поле и токи на различных высотах в рассматриваемой АО в нелинейном бессиловом приближении (ИСЗФ СО РАН). Оказалось, что в фотосфере абсолютная величина вертикальных токов по обе стороны от нейтральной линии локального магнитного поля увеличилась непосредственно перед импульсом, а затем вернулась к прежнему значению. Ранее такой эффект отмечался Шарыкиным и Косовичевым (*Sharykin, I.N. and Kosovichev, A.G., ApJ, 808(1), id. 72, 9 pp., 2015*) во всей АО. Однако в нашем случае он выявлен вблизи лишь самого сигмоида, т. е. в небольшой области, предположительно отождествляемой с местом первичного импульсного выделения энергии. Обнаруженный нами эффект свидетельствует о том, что сильные токи на низких высотах над линией раздела полярностей трансформируются в токи вдоль системы петель, ориентированных под большими углами к этой нейтральной линии (см. рис. 2.19). Полученные результаты можно считать аргументом в пользу того, что формирование и выброс крупномасштабных замагниченных жгутов в сигмоидных вспышках связаны с влиянием сдвиговых движений в фотосфере и выносом спиральности в магнитной трубке с дальнейшим развитием неустойчивости тороидального плазменного шнура.

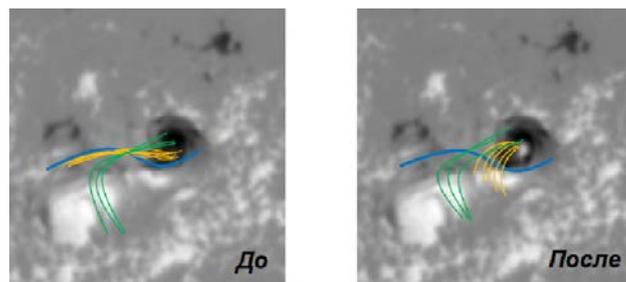


Рис. 2.19

Рис. 2.18

Рис. 2.18 иллюстрирует сгущение силовых линий (и бессиловых токов вдоль них) около центра небольшого сигмоида (темные, самые яркие участки начавшейся импульсной вспышки). На нём показан фрагмент негативного изображения в EUV линии 171 Å (SDO/AIA) 10 мая 2012 г. в 04:12:00 UT. Желтым и синим цветом показаны изолинии радиального компонента положительного и отрицательного магнитного поля с напряженностью в 80%, 60%, 40%, 20%. Зеленым цветом показаны силовые линии над чёрной нейтральной линией и более высокие линии, соединяющие холмы поля противоположного знака. Прямые линии – проекционный куб. Шкалы – расстояние от центра диска в угловых секундах. Рис 2.19 – схематическое изображение низких (жёлтый цвет) и высоких (зелёный цвет) силовых линий над нейтральной линией (синий цвет) на фоне продольного магнитного поля до и после вспышки.

**Руководители темы:**

Фомичев Валерий Викторович, ИЗМИРАН, [fomichev@izmiran.ru](mailto:fomichev@izmiran.ru),

Белов Анатолий Владимирович, ИЗМИРАН, [belov@izmiran.ru](mailto:belov@izmiran.ru)

**Публикация:**

М.А. Лившиц, И.Ю. Григорьева, И.И. Мышьяков, Г.В. Руденко, «Наблюдательные свидетельства связи всплытия магнитных полей, токов и солнечных вспышек 10 мая 2012 г.», Астрон. Журн., 2016, **93** (10), 907-917.

**Аннотация 2.15.2.**

С помощью наблюдений с разных углов зрения наземными и околоземными телескопами, а также космическими обсерваториями STEREO определено точное положение протуберанцев в пространстве в различные моменты времени во время эрупции. Сопоставлением траекторий эруптивных протуберанцев с формой нейтральных

поверхностей  $B_r = 0$  в короне, рассчитанных в потенциальном приближении по данным фотосферных измерений, показано, что эруптивные протуберанцы на начальных участках траектории движутся вдоль нейтральных поверхностей. Это позволяет определить направление движения последующих корональных выбросов и оценить их геоэффективность.

**Публикация:**

Филиппов Б. П., Начальные траектории эруптивных протуберанцев, Астрон. журн., 93, № 3, 321-330, 2016.

**Аннотация 2.15.3.**

Продолжено развитие нового метода ранней диагностики геоэффективности солнечных эрупций по магнитному потоку диммингов и постэруптивных аркад. Разработана процедура перехода от данных SOHO к данным SDO. Установлено, что при принятых ранее критериях и корректном учёте различий в откликах телескопов крайнего ультрафиолетового диапазона EIT (SOHO) и AIA (SDO) магнитный поток по данным магнитографа MDI на SOHO систематически превышает поток магнитографа HMI на SDO на фактор 1,4. С учётом этих результатов получены преобразованные эмпирические соотношения, позволяющие по эруптивному магнитному потоку, измеряемому на SDO, с заблаговременностью от 1 до 4 суток оценивать основные параметры предстоящих возмущений космической погоды у Земли: интенсивность нерекуррентных геомагнитных бурь (индексы Dst и Ap) и амплитуду Форбуш-понижений, а также времена их начала и пика.

**Публикация:**

Chertok I.M., Abunin A.A., Grechnev, V.V. An Early Diagnostics of the Geoeffectiveness of Solar Eruptions from Photospheric Magnetic Flux Observations: Transition from SOHO to SDO. Solar Phys., (in press).

**Аннотация 2.15.4.**

Выполнено исследование модуляции космических лучей (КЛ), наблюдаемых на Земле и околоземном пространстве во время минимума, роста, максимума и начала спада солнечной активности (СА) в 20-24 циклах СА. Вариации КЛ для 1957-2015 гг. получены на основе информации об интенсивности КЛ, зарегистрированной наземной мировой сетью нейтронных мониторов (>40) и при зондировании стратосферы в трех пунктах.

Анализ выполнен для полученной с помощью метода глобальной съемки амплитуды вариаций КЛ с жесткостью 10 ГВ в следующие эпохи анализируемых циклов: 20-го – 1963-1969 гг.; 21-го– 1976-1982 гг.; 22-го– 1986-1992 гг.; 23-го – 1996-2003 гг и 24-го – 2008-2015гг. Показано: наблюдаемая модуляция КЛ в период 2008-2015 является самой слабой по сравнению с модуляцией КЛ в аналогичные эпохи 20-23 циклов СА. Величина наблюдаемой долговременной вариации составляет для анализируемого периода 11.8% для жёсткости КЛ 10 ГВ; на фоне уменьшения квазиодиннадцатилетних вариаций четко проявляются короткопериодные вариации КЛ (осцилляции, всплески активности); в 24-м цикле снизились не только значения большинства солнечных индексов, но и уменьшилась модуляционная эффективность некоторых из них, например наклона гелиосферного токового слоя и спорадических солнечных факторов (СМЕ). Вместе с этим, модуляционная эффективность корональных дыр близка к прежней; в последнее десятилетие уменьшилось запаздывание вариаций КЛ относительно СА. Это означает уменьшение эффективного размера модулирующей КЛ гелиосферы.

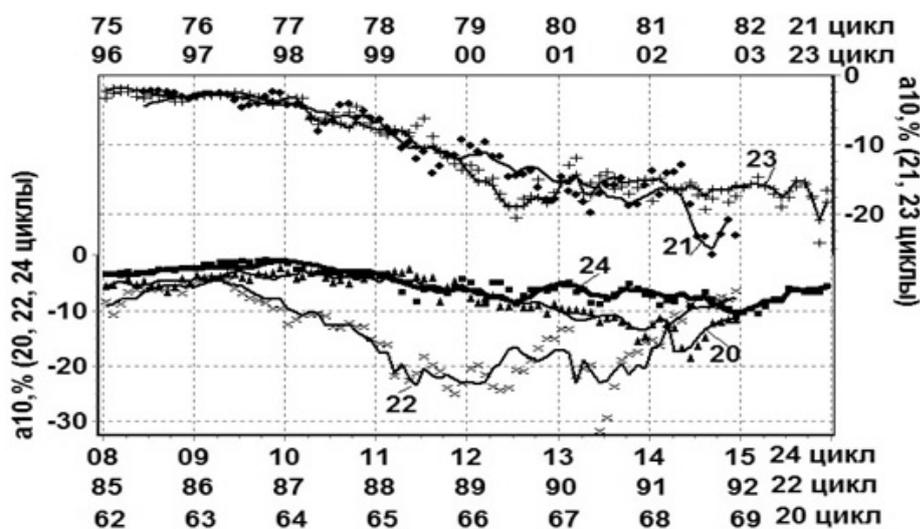


Рис. 2.20 – Наблюдаемые вариации КЛ (треугольники в 20-м, крестики в 22-м, прямоугольники в 24-м циклах – левая шкала и ромбики в 21-м, знак плюс в 23-м циклах – правая шкала) и модельный расчет вариаций в указанные циклы – кривые (относительно 2009 г.).

#### Руководитель темы:

Белов Анатолий Владимирович, ИЗМИРАН, [belov@izmiran.ru](mailto:belov@izmiran.ru)

**Публикация:**

Гущина Р.Т., Белов А.В., Тлатов А.Г., Янке В.Г. “Корональные дыры в долговременной модуляции космических лучей”, Геомagnetизм и Аэрономия, Т.56, N3 с.275–282. 2016. /R. T. Gushchina, A. V. Belov, A. G. Tlatov, and V. G. Yanke Coronal Holes in the Long\_Term Modulation of Cosmic Rays ISSN 0016\_7932, Geomagnetism and Aeronomy, 2016, Vol. 56, No. 3, pp. 257–263. © Pleiades Publishing, Ltd., 2016.

**Проект 2.16. Физические процессы в атмосфере Солнца: плазменные неустойчивости, МГД-волны, нагрев плазмы и электромагнитное излучение****Тема 2.16.1 Звуковые и медленные магнитно-звуковые колебания в стратифицированной солнечной фотосфере: Наблюдения на Hinode и фазовые соотношения****Аннотация.**

Показано, что волноводами для передачи энергии волн из фотосферы в корону могут быть магнитные трубки с поперечным размером порядка 100 км. Наиболее перспективными для нагрева являются торсионные альфвеновские и изгибные колебания магнитных трубок.

На основе линеаризованных МГД-уравнений в приближении тонкой магнитной трубки исследованы фазовые соотношения между возмущениями типа эванесцентных звуковых и медленных магнитозвуковых колебаний с периодами  $\geq 1$  минут, возбуждаемых в фотосфере Солнца. Показано, что разность фаз  $\pm\pi/2$  между скоростью и другими возмущёнными величинами: давлением, плотностью, магнитным полем, температурой, зависит от частоты волн. Эванесцентные волны не могут передавать энергию в верхние слои солнечной атмосферы, но с их помощью можно проводить диагностику плазмы фотосферы и магнитных полей. Найденные фазовые соотношения хорошо согласуются с наблюдениями SOT/Hinode, полученными Fujimura и Tsuneta (2009) при частоте волн  $\omega \approx \omega_c$ , где  $\omega_c$  частота отсечки.

Обсуждена роль различных колебаний, возбужденных в солнечной фотосфере конвективными движениями вещества, в нагреве хромосферы и короны Солнца. Показано, что волноводами для передачи энергии волн в корону могут быть многочисленные магнитные трубки с поперечным размером порядка 100 км. При этом

наиболее перспективными для нагрева являются торсионные Альфвеновские и изгибные колебания магнитных трубок.

**Руководитель темы:**

Степанов Александр Владимирович, ГАО РАН, [stepanov@gao.spb.ru](mailto:stepanov@gao.spb.ru) [astep44@mail.ru](mailto:astep44@mail.ru)

**Состав группы:**

Ю.Т.Цап (ГАО, КрАО) и Ю.Г.Копылова (ГАО).

**Публикация:**

Tsap Y.T., Stepanov A.V., Kopylova Y.G. Acoustic and slow sausage oscillations in the stratified solar photosphere: Hinode observations and phase relationships, 2016, Solar Phys. **291** No 11, pp.3349–3356; DOI: 10.1007/s11207-016-0980-4.

**Тема 2.16.2. Сходство быстро затухающих квазипериодических пульсаций в тепловом излучении солнечных и звездных вспышек**

**Аннотация.**

Анализ теплового рентгеновского излучения в солнечных и звездных вспышках, полученного с помощью орбитальных инструментов RHESSI и XMM-Newton, показал присутствие статистически достоверных квазипериодических пульсаций с периодами от нескольких десятков секунд до нескольких десятков минут на фазе спада вспышек. Применение метода определения эмпирических мод позволило оценить характерные времена затухания данных квазипериодических сигналов. Найдено, что, как в солнечных, так и в звездных вспышках время затухания пульсаций линейно зависит от периода колебаний:

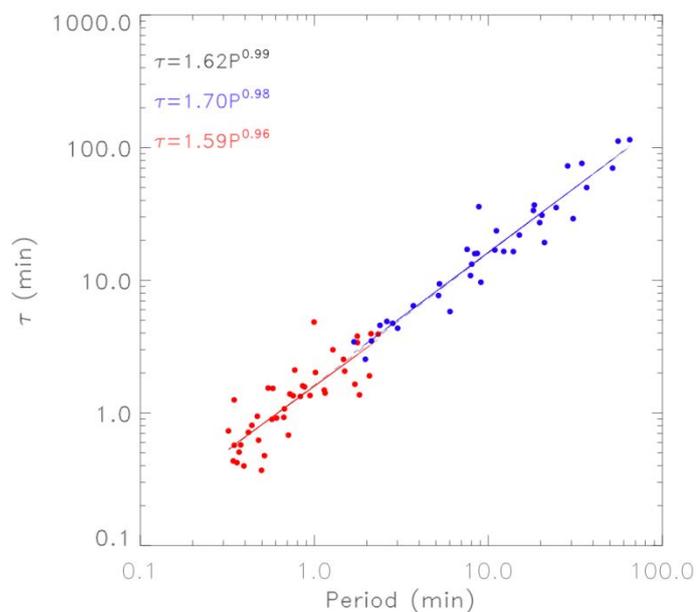


Рис 2.21 – Зависимость времени затухания квазипериодических пульсаций в солнечных (красные точки) и звездных (синие точки) вспышках от их периода.

Очевидное сходство зависимостей найденных в солнечных и звездных вспышках указывает на аналогичность физических процессов, ответственных за энерговыделение на Солнце и звёздах.

**Руководитель темы:**

Степанов Александр Владимирович, ГАО РАН, [stepanov@gao.spb.ru](mailto:stepanov@gao.spb.ru) [astep44@mail.ru](mailto:astep44@mail.ru)

**Состав группы:**

В.М.Накаряков (ГАО РАН).

**Публикация:**

Cho, I.-H., Cho, K.-S., Nakariakov, V. M., Kim, S., Kumar, P., [Comparison of damped oscillations in solar and stellar X-ray flares](#), *Astrophys. J.* **830**, 110, 2016, DOI: 10.3847/0004-637X/830/2/110

### Тема 2.16.3 О происхождении суб-ТГц излучения солнечной вспышки 4 июля 2012 г.

#### Аннотация.

На основе наземных (PT-7.5) и космических (SDO, RHESSI, GOES) наблюдений в суб-терагерцовом (93-140 ГГц), УФ и рентгеновском диапазонах, показано, что растущий с частотой поток миллиметрового излучения вспышки 4 июля 2012 г. вызван оптически толстым тепловым источником, расположенным в переходной области Солнца.

Вплоть до начала 2000-х считалось, что микроволновое (3-300 ГГц) излучение солнечных вспышек является гиротронным и генерируется нетепловыми электронами, захваченными в корональные арки – магнитные ловушки. Однако обнаруженный сравнительно недавно для многих событий рост микроволнового излучения с частотой в диапазоне 200-400 ГГц противоречит этому предположению (Krucker et al. 2013). К настоящему времени, несмотря на множество теоретических моделей (Зайцев и др. 2013), объяснения данного явления не существует.

Проведенное исследование выявило положительный наклон суб-ТГц спектра излучения в диапазоне 93-140 ГГц для солнечной вспышки 4 июля 2012 г. Обнаруженная на радиотелескопе МГТУ им. Э.Н. Баумана PT-7.5 особенность (Smirnova et al. 2013) исследуется на основе данных наблюдений в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, полученных на космических аппаратах SDO/AIA, RHESSI и GOES. По данным о дифференциальной мере эмиссии (SDO/AIA) установлено, что тепловая оптически тонкая плазма с температурой выше 0.5 МК не может быть ответственна за наблюдаемое суб-ТГц излучение. Оценка концентрации нетепловых электронов, полученная в результате фитирования рентгеновских спектров RHESSI и численные расчеты, исключают модель гиротронного излучения с эффектом Разина. Показано, что для события 4 июля 2012 г. положительный наклон спектра в диапазоне 93-140 ГГц может быть вызван оптически толстым излучением плазмы с температурой 0.1 МК (рис 2.21).

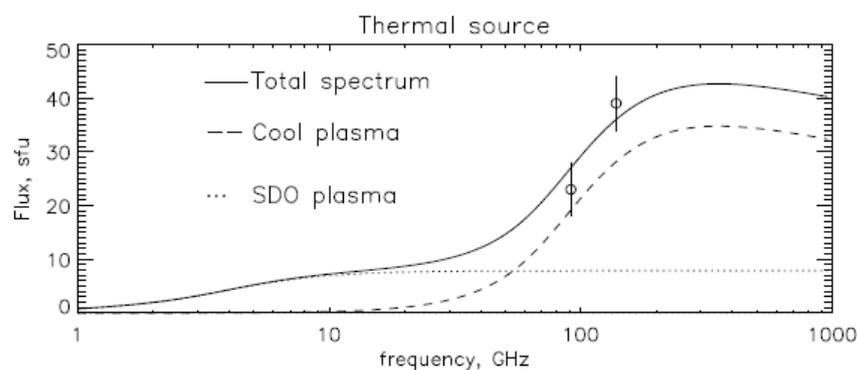


Рис. 2.22 – Суммарный расчетный спектр (сплошная линия) теплового тормозного излучения, включающего вклад корональной плазмы SDO/AIA с температурой 0.5 – 10 МК (пунктирная линия) и плазмы переходной области Солнца: толщина источника  $10^9$  см, характерная температура 0.1 МК и концентрация тепловых электронов  $7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  (штриховая линия). Площади источников излучения в корональной и переходной областях равны  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^2$ .

**Руководитель темы:**

Степанов Александр Владимирович, ГАО РАН, [stepanov@gao.spb.ru](mailto:stepanov@gao.spb.ru) [astep44@mail.ru](mailto:astep44@mail.ru)

**Состав группы:**

Ю.Т. Цап (ГАО, КрАО), В.В. Смирнова (ГАО), Г.Г. Моторина (ГАО).

**Публикация:**

Tsap, Yuriy T.; Smirnova, Victoria V.; Morgachev, Alexander S.; Motorina, Galina G.; Kontar, Eduard P.; Nagnibeda, Valery G.; Strelakova, Polina V. “On the origin of the sub-THz emission from the 4 July 2012 solar flare” // *Advances in Space Research*, 2016, **57**, No 7, pp. 1449-1455.

**Тема 2.16.4 Новые вызовы к "стандартной" модели солнечных вспышек**

**Аннотация.**

Наиболее важные из вызовов: проблема нагрева *in situ* фотосферных и хромосферных оснований магнитных петель до корональных температур и проблема объяснения необычно большого числа ускоренных частиц в солнечных вспышках. Предложены способы решения указанных вызовов – важная роль фотосферной конвекции и электрических токов.

Проблемы «стандартной» модели солнечных вспышек возникли на основе современных наблюдений Солнца с помощью космических аппаратов и наземных телескопов. Наиболее важные из них, это проблема нагрева *in situ* фотосферных и хромосферных оснований магнитных петель до корональных температур без вторжения пучков ускоренных в короне частиц, проблема sunquakes – «солнцетрясений», которые вряд ли могут быть объяснены воздействием частиц высоких энергий на хромосферу и фотосферу, что приводит к всплескам жесткого рентгеновского излучения. Существует также давняя проблема объяснения необычно большого числа ускоренных частиц в солнечных вспышках.

Показано, что современные наземные наблюдения свидетельствуют о важной роли электрических токов во вспышечном энерговыделении в нижних слоях солнечной атмосферы. Предложен механизм ускорения частиц в электрических полях, возникающих в хромосфере из-за магнитной неустойчивости Рэля-Тейлора. Найдено значение электрического тока  $I \geq 10^{10}$  А, необходимое для возбуждения супер-драйсеровских электрических полей в хромосфере. Показано, что джоулева диссипация электрических токов и ускорение частиц в хромосфере могут быть ответственным за нагрев нижних слоёв солнечной атмосферы. Представлена альтернативная модель солнечной вспышки, основанная на аналогии между вспышечной петлей и эквивалентным электрическим контуром, которая является хорошим инструментом диагностики электрических токов. Взаимодействие токнесущей магнитной петли с частично ионизированной плазмой играет заметную роль в проблеме ускорения частиц.

**Руководитель темы:**

Степанов Александр Владимирович, ГАО РАН), [stepanov@gao.spb.ru](mailto:stepanov@gao.spb.ru)

**Публикация:**

A.V. Stepanov, V.V. Zaitsev: The Challenges of the Modern Models of Solar Flares (Вызовы к современным моделям солнечных вспышек) // *Geomagnetism and Aeronomy*, **56**, № 8, С. 952-971 (2016).

## **Проект 2.17 Физика магнитосфер активных областей в переходной области хромосфера-корона и нижней короны Солнца по микроволновым наблюдениям**

### **Тема 2.17.1 Исследование высотной структуры корональных магнитных полей на Солнце**

#### **Аннотация.**

Получены новые данные о тонкой высотной структуре корональных магнитных полей (КМП) в активной области над пятнами с разрешением по солнечной долготе 0.02 градуса и по высоте 0.3-1.0 Мм.

Измерения магнитных полей в короне Солнца методами традиционной спектроскопии трудны ввиду высокой температуры. Методы радиоастрономии решают эту проблему, используя метод стереоскопии, основанный на вращении Солнца, при этом доступно измерение изменения долготы радиоисточника расположенного на некоторой высоте над пятном. Циклотронный механизм прямо связывает магнитное поле и частоту излучения радиоисточника на данной высоте. Стереоскопия на многих частотах дает информацию о высотной структуре магнитного поля над пятном. Высокая позиционная точность и стабильность РАТАН-600 позволяет измерять высотную структуру на уровне до долей угловых секунд, что много выше его пространственного разрешения. Для измерений были применены наблюдения на РАТАН-600 с высоким спектральным разрешением (1%) в широком диапазоне частот 3– 18 ГГц. Методические улучшения повысили точность измерений по долготе Солнца до 0.02 градусов (что составляет 0.3 угл.сек) в центре солнечного диска. Дополнительно, стереоскопические (координатные) измерения были сопоставлены с данными спектров потока поляризованного излучения. Это позволило выявить тонкую спиральную структуру КМП на недостижимых ранее малых пространственных масштабах (до 0,3 Мм) и структуры со значительной неоднородностью расходящиеся с высотой.

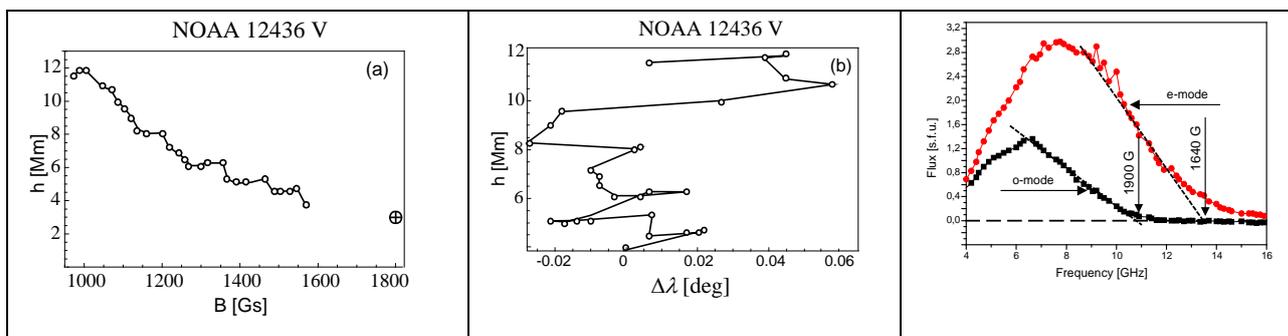


Рис. 2.23– (а) Зависимость параметров коронального магнитного поля  $\mathbf{B}$  от высоты  $h$  для активной области NOAA 12436 (22 октября 2015г.) и (b) зависимость высоты  $h$  от относительной долготы источника  $\Delta\lambda$ . Справа, спектр поляризованного потока АО 12436 для 23 окт. 2015 г. для о-моды и е-моды. Показаны максимальные значения КМП при выходе мод в область корональных температур.

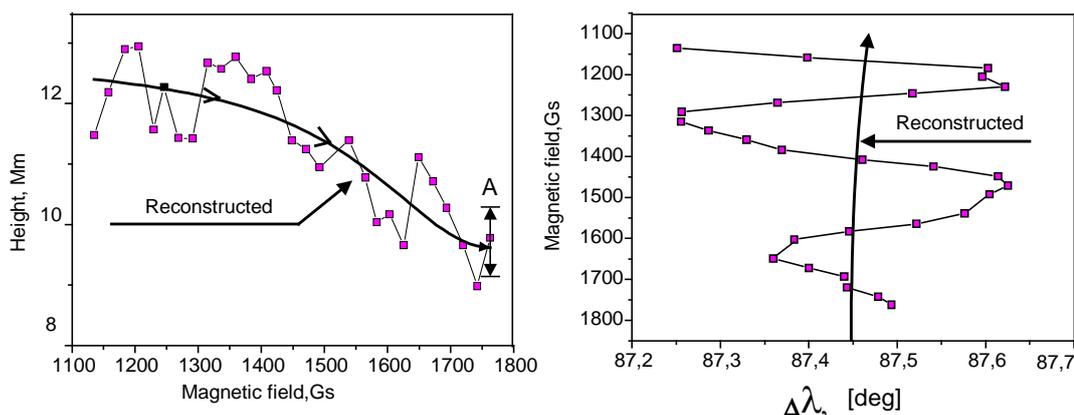


Рис. 2.24 – Пример высотного (слева) и долготного распределения магнитного поля (справа) в АО NOAA 10933 и сопоставление с расчетным распределением (показано сплошной линией). А – оценка ошибки по высоте. Структура КМП представлена расходящейся спиралью.

Мы использовали измерения относительного положения максимума поляризованного излучения радиоисточника с высокой точностью координат на всех частотных каналах с частотным разрешением 1%. Оценка погрешности измерений по высоте составляет около  $\pm 1$  [Мм]. Оценка разрешения по солнечной долготе составляет приблизительно  $\pm 0,02$  [град].

Определено соотношение компонентов структуры КМП на высотах 8-14 Мм для полей 1000 Гс в пределах  $B_\lambda/B_h \approx 0.25 - 0.44$  (здесь  $\lambda$  – долгота). Высокие значения КМП на этих высотах указывают на относительно слабую расходимость напряженности

магнитных трубок, ответственных за основной вклад в радиоизлучение активных областей. Высотно-долготная структура магнитного поля демонстрирует турбулизированный расходящийся с высотой характер коронального магнитного поля над пятном.

**Руководитель темы:**

Богод Владимир Михайлович, СПб Ф САО РАН, [vbog\\_spb@mail.ru](mailto:vbog_spb@mail.ru)

**Публикации:**

1. V.M.Bogod, L.V.Yasnov: Determination of the Structure of the Coronal Magnetic Field Using Microwave Polarization Measurements, *Solar Physics*, 2016, pp 1–12? DOI: 10.1007/s11207-016-0936-8
2. В.М. Богод, Т.И Кальтман, Н.Г. Петерова, Л.В.Яснoв, Исследование магнитосфер активных областей на Солнце методами радиоастрономии, *Космические исследования*, 2017, № 1, стр. 1-12. (в печати)
3. Alexey Stupishin, Vladimir Bogod, Tatyana Kaltman, Leonid Yasnov, “Modeling of solar atmosphere parameters above the active region using RATAN-600 radiotelescope observation”, Programme and abstracts of CESRA 2016: Solar Radio Physics from the Chromosphere to Near Earth 13-17 June 2016, Orléans (France), electronic issue, p. 100.
4. L. V. Yasnov, A. A. Gofman, A. G. Stupishin On the Spectrum and Generation Regions of Solar Microbursts in the Decimeter Wave Band, *Solar Physics*, August 2016, Volume 291, Issue 6, pp 1819-1828, <http://link.springer.com/article/10.1007/s11207-016-0932-z>
5. Богод В.М., Гофман А.А., Яснoв Л.В., Ступишина О.М. о спектрах и физических условиях в областях генерации микровсплесков в дециметровом диапазоне длин волн, *Астрофизический бюллетень (САО)* 2017, № 1 (в печати).
6. В.М. Богод, Н. Г. Петерова, Б. И. Рябов, Н. А. Топчило, О регистрации излучения пониженной яркости в области сильного магнитного поля солнечных пятен, *Космические исследования*, 2015, т. 53, № 1, стр. 1.
7. L. V. Yasnov, M. Karlický Regions of Generation and Optical Thicknesses of dm-Zebra Lines. *Solar Physics*, 2015, Volume 290, Issue 7, pp.2001-2012 doi: 10.1007/s11207-015-0721-0

## **Проект 2.18 Ускорение заряженных частиц, нагрев плазмы в нестационарных процессах на Солнце и новые физические модели активных образований**

### **Аннотация.**

Разработаны качественно новые модели солнечных протуберанцев с винтовой структурой магнитного поля и уединенных 3D-корональных петель.

В последние годы активно развивается такое направление солнечной физики, как локальная гелиосейсмология. Речь идет о сейсмологии солнечных пятен, протуберанцев, хромосферных волокон и корональных петель. Однако сама постановка некорректной в математическом смысле сейсмологической задачи предполагает, что у нас имеется некоторая физическая модель объекта, свойства которой предполагается уточнить по спектру наблюдаемых колебаний этого объекта. Таким образом, при изучении физических свойств активных солнечных образований на первый план выходит разработка достаточно адекватных их природе теоретических моделей.

В последний год мы активно занимались разработкой новых моделей солнечных протуберанцев с винтовой структурой их магнитного поля и апробацией этих моделей на обширном наблюдательном материале, получаемом как с наземных телескопов (сеть GONG), так и с космических обсерваторий (SOHO, SDO) в оптическом и УФ диапазонах. Представлено новое точное аналитическое решение магнитогидростатической задачи, описывающее равновесное удержание уединенного плотного, холодного солнечного волокна в однородном поле тяжести магнитными силами в короне на высотах до 20-40 Мм. Волокно предполагается однородным в длину (трансляционная симметрия). Магнитное поле волокна имеет винтовую структуру (магнитный жгут) с напряженностью поля в несколько гаусс на указанных выше высотах, где температура плазмы в волокне составляет около 4000 К (см. рисунок 2.25). Модель может описывать протуберанцы, как нормальной, так и инверсной полярности.

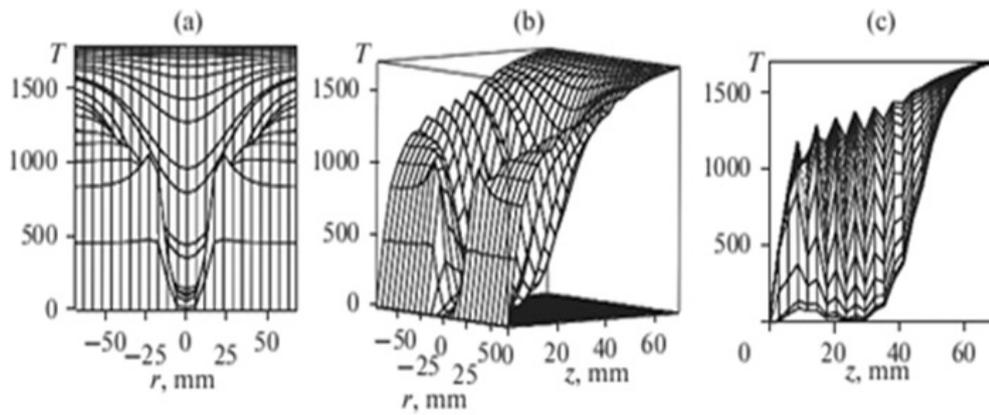


Рис. 2.25 – Поперечный профиль температуры протуберанца, выраженной в тысячах Кельвин. Все размеры даны в тысячах км (Мм). Отчетливо видна тонкая структура протуберанца, минимальная температура (около 4000К) достигается на высоте 20-30 Мм. Solov'ev, A.A., Korolkova O.A., Kirichek E.A.: Model of Quiescent Prominence with the Helical Magnetic Field. (Geomagnet. and Aeronomy, 2016, Vol. 56, No. 8, pp. 45–51.

Б. Ультра низкочастотные колебания хромосферного волокна по данным сети GONG  
 Данные наземной сети телескопов Global Oscillation Network Group (GONG), полученные в линии Н-альфа, дали возможность выявить долгопериодические колебания хромосферных волокон (спокойных протуберанцев). Впервые на основе временного ряда длительностью 5 дней, скомбинированного по данным трех обсерваторий сети GONG, в очень длинном и долгоживущем на диске хромосферном волокне (состоявшем из трех отдельных частей) выявлены низкочастотные моды колебаний с периодами 20 и 30 часов.

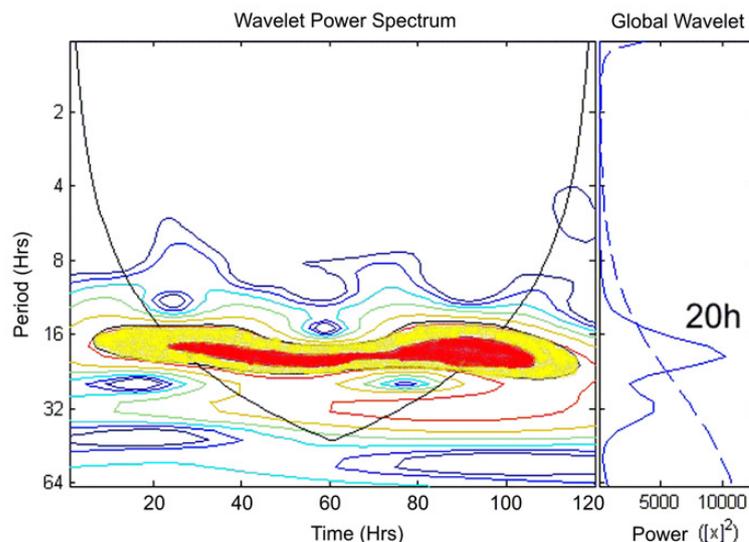


Рис. 2.26 – Пример вайвлет-анализа для одной из трех частей волокна. Доминирующей модой является колебание с периодом 20 часов.

## Публикации:

1. Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A. Ultra low-frequency oscillations of a solar filament in H $\alpha$  revealed with the data of the Global Oscillation Network Group (GONG). *Solar Physics*. First on line (2016). DOI: 10.1007/S 11207-016-1021-2.
2. Efremov V.I., Solov'ev A.A., Parfinenko L.D., Riechokainen, A., Smirnova, V.V., Varun, N., Bakunina, I.A., Kirichek, E.A., Zhivanovich, I. Long-term oscillations of sunspots and a special class of artifacts in SOHO/MDI and SDO/HMI data. *Solar Physics*. Принята к печати (2016).
3. Efremov V.I., Parfinenko L.D., Solov'ev A.A., Riechokainen A. Long-term oscillations of sunspot magnetic field on synchronous observations of GONG and MDI/SOHO. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol.56, №7, pp. 897-902. 2016.
4. Solov'ev, A.A., Korol'kova, O.A. Kirichek, E.A. Model of quiescent prominence with the helical magnetic field. *Geomagnetism and Aeronomy*, vol.56, №8, pp.1090-1094. 2016.
5. Соловьев А. 3-D модель уединенной корональной петли. Труды Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика» С-Пб, Пулковое, 10-15 октября 2016. С. 295-300.
6. В.И. Ефремов, Л. Д. Парфиненко, А.А.Соловьев, А. Риехокайнен. Низкочастотные колебания магнитного поля солнечных пятен по данным SDO. Труды Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика». С-Пб, Пулковое, 10-15 октября 2016. С.105-108.
7. Королькова, О.А. ,Соловьев, А.А. Моделирование тонкой структуры спокойных солнечных протуберанцев. Труды Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика» С-Пб, Пулковое, 10-15 октября 2016. С. 163-166.
8. Королькова, О.А., Соловьев, А.А. Протуберанец как скрученное волокно на подложке. Труды Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика». С-Пб, Пулковое, 10-15 октября 2016. С.167-170.
9. Живанович И., Риехокайнен А., Ефремов В. И., Соловьев А. А. Дифференциальное вращение Солнца по данным SDO. Труды Всероссийской конференции «Солнечная и солнечно-земная физика» С-Пб, Пулковое, 10-15 октября 2016. С.109-112.
10. Strekalova P.V., Nagovitsyn Y.A., Riechokainen A, Smirnova V.V. Long quasi-periodic variations of the magnetic field of solar small-scale magnetic structures // *Geomagnetism & Aeronomy*. 2016. V. 56. №8, pp. 1052-1059, doi: 10.1134/S0016793216080211.

## Тема 2.18.2 МГД-взаимодействие солнечного вращательного разрыва с фронтом головной ударной волны в солнечном ветре перед планетарной магнитосферой

### Аннотация

Известно наличие множества волн Альфвена в солнечном ветре. Эти волны в силу нелинейных процессов могут создавать вращательные разрывы (ВР), способствующие возникновению отрицательной, или южной, компоненты магнитного поля, являющейся геоэффективной по отношению к геомагнитным бурям. Исследовалось взаимодействие вращательного разрыва, пришедшего со стороны солнечного ветра, с фронтом головной ударной волны перед магнитосферой Земли.

Падение вращательного разрыва  $A$  на головную ударную волну (ГУВ) можно изучать как частный случай проблемы Римана-Кочина о распаде произвольного разрыва. Рассмотрено плоскополяризованное взаимодействие  $A$  с ГУВ  $S_b$  в некоторой окрестности подсолнечной точки. Полагаем, что межпланетное магнитное поле  $\mathbf{B}_{sw}$  наклонено под некоторым углом к направлению скорости солнечного ветра  $\mathbf{V}_{sw}$  и лежит в плоскости эклиптики.

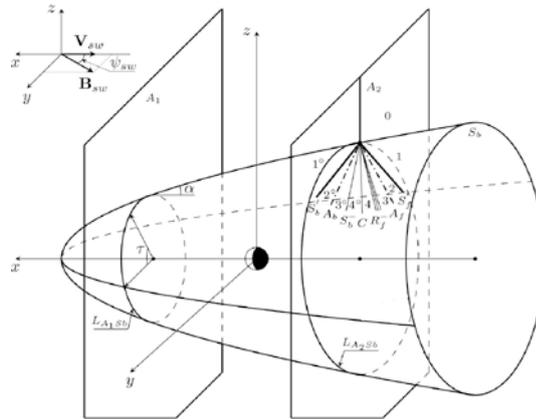


Рис. 2.27

На самой подсолнечной точке интенсивность быстрой волны разрежения и быстрой ударной волны равны нулю. Таким образом, в результате взаимодействия ВР и ГУВ может образоваться модифицированный ВР  $A'$ , преломленный в магнитослой, две медленные ударные волны  $S_r^-$  и  $S_f^-$  и контактный разрыв  $C$  между ними, который со временем исчезает в результате диффузии.

Рассмотрена задача распада произвольного разрыва  $AS_b \rightarrow S_b' S_r^- C S_f^- A'$ , когда интенсивности некоторых разрывов равны  $|S_r^-| = |S_f^-|$ . Образованные в результате распада медленные ударные волны, прямая и обратная, двигаются в разные стороны, но сносятся в направлении Земли. В медленных ударных волнах плотность растет, а величина

магнитного поля и вместе с ним значение магнитного давления убывает. Таким образом, в магнитослое может образоваться «плато», в котором плотность возрастает, а магнитное давление падает примерно в два раза. Полученные результаты качественно совпадают с результатами численного моделирования и данными наблюдений на КА [Hubert and Harvey, 2000].

В заключение перечислим полученные результаты. Впервые была построена МГД модель плазменной структуры с постоянным давлением типа магнитной дыры в солнечном ветре с границами, представляемыми в виде тангенциальных разрывов. Изучено и описано динамическое состояние магнитослоя перед магнитосферой Земли, во многом аналогичное состоянию магнитослоя, возникающему перед магнитным облаком в потоке солнечного ветра и перед магнитосферой Юпитера. Также впервые было рассмотрено столкновение вращательного разрыва как структуры с постоянным давлением с головной ударной волной перед магнитосферой Земли и доказана возможность возникновения плазменной неоднородности типа плазмоида, или плато, в плазме магнитослоя.

Получено подтверждение теоретических результатов данными наблюдений, проведённых на космических аппаратах типа WIND, CLUSTER, THEMIS.

**Руководитель темы:**

Проф. Соловьев Александр Анатольевич, ГАО РАН, [solov.a.a@mail.ru](mailto:solov.a.a@mail.ru)

**Состав группы:**

С.А.Гриб (ГАО).

**Литература:**

Hubert D., Harvey C.C. Interplanetary rotational discontinuities: from the solar wind to the magnetosphere through the magnetosheath // Geophys.Res. Lett. V.27, №19, p.3149-3152, 2000.

**Публикации:**

1. С.А.Гриб, С.Н.Леора, Применение точных решений магнитной гидродинамики к описанию различных структурных возмущений в солнечном ветре. Геомагнетизм и аэрномия. 2016, т.56, № 2, с. 178-186.
2. S.A.Grib, E.A.Pushkar, and S.N.Leora. Some sources of plasma inhomogeneities in the solar wind in front of the Earth's magnetosphere. Geomagn. and Aeronomy, 2016, v. 56, № 7, 45-49.
3. Е.А. Пушкарь, С.А. Гриб, Д.В. Донской, А.С. Королёв, В.И. Толмачёв. Образование неоднородностей в магнитослое при столкновении разрыва солнечного ветра с головной

ударной волной. Модели и методы аэродинамики. Материалы Шестнадцатой международной школы-семинара. М. ЦАГИ, с.136-137. 2016.

#### **Принято в печать:**

Материалы доклада, сделанного на международной конференции Проблемы Геокосмоса. Grib S.A., Leora S.N. «Secondary MHD waves in the magnetosheath before the magnetosphere of the Earth». 03.10.2016. 11<sup>th</sup> International Conference “Problems of Geocosmos”, St.Petersburg, Petrodvorets, October 3-7, 2016.

#### **Проекты СО РАН**

##### **Проект: Методы диагностики процессов солнечной активности и ее проявлений в ММП, магнитосфере и ионосфере Земли**

#### **Аннотация.**

В 2016 году начаты регулярные наблюдения на первой очереди многоволнового Сибирского радиогелиографа и на первом из трех Солнечных телескопов оперативных прогнозов «СТОП».

В 2016 году начаты регулярные наблюдения на первой очереди многоволнового Сибирского радиогелиографа. Диапазон частот 4 – 8 ГГц, частоты наблюдений с мгновенной полосой 10 МГц задаются протоколом наблюдений. Пространственное разрешение 48-антенной решетки – менее угловой минуты, время переключения частоты менее секунды. Тестовые наблюдения показали, что чувствительность радиогелиографа достаточна для обнаружения источников с потоком менее одной десятитысячной от излучения спокойного Солнца как целого. Данные наблюдений радиогелиографа дополняются наблюдениями на спектрополяриметрах интегрального потока с общим диапазоном от 50 МГц до 24 ГГц. Данные доступны по адресу <http://badary.iszf.irk.ru/> [1,2,4].

Начаты регулярные наблюдения на первом из трех Солнечных телескопов оперативных прогнозов «СТОП», разработанных и изготовленных в ИСЗФ СО РАН по контракту с Институтом прикладной геофизики, данные которого позволяют измерять распределение магнитного поля по диску Солнца, находить области с открытыми линиями магнитного

поля, прогнозировать скорость стационарного солнечного ветра, рассчитывать магнитное поле на поверхности источника [3].

Разработанная в ИСЗФ СО РАН методика расчета токовых систем в полярной шапке Земли позволила обнаружить и объяснить эффекты насыщения магнитного потока и сжимаемости магнитопаузы во время мощных суббурь. Выявлена важная роль набегающего давления в потке солнечного ветра [5].

С помощью нового радара когерентного рассеяния, установленного под Екатеринбургом, получены первые результаты о природе дрейфующих волн сжатия в ионосфере Земли на средних широтах [6].

**Руководитель проекта:**

профессор, д.ф.м.н. А.Т.Алтынцев, ИСЗФ СО РАН

**Публикации:**

1. S. V. Lesovoi, A. T. Altyntsev, E. F. Ivanov, A. V. Gubin, V. V. Grechnev, D. A. Zhdanov, A. A. Kochanov, N. S. Meshalkina, and L. K. Kashapova, The Siberian Radioheliograph: first observations., <sup>th</sup> RadioSun Workshop and Summer School, May 23-27, 2016, České Budějovice, Czech Republic.
2. Lesovoi, S.V., A.T. Altyntsev, E.F. Ivanov, V.V. Grechnev, A.V. Gubin, L.K. Kashapova, A.A. Kochanov, A.A. Kuznetsov, N.S. Meshalkina, D.A. Zhdanov The first results of the flare observations by the Siberian Multiwave Radioheliograph, 15th RHESSI Workshop, Graz, July 26 – 30, 2016.
3. Pevtsov, A. A.; Nagovitsyn, Yu. A.; Tlatov, A. G.; Demidov, M. L. Solar Physics Research in the Russian Subcontinent – Current Status and Future, Asian Journal of Physics, Vol. 25 No 3 (2016).
4. Zhdanov D., Lesovoi S., Tokhchukova S., Sources of type III solar microwave bursts, Solar-Terrestrial Physics, vol. 2, issue 2, pp. 12-21, 2016
5. Mishin, V. V.; Mishin, V. M.; Karavaev, Yu.; Han, J. P.; Wang, C. Saturation of superstorms and finite compressibility of the magnetosphere: Results of the magnetogram inversion technique and global PPMLR-MHD model. Geophysical Research Letters, Volume 43, Issue 13, pp. 6734-6741, 2016,
6. Chelpanov, Maksim; Mager, Pavel; Klimushkin, Dmitriy; Bergardt, Oleg; Mager, Olga Observation of drift compressional waves with a mid-latitude decameter coherent radar Solar-Terrestrial Physics, vol. 2, issue 2, pp. 46-56, 2016.

## **Проект Радиоастрономические исследования динамических процессов в солнечной короне**

### **Аннотация.**

В 2016 г. при частичной поддержке данного проекта были начаты регулярные наблюдения на новом инструменте ИСЗФ СО РАН – Сибирском Радиогелиографе (в 48-антенной конфигурации, рабочий диапазон частот 4-8 ГГц). Разработано программное обеспечение для первичной обработки результатов наблюдений.

С использованием данных различных радиоастрономических инструментов ИСЗФ СО РАН (Сибирский Солнечный Радиотелескоп, 10-элементный прототип Сибирского Радиогелиографа, широкополосные спектрополяриметры) и разработанных участниками проекта теоретических методов и программных средств (система моделирования солнечного радиоизлучения GX Simulator, средства экстраполяции фотосферного магнитного поля) было проведено детальное исследование ряда солнечных вспышек. В частности, для вспышки 10 марта 2002 г. на основе численного моделирования с помощью программного пакета GX Simulator был построен сценарий развития вспышки, определена конфигурация магнитного поля и параметры нетепловых ускоренных электронов; показано, что в основе вспышечного процесса лежало взаимодействие двух корональных магнитных петель (большой и малой), а ускоренные электроны имели анизотропное распределение пучкового вида. Полученные результаты важны для дальнейшего развития теории солнечных вспышек; кроме того, проведенная работа представляет собой важный шаг в разработке и отладке средств диагностики солнечных активных процессов по многоволновым радионаблюдениям (в том числе в приложении к будущим данным Сибирского Радиогелиографа).

Было проведено численное моделирование радиоизлучения магнитных жгутов (т.е., формирующихся филаментов) в солнечных активных областях. Показано, что для подобных объектов характерно интенсивное гирорезонансное излучение с яркостной температурой до нескольких миллионов градусов. Таким образом, магнитные жгуты являются наиболее вероятной причиной формирования часто наблюдаемых микроволновых источников над нейтральной линией фотосферного магнитного поля в предвспышечных активных областях.

### **Руководитель проекта:**

д. ф.-м. н. А.А. Кузнецов, ИСЗФ РАН

**Публикации:**

1. Fleishman G.D., Pal'shin V.D., Meshalkina N., Lysenko A.L., Kashapova L.K., Altyntsev A.T. A Cold Flare with Delayed Heating // *Astrophysical Journal*. 2016. V. 822. ID. 71.
2. Altyntsev A., Meshalkina N., Mészárosová H., Karlický M., Palshin V., Lesovoi S. Sources of Quasi-periodic Pulses in the Flare of 18 August 2012 // *Solar Physics*. 2016. V. 291, P. 445-463.
3. Kuznetsov A.A., Keppens R., Xia C. Synthetic Radio Views of Simulated Solar Flux Ropes // *Solar Physics*. 2016. V. 291. P. 823-845.
4. Zhdanov D., Lesovoi S., Tokhchukova S. Sources of type III solar microwave bursts // *Solar-Terrestrial Physics*. 2016. V. 2. P. 15-27.

## НАПРАВЛЕНИЕ 3. Луна и планеты земной группы, сравнительная планетология

Кураторы направления: Базилевский А.Т. (ГЕОХИ), Иванов Б.А. (ИДГ).

3.1	Проект 3.1: Модели ранней эволюции и дегазации Земли, основанные на данных изотопии благородных газов	ГИ КНЦ РАН	Толстихин И.Н.
3.2	Проект 3.2: Сейсмология и физика недр Марса	ИФЗ РАН	Жарков В. Н.
3.3	Проект 3.3: Ударные кратеры на Луне, планетах и астероидах	ИДГ РАН	Иванов Б.А.
3.4	Проект 3.4: Термохимические модели ядра и мантии Луны	ГЕОХИ РАН	Кусков О.Л.
3.5	Проект 3.5: Построение долгосрочной теории движения Луны	ИПА РАН	Иванова Т.В.
3.6	Проект 3.6: Научные задачи изучения внутреннего теплового потока Луны и методика контактных теплофизических измерений в лунном грунте	ГЕОХИ РАН	Маров М.Я.
3.7	Проект 3.7: Теоретические и астрономические исследования механизмов диссипации приливной энергии для Луны и других объектов Солнечной системы	ГЕОХИ РАН	Воропаев С.А.
3.8	Проект 3.8: Исследование физических свойств реголита Луны методами активной радиолокации	ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН	Смирнов В.М.

### Проект 3.1 Модели ранней эволюции и дегазации Земли, основанные на данных изотопии благородных газов

#### Аннотация.

Ранняя базальтовая кора с находящимся на ее поверхности реголитом погрузилась в мантию без плавления, фракционирования и дегазации; этот материал был частично перемешан с веществом мантии, частично сохранился в виде изолированного резервуара.

Для анализа аккреции Земли необходимо привлекать «контрастные» изотопные системы, с разных сторон освещающие столь удаленные во времени и отличные от современных процессы и материалы. Для воссоздания главного процесса дифференциации Земли – сегрегации ядра – следует использовать сидерофильные элементы и соответствующие изотопные системы, прежде всего систему  $^{182}\text{Hf} - ^{182}\text{W}$ , позволяющую оценить временные шкалы сегрегации. Процесс фракционирования силикатной мантии лучше всего «зафиксирован» нелетучими литофильными несовместимыми элементами; наиболее информативной представляется  $^{146}\text{Sm} - ^{142}\text{Nd}$  и  $^{147}\text{Sm} - ^{143}\text{Nd}$  дует. Специфические процессы переноса летучих и дегазации отражены в данных трех изотопных систем:  $^{244}\text{Pu}$

–  $^{238}\text{U}$  –  $^{129}\text{I}$  –  $\text{Xe}(\text{Pu}, \text{U}, \text{I})$ ,  $^{40}\text{K}$  –  $^{40}\text{Ar}^*$ ,  $^{238}\text{U}$ – $^{235}\text{U}$ – $^{232}\text{Th}$ – $^4\text{He}$ – $^{21}\text{Ne}^*$ . Модельные расчеты выполняются в рамках стандартной модели аккреции планет (Витязев и др., 1990; Wetherill, 1990) из материала, по составу нелетучих элементов близкого к хондритовому.

В ходе сегрегации ядра отношение литофильного Hf к сидерофильному W в мантии увеличилось в  $\approx 13$  раз, что привело к избытку дочернего  $^{182}\text{W}$  в мантийных породах и позволило определить (в рамках одностадийной модели) время сегрегации – 30 млн. лет (после формирования Солнца, Jacobsen, 2005). Это время обычно идентифицируется с последним соударением Земли с массивной прото-планетой. Из анализа более реалистичной модели длительного многостадийного роста ядра следует, что этот интервал может быть увеличен (Kramers, 1998). Моделирование аккреции показывает, что молодые планеты оставались динамически связанными с роem планетезималей малой массы, которые могли пересечь орбиту Земли и присоединится к ней, принося «поздние» аккреционные материалы (Angor et al., 1999), в том числе близкие по составу к хондритовым метеоритам (ХМ). Вклад ХМ на поздних стадиях аккреции объясняет относительные содержания высоко-сидерофильных нелетучих благородных металлов (БМ). Абсолютные содержания БМ уменьшились за счет «разбавления» вещества ХМ веществом мантии, практически не содержащим БМ (уже перешедших в состав ядра на главной стадии его формирования), однако относительные хондритовые содержания сохранились. Чтобы обеспечить концентрации БМ в мантии, суммарный вклад ХМ должен быть около 0.3 % массы Земли.

Вторая изотопная система включает два нелетучих литофильных элемента, Sm и Nd. Сравнение изотопного состава Nd «наблюдаемых» резервуаров Земли с исходным, хондритовым, показывает, что эти резервуары были обеднены Nd, более «несовместимым» чем Sm, в ходе ранней эволюции Земли. Предположение о раннем формировании изолированного от мантийной конвекции обогащенного резервуара, по составу близкого к сформированной застывшими мантийными расплавами коре, позволяет объяснить данные и «короткоживущей»,  $^{146}\text{Sm}$  –  $^{142}\text{Nd}$  (Caro, 2011), и «долгоживущей»,  $^{147}\text{Sm}$  –  $^{143}\text{Nd}$  (Allegre, 1997), составляющих Sm – Nd дуэта.

Радиоактивные изотопы уникальной  $^{244}\text{Pu}$  –  $^{238}\text{U}$  –  $^{129}\text{I}$  –  $\text{Xe}(\text{Pu}, \text{U}, \text{I})$  системы включают и литофильные нелетучие изотопы,  $^{244}\text{Pu}$  и  $^{238}\text{U}$ , и летучий  $^{129}\text{I}$ , а дочерние изотопы относятся к весьма летучему  $\text{Xe}(\text{Pu}, \text{U}, \text{I})$ . Благодаря недавним высокоточным измерениям изотопного состава благородных газов в мантийных породах и газах было подтверждено присутствие в мантии Q-Xe и Kr, носителем которых являются углистые хондриты. Также было установлено, что изотопные отношения  $^{129}\text{Xe}(\text{I}) / ^{136}\text{Xe}(\text{Pu})$  в образцах мантийных плюмов отличаются от таковых в срединно-океанических базальтах и углекислых газах, возникших при дегазации базальтовых интрузий (Holland, 2009; Parai and Mukhopadhyay,

2015; Caracausi et al., 2016). Оба родительских изотопа,  $^{129}\text{I}$  и  $^{244}\text{Pu}$  – короткоживущие, так что  $^{129}\text{Xe}(\text{I})$  и  $^{136}\text{Xe}(\text{Pu})$  возникли в ходе ранней эволюции Земли. По мнению Caracausi et al. (2016) отношение  $^{129}\text{Xe}(\text{I}) / ^{136}\text{Xe}(\text{Pu})$  в образцах плюмов (например, Эйфель, Исландия) указывает на «раннее закрытие резервуара» – источника Xe, тогда как в образцах океанических базальтов эти отношения отражают «прогрессивный вклад вещества богатого летучими компонентами». Такая интерпретация вряд ли оправдана, поскольку значения  $^{129}\text{Xe}(\text{I}) / ^{136}\text{Xe}(\text{Pu})$  в ХМ, до 10000, на порядки величины выше, чем в силикатной мантии, около 1, так что смешение ХМ с ее веществом могло обеспечить наблюдаемые вариации  $^{129}\text{Xe}(\text{I}) / ^{136}\text{Xe}(\text{Pu})$  в земном Xe, (2 – 20).

Носителями легких благородных газов внеземного происхождения, He и Ne, в мантии Земли являются облученные солнечным ветром материалы с концентрациями  $^4\text{He}$  достигающими  $1 \text{ см}^3 \text{ СТД г}^{-1}$ . Из таких материалов мог бы (частично) состоять земной реголит: в рассматриваемый интервал времени аккреция еще продолжалась, и реголит мог быстро накапливаться на поверхности ранней коры.

Рассмотренные выше наблюдения могут быть объяснены погружением ранней земной коры вместе с хондритовым и облученным солнечным ветром реголитом на ее поверхности. В пределах конвектирующей мантии этот «пирог» был: (а) частично перемешан с ее веществом, что обеспечило появление и благородных металлов в мантии Земли в хондритовых соотношениях, и метеоритных Kr, Xe и йода; (б) частично сохранился как изолированный мантийный резервуар, в соответствии с данными  $^{146}\text{Sm} - ^{142}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm} - ^{143}\text{Nd}$ , U-Th-He-Ne и  $^{244}\text{Pu} - ^{238}\text{U} - ^{129}\text{I} - \text{Xe}(\text{Pu}, \text{U}, \text{I})$  изотопных систем.

Упомянутые выше материалы и процесс их транспортировки в недра Земли известны; необходимо только предположить, что «ранняя транспортировка», в отличие от современной субдукции, не сопровождалась плавлением, фракционированием и дегазацией вещества (Tolstikhin and Hofmann, 2005; Tolstikhin and Kramers, 2008). Таким образом, одно предположение позволяет удовлетворить 7 независимых наблюдений.

Кроме того, процессы формирования ранней коры и богатого летучими элементами реголита на ее поверхности могли протекать одновременно с «вкладом углистых хондритов (CI-CM) в вещество прото-Земли, который обеспечивается аккрецией нескольких планетезималий, как это было предложено в динамических моделях аккреции» (Angor et al., 1999; Marty, 2012). Подобный сценарий был также предложен другими авторами (например, Kramers, 2003), так что определенный консенсус по этому поводу существует. Необходимая добавка вещества ХМ составляет от  $\approx 1\%$  до  $\approx 2\%$  от массы Земли. Такой вклад ХМ полностью обеспечивает количество йода в силикатной Земле, от  $6 \cdot 10^{-9} \text{ г г}^{-1}$  до  $12 \cdot 10^{-9} \text{ г г}^{-1}$ . Таким образом, главным источником йода на Земле

были поверхностные материалы, а появление йода в мантии, вероятно, обеспечивалась субдукцией этого элемента (аналогично субдукции атмосферных благородных газов).

Предварительные результаты моделирования эволюции двух-резервуарной мантии показывают, что глубинный изолированный резервуар ДДП формируется в виде смеси базальта + небольшой вклад хондритов и метеоритов, облученных солнечным ветром. Масса DDP, аналогичная современной,  $D \approx 2 \cdot 10^{26}$  г, позволяет согласовать расчеты с наблюдениями для  $^{147}\text{Sm} - ^{143}\text{Nd}$  систематики и 2/3 наблюдаемого отклонения земного отношения  $^{142}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  от хондритового.

Скорость дегазации лишь немного выше, чем для одного резервуара мантии модели: получены высокие значения коэффициента сохранности RET ( $t_{\text{NOW}}$ ), до  $\approx 4 \cdot 10^{-4}$ . Прямая корреляция между RET ( $t_{\text{NOW}}$ ) и  $t_{129}$  (временем, когда количество  $^{129}\text{Xe}$  в мантии было равно количеству этого изотопа в атмосфере) была получена из модельных растворов: вышеуказанные значения RET( $t_{\text{NOW}}$ ) соответствуют  $t_{129} \approx 1$  Гур, в согласии с наблюдениями "менее фракционированного" воздушного Хе. Моделирование показывает, что  $^{244}\text{Pu} - ^{238}\text{U} - ^{129}\text{I} - \text{Xe-He-Ne}$  систематика не очень чувствительна к времени формирования DDP в «разрешенных» пределах, от 30 млн. лет после SOS до  $\approx 150$  млн. лет, то есть время, когда вода вероятно появилась на земной поверхности. Весьма малая масса материала DDP,  $\approx 2 \cdot 10^{25}$  г, достаточна для поддержания потока благородных газов из DDP в мантию и дегазации мантии в течение всей истории Земли.

#### **Руководитель проекта:**

Толстихин Игорь Несторович, Геологический институт КНЦ РАН и Институт Космических Исследований РАН, [igor.tolstikhin@gmail.com](mailto:igor.tolstikhin@gmail.com)

#### **Состав группы:**

ст. н. с., к.ф.-м.н. Асминг В.Э., н. с., к.ф.-м.н. Федоров А.В.

#### **Публикации:**

1. V. E. Asming and I. N. Tolstikhin (2016) Software package to solve geochemical transport problems. Oral presentation on International Workshop "Developments in noble gas understanding and expertise", France, Nancy, SRPG-CRNS, April 13-15. Abstract published at <http://helium.crpq.cnrs-nancy.fr/DINGUE-4/program.html>
2. I.N. Tolstikhin, V.E. Asming, M.V. Gerasimov (2016) Early differentiation and degassing of the Earth as derived from modelling  $^{182}\text{Hf} - ^{182}\text{W}$ ,  $^{146}\text{Sm} - ^{142}\text{Nd}$  and noble gas isotope

systematics. Oral presentation on International Workshop “Developments in noble gas understanding and expertise”, France, Nancy, SRPG-CRNS, April 13-15, Abstract published at <http://helium.crgp.cnrs-nancy.fr/DINGUE-4/program.html>

3. И.Н. Толстихин (2016) Процессы поздней аккреции Земли, – по данным изотопии вольфрама, неодима и ксенона. Тезисы докладов «XXI Симпозиума по геохимии изотопов», ГЕОХИ, Москва, 2016, с. 56-60.

4. Направлена в печать в журнал «Геохимия» и прошла экспертизу статья

И.Н. Толстихин. Процессы, завершавшие аккрецию Земли, – согласно данным о содержаниях летучих, литофильных и сидерофильных элементов в «наблюдаемых» резервуарах.

### **Проект 3.2 Сейсмология и физика недр Марса**

#### **Аннотация.**

Рассмотрен вопрос о выборе отсчетной (референсной) модели для поверхности Марса, рассчитаны высоты ареоида и гравитационные аномалии для этой планеты, высказано предположение о том, что средняя толщина упругой литосферы Марса должна превосходить мощность континентальной литосферы Земли.

В настоящее время имеются детальные данные о топографии Марса, полученные прибором MOLA с космического аппарата MGS. В работе использованы данные, которые были представлены в виде коэффициентов разложения по полиномам Лежандра высот рельефа относительно центра масс до 90 степени и порядка группой (Smith и др., 2001).

В работе использованы данные о глобальном ГПМ – модель (MRO11OB2), в которой поле разложено до 110 степени и порядка. Модель основана на результатах измерений в миссиях MGS, Mars Odyssey и Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) (Konopliv и др., 2011).

Топография и гравитационное поле модели описываются соответствующими разложениями по сферическим функциям, построенными по данным наблюдений. При рассмотрении структуры гравитационного поля всегда встают вопросы о поверхности отсчета, от которой отсчитываются высоты рельефа и ареоида, а также строятся аномалии гравитационного ускорения.

В данной работе мы определяем топографию Марса по отношению к референсной поверхности, за которую выбираем равновесный сфероид  $r(s, \theta)$  со средним радиусом  $R$ .

На рис. 3.1 представлена построенная на основании этих данных карта изолиний высот марсианского рельефа после разложения в ряд до 90 степени и порядка. Видна одна из

основных особенностей топографии Марса: приподнятость южных сильно кратерированных областей относительно северной планетарной депрессии. Видны такие основные геологические структуры, как поднятие Фарсида, поднятие Элизий, кольцевые бассейны Эллада, Аргир и Исида, вулкан Олимп, патера Альба и некоторые другие.

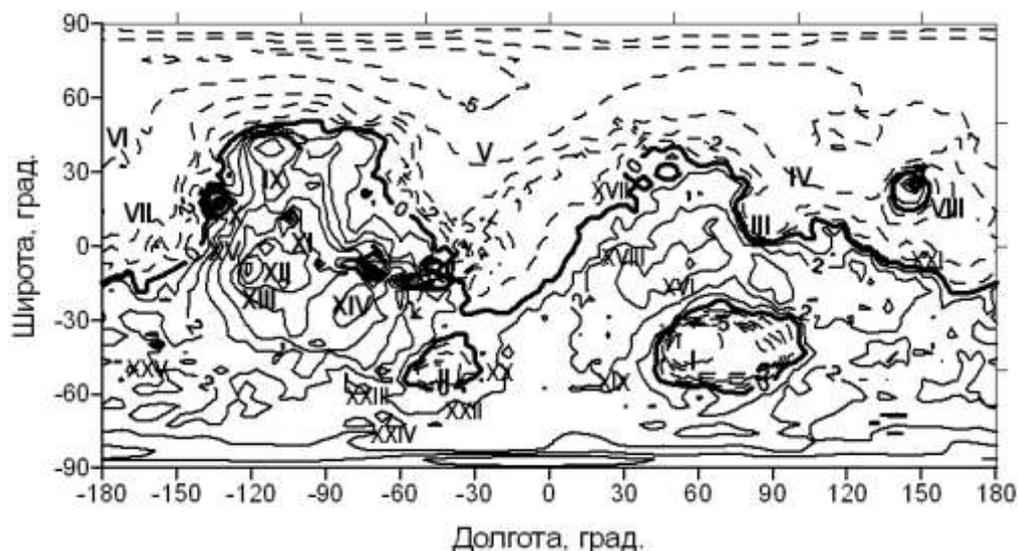


Рис. 3.1 – Карта изолиний высот марсианского рельефа после разложения в ряд до 90 степени и порядка. Нулевой уровень (жирная сплошная линия) соответствует равновесной фигуре. Сплошные линии соответствуют положительным высотам, пунктирные – отрицательным. Интервал между изолиниями 1 км. Условные обозначения: I – бассейн Эллада, II – бассейн Аргир, III – бассейн Исида, IV – равнина Утопия, V – Ацидалийское море, VI – равнина Аркадия, VII – равнина Амазония, VIII – поднятие Элизий, IX – Альба патера, X – вулкан Олимп, XI – вулкан Аскрийский, XII – вулкан Павлиний, XIII – вулкан Арсия, XIV – долина Маринера, XV – патера Библиды; кратеры: XVI – Гюйгенс, XVII – Кассини, XVIII – Скиапарелли, XIX – Дарвин, XX – Галле, XXI – Гейл, XXII – Филлипс, XXIII – Лоуэлл, XXIV – Шмидт, XXV – Ньютон.

На рис. 3.2 показаны высоты ареоида. Рисунок подтверждает тот известный факт, что глобальная структура гравитационного поля Марса определяется, прежде всего, круговой положительной аномалией в экваториальной части западного полушария планеты, которая имеет амплитуду 1600 м и связана с самой мощной топографической структурой – поднятием Фарсида.

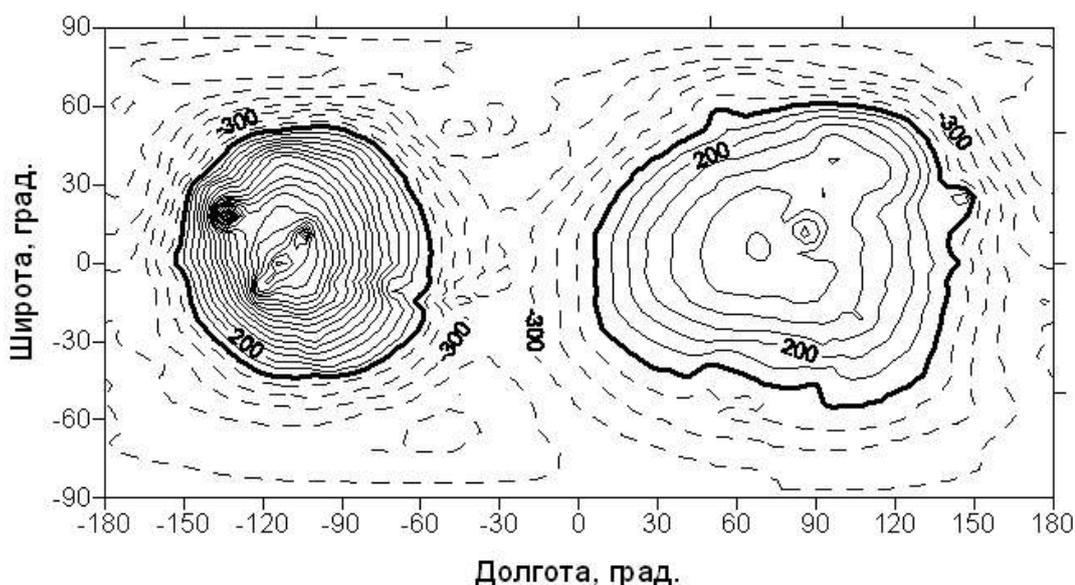


Рис. 3.2 – Карта высот ареоида  $N$  относительно равновесной фигуры. Сплошные линии соответствуют положительным высотам, пунктирные – отрицательным, нулевой уровень – жирная сплошная линия. Интервал между изолиниями 100 м.

Другая, более размытая положительная аномалия расположена в восточном полушарии диаметрально противоположно Фарсиде. Существенно, что в форме ареоида практически не проявляется одна из основных особенностей топографии Марса – его дихотомия, т.е. приподнятость южных сильно кратерированных континентальных областей относительно Северной планетарной депрессии. Это объясняется сдвигом центра геометрической фигуры к югу-западу относительно центра масс и присутствием в разложении марсианской топографии гармоник первой степени, отсутствующих в разложении потенциала. Пространство между двумя положительными аномалиями, а также полярные области, характеризуются отрицательными значениями высот ареоида, в частности, на северном полюсе  $N = -570$  м на южном  $N = -330$  м. Более глубокая аномалия на севере может быть неявным проявлением дихотомии.

Очевидно, что в поле потенциала Марса сильно доминируют длинноволновые компоненты, а мелкомасштабные детали марсианского гравитационного поля практически не видны, за единственным исключением области над щитовым вулканом Олимп на северо-западе Фарсиды. Это связано с тем, что амплитуды гармоник степеней  $n = 2 - 6$  в спектре потенциала значительно превосходят амплитуды остальной части спектра, и несут в себе информацию, прежде всего, о глобальной фарсидской аномалии.

#### **Руководитель проекта:**

Жарков Владимир Наумович, ИФЗ РАН [zharkov@ifz.ru](mailto:zharkov@ifz.ru)

### **Состав группы:**

Гудкова Т.В. д.ф.м.н., гл.н.с., Плеханова М.А. инж.

### **Публикации:**

1. Жарков В.Н., Гудкова Т.В. О модельной структуре гравитационного поля Марса, Астрон. Вестн. 2016, 4, 252-267.
2. Panning M.P., Lognonne Ph., Banerdt W.B., Garsia R., Golombek M., Kedar S., Кnapmeyer-Endrun B., Mocquet A., Teanby N.A., Tromp J., Weber R., Beucler E., Blanchette-Guertin J.-F., Drilleau M., Gudkova T., Hempel S., Khan A., Lekic V., Plesa A.-C., Rivoldini A., Schmerr N., Ruan Y., Verhoeven O., Gao C., Christensen U., Clinton J., Dehant V., Giardini D., Mimoun D., Pike W.T., Smrekar S., Wiczeirek M., Кnapmeyer M., Wookey J. Planned products of the Mars structure service for the InSight mission to Mars, Space Science Rev. 2016, принята в печать.
3. Zharkov V.N., Gudkova T. Analysis of gravity and topography data for Mars. 3<sup>rd</sup> IAPS Scientific Assembly: "Observation and Understanding of the Moon, moons & Planets". Kazan, 2016.
4. Zharkov V.N., Gudkova T. V. On the model structure of the gravity field of Mars. Abstract, The seventh Moscow Solar System Symposium 7M-S<sup>3</sup>, IKI, 2016.
5. Weber R., Banerdt W.B., Lognonne P.H., Hemple S., Panning M.P., Schmerr N.C., Garsia R., Shiro B., Gudkova T. Mars Internal Structure: Seismic Predictions for Core Phase Arrivals in Anticipation of the InSight Mission. AGU Fall Meeting abstracts 2016, DI34A-08.

### **Проект 3.3. Ударные кратеры на Луне, планетах и астероидах**

#### **Аннотация.**

Найдено, что распределение по размерам малых лунных кратеров может менять свой наклон по мере старения и уширения кратеров, что важно для датировки лунной поверхности.

В 2016 году были решены две задачи: (1) влияние старения малых кратеров на Луне на их распределение по размерам и (2) подобие и неподобие в законах затухания ударных волн при высокоскоростном ударе.

1) Малые кратеры (диаметром менее 1 км) на Луне широко используются для датировки лунной поверхности по числу накопленных на заданном участке поверхности после ее последнего обновления (лавовые потоки в лунных морях или покровы выбросов вокруг

крупных кратеров). Для этой датировки важным является предположение о постоянстве во времени распределения малых кратеров по размерам. Было замечено, что при старении лунных кратеров их глубина уменьшается за счет заполнения материалом, сползающим с бортов кратера под действием мелких и частых метеоритных ударов и воздействии сейсмических волн. Новые снимки с аппарата LRO (с разрешением до 0.5 м/пиксель) позволили резко расширить точность и объем данных о форме кратеров в разной степени сохранности. Однако сползание материала с бортов кратера, помимо уменьшения глубины, приводит к «расползанию» вала кратера – видимый диаметр кратера может увеличиться до 1.5 раз. Этот эффект нужно будет учитывать впредь при анализе распределения кратеров по размерам, особенно вблизи перегиба кривой распределения кратеров по размерам при переходе к равновесной популяции кратеров (рис. 3.3).

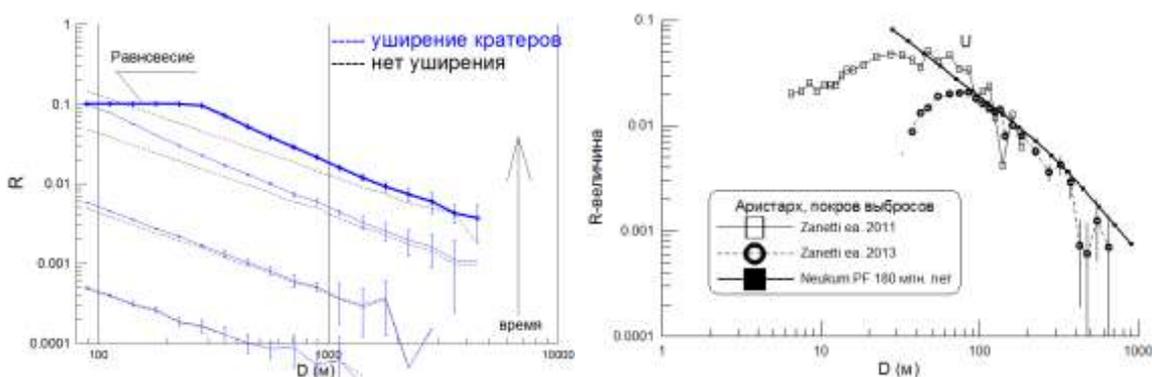


Рис. 3.3 – Слева – моделирование методом Монте-Карло накопления кратеров на поверхности с учетом их уширения по мере старения. Пунктир – распределение по размерам молодых кратеров  $N(>D) \sim D^{-3}$ . Сплошные кривые с вертикальными стандартными отклонениями – модель с учетом уширения кратеров при старении. Видно, что наклон кривой  $R(D)$  для фиксированного интервала диаметров кратеров возрастает со временем. Справа – реальные измерения кратеров на покрове выброса кратера Аристарх в сравнении со стандартной кривой Нойкума. Буквой “U” отмечен возможный участок «задиранья» кривой  $R(D)$  за счет эффекта уширения кратеров при старении.

Задача решалась как определением формы кратеров различной сохранности по цифровым картам местности (DTM), так и анализом существующих диффузионных моделей старения кратеров. Результаты сведены в статью, направленную в «Астрономический Вестник» в ноябре 2016 г. [3].

2) Законы подобия (англ. – scaling laws) играют важное значение при решении широкого круга практических задач, связанных с высокоскоростными ударными процессами. В

частности, при изучении природных ударов астероидов и метеоритов по поверхности планет Солнечной системы необходимо переносить результаты экспериментов на удары с гораздо большими скоростями, чем достижимые в лаборатории. В 2016 г., в рамках заявленного в проекте изучения законов подобия при образовании ударных кратеров, классическая автомодельная задача о затухании ударных волн, решенная ранее для идеального газа, анализируется методами численного моделирования для случая «реальных» уравнений состояния (УС). Показано, что для популярных в современном моделировании природных ударных процессов УС Тиллотсона и ANEOS выход на автомодельное решение осуществляется довольно поздно, на расстоянии более  $\sim 50$  длин плоского ударника. Хотя исследованные УС при экстремально высоких параметрах описывают идеальный газ, показатель степени в законе затухания давления в ударной волне никогда не достигает теоретического предела. **Интересным результатом** является сложный характер перехода от медленных ударов к быстрым ударам (измеряется отношением скорости удара к скорости звука в мишени). При ударе плоского ударника (слоя вещества конечной толщины  $L$ ) по поверхности полупространства (мишени) механическая эффективность удара (например – затухание ударной волны в мишени на больших расстояниях  $x \gg L$ ) для ударов с различными скоростями  $U$  будет одинаковой (подобной), если толщина ударника и скорость удара связаны соотношением с постоянной  $C$ :

$$C = L U^\mu \quad (1)$$

где  $\mu$  – постоянный показатель степени, зависящий от уравнения состояния (от величины  $\gamma$  для идеального газа). Оказалось, что зависимость  $\mu$  от скорости  $U$  является неожиданно сложной функцией (рис. 3.4).

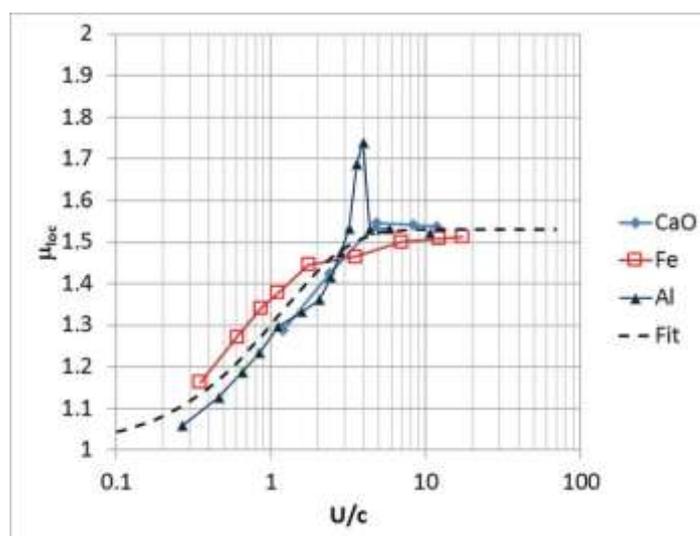


Рис. 3.4 – Зависимость «локального» значения параметра  $\mu$  в формуле (1) от отношения скорости удара к скорости звука. Видно, что формула (1) применима только при высоких скоростях примерно в 5 раз превышающих скорость звука. Для алюминия был получен неожиданный «пик» в зависимости  $\mu$  ( $U/c$ ), не нашедший пока объяснения.

Результаты задачи опубликованы в статье [4].

#### Руководитель проекта:

Иванов Борис Александрович, д.ф.-м.н, ИДГ РАН, [baivanov@idg.chph.ras.ru](mailto:baivanov@idg.chph.ras.ru)

#### Состав группы: ?

#### Публикации:

1. Ivanov B.A. (2016), Impact Shaking of the Phobos Surface, in Lunar and Planetary Science Conference 47, abs# 1833.
2. Иванов Б.А. (2016) Распределение по размерам малых лунных кратеров: старение и уширение. Тезисы доклада 7MS3-MN-07, The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S<sup>3</sup>), Москва ИКИ РАН 2016.
3. Иванов Б.А. (2016) Распределение по размерам малых лунных кратеров: роль увеличения диаметра при старении кратеров. *Астрономический Вестник* (в печати).
4. Иванов Б. А. (2016) Подобие в затухании ударных волн при одномерном ударе. *Динамические процессы в геосферах. Выпуск 8: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, ISBN 2222-8535 с. 28-34.*

5. Schmedemann N., R.J. Wagner, G. Michael, B.A. Ivanov, T. Kneissl, A. Neesemann, H. Hiesinger, R. Jaumann, C.A. Raymond, and C.T. Russell (2016), Crater Scaling on Weak Targets, from Ceres to Icy Satellites, in Lunar and Planetary Science Conference 47, abs# 2236.
6. Wagner R.J., N. Schmedemann, S.C. Werner, B.A. Ivanov, K. Stephan, H. Hoffmann, and R. Jaumann (2016), Reinvestigating crater size distributions on the Galilean satellite Ganymede, and an Outlook to ESA's JUICE Mission, in Lunar and Planetary Science Conference 47, abs# 2255.

### **Проект 3.4 Термохимические модели ядра и мантии Луны**

#### **Аннотация.**

Установлены термодинамические ограничения на модели внутреннего строения Луны: химический состав и минералогию мантии, плотность, скорость звука и размеры флюидного Fe-S ядра.

- 1) Исследовано соответствие сейсмологической референц-модели мантии Луны (VPREMOON, Garcia et al., 2011) термическим и петрологическим моделям. Методами математического моделирования проведено преобразование скоростей  $P$ -,  $S$ -волн референц-модели VPREMOON в соотношения температура – глубина для различных петрологических моделей мантии Луны, охватывающих широкий спектр концентраций порообразующих оксидов. Показано, что вне зависимости от химического состава, положительный градиент скоростей  $P$ -,  $S$ -волн приводит к отрицательному градиенту температуры в мантии, что не имеет физической основы. Сделан вывод, что для адекватного распределения температуры в мантии Луны скорости  $P$ -,  $S$ -волн должны оставаться практически постоянными, либо слабо уменьшаться с глубиной (особенно это касается  $V_S$ ) как результат влияния температуры, нарастающей быстрее, чем давление. Наиболее вероятные породы верхней мантии обеднены тугоплавкими оксидами. Модели, обогащенные кальцием и алюминием (типа пиролита), не могут рассматриваться в качестве петрологической основы верхней мантии, поскольку приводят к нереалистичным температурам (вблизи или выше солидуса).
- 2) Проведено моделирование физико-химических свойств твердых и жидких Fe-S растворов методом молекулярной динамики (МД) с применением потенциала модели погруженного атома (EAM – Embedded Atom Model) в приложении к внутреннему строению ядра Луны. Представлены результаты расчетов термодинамических параметров,

включающих калорические, термические и упругие свойства (теплоемкости, термическое расширение, параметр Грюнайзена, плотность, модули сжатия, скорость звука, адиабатический градиент) растворов Fe-S при концентрациях серы 0-18 ат.%, температурах до 2500 К и давлениях до 14 ГПа. Скорость звука, увеличиваясь с ростом давления, слабо зависит от концентрации серы и температуры. Для внешнего Fe-S ядра Луны (~5 ГПа/2000 К), содержащего 6-16 ат. % (3.5-10 мас.%) серы, плотность составляет 6.3-7.0 г/см<sup>3</sup>, а скорость звука оценивается на уровне 4000 ± 50 м/с. Сравнение МД расчетов с результатами интерпретации наблюдений по программе Apollo (Weber et al., 2011) показывает хорошее согласие скорости *P*-волн во флюидном ядре Луны, в то время как термодинамическая плотность Fe-S ядра не соответствует сейсмическим моделям с  $\rho \sim 5.1$  г/см<sup>3</sup> (Garcia et al., 2011; Weber et al., 2011). Пересмотр значений плотности ядра приводит к ревизии его размеров и массы. При концентрациях серы 3.5-10 мас.% плотность Fe-S расплава на 20-30% превышает сейсмическую плотность ядра. Следовательно, наиболее вероятный радиус внешнего ядра Луны должен быть меньше 330 км (Weber и др., 2011), поскольку с учетом выполнения ограничений на массу и момент инерции Луны увеличение плотности ядра должно приводить к уменьшению его радиуса. Расчеты адиабатического градиента при *P-T* условиях Fe-S ядра Луны предполагают кристаллизацию ядра по схеме сверху вниз (Fe-snow scenario).

#### **Руководитель проекта:**

О. Л. Кусков, чл-корр. РАН / ГЕОХИ РАН [ol\\_kuskov@mail.ru](mailto:ol_kuskov@mail.ru)

#### **Состав группы:**

Кронрод В.А., д.х.н, Кронрод Е.В., асп.

#### **Публикации:**

1. Кусков О.Л., Белашченко Д.К. Оценка термодинамических свойств флюидных Fe-S ядер Луны, Ио, Европы и Ганимеда методом молекулярной динамики // *Астроном. Вестник* 2016. Т. 50. № 3. С. 177-196.
2. Кусков О. Л., В. А. Кронрод, Е. В. Кронрод, Тестирование референц-модели Луны по отношению к термальному режиму и химическому составу мантии: Термодинамика против сейсмологии. *Физика Земли*, 2016, № 3, 10–18.
3. Kuskov O.L., Belashchenko D.K. Thermodynamic properties of Fe-S alloys from molecular dynamics modeling: Implications for the lunar fluid core. *Phys. Earth and Planetary Interiors* 2016, 258, 43-50.

### **Доклады / тезисы на конференциях:**

1. Kronrod V.A., Kuskov O.L. Agreement between lunar crustal porosity, thermal conductivity and uranium concentration in the crust and mantle // *Experiment in Geosci.* 2016. 22. N 1. p.17-18.
2. Кронрод В.А., Кусков О.Л. Согласование теплопроводности и пористости лунной коры с концентрацией урана в коре и мантии // Труды семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ВЕСЭМПГ-2016). ГЕОХИ РАН Москва. 2016. с. 94-95.
3. Кронрод В.А., Кусков О.Л. Пористость и теплопроводность лунной коры // Семнадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» Москва, Борок, 2016 г., ISBN 978-5-88918-041-8. с.149-152.
4. Кронрод Е.В., О.Л. Кусков «Холодные» и «горячие» модели мантии Луны. Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле, «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле» Москва, Борок, 2016 г.,
5. Kronrod V.A., Kuskov O.L., Kronrod E.V. Lunar crustal porosity, thermal conductivity and uranium concentration in the crust and mantle // VII Moscow Int. Solar System Symp., IKI, 2016, 7MS3-PS-15.

### **Проект 3.5 Построение долгосрочной теории движения Луны**

#### **Аннотация.**

Построена вековая система в тригонометрической форме в теории вращения осесимметричной Луны (случай Пуассона).

Построение аналитической теории вращения твердой Луны производится в форме, согласованной с общей планетной теорией GPT. Метод GPT, основанный на идеях Хилла (использование некеплеровой промежуточной орбиты), Цейпеля (разделение медленно и быстро меняющихся переменных) и Биркгофа (приведение динамической системы к нормальной форме), позволяет совместное приведение уравнений поступательного движения больших планет и Луны и уравнений вращательного движения Луны к вековой системе, описывающей эволюцию планетных и лунной орбит (независимо от вращения Луны) и эволюцию вращения Луны (в зависимости от эволюции планетных и лунного движений). В процессе решения долгопериодические члены выделяются в вековую

систему, имеющую форму полиномиальной системы дифференциальных уравнений для поступательного движения больших планет и Луны и вращения Луны. Метод построения вековой системы основывается на разделении быстрых и медленных переменных с помощью целого ряда линейных преобразований переменных и нормализации Биркгофа. В результате, теория вращения Луны представляется в виде рядов по степеням эволюционных переменных с квази-периодическими коэффициентами.

Для осесимметричной Луны (случай Пуассона) вековая система может быть записана в виде

$$\dot{g} = in \left[ gG(g\bar{g}, h\bar{h}, z_j \bar{z}_j, w_j \bar{w}_j) + \Phi(g, \bar{g}, h, \bar{h}, z_j \bar{z}_j, w_j \bar{w}_j) \right], \quad (1)$$

$$\dot{h} = in \left[ hH(g\bar{g}, h\bar{h}, z_j \bar{z}_j, w_j \bar{w}_j) + \Psi(g, \bar{g}, h, \bar{h}, z_j \bar{z}_j, w_j \bar{w}_j) \right], \quad (2)$$

где  $G, H, \Phi, \Psi$  и являются голоморфными функциями своих аргументов.

Переменные  $g, \bar{g}, h, \bar{h}$  являются параметрами Эйлера, непосредственно связанными с углами Эйлера для Луны. Переменные  $z_j, \bar{z}_j, w_j, \bar{w}_j$  зависят от медленно меняющихся переменных типа Лапласа, связанных с координатами поступательного движения больших планет и Луны. При этом  $G = U_5^{*(1)}$ ,  $H = U_7^{*(1)}$ ,  $\Phi = U_5^{*(2)}$ ,  $\Psi = U_7^{*(2)}$ ,

$$U_{\kappa}^{*(1)} = \left( \begin{matrix} g, \kappa = 5 \\ h, \kappa = 7 \end{matrix} \right) \sum U_{iklm}^{(kprqs)} (g\bar{g})^q (h\bar{h})^s (w_N \bar{w}_N)^s \prod_{j=1}^9 (z_j \bar{z}_j)^{k_j} (w_j \bar{w}_j)^{m_j} \quad (3)$$

и

$$U_{\kappa}^{*(2)} = \sum U_{iklm}^{(kprqs)} g^p \bar{g}^q h^r \bar{h}^s (w_N \bar{w}_N)^{\max\{r-\delta_{\kappa 7}, s\}} \prod_{j=1}^9 (z_j \bar{z}_j)^{k_j} (w_j \bar{w}_j)^{m_j}. \quad (4)$$

$U_{iklm}^{(kprqs)}$  — численные коэффициенты,  $N$  — номер, равной нулю частоты для одной из облических переменных, возникающей при решении вековой системы для больших планет и Луны. Разложения вещественных функций  $G$  и  $H$  начинаются с 1 и

$$g\bar{g}G + h\bar{h}w_N \bar{w}_N H = g\bar{g} + h\bar{h}w_N \bar{w}_N.$$

Комплексные функции  $\Phi$  и  $\Psi$  удовлетворяют соотношению

$$\bar{g}\Phi + \bar{h}w_N \bar{w}_N \Psi = 0.$$

В силу исходного соотношения для  $U_{\kappa}^* = U_{\kappa}^{*(1)} + U_{\kappa}^{*(2)}$

$$\bar{g}U_5^* + \bar{h}w_N \bar{w}_N U_7^* = 0$$

система (1), (2) имеет интеграл

$$g\bar{g} + h\bar{h}w_N \bar{w}_N = C (= \text{const}). \quad (5)$$

В ГРТ было показано, что вековая система для планет и Луны

$$\begin{aligned}\dot{z}_\sigma &= i(\mu_\sigma z_\sigma + n_\sigma U_{1\sigma}^*), \\ \dot{w}_\sigma &= i(\nu_\sigma w_\sigma + n_\sigma U_{3\sigma}^*)\end{aligned}\tag{6}$$

с

$$U_{\kappa\sigma}^* = \begin{pmatrix} z_\sigma, \kappa=1 \\ w_\sigma, \kappa=3 \end{pmatrix} \sum U_{iklm}^{(\kappa\sigma)} (z_j \bar{z}_j)^{k_j} (w_j \bar{w}_j)^{m_j}, (\kappa=1, 3; \sigma=1, 2, \dots, 9)$$

допускает очевидные интегралы

$$z_j \bar{z}_j = \text{const}, \quad w_j \bar{w}_j = \text{const},\tag{7}$$

что сразу же приводит к интегрированию (6).

Здесь  $\mu = \text{diag}(\mu_1, \dots, \mu_9)$  и  $\nu = \text{diag}(\nu_1, \dots, \nu_9)$  — диагональные матрицы собственных частот движения перицентров и узлов, соответственно (при этом  $\nu_N = 0$ ).

Следовательно, вековая система, описывающая эволюцию поступательного движения больших планет и Луны и вращательного движения Луны представляется уравнениями (6), (1) и (2) с интегралами (5) и (7). Эта автономная система может быть исследована различными методами. В последующей работе будет использован метод вариации постоянных. Все вычисления были выполнены с помощью пуассоновского процессора.

#### **Руководитель проекта:**

Иванова Тамара Вениаминовна, с.н.с., Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, e-mail: [itv@ipa.nw.ru](mailto:itv@ipa.nw.ru)

#### **Состав группы:**

Рыжкова Диана Анатольевна, инженер-программист.

#### **Публикация:**

Иванова Т.В. 2016. О построении аналитической теории вращения Луны в тригонометрической форме. Труды всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2015», С. 189–194.

### **Проект 3.6 Научные задачи изучения внутреннего теплового потока Луны и методика контактных теплофизических измерений на лунном грунте**

#### **Аннотация.**

В результате испытаний получены записи циклов работы прибора с синхронными измерениями температуры в реперных точках, что позволило провести температурную градуировку датчиков прибора.

Испытания проводились в лаборатории ГЕОХИ РАН на аналоге летного прибора ТЕРМО-Л. Проводились исследования влияния температуры среды и давления и их влияние на показания термодатчиков. Контрольная аппаратура обеспечивала измерение давления с погрешностью  $\pm 20\%$ . Регистрация температуры с погрешностью менее 0,5 К производилась для трех точек вакуумной камеры и двенадцати точек камеры КТХ. Сигналы прибора регистрировались с частотой 1 Гц 16-разрядным аналого-цифровым преобразователем и вводились в компьютер.

Задачей этапа вакуумных испытаний являлось определение степени разрежения, необходимой для правильной работы прибора. Испытания проводились в активном режиме. Испытания подтвердили зависимость показаний прибора от давления, характерную для перехода от конвективного к молекулярному и, далее, вакуумному режиму теплопереноса (рис 3.5). Как видно из графика, при давлении ниже  $10^{-4}$  бар показания прибора стабилизируются. Были проведены измерения для следующих значений давления:  $5 \cdot 10^{-6}$ ,  $10^{-5}$ ,  $10^{-4}$ ,  $2 \cdot 10^{-3}$ ,  $8 \cdot 10^{-2}$ ,  $10^{-1}$ . Соответственно, для получения надежных измерений рекомендуется проводить испытания при давлении не более  $10^{-4}$  бар. Активные измерения в вакууме проводились в режиме короткого замыкания (КЗ) и холостого хода (ХХ). Режим короткого замыкания соответствует максимальному отводу тепла встроенного нагревателя и обеспечивается путем создания теплового контакта чувствительной поверхности датчика с теплопроводящей массой (медной пластиной). Тепловой контакт обеспечивался пастой КПП-8. Режим холостого хода соответствует минимальному отводу тепла нагревателя (чувствительная поверхность датчика располагается на поверхности пластины из фторопласта).

В результате испытаний получены записи циклов работы прибора с синхронными измерениями температуры в реперных точках. Эти данные позволили провести температурную градуировку датчиков прибора.

Таблица 3.1 – Цели и задачи прибора Термо-Л

Цель эксперимента	Научные задачи	Измеряемые характеристики	Физические параметры измерений	Средства измерений прибора	Ожидаемая точность измерений
Определение тепло-физических свойств лунного грунта	Определение температуры лунного грунта	Измерение температуры поверхностного слоя в пассивном режиме работы прибора	Интервал измерения температур $\pm 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	Поверхностные термодатчики на основе металло-керамических платиновых термометров	$\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
	Определение теплоемкости теплопроводности лунного грунта	Измерение температуры поверхностного слоя в активном режиме работы прибора	Интервал измерения температур $\pm 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	Поверхностные термодатчики на основе металло-керамических платиновых термометров	$\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

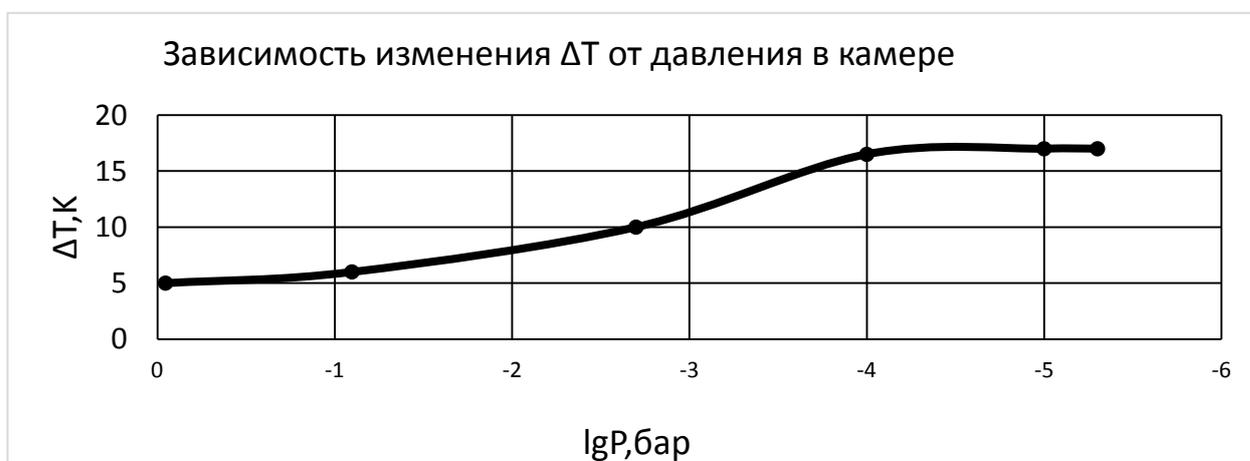


Рис. 3.5 – Зависимость разницы температуры датчиков, расположенных у нагревателя и у контакта от давления в барокамере. Данные сняты при времени нагрева 300 секунд.

**Руководитель проекта:**

Маров Михаил Яковлевич, академик, ГЕОХИ РАН, [marov@geokhi.ru](mailto:marov@geokhi.ru)

**Состав группы:**

Слюта Евгений Николаевич, к.г.-м.н., зав. лаб., Белов Дмитрий Андреевич, м.н.с.

**Публикация:**

Maikovchuk V.Yu., Belov D.A., Savelev E.G., and Slyuta E.N, Experimental research of thermal sensors on control samples of lunar soil. The Seventh Moscow Solar System Symposium, Moscow 2016. Abstr. P. 199-200.

**Проект 3.7 Теоретические и астрономические исследования механизмов диссипации приливной энергии для Луны и других объектов Солнечной системы****Аннотация.**

Изучены данные GRAIL по гравитационному полю (ГП) Луны и показано, что ее фигура сохраняет неравновесную форму, обусловленную неравномерной динамикой приливного взаимодействия с Землей.

Знание внутренней структуры Луны является ключевым для понимания происхождения и эволюции ближайшего к нам небесного тела. Луна является единственной планетой, кроме Земли, для которой сейсмические данные существуют и могут быть привлечены для выявления внутренней структуры. Но наибольшая глубина, доступная по сейсмическим данным Аполло, составляет  $\sim 1300$  км для Р-волны и  $\sim 1100$  км для S-волны (Lognonne и соавт., 2003), оставляя центральную часть «белым пятном». Weber и соавт. (2011) и Garcia и соавт. (2011) предприняли попытку выявить структуру жидких и твердых слоев ядра Луны по форме стэка сейсмических волн, отраженные на границах слоев. Модель группы Weber включала жидкое внешнее ядро (радиус  $330 \pm 20$  км), твердое внутреннее ядро (радиус  $240 \pm 10$  км) и зону низких скоростей (ЗНСВ) волн 150 км толщиной выше границы ядро-мантия. Модель группы Garcia была гораздо проще: она не включала в себя ни твердое внутреннее ядро, ни ЗНСВ, и содержала только большое жидкое ядро с радиусом  $380 \pm 40$  км. Такие значительные различия между моделями демонстрируют большую неопределенность в понимании структуры центральной части Луны, ниже зоны глубоких лунотрясений.

Для изучения Луны также активно привлекаются методы селенодезии, такие как спутниковая гравиметрия, спутниковая альтиметрия и лазерная локация. Структурные характеристики Луны, полученные из этих наблюдений, включают в себя: массу, средний радиус, моменты инерции (МИ), приливное число Лява ( $k_2$ ) и тепловую диссипацию механической энергии, выражаемую фактором добротности ( $Q$ ). Масса и средний радиус позволяют определить среднюю плотность, а МИ накладывают ограничения на профиль плотности с глубиной. Число Лява характеризует отклик планетарного тела на внешнее приливное воздействие и зависит от профиля плотности ( $\rho$ ), модуля сдвига ( $G$ ), объемного модуля упругости ( $K$ ) и вязкости ( $\eta$ ). В общем, тело с жидким и/или частично расплавленным составом вещества более деформируемо и приливное число Лява для него больше, чем для абсолютно твердого тела. Для 2-й гармоники гравитационного потенциала приливное число Лява было определено путем анализа спутниковых радиоданных и данных лазерной локации (Williams et al., 2001, 2013).

Прежний анализ включал в себя результаты старых миссий, таких как Селена (SELENE) и лунный орбитальный зонд (LRO) (Matsumoto et al., 2010; Mazarico et al., 2010; Goossens et al., 2008, 2011) и определял  $k_2$  с точностью до  $\sim 6\%$ . Последняя лунная миссия, GRAIL (см. табл. 3.2), позволила определить  $k_2$  с точностью до  $\sim 1\%$  (Konopliv et al., 2013). Такой уровень точности  $k_2$  уже позволяет частично прояснить модель структуры лунного центра. Модель физической либрации также может быть уточнена на основе последних данных (Гусев et al., 2015). Кроме того, недавнее исследование Narada et al. (2014) показывает наличие слоя низкой вязкости выше границы ядро-мантия для объяснения наблюдаемых изменений коэффициентов приливной диссипации с периодами месяц и год.

Таблица 3.2 – Современные данные селенодезии и гравиметрии, по итогам миссии GRAIL

Средний радиус ( $R$ )	1737.15 км
Масса ( $M$ )	$(7.34630 \pm 0.00088) \times 10^{22}$ кг
Нормализованный средний момент инерции ( $I_s/MR^2$ )	$0.393112 \pm 0.000012$
$J_2$ ( $C_{20}$ , ненормализованный, с приливным выступом)	$2.0330530 \text{ e-}4$
$C_{22}$ (ненормализованный, с приливным выступом)	$2.242615 \text{ e-}5$
Приливное число Лява для 2-й гармоники гравитационного потенциала ( $k_2$ )	$0.02405 \pm 0.00018$
Фактор добротности, период 1 месяц ( $Q_m$ )	$38 \pm 4$

В итоге, по указанным выше последним данным гравиметрии миссии GRAIL, фигуру Луны можно аппроксимировать трехосным эллипсоидом с главными полуосями:  $a = 1737.64$  км,  $b = 1737.21$  км,  $c = 1735.33$  км. Средняя плотность может быть оценена по полной массе и объему тела как  $\rho_b = P_n^m(\sin \varphi) = 3.3464$  г/см<sup>3</sup>. Вне планетного тела его гравитационное поле можно представить в виде ряда сферических гармоник, где присоединенный полином Лежандра (Мельхиор, 1976)

$$V(\varphi, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{mn} \cos m\lambda + S \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi)$$

Коэффициенты разложения зависят от распределения массы планеты и позволяют оценить степень неоднородности ее внутренней структуры. Независимо от механизма генезиса, Луна после формирования постепенно отодвигалась от Земли и подвергалась приливным и центробежным силам, которые формировали ее фигуру. Главные моменты инерции  $A < B < C$  обычно определяются параметрами физической либрации:  $\beta = (C - A)/B$  и  $\gamma = (B - A)/C$ , а также гармониками 2-го порядка  $C_{20} = (2C - B - A)/(2MR^2)$  и  $C_{22} = (B - A)/(4MR^2)$ . Опираясь на астрономические данные, Джеффрис первый привлек гипотезу реликтового «замороженного» выступа и предсказал величину  $\gamma/\beta = 0.75$  или, соответственно,  $C_{20}/C_{22} = 3.33$  (Джеффрис, 1960). В действительности, по последним данным GRAIL эти соотношения сильно различаются с предсказанными:  $\gamma/\beta = 0.36$  или, соответственно,  $C_{20}/C_{22} = 9.1$ . Более детальный анализ гармоник 2-го порядка показывает величину «негидростатичности» фигуры Луны:  $C_{20} = 2.033 \cdot 10^{-4}$  оказывается больше «гидростатичного» в 22 раза,  $\beta = 6.315 \cdot 10^{-4}$  и  $\gamma = 2.279 \cdot 10^{-4}$  больше в 17 и 8 раз, соответственно.

Для объяснения таких значительных отклонений привлекались гипотезы начальной орбиты Луны с сильным эксцентриситетом и спин-орбитальным резонансом 3:2 (Garrick-Bethell, 2006), а также движения вокруг Земли с изначально сильно наклоненной осью вращения (Chuk, 2004). В ходе дальнейшей эволюции, приливное воздействие Солнца привело бы орбиты системы Земля-Луна в современное положение, оставив следы в виде некоторых аномалий вращения и фигур планет. В отличие от «внешних» гипотез, мы попытаемся найти «внутреннюю» причину негидростатичности Луны, основываясь на особенностях ее строения, эволюции орбиты и известных геохимических данных по лунным породам.

Расчеты гравитационного поля проводились для двух моделей внутреннего строения ранней Луны (первый миллиард лет), которые могут подсказать причины неравновесности

ее современной фигуры, зафиксированную в реликтовом выступе ( $d$  – радиальная толщина слоя):

1. Модель А (2 слоя, без сформированного ядра). «Средняя» кора ( $\rho_1 \approx 3 \text{ г/см}^3$ ,  $d_1 \approx 848 \text{ км}$ , анортит + габбро) + «тяжелая» мантия ( $\rho_2 \approx 5.54 \text{ г/см}^3$ ,  $d_2 \approx 889 \text{ км}$ , габбро+железо+пириты). Зависимость  $C_{20}/C_{22}$  от размеров внутреннего ядра и плотности «коры» показана на рис. 3.6.

2. Модель В (3 слоя, сформированное ядро). «Легкая» кора ( $\rho_1 \approx 2.6 \text{ г/см}^3$ ,  $d_1 \approx 207 \text{ км}$ , анортозит) + «Средняя» мантия ( $\rho_1 \approx 3.4 \text{ г/см}^3$ ,  $d_1 \approx 950 \text{ км}$ , оливин-клинопироксен габбро) + «тяжелое» ядро ( $\rho_2 \approx 8.6 \text{ г/см}^3$ ,  $d_2 \approx 580 \text{ км}$ , железо+никель+пириты)

Показано влияние размеров и массы внутреннего ядра на 2-е гармоники ГП по данным GRAIL.

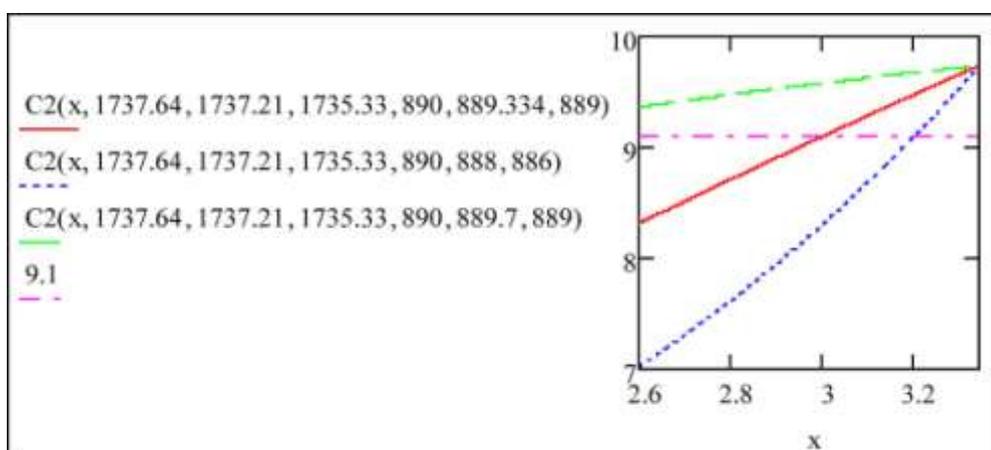


Рис. 3.6 – Зависимость  $C_{20}/C_{22}$  от размеров внутреннего ядра (модель А).

#### Руководитель проекта:

Воропаев Сергей Александрович ГЕОХИ РАН [voropaev@geokhi.ru](mailto:voropaev@geokhi.ru)

#### Состав группы:

Проф. д.ф.-м.н. Гусев А.В., Казанский Федеральный Университет, Институт Астрономии, снс Иванов А.А., ГЕОХИ РАН, мнс Душенко Н.В., ГЕОХИ РАН.

#### Публикации:

1. S. Voropaev. Value of tidal effects on the early tectonics of Moon. International Symposium AstroKazan-2016, Lunar Exploration and Space Technology Heritage, Kazan (2016).
2. Gusev A. et al. Tidal-librational dissipative dynamics of the Moon and radio/laser beacons VLBI/LRR/LLR technologies for Cnahge-5/6, Luna 25/26/27, ILOM missions. 7<sup>th</sup> Moscow Solar System Symposium, Moscow (2016).

### **Проект 3.8 Исследование физических свойств реголита Луны методами активной радиолокации**

#### **Аннотация.**

Показано, что диэлектрические характеристики реголита и коренных пород образцов лунного грунта, доставленных на Землю миссиями «Луна» и «Apollo», существенно зависят от частоты взаимодействующего электромагнитного поля и температуры грунта.

На данный момент для дистанционного исследования грунта Луны, наиболее разнообразным, теоретически обоснованным и практически проверенным является комплекс радиолокационных экспериментов. В основе радиолокации лежит способность радиосигнала менять свои параметры при взаимодействии с грунтом. Восстановление глубинного распределения диэлектрических характеристик грунта по измененным параметрам отраженного радиосигнала является некорректно поставленной обратной задачей, эффективность решения которой, а так же достоверность интерпретации результатов натурных измерений, зависят от соответствия нашего представления об исследуемом объекте действительности, от формирования этого представления в виде адекватной электрофизической модели грунта с учетом всей априорной информации о свойствах пород, слагаемых верхний покров Луны, и условий на поверхности. Цель работы 2016 г. – сбор, анализ результатов лабораторных измерений диэлектрических характеристик образцов лунного грунта, доставленных на Землю в рамках миссий “Apollo” и “Луна”, моделирование частотной и температурной зависимости диэлектрических характеристик лунных пород для последующей интеграции в электрофизическую модель грунта Луны.

Диэлектрические параметры, действительная часть диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$ , от которой зависит скорость распространения электромагнитной волны, и тангенс потерь  $tg\delta$ , от которого зависит поглощение волн, лунных образцов измерялись рядом научных коллективов. Цели проведенных измерений были разные: в одних работах исследовалось изменение  $\epsilon'$  и  $tg\delta$  для разных частот при комнатной температуре и нормальном давлении, в других для одной частоты, но при меняющейся температуре, давлении и т.д. Большинство исследований проведено на частоте 450 МГц, в небольшой серии работ рассмотрен частотный диапазон от 0.1 до 10 МГц и единичные измерения выполнены на частоте 9.375 ГГц. Для анализа были отобраны результаты измерений тех образцов, для которых лабораторные измерения были проведены в нескольких частотных диапазонах при атмосферном давлении, температуре 20-30°C и похожих условиях хранения. Таких

образцов найдено 7 (4 – реголита и 3 – коренных пород). В диапазоне от 10 Гц до 10 ГГц была построена зависимость от частоты инвариантной величины – удельного тангенса диэлектрических потерь образцов  $\text{tg}\delta/\rho$ . Оказалось, что для рассмотренных образцов диапазон изменения значений  $\text{tg}\delta/\rho$  осадочных пород (? реголита?) значительно шире диапазона изменения  $\text{tg}\delta/\rho$  коренных пород. Поведение графиков для всех образцов одинаково: в диапазоне частот  $10^2 - 10^6$  Гц  $\text{tg}\delta/\rho$  убывает, что, связано с электропроводимостью грунта, на частотах 6 – 8 МГц значения  $\text{tg}\delta$  минимальны; последующий рост  $\text{tg}\delta$  на частотах выше 8 МГц, по-видимому, связан с релаксационными эффектами. При этом минимальные значения связаны с суммарным процентным содержанием двуоксида титана  $\text{TiO}_2$  и оксида железа  $\text{FeO}$ : чем выше процентное содержание металлов, тем больше потери. Значения  $\epsilon'$  для всех частот практически постоянны.

На основе теории диэлектриков была разработана методика аппроксимации экспериментальных данных по прототипу формулы Дебая, разработанной Сканави для алюмосиликатных диэлектриков. Достоинство такой аппроксимации состоит в том, что кроме зависимости от частоты это приближение учитывает зависимость от температуры.

На Луне отсутствует атмосфера, поэтому перепады температуры на ее поверхности велики: разница между дневной и ночной температурами достигает  $300^\circ\text{K}$ , минимальная температура по оценкам радиометра Diviner (**D**iviner **L**unar **R**adiometer **E**xperiment, LRO, NASA) составила 25-35К. Диэлектрические параметры лунных пород моделировались для диапазона температур от 100 до 350К.

На рис. 3.7 приведены результаты расчетов частотной зависимости  $\epsilon'$  и  $\epsilon'' = \epsilon' \text{tg}\delta$  образца 66041. Линия 1 дана для температуры 100К, 2 – 150К, 3 – 200К и 4 – 300К. Из результатов моделирования следует, что с ростом температуры область дисперсии диэлектрической проницаемости смещается в сторону высоких частот. Максимальное значение мнимой части диэлектрической проницаемости в области дисперсии остается постоянным для всех частот и равно  $(\epsilon_0 - \epsilon_\infty)/2$ , минимальное значение – уменьшается.

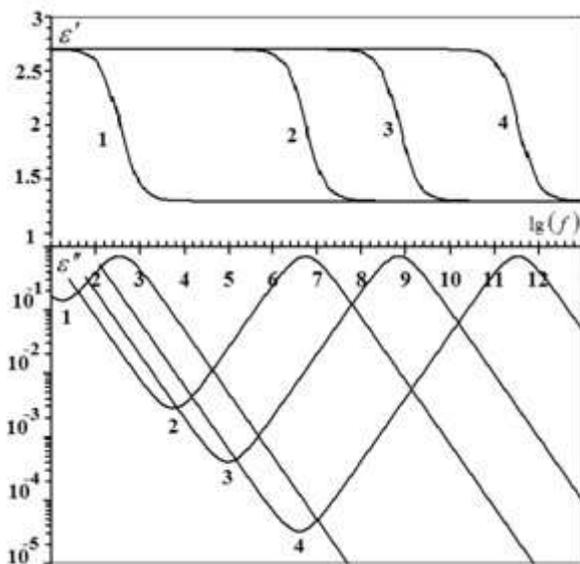


Рис. 3.7

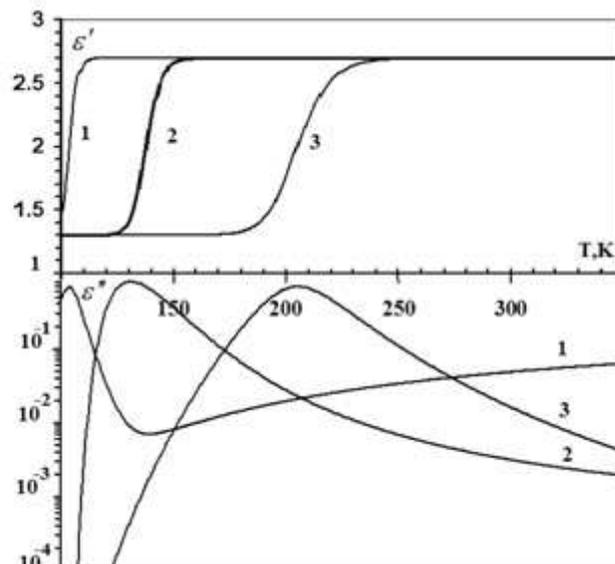


Рис. 3.8

На рис. 3.8 приведены результаты расчетов  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  для образца 66041 в зависимости от температуры для фиксированных частот. Линия 1 соответствует частоте 1 кГц, линия 2 – 1 МГц и линия 3 – 1 ГГц. Из результатов расчетов следует, что в зависимости от температуры верхнего слоя грунта Луны,  $\varepsilon'$  может принимать значения от  $\varepsilon_0$  до  $\varepsilon_\infty$ , а  $\varepsilon''$  для частоты 1 ГГц изменяться более чем на два порядка. При температурах ниже 150К на частоте 1 ГГц  $\varepsilon''$  меньше  $10^{-4}$  и  $\varepsilon' \approx \varepsilon_\infty < \varepsilon_0$ . Оба факта обуславливают прозрачность данной породы для электромагнитных волн этой частоты. При температурах, близких к 200К, поглощение грунтом волн частоты 1 ГГц возрастает, практически до максимального значения  $(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)/2$ , а затем, с повышением температуры, убывает. При температуре выше 250К  $\varepsilon'$  не меняется с увеличением температуры, а  $\varepsilon''$  изменяется наиболее существенно для частоты 1 ГГц приблизительно в диапазоне  $4 \cdot 10^{-3} - 10^{-1}$ .

**Выводы.** При разработке радиоаппаратуры для исследования грунта Луны, прогнозировании и, особенно, при интерпретации результатов натуральных измерений, следует учитывать частотную зависимость и возможность суточных вариаций диэлектрических характеристик верхнего слоя грунта. Это наиболее актуально для исследований, проводимых на ночной стороне Луны, в районах, где существуют вечно затененные кратеры, и в районе терминатора, так как рядом могут находиться участки поверхности с разной температурой. При температуре на поверхности Луны ниже 100К, верхний покров имеет настолько низкие значения тангенса потерь и действительной части диэлектрической проницаемости, что верхний слой грунта практически прозрачен, и отражение радиоволн должно происходить от коренных пород. При температурах от 150

до 200К поглощение на волнах мегагерцового и гигагерцового диапазона самое высокое и отражение происходит от тонкого слоя верхних пород. При температурах выше 200К диэлектрические параметры грунта меняются слабо. При анализе отражения радиоволн этими изменениями можно пренебречь.

#### **Руководитель проекта:**

Смирнов В.М., д.ф.-м.н., с.н.с., ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, заведующий лабораторией; [vsmirnov@ire.rssi.ru](mailto:vsmirnov@ire.rssi.ru)

#### **Состав группы:**

Марчук В.Н., к.ф.-м.н., с.н.с., ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Юшкова О.В., к.ф.-м.н., с.н.с. ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Кибардина И.Н. к.ф.-м.н., РАН, с.н.с., ИРЭ им. В.А.Котельникова.

#### **Публикации:**

1. Смирнов В.М., Юшкова О.В., Марчук В.Н., Андреев В.Ю. Космические радиолокаторы подповерхностного зондирования грунта Марса и Луны // Радиотехника и электроника, 2016, №2, С. 122-129.
2. Smirnov V. et al Radar complex in the “Luna – Resource” project // Seventh Moscow Solar System Symposium (7 M-S3), IKI RAS, 10-14 October 2016.
3. Smirnov V. et al Radar complex in the “Luna – Resource” project // International conference COSMONAUTICS — XXI, ЦНИИмаш, г. Королёв, 28 – 30 ноября 2016 г.
4. Смирнов В.М., Марчук В.Н., Юшкова О.В. и др. Радиолокационный комплекс РЛК-Л в проекте «Луна-Ресурс» // ФАНО, Научно-практическая конференция «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития», 15-16 ноября 2016.

#### **В печати:**

1. Юшкова О.В., Яковлев О.И. Анализ возможностей определения характеристик грунта Луны методом бистатической радиолокации // Радиотехника и электроника, Т.62, № 1, 2017
2. Кибардина И.Н., Юшкова О.В. Определение плотности и процентного содержания оксидов металлов грунта Луны по радиолокационным данным // Космические исследования, 2017
3. Юшкова О.В., Кибардина И.Н. Диэлектрические свойства верхнего покрова Луны // Астрономический вестник, 2017

## НАПРАВЛЕНИЕ 4. Планеты-гиганты, их спутники и кольца

Кураторы направления: О.Л. Кусков (ГЕОХИ), Ю.М. Торгашин (ИНАСАН), П.А.

Беспалов (ИПФ).

4.1	Проект 4.1: Исследование тонкой структуры спектров радиоизлучения Солнца и Юпитера как источника информации о физических процессах в солнечной короне и магнитосфере	ИПФ РАН	Шапошников В.Е.
4.2	Проект 4.2: Изучение динамики систем спутников планет-гигантов. Построение численных теорий движения основных спутников систем планет-гигантов и их использование для уточнения эфемерид Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна	ИПА РАН	Питьева Е.В.
4.3	Проект 4.3: Роль примитивных каменно-ледяных тел в формировании вещества регулярных спутников Юпитера и Сатурна	ГЕОХИ РАН	Дорофеева В.А.
4.4	Проект 4.4: Исследование динамики спутников планет Солнечной системы по астрометрическим и фотометрическим наблюдениям	ГАО РАН	Рощина Е.А.
4.5	Проект 4.5: Исследование кинетики основных и малых составляющих атмосфер планет земной группы, спутников планет Титана и Тритона. Исследование общей циркуляции атмосфер Венеры и Титана, а также радиационного нагрева и переноса аэрозолей в этих атмосферах	ПГИ КНЦ РАН	Кириллов А.С., Мингалев И.В.

### Проект 4.1 Исследование тонкой структуры спектров радиоизлучения Солнца и Юпитера как источника информации о физических процессах в солнечной короне и магнитосфере

**Аннотация.** Исследовано происхождение зебра-структуры – дрейфующих во времени квазигармонических полос повышенной яркости, наблюдавшихся в магнитосфере Юпитера на динамическом спектре километрового радиоизлучения в интервале частот ~ 20-70 кГц.

Впервые показано, что наблюдаемая зебра-структура является проявлением эффекта двойного плазменного резонанса на ионных циклотронных гармониках. Километровое излучение возникает в результате трехволнового процесса, в котором происходит слияние ионных циклотронных волн с частотами ~ 100 Гц с плазменными волнами, генерируемыми на верхней гибридной частоте. Предложенный механизм позволяет оценить параметры магнитосферной плазмы в областях, недоступных для наземных и спутниковых измерений, и объяснить все основные свойства наблюдаемого излучения,

включая увеличение частотного интервала между полосами зебра-структуры с ростом частоты радиоизлучения.

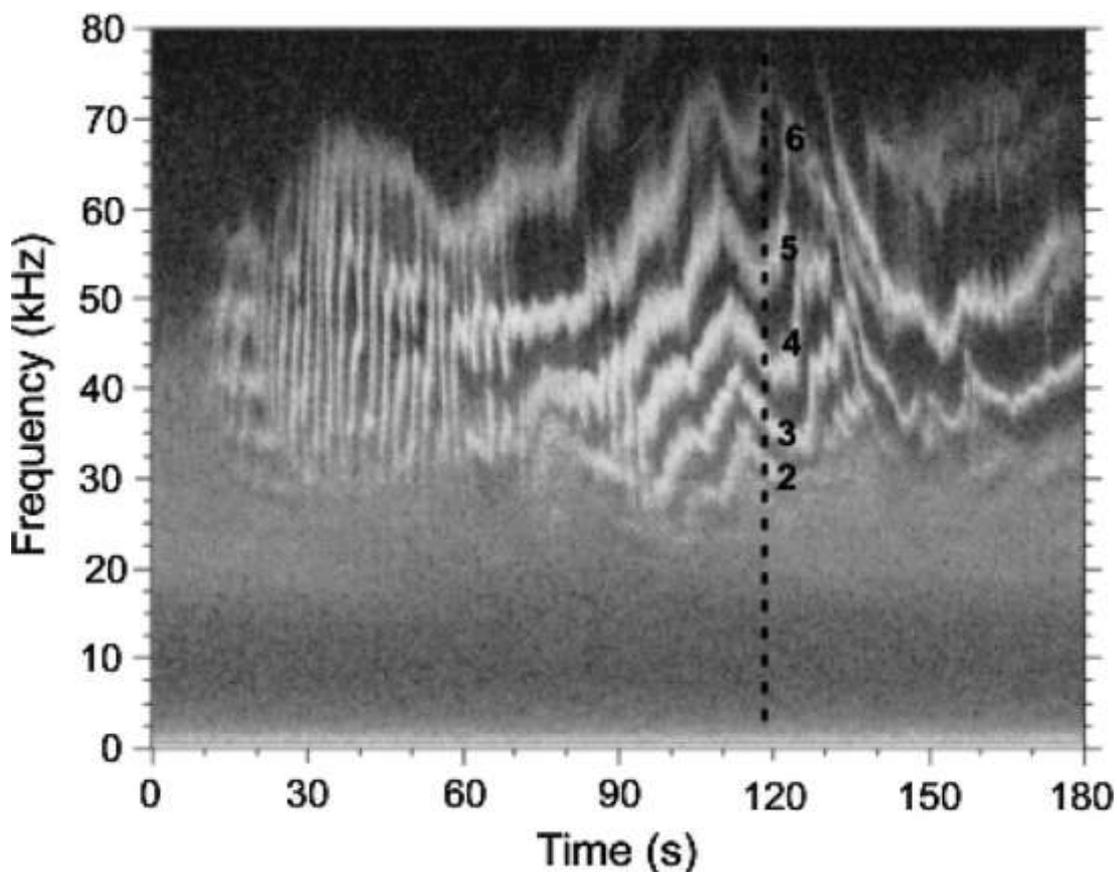


Рис. 4.1 – Динамический спектр с зебра-структурой в километровом излучении Юпитера.

Наблюдения электромагнитного излучения от Юпитера, выполненные на КА Cassini, впервые обнаружили спектральную структуру, представляющую собой на динамическом спектре систему параллельных дрейфующих полос с повышенным уровнем радиоизлучения, разделенных увеличивающимися с ростом частоты частотными интервалами (рис. 4.1). Указанная структура имеет сильную аналогию с так называемой зебра-структурой (ЗС) в солнечном метровом и дециметровом радиоизлучении. Исследования солнечной ЗС показали, что наилучшее соответствие со всей совокупностью наблюдаемых характеристик обеспечивается в рамках теории, основанной на эффекте двойного плазменного резонанса (ДПР) [1]. Эффект двойного плазменного резонанса представляет собой существенное увеличение инкремента циклотронных волн при совпадении верхней гибридной частоты с частотой гармоник электронной гирочастоты. В неоднородной плазме повышенное излучение, соответствующее разным полосам, возникает в пространственно разнесенных источниках, где частота верхнего гибридного резонанса совпадает с одной из гармоник электронной гирочастоты.

Необходимым условием для реализации эффекта ДПР на гармониках электронной гирочастоты является существенное превышение плазменной частоты над электронной гирочастотой, т.е. необходима слабо анизотропная плазма. В магнитосфере Юпитера плазма сильно анизотропная, т.е. электронная гирочастота заметно превышает плазменную частоту, и только в области экваториального токового слоя плазма слабо анизотропная. Однако реализация эффекта ДПР в области токового слоя приводит к частотной структуре, противоречащей наблюдениям [2,3].

Альтернативная возможность интерпретации ЗС в километровом излучении Юпитера с помощью эффекта ДПР состоит в рассмотрении ионных циклотронных гармоник. Реализация этого эффекта возможна только при условии сильной анизотропии для электронов и слабой анизотропии для ионов. Это означает, что источник должен быть расположен вне области экваториального токового слоя, где для плазмы выполняется условие слабой анизотропии для электронов. Наиболее оптимальные условия для реализации эффекта ДПР на ионных циклотронных гармониках и объяснения на основе этого эффекта всех основных свойств наблюдаемой ЗС существуют в магнитосфере Юпитера вблизи магнитной оболочки  $L=15$  в интервале широт 40-50 градусов. В соответствии с современными представлениями о строении магнитосферы Юпитера мы предположили [3], что плазма в области источника ЗС представляет собой равновесную электрон-протонную плазму, сильно анизотропную для электронов и слабо анизотропную для протонов. Небольшая примесь горячих электронов и протонов, захваченных магнитным полем и неравновесных по поперечным относительно магнитного поля скоростям, обуславливает генерацию плазменных волн с непрерывным спектром на электронной гирочастоте и на ионных циклотронных частотах. В областях магнитосферы Юпитера, где условие ДПР выполняется для ионных циклотронных гармоник, возникает повышенная по сравнению с окружающим фоном генерация продольных ионных циклотронных волн. Электромагнитное излучение, возникающее в результате трехволнового взаимодействия, в котором происходит слияние высокочастотных и низкочастотных плазменных волн, наблюдается в виде квазиэквидистантных полос повышенной яркости на фоне континуума.

Предложенная модель ЗС в километровом излучении Юпитера в полном соответствии с наблюдениями объясняет наличие квазигармонических полос повышенной яркости на динамическом спектре с расстоянием между полосами, существенно меньшим, чем сама частота, и увеличение частотного разнесения полос с ростом частоты.

**Руководитель проекта:**

Шапошников Владимир Евгеньевич – доктор физ.-мат. наук, снс, Институт прикладной физики РАН, главный научный сотрудник, [sh130@appl.sci-nnov.ru](mailto:sh130@appl.sci-nnov.ru), (831) 416-48-81.

**Состав группы:**

Зайцев Валерий Васильевич – доктор физ.-мат. наук, профессор, Институт прикладной физики РАН, главный научный сотрудник, [za130@appl.sci-nnov.ru](mailto:za130@appl.sci-nnov.ru), (831) 416-06-59;

Злотник Елена Яковлевна – доктор физ.-мат. наук, снс, Институт прикладной физики РАН, ведущий научный сотрудник, [zlot@appl.sci-nnov.ru](mailto:zlot@appl.sci-nnov.ru), (831) 416-06-59.

**Публикации:**

1. В. В. Железняков, Е. Я. Злотник, В.В. Зайцев, В.Е. Шапошников «Эффект двойного плазменного резонанса и его роль в радиоастрономии. УФН, т. 186, № 10, сс. 1090-1116, 2016, DOI: 10.3367/UFNr 2016.05.037813.

2. E. Ya. Zlotnik, V.E. Shaposhnikov, V.V. Zaitsev “Interpretation of the zebra pattern in the Jovian kilometric radiation” J. Geophys. Res. 121, Issue 6, pp. 5307-5318, 2016, DOI: 1002/2016JA022655.

**Проект 4.2 Изучение динамики систем спутников планет гигантов. Построение численных теорий движения основных спутников систем планет-гигантов и их использование для уточнения эфемерид Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна****Аннотация.**

а) По обширным рядам наблюдений разного типа с 1874 г. по 2015 г. построены уточненные версии численных теорий движения галилеевых спутников Юпитера (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто) и восьми классических спутников Сатурна (Мимас, Энцелад, Тефия, Диона, Рея, Титан, Гиперион, Япет).

б) Создана новая версия теории движения планет и Луны (EPM2015) доступная на сайте ИПА РАН <http://iaaras.ru/dept/ephemeris/epm/>

Построены новые версии численных теорий галилеевых спутников Юпитера (Ио, Европа, Ганимед, Каллисто) на интервале 1891-2025 гг. и восьми классических спутников Сатурна (Мимас, Энцелад, Тефия, Диона, Рея, Титан, Гиперион, Япет) на интервале 1870-2025 гг. Построенные теории представлены в виде полиномов Чебышева. Было выполнено

совместное интегрирование уравнений движения этих спутников с учетом их взаимных возмущений, а также возмущений от Солнца, планет и потенциалов центральных планет. К элементам орбит спутников получены поправки по 58643 астрометрическим наблюдениям разного типа, выполненным в 1874-2015 гг. Статистические данные по базе оптических наблюдений спутников приведены в таблице 4.1. Для каждого спутника приведены общий период используемых наблюдений и их общее число, а также среднеквадратические ошибки (СКО) наблюдений, которые приводятся по прямому восхождению и склонению для каждого типа наблюдений соответственно. На графиках 4.2–4.4 приведены результаты остаточных невязок сравнения с наблюдениями, как пример, для спутника Юпитера Ио и спутников Сатурна Мимаса и Реи. Наблюдения Мимаса в конце 19 в. – начале 20 в. были очень неточными.

Таблица 4.1 – Астрометрические наблюдения спутников

Планета	Спутник	Период наблюдений	Число наблюдений	СКО различных типов наблюдений, "							
				абсолютные позиционные		Дифференциальные					
				$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	Планета-спутник		Спутник-спутник		Взаимные явления	
$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$				
Юпитер	Ио	1891-2015	4079	.10-.30	.12-.26	.05-.15	.03-.20	.03-.90	.02-.81	.04-.05	.03-.07
	Европа	1891-2015	3920	.12-.28	.12-.26	.02-.14	.04-.20	.05-.73	.02-.70	.04-.05	.03-.07
	Ганимед	1891-2015	2931	.13-.23	.10-.28	.07-.16	.05-.31	.01-.99	.02-.90	.04-.09	.04-.06
	Каллисто	1891-2015	2982	.10-.23	.09-.27	.04-.17	.03-.47	.09-.93	.12-.93	.04-.12	.07-.10
Сатурн	Мимас	1875-2015	1646	.26-.43	.11-9.9	.09-5.3	.10-.22	.05-8.9	.10-3.4	.01	.03
	Энцелад	1875-2015	3908	.12-.47	.11-.93	.12-.43	.05-.34	.06-.48	.05-.26	.02-.06	.03-.04
	Тетфия	1875-2015	7581	.12-.89	.10-.81	.13-.81	.05-.43	.04-.74	.04-.37	0.5	.01-.09
	Диона	1875-2015	7114	.09-.70	.07-.84	.10-.44	.05-.50	.04-.71	.04-.29	0.4	.03-.05
	Рея	1875-2015	9469	.06-.78	.08-.85	.10-1.6	.05-.50	.04-.73	.04-.35	0.5-0.6	.06-.07
	Титан	1875-2015	4977	.07-.43	.08-.78	.10-.43	.06-.49	.09-.35	.07-.20	.01	.12
	Гиперион	1875-2015	3319	.07-4.9	.36-1.6	1.9-7.0	1.1-3.0	.42-7.5	.12-3.5	–	–
	Япет	1875-2015	3723	.05-.38	.05-.82	.12-.99	.16-.38	.03-.60	.03-.38	–	–

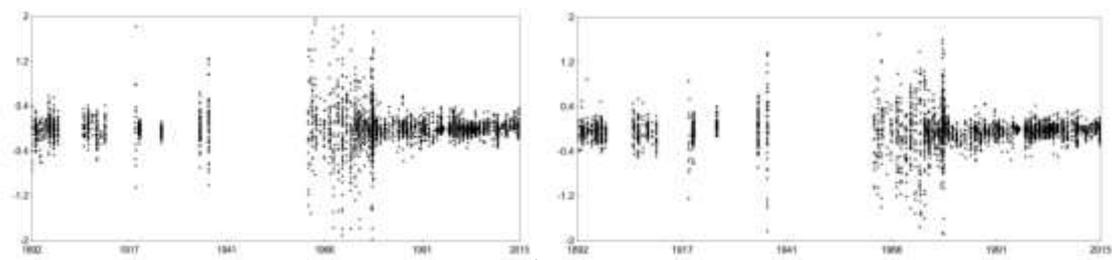


Рис. 4.2 – Остаточные невязки по прямому восхождению и склонению для Ио, в ″.

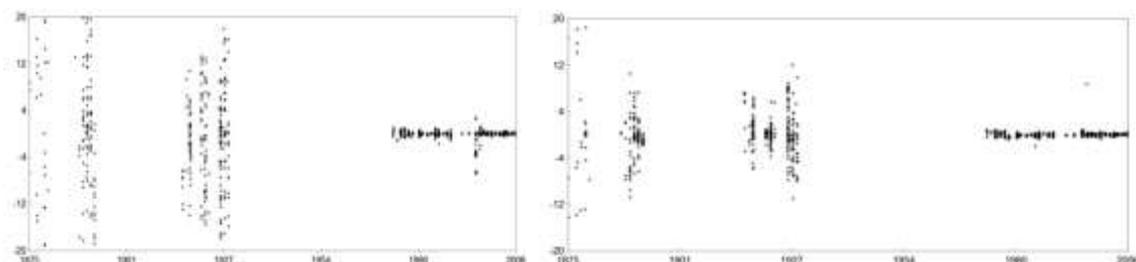


Рис. 4.3 – Остаточные невязки по прямому восхождению и склонению для Мимаса, в ″.

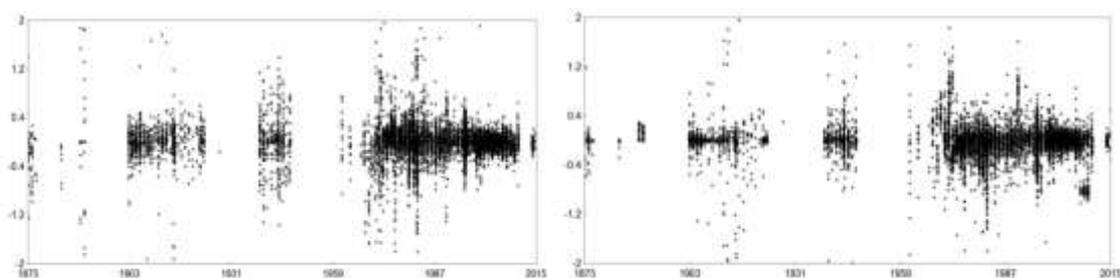


Рис. 4.4 – Остаточные невязки по прямому восхождению и склонению для Реи, в ″.

Построенные теории движения спутников внешних планет были использованы для обработки позиционных наблюдений этих спутников и уточнения эфемериды внешних планет.

Создана новая отечественная версия эфемерид планет и Луны — EPM2015 на основе программного комплекса ЭРА-8, полностью переработанного прежнего пакета ЭРА-7. Для EPM2015 была реализована модель орбитально-вращательного движения Луны, основанная на уравнениях, использованных для построения лунной части эфемерид JPL DE430 в совокупности с современными астрономическими, геодинамическими и селенодинамическими моделями. Луна рассматривается как эластичное тело, имеющее вращающееся жидкое ядро. Планетная часть эфемерид EPM2015 была обновлена добавлением двумерного астероидного кольца астероидов вместо одномерного и включением 30 транснептуновых объектов в совместное интегрирование. Эфемериды улучшены по более чем 140000 наблюдений и их нормальных мест, включая новые данные от космических аппаратов (КА) Cassini и MESSENGER. На рисунке 4.5 показаны

десятилетние (2004-2014 гг.) остаточные невязки КА Cassini, которые позволили значительно уточнить эфемериды Сатурна.

Эфемериды EPM2015 доступны на сайте ИПА РАН <http://iaaras.ru/dept/ephemeris/epm/>

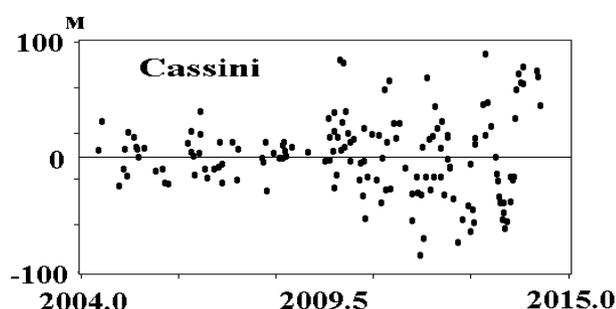


Рис. 4.5 – Остаточные невязки дальности КА Cassini в метрах.

**Руководитель проекта:**

Питьева Елена Владимировна, доктор ф.-мат. наук,  
Институт прикладной астрономии РАН, [evp@iaaras.ru](mailto:evp@iaaras.ru)

**Состав группы:**

Космодамианский Г.А., Павлов Д.А.

**Публикации:**

1. Космодамианский Г.А., Павлов Д. А., Питьева Е. В. Новые версии эфемерид ИПА—EPM2015 и спутников Юпитера и Сатурна // Труды ИПА РАН. - СПб.: Наука, 2016. (в печати).
2. Павлов Д.А. Уточнение параметров орбиты и либрации Луны на основе модели DE430 // Известия ГАО в Пулкове: Труды Всероссийской астрометрической конференции "ПУЛКОВО-2015", 2016, Санкт-Петербург, № 223. с. 229-234.
3. Питьева Е. В. Астрометрические наблюдения для построения планетных эфемерид // Известия ГАО в Пулкове: Труды Всероссийской астрометрической конференции "ПУЛКОВО-2015", 2016, Санкт-Петербург, № 223. с. 85-70.
4. Питьева Е. В., Павлов Д. А., Скрипниченко В. И. Повышение точности фундаментальные эфемерид планет (EPM) // Труды ИПА РАН. - Санкт-Петербург, 2016. Вып. 36. С. 41-48.
5. Pavlov D. A., Williams J. G., Suvorkin V. V. Determining parameters of Moon's orbital and rotational motion from LLR observations using GRAIL and IERS-recommended models // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 2016, Vol. 126, Issue 1-3, P. 61-88.

6. Pitjeva E.V., N.P. Pitjev N.P. Masses of asteroids and total mass of the main asteroid belt. // Proc. of IAU Symposium "Asteroids: New Observations, New Models ", 2016, eds. S. Chesley, A. Morbidelli, R. Jedicke, & D. Farnocchia, Vol. 318, P. 212-217.
7. Pitjeva E.V. VLBI data are the base of orientation of planetary ephemerides with respect to ICRF2 and improvement of other ephemeris parameters // 13th European VLBI Network Symposium and Users Meeting on September 20-23, 2016, St. Petersburg, Russia, 28-29, (program and abstracts).

### **Проект 4.3 Роль примитивных каменно-ледяных тел в формировании вещества регулярных спутников Юпитера и Сатурна**

#### **Аннотация.**

На основе экспериментальных данных по компонентному и изотопному составу комет различных динамических типов, а также вещества регулярных спутников Юпитера и Сатурна найдена генетическая связь между веществом примитивных каменно-ледяных тел и регулярных спутников Сатурна Энцелада и Титана.

**I.** 1) Оценен вероятный состав первичного вещества регулярных спутников Юпитера и Сатурна на основе экспериментальных данных по химическому и изотопному составу летучих на Титане и Энцеладе, а также составу комет как представителей примитивных каменно-ледяных тел, образовавшихся в ранней Солнечной системе. Используя полученные ранее модельные оценки температурных условий в околосолнечном газопылевом протопланетном диске и в протоспутниковых дисках Юпитера и Сатурна для разных моментов времени эволюции Солнечной системы, выявлена генетическая связь вещества примитивных каменно-ледяных тел с веществом Энцелада.

Одним из доказательств этой связи служит близость значений изотопного состава водорода в молекуле воды большинства комет и значения  $D/H_{H_2O}$  в водных плюмах Энцелада, как это видно из рис. 4.6.

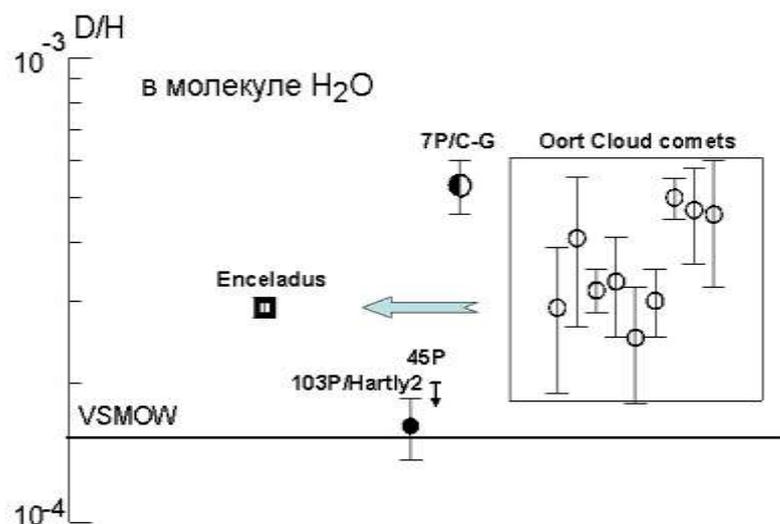


Рис. 4.6 – Изотопный состав водорода в молекуле воды в объектах внешней части Солнечной системы.

2) Разработана термодинамическая модель образования азотно-метановой атмосферы крупнейшего регулярного спутника Сатурна – Титана. Результаты моделирования показали принципиальную возможность конверсии газообразных  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  – основных азот- и углерод содержащих молекул в примитивных каменно-ледяных телах ранней Солнечной системы в  $\text{N}_2$  и  $\text{CH}_4$  соответственно в условиях подледного водного океана, вероятно, существующего на Титане, при относительно невысоких температурах и давлениях. Одним из доказательств вероятности такого механизма образования атмосферы Титана служит близость изотопных отношений в молекуле  $\text{NH}_3$  в веществе комет и  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}_{\text{N}_2}$  в атмосфере Титана как это показано на рис. 4.7.

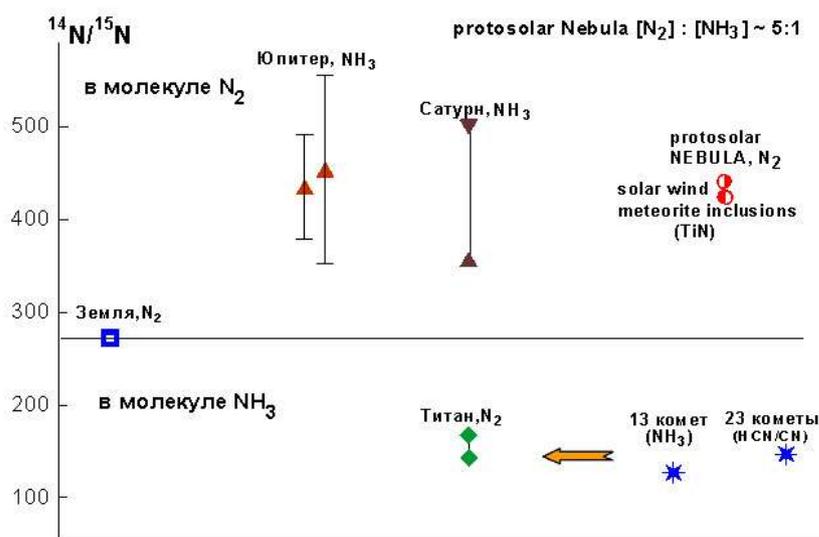


Рис. 4.7 – Изотопный состав азота в объектах внешней части Солнечной системы.

Это позволяет сделать вывод, что вещество примитивных каменно-ледяных тел играло важную роль в формировании первичного вещества Титана.

**II.** Начата разработка моделей термической эволюции комет. Ранее было показано, что состав кометных ком неадекватно отражает состав летучих их ядер. Основные причины этого заключаются в неравномерности нагрева поверхностного слоя ядер комет – источника летучих в их комах. К настоящему времени выполнен первый этап – построена 3D модель освещенности поверхности кометного ядра (с учетом ее неоднородности) для различных параметров орбиты, углов наклона и характеристик собственного вращения на примере кометы 67P/Чурюмова-Герасименко. Поверхность кометы 67P была аппроксимирована треугольными элементами (11420 элементов и 5689 вершин), основой послужили имеющиеся фотографии ее ядра и 3D модель ЕКА (рис. 4.8а). Полученные нормали к каждому из элементов позволяют рассчитать интенсивность освещенности отдельных участков кометы Солнцем и ее изменение по мере движения кометы по орбите в любой момент времени с учетом ее собственного вращения (рис. 4.8б).

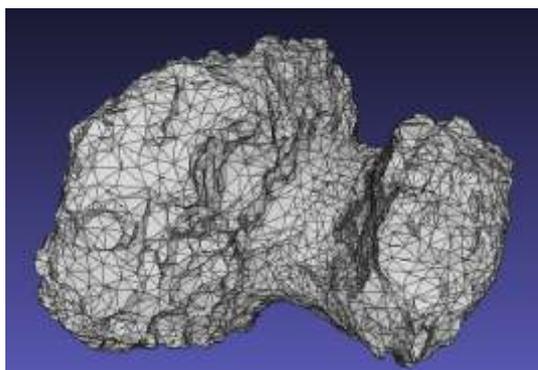


Рис. 4.8(а) – Аппроксимация поверхности кометы 67P треугольными элементами

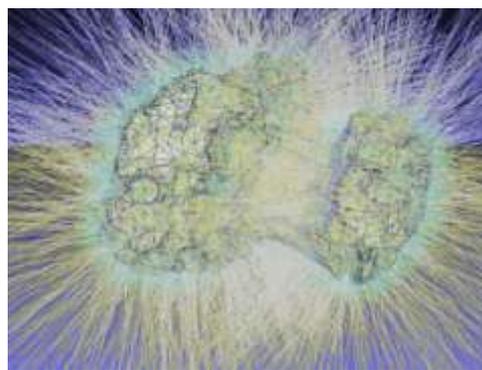


Рис. 4.8(б) – Положение нормалей к плоскостям элементов

Разработанная модель позволяет получить распределения температур на поверхности кометы 67P/Чурюмова-Герасименко в фиксированный момент времени и на любом гелиоцентрическом расстоянии. Примеры представлены на рис. 4.9.

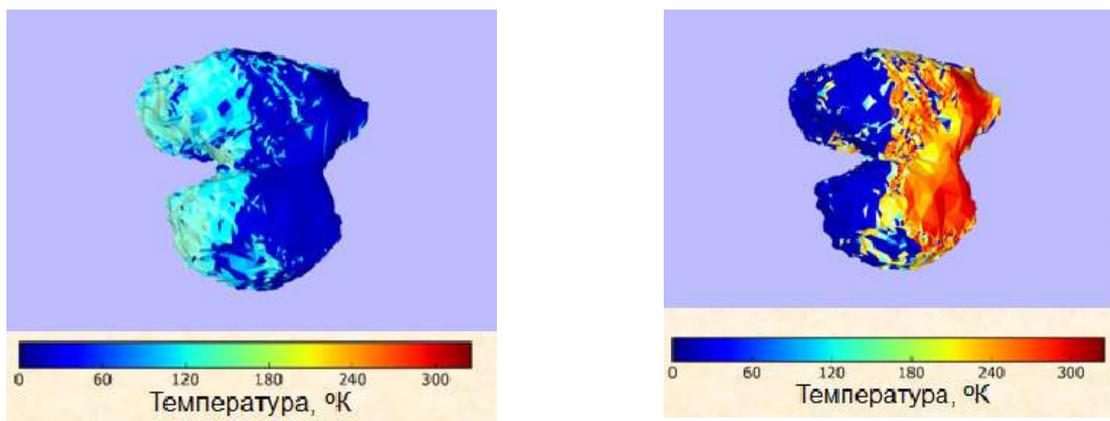


Рис. 4.9 – Распределения температур на поверхности кометы 67P/Чурюмова-Герасименко в фиксированный момент времени в афелии (слева) и перигелии (справа).

Рассчитанные распределения температур в различных точках поверхности служат граничными условиями для моделей тепловой эволюции субповерхностных областей вещества кометных ядер.

**III.** Проведены квантово-химические расчеты УФ-спектров флуоресценции и поглощения пирена ( $C_{16}H_{10}$  – ПАУ) в газофазной среде и в водяном кластере, моделирующем водяной лед, что позволит выяснить химический состав матрицы, в которой находятся молекулы пирена. В частности, изучение УФ-спектров пирена на поверхности Ганимеда с борта Jupiter Icy Moon Explorer (JUICE) и спускаемого аппарата Laplace-P позволит получить новые сведения о химическом составе поверхности этого небесного тела.

**Руководитель проекта:**

Дорофеева Вера Алексеевна, дхн, внс ГЕОХИ РАН, e-mail: [dorofeeva@geokhi.ru](mailto:dorofeeva@geokhi.ru)

**Состав группы:**

Русол А.В. ктн снс ГЕОХИ РАН

Бережной А.А. к ф-м н ГАИШ МГУ

Черкасова Е.В. снс ГЕОХИ РАН

**Публикации:**

1. Дорофеева В.А. Генезис летучих регулярных спутников Сатурна. Происхождение атмосферы Титана. Геохимия. 2016. № 1. С. 11-31. DOI: [10.7868/S0016752516040075](https://doi.org/10.7868/S0016752516040075)
2. Дорофеева В.А. Изотопный состав водорода и азота в объектах внешней Солнечной системы как индикатор процессов их образования и эволюции. XVII международная

конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». (Москва, 26-28 сентября, Борок, 30 сентября 2016 г.). Материалы конференции. М. ИГЕМ РАН. 2016. ISBN 978-5-88918-041-8. с. 89-91.

3. Русол А.В., Дорофеева В.А. Модель освещенности поверхности кометы: на примере ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко. XVII международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле». (Москва, 26-28 сентября, Борок, 30 сентября 2016 г.). Материалы конференции. М. ИГЕМ РАН. 2016. ISBN 978-5-88918-041-8. с. 296-299.

4. Фрейдзон А.Я., Бережной А.А., Валиев Р.Р. Зависимость УФ-спектров пирена от окружения: возможности для исследований галилеевых спутников Юпитера, 2-ая Всероссийская конференция по астробиологии «Жизнь во Вселенной: физические, химические и биологические аспекты», Пущино, Россия, 5-9 июня 2016 г., программа и сборник тезисов, стр. 117, 2016

#### **Проект 4.4 Исследование динамики спутников планет Солнечной системы по астрометрическим и фотометрическим наблюдениям**

##### **Аннотация.**

Выполнены позиционные наблюдения спутников Урана и Юпитера, завершена обработка фотометрических наблюдений взаимных явлений в системе галилеевых спутников Юпитера (получено 24 кривых блеска, всего во время наблюдательной кампании получена 51 кривая блеска хорошего и удовлетворительного качества), получены координаты спутников Урана и Юпитера.

Наблюдения планет и их естественных спутников дают материал, необходимый для построения и уточнения теорий движения небесных тел. В свою очередь, совершенствование теорий важно не только для согласования звездной и динамической систем координат, но и для обеспечения космических миссий более точными эфемеридами. Для построения теории движения планет и спутников используется весь накопленный ряд положений, и чем ряд длиннее, тем точнее будет модель движения. Поэтому в проекте отводится место как продолжению астрометрических наблюдений планет и их спутников, так и более точному переизмерению старых астронегативов и определению координат тел Солнечной системы в современной системе координат с новейшими каталогами. Телескопы Пулковской обсерватории, оснащенные ПЗС-

камерами, позволяют получать экваториальные координаты спутников планет с точностью на уровне 5-100 mas.

В 2016 г. по проекту «Позиционные наблюдения спутников планет и исследование их динамики с целью уточнения теорий движения» были выполнены следующие работы:

1. ПЗС-наблюдения спутников планет-гигантов. Получено более 11000 кадров для Юпитера, Урана и их спутников.

Астрометрические наблюдения спутников Урана и Юпитера производятся в Пулковке на трех астрометрических инструментах:

### **Нормальный астрограф**

$D = 330 \text{ мм}$ ,  $F = 3467 \text{ мм}$

ПЗС SBIG ST-L-11K,  $FOV = 35' \times 23'$ ,  $M = 0.533''/\text{pix}$ .

### **26-дюймовый рефрактор**

$D = 650 \text{ мм}$ ,  $F = 10413 \text{ мм}$

ПЗС FliProline 9000 3056x3056 px,

$1 \text{ px} = 0.012 \text{ мм}$ ,  $FOV = 12' \times 12'$ ,  $M = 0.24''/\text{px}$ ,

### **1-м зеркальный телескоп Сатурн (с 2015 г.)**

$D = 1000 \text{ мм}$ ,  $F = 4000 \text{ мм}$

ПЗС S2C, 1046x1140 px,  $1 \text{ px} = 0.016 \text{ мм}$ ,  $FOV = 14' \times 14'$ ,  $M = 0.82''/\text{px}$

Таблица 4.2 – Статистика наблюдений планет-гигантов и их спутников в 2016 г.

объект	Норм. астрограф	1-м телескоп	26" рефрактор
Юпитер и галилеевы спутники	14 ночей 2800 кадров	-	36 ночей 7200 кадров
Уран и 4 главных спутника U1-U4	-	3 ночи, 320 кадров	27 ночей 1080 кадров

На рисунке 4.10 представлена статистика наблюдений спутников планет-гигантов за 2007-2016 г. на 26-дюймовом рефракторе.

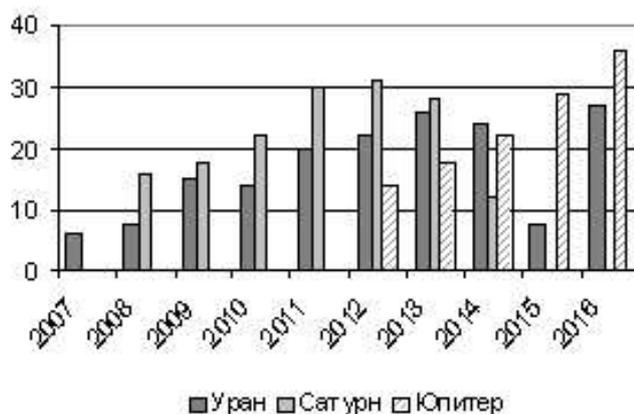


Рис. 4.10

2. В 2016 г. обработаны наблюдения спутников планет-гигантов, произведено сравнение с теорией и выполнена оценка точности.

В рамках работ по проекту по наблюдениям на 26-дюймовом рефракторе и Нормальном Астрографе получены экваториальные координаты галилеевых спутников Юпитера и четырех спутников Урана. Точности позиционных наблюдений составили 0.005-0.065 arcsec для 26-дюймового рефрактора и 0.040-0.080 arcsec для Нормального Астрографа. Полученные положения были сравнены с новейшими теориями движения, по дисперсии разностей «О-С» сделана оценка точности наблюдений. Эфемериды обеспечены веб-сервером “Natural Satellites Ephemeride Server MULTI-SAT” (Emel'yanov N. V., Arlot J.-E., 2008). Полученные координаты размещаются в пулковской астрометрической базе данных [www.puldb.ru](http://www.puldb.ru).

Закончена обработка фотометрических наблюдений взаимных явлений в системе галилеевых спутников Юпитера. Фотометрические наблюдения взаимных явлений – затмений или покрытий спутников являются очень важными для получения материала для уточнения теорий движения. Результаты анализа кривых блеска спутников, полученные во время взаимных явлений, позволяют получить особо точные астрометрические данные. Взаимные явления в системе галилеевых спутников Юпитера повторяются с периодом в 6 лет и 9 месяцев. Всего за время кампании по наблюдениям взаимных явлений в 2014/2015 гг. на телескопах ГАО РАН и ГАС ГАО получена 51 кривая блеска с точностью 0.015-0.200 mag, что является значимым вкладом в мировые наблюдения, данные переданы в ГАИШ МГУ для дальнейшей интерпретации. Кривые блеска доступны по адресу <http://puldb.ru/photometry/phemu2014-2015/>

3. В 2016 г. выполнялась оцифровка и редукция фотографических наблюдений Сатурна в современной системе координат.

Продолжаются работы по оцифровке и переизмерению старых фотографических наблюдений спутников Сатурна и Юпитера. Фотопластинки обрабатываются с применением новой разработанной в Пулковке методики с использованием цифровой камеры. Результаты новой редукиции с каталогами UCAC4, TYCHO-2 имеют **в три раза более высокую внутреннюю точность** по сравнению со старыми определениями.

**Руководитель проекта:**

Рощина Елена Александровна, к.ф.-м.н., ГАО РАН, [star-fox@yandex.ru](mailto:star-fox@yandex.ru)

**Состав группы:**

И. С. Измайлов, М. Ю. Ховричев, Т.П. Киселева, Т.А. Васильева, Н.В. Нарижная, А. П. Ершова, И. А. Баляев, Д. А. Бикулова, , Л.А. Максимова, К. И. Оськина, А. А. Апетян, А. М. Куликова

**Публикации:**

1. Т.П.Киселева, Т.А. Васильева, Е.А. Рощина, И.С. Измайлов. Астрометрические исследования результатов редукиции старых фотографических наблюдений системы Сатурна на основе сравнения с современными теориями движения спутников. // Астрон. Вестник, 2016, т.50, № 6, СС. 425-430.
2. Н.В. Нарижная, Наблюдения галилеевых спутников Юпитера в 2013-2015 гг. в Пулковке. Астрономический вестник, 2016, том 50, № 5, с. 364–371. (N.V. Narizhnaya, Observations of the Galilean Moons of Jupiter in 2013–2015 at Pulkovo, Solar System Research, 2016, Vol. 50, No. 5, pp. 344–351.)
3. Anastasiya Ershova, Elena Roshchina, Igor Izmailov Astrometric Observations of the Main Uranian Satellites at the Pulkovo Observatory in 2007 – 2016 // Planetary and Space Science, October 2016, DOI: 10.1016/j.pss.2016.10.012
4. Elena Roshchina, Igor Izmailov, Tamara Kiseleva, Tatiana Vasilyeva. The photographic plates archive of Pulkovo Observatory.// Сборник материалов международной конференции ASTROPLATE 2016, Прага 2016.
5. Е.А.Рощина, И.С. Измайлов, Т.П. Киселева. ПЗС-наблюдения спутников больших планет на 26-дюймовом рефракторе в Пулковке. // Известия ГАО №223,, 2016, СС. 71-76.
6. Т.П. Киселева, Т.А.Васильева, Е.А. Рощина, И.С. Измайлов. Определение точных положений Сатурна и его спутников по оцифрованным астронегативам фотографических наблюдений 1972-1974 гг. // Известия ГАО, №223, 2016, С. 195-200.

7. Н.В.Нарижная. Наблюдения галилеевых спутников Юпитера на Пулковском Нормальном астрографе. // Изв.ГАО, № 223, 2016, стр. 59-64.

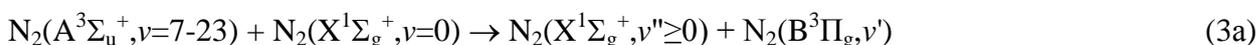
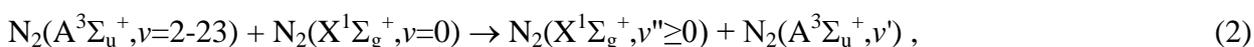
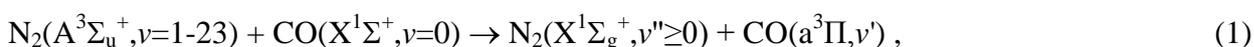
**Проект 4.5 Исследование кинетики основных и малых составляющих атмосфер планет земной группы, спутников планет Титана и Тритона. Исследование общей циркуляции атмосфер Венеры и Титана, а также радиационного нагрева и переноса аэрозолей в этих атмосферах**

**Аннотация.**

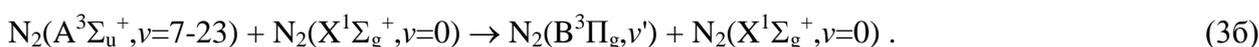
Исследована кинетика метастабильного азота и метастабильного монооксида углерода в атмосфере Титана (спутник Сатурна) и впервые численно показано, что при концентрациях  $[N_2] \sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$  и выше доминирующий вклад в образование CO ( $a^3\Pi, \nu$ ) в условиях потоков высокоэнергичных фотоэлектронов вносит межмолекулярный процесс переноса энергии возбуждения с метастабильного азота  $N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu)$ .

Метастабильный азот  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  и метастабильный монооксид углерода CO ( $a^3\Pi$ ) являются источником свечения УФ полос Вегарда-Каплана и Камерона. Кроме того, переходы с метастабильных состояний на основные ( $X^1\Sigma_g^+$  у  $N_2$ ,  $X^1\Sigma^+$  у CO) приводят к колебательному возбуждению этих молекул и, соответственно, к изменению температуры и интенсивностей ИК свечения атмосферы.

С помощью квантово-химических приближений Ландау-Зинера и Розена-Зинера рассчитаны константы межмолекулярных процессов переноса электронного возбуждения

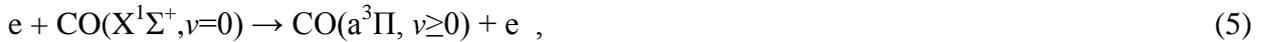
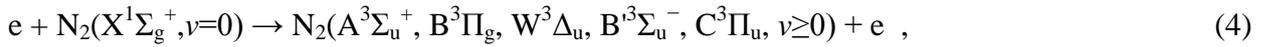


и внутримолекулярного процесса



Полученные константы были использованы при расчете концентраций  $N_2(A^3\Sigma_u^+, \nu)$  и  $CO(a^3\Pi, \nu)$  в дневной атмосфере Титана для высот 700-1200 км. Константы взаимодействия с метаном  $CH_4$  брались из научной литературы. Для атмосферы Титана на высотах 700-1200 км поток фотоэлектронов брался согласно [Campbell et al., 2010, J. Geophys. Res.,

v.115, A09320]. Учитывались процессы возбуждения триплетных состояний молекул азота и монооксида углерода фотоэлектронами



а также излучательные процессы



приводящие в конечном итоге к аккумуляции энергии электронного возбуждения на колебательных уровнях состояния  $A^3\Sigma_u^+$ .

Результаты расчета концентраций  $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0-15)$  на высотах 900 и 700 км в атмосфере Титана показаны на рис. 4.11. Концентрации молекулярного азота в атмосфере Титана брались согласно [Fulchignoni et al., 2005, Nature, v.438, p.785; Lavvas et al., 2015, Icarus, v.260, p.29]. Кроме того, полагалось, что  $[CH_4]=0.03 \cdot [N_2]$  и  $[CO]=3.2 \cdot 10^{-5} \cdot [N_2]$  [Lopez-Valverde et al., 2005, Icarus, v.175, p.503]. На рис. 4.11 также показаны вклады:

- 1) прямого возбуждения состояния  $A^3\Sigma_u^+$  фотоэлектронами при столкновениях (4),
- 2) возбуждения триплетных состояний  $B^3\Pi_g, W^3\Delta_u, B^3\Sigma_u^-, C^3\Pi_u$  при столкновениях (4) и каскадных переходов (6a-в,7).

Как видно из рисунка 4.11, для нижних колебательных уровней состояния  $A^3\Sigma_u^+$  определяющими в накачке являются каскадные процессы с вышележащих триплетных состояний. С ростом колебательного номера прямое возбуждение  $A^3\Sigma_u^+$  фотоэлектронами становится доминирующим и вкладом других триплетных состояний можно пренебречь.

Аналогично результаты расчета концентраций  $CO(a^3\Pi, v=0-10)$  на высотах 900 и 700 км в атмосфере Титана представлены на рис. 4.12. Расчет проводился для двух случаев:

- 1) возбуждение триплетных состояний молекулярного азота фотоэлектронами (процесс (4)), перенос энергии возбуждения с триплетных состояний на состояние  $A^3\Sigma_u^+$  при спонтанных излучательных переходах (6a-в,7), возбуждение триплетного состояния CO при межмолекулярном процессе переноса энергии (1);
- 2) прямое возбуждение состояния  $a^3\Pi$  монооксида углерода фотоэлектронами (процесс (5)).

Как видно из рисунка 4.12, вклад межмолекулярного процесса переноса электронного возбуждения (1) в накачку  $a^3\Pi$  состояния CO для колебательных уровней  $v=0-4$  является определяющим на высоте 700 км ( $[N_2]=2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ). На высоте 900 км ( $[N_2]=0.8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ ) относительный вклад межмолекулярного процесса (1) значительно уменьшается, а с

дальнейшим ростом высоты и уменьшением плотности атмосферы им можно пренебречь по сравнению с процессом возбуждения  $\text{CO}(a^3\Pi)$  фотоэлектронами (5).

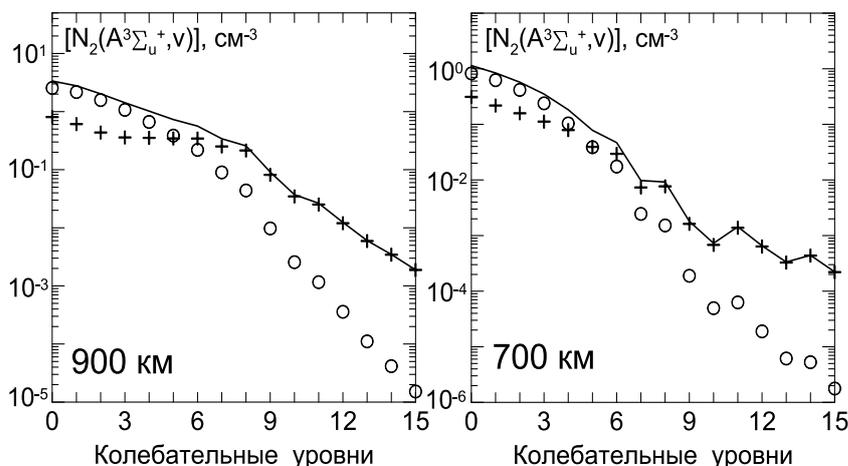


Рис. 4.11 – Рассчитанные колебательные населенности  $\text{N}_2(A^3\Sigma_u^+, v=0-15)$  на высотах 900 и 700 км в атмосфере Титана (сплошные линии). Вклады прямого возбуждения  $A^3\Sigma_u^+$  состояния фотоэлектронами и каскадных процессов с других триплетных состояний – крестики и кружочки, соответственно.

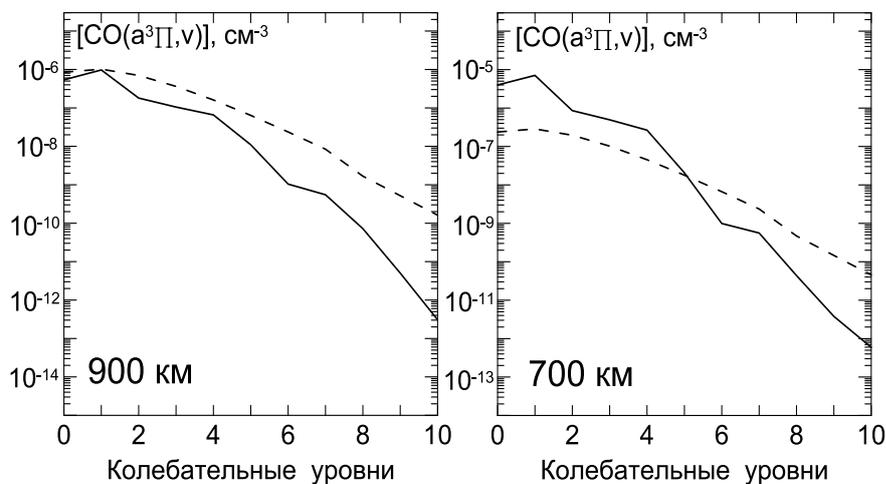


Рис. 4.12 – Рассчитанные концентрации  $\text{CO}(a^3\Pi, v)$  на высотах 900 и 700 км в атмосфере Титана: за счет процесса (1) (сплошные линии) и за счет прямого возбуждения фотоэлектронами (5) (пунктирные линии).

**Руководитель проекта:**

Кириллов Андрей Серафимович, зав.лаб. Полярного геофизического института,  
[kirillov@pgia.ru](mailto:kirillov@pgia.ru)

### **Публикации:**

1. Kirillov A.S. Intermolecular electron energy transfer processes in the collisions of  $N_2(A^3\Sigma_u^+, v=0-10)$  with CO and  $N_2$  molecules. // Chemical Physics Letters, 2016, v.643, p.131-136, doi: 10.1016/j.cplett.2015.11.032
2. Kirillov A.S., Werner R., Guineva V. Kinetics of the metastable molecular nitrogen  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  in the mixture with CO molecules. // Chemical Physics Letters, 2016 (подготовлена к печати).
3. Кириллов А.С., Вернер Р., Гинева В. Кинетика метастабильного молекулярного азота на высотах верхних атмосфер планет Солнечной системы. // Труды Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016 г., ПГИ РАН, Мурманск (в печати).

### **Тезисы докладов на конференциях:**

Kirillov A.S., Werner R., Guineva V. Kinetics of metastable molecular nitrogen in the atmosphere of Titan and in the mixture with carbon monoxide. (Стендовый доклад) // Programme of Twelfth Scientific Conference “Space, Ecology, Safety”, Bulgarian Academy of Sciences, 2–3 November, 2016, Sofia, Bulgaria, p.6.

Кириллов А.С. Кинетика метастабильного молекулярного азота в атмосферах планет Солнечной системы. (Устный доклад) // Сборник тезисов 11-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», Москва, ИКИ РАН, 15-19 февраля 2016 г., с.68.

Кириллов А.С. Исследование процессов релаксации энергии метастабильного молекулярного азота в атмосферах планет Солнечной системы. (Устный доклад) // Abstracts of the 39th Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena” 29 February - 4 March 2016. - Apatity. - Polar Geophysical Institute.- Kola Science Center. - Russian Academy of Sciences. – PGI-16-01-132. – P.41.

Кириллов А.С. Образование электронно-возбужденного молекулярного азота на высотах верхних атмосфер планет Солнечной системы. (Устный доклад) // Программа научной конференции ИКИ РАН, ПГИ РАН, МФТИ «Полярные процессы в атмосферах планет», 11 апреля 2016 г., ПГИ РАН, Апатиты, Россия.

Кириллов А.С., Вернер Р., Гинева В. Кинетика метастабильного молекулярного азота на высотах верхних атмосфер планет Солнечной системы. (Устный доклад) // Тезисы Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике», 19-23 сентября 2016 г., ПГИ РАН, Мурманск, PGI-16-02-133, С.24.

Кириллов А.С., Вернер Р., Гинева В. Кинетика метастабильного молекулярного азота в верхней атмосфере Титана и в смеси  $N_2$  с газами CO и  $O_2$ . (Устный доклад) // Программа

14-й Всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, Москва, ИКИ РАН, 14-18 ноября 2016 г., с.36.

## НАПРАВЛЕНИЕ 5: АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ ПЛАНЕТ

Кураторы направления: О.И. Кораблев (ИКИ), В.И. Шематович (ИНАСАН)

5.1	Проект 5.1: Моделирование УФ свечений атомов водорода и кислорода в планетных коронах с учетом надтепловых характеристик среды	ИНАСАН	Шематович В.И., Кайгородов П.В.
5.2	Проект 5.2: Газовые эмиссии из земной коры как важный фактор взаимодействия литосферы и атмосферы (2.5. е)	ИКИ РАН	Пулинец С.А.
5.3	Проект 5.3: Влияние вариаций ионизирующего излучения, аккреции межзвездной и межпланетной пыли, падения крупных тел на состав и химию атмосферы и климата Земли и Марса	ФТИ им. А.Ф. Иоффе	Павлов А.К., Васильев Г.И., Ануфриев Г.С.
5.4	Проект 5.4: Исследование слоистых структур, турбулентности и внутренних волн в атмосферах Земли и планет по данным анализа радиозатменных и зондовых измерений	ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН	Павельев А.Г.
5.5	Проект 5.5: Исследование водяного пара и озона на Марсе по данным надирных наблюдений	ИКИ РАН	Фёдорова А.А.
5.6	Проект 5.6: Климатология надоблачной дымки в атмосфере Венеры	ИКИ РАН	Игнатъев Н.И.
5.7	Проект 5.7: Исследование процессов выноса с поверхности и переноса пустынного аэрозоля в атмосфере Марса и его термических эффектов	ИФА РАН	Чхетиани О.Г., Вигасин А.А.
5.8	Проект 5.8: Динамика мезосферы Венеры	ИКИ РАН	Засова Л.В.
5.9	Проект 5.9: Электрические поля и разряды в атмосферах планет Солнечной системы	ИПФ РАН	Мареев Е.А.

### **ПРОЕКТ 5.1 Моделирование УФ свечений атомов водорода и кислорода в планетных коронах с учетом надтепловых характеристик среды**

#### **Аннотация.**

Оценены скорости нетепловой диссипации нейтральных приповерхностных атмосфер спутников Юпитера – Европы и Ганимеда, как за счет фотохимических процессов, так и воздействия магнитосферной плазмы.

Исследованы процессы образования и динамики разреженной газовой оболочки вблизи ледяной поверхности спутника Юпитера Ганимед. Для Ганимеда, как наиболее массивного

ледяного спутника, возможно образование разреженной экзосферы с относительно плотным приповерхностным слоем. Основной родительской компонентой данной газовой оболочки являются пары воды, попадающие в атмосферу за счет процессов тепловой дегазации, нетеплового радиолиза и других активных процессов и явлений на ледяной поверхности спутника. Построена численная кинетическая модель для исследования на молекулярном уровне процессов образования, химической эволюции и динамики преимущественно  $\text{H}_2\text{O}$ - и  $\text{O}_2$ -доминантных разреженных газовых оболочек. Процессы ионизации в таких разреженных газовых оболочках протекают в результате воздействия ультрафиолетового излучения Солнца и магнитосферной плазмы. Химическое разнообразие газовой оболочки ледяного спутника возникает вследствие первичных процессов воздействия потоков ультрафиолетовых солнечных фотонов и электронов плазмы на разреженный газ  $\text{H}_2\text{O}$ - или  $\text{O}_2$ -доминантной атмосферы. Данная модель использована для расчетов образования и развития химического разнообразия в приповерхностной относительно плотной оболочке Ганимеда, где важны столкновения между родительскими молекулами и продуктами их фотолиза и радиолиза и потери нейтрального газа из приповерхностной атмосферы Европы с учетом надтепловых частиц.

#### **Руководитель проекта:**

Шематович В.И., Институт астрономии РАН, [shematov@inasan.ru](mailto:shematov@inasan.ru)

#### **Состав группы:**

Бисикало Д.В., Кайгородов П.В., Ионов Д.Э., Институт астрономии РАН

#### **Публикации:**

1. Шематович В.И. «Нейтральная атмосфера вблизи ледяной поверхности спутника Юпитера Ганимед». *Астрономический вестник*, т. 50, № 4, 280-299, (2016).
  - 2 Lucchetti A., Plainaki Ch., Cremonese G., Milillo A., Cassidy T., Jia X., **Shematovich V.** «Loss rates of Europa's tenuous atmosphere». *Planet. Space Sci.*, Vol. 130, p. 14-23, (2016).
  3. Soret L., Gérard J.-C., Libert L., **Shematovich V.I.**, **Bisikalo D.V.**, Stiepen A., Bertaux J.-L. «SPICAM observations and modeling of Mars aurorae». *Icarus*, V. 264, 398–406 (2016).
- 1 доклад на международной конференции.

## **ПРОЕКТ 5.2. Газовые эмиссии из земной коры как важный фактор взаимодействия литосферы и атмосферы**

### **Аннотация.**

Проведены статистические исследования поведения поправки химического потенциала паров воды в приземном слое атмосферы в регионе Камчатки в период подготовки сильных ( $M > 6$ ) землетрясений. Установлена их статистическая достоверность, что позволяет использовать данный параметр в приложениях, направленных на осуществление краткосрочного прогноза землетрясений.

На первом этапе проекта (2015 г.) была разработана физическая модель и проведена валидация энергетической эффективности эффекта ионизации пограничного слоя атмосферы радоном, выделяемым из активных разломов земной коры. Основным используемым параметром была поправка химического потенциала паров воды в приземном слое атмосферы. В течение 2016 г. исследовалось поведение поправки химического потенциала в период подготовки сильных ( $M > 6$ ) землетрясений в регионе Камчатки за период 2005-2015 гг. Установлено, что вариации поправки химического потенциала очень напоминают типичные вариации эманации радона перед землетрясениями, когда интенсивность достигает абсолютного максимума (на временном интервале 1 месяц), а само сейсмическое событие происходит на спаде после прохождения максимума. Подтверждением того, что тепловой эффект вызывается газами, является тот факт, что вариации параметра наблюдались как при нахождении эпицентра на суше, так и в океане, причем форма вариаций был идентична. Установлено, что в среднем максимум параметра наблюдается за 10 и 4 суток до землетрясения, а минимум наблюдается за 2 суток или в день землетрясения. Полученные результаты позволяют рекомендовать данный параметр для использования в приложения по краткосрочному прогнозу землетрясений.

### **Руководитель проекта:**

Пулинец Сергей Александрович, ИКИ РАН, [pulse1549@gmail.com](mailto:pulse1549@gmail.com)

### **Состав группы:**

Пулинец С.А., ИКИ РАН, Давиденко Д.В., ИКИ РАН, Петрухин А.В., магистрант МФТИ.

### **Публикации:**

1. Pulinets S., Ouzounov D., Davydenko D., Petrukhin A., Multiparameter monitoring of short-term earthquake precursors and its physical basis. Implementation in the Kamchatka region, E3S Web of Conferences 11, 00019 (2016), DOI: 10.1051/e3sconf/20161100019
2. Pulinets S.A., Atmosphere-Ionosphere Coupling: The role of boundary layer in generation of ionospheric precursors of earthquakes, Proceedings of the International Beacon Satellite Symposium BSS-2016, 26 June 1July 2016, Trieste, Italy, 1-3, 2016.
3. Parrot M., V. Tramutoli, Tiger J.Y. Liu, S. Pulinets, D. Ouzounov, N. Genzano, M. Lisi, K. Hattori, A. Namgaladze, Atmospheric and ionospheric coupling phenomena related to large earthquakes, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., doi:10.5194/nhess-2016-172, 2016.
4. Pulinets S.A., The Physical Bases for the Short-Term Earthquake Precursors Generation, Proceedings of the V-th International conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety”, June 20-24, 2016, Kaliningrad, Kant Federal University Publ., ISBN 978-5-9971-0412-2, 24-29, 2016.

### **ПРОЕКТ 5.3 Влияние вариаций ионизирующего излучения, аккреции межзвездной и межпланетной пыли, падения крупных тел на состав и химию атмосферы и климата Земли и Марса**

#### **Аннотация.**

Проведены модельные расчеты высотных профилей ионизации атмосферы и образования радионуклидов в атмосфере Земли под действием вариаций галактических космических лучей и сверхмощных солнечных вспышек.

В 2016 году в рамках проекта проведены модельные расчеты высотных профилей ионизации атмосферы и образования радионуклидов в атмосфере Земли под действием вариаций галактических космических лучей и сверхмощных солнечных вспышек с использованием двух различных моделей внутриядерного каскада, используемых в последней версии численного кода GEANT4. Аналогичные расчеты проведены для получения глубинного профиля образования радионуклидов в лунных породах.

Сравнение с имеющимися экспериментальными данными по концентрации долгоживущих радионуклидов ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  и  $^{36}\text{Cl}$ ) в кольцах деревьев, кернах полярных ледников и кернах

лунного грунта показало, что образование  $^{10}\text{Be}$  и  $^{26}\text{Al}$  хорошо описывается в модели BERT, а  $^{14}\text{C}$  и  $^{36}\text{Cl}$  в модели ВИС. Получены ограничения на возможную частоту сверхмощных солнечных событий на шкале от нескольких сот до миллионов лет. Показано существенное влияние на содержание малых компонент в атмосферах Земли и Марса сверхмощных солнечных вспышек. Проведены расчеты вариаций озона с использованием фотохимической модели марсианской атмосферы для дальнейшего применения к проблеме вариаций содержаний кислорода и метана, обнаруженных в экспериментах на миссии MSL.

**Руководитель проекта:**

А.К. Павлов, Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, [anatoli.pavlov@mail.ioffe.ru](mailto:anatoli.pavlov@mail.ioffe.ru)

**Состав группы:**

снс Павлов А.К., снс Васильев Г.И., внс Еремин В.К., нс Крутьков С.Ю.

**Публикация:**

Принята в печать статья в Известия РАН, сделаны доклады на 34 Всероссийской конференции по космическим лучам (Дубна) и 20 Всероссийской конференции по физике Солнца и солнечно-земных связей (Пулково).

**ПРОЕКТ 5.4 Исследование слоистых структур, турбулентности и внутренних волн в атмосферах Земли и планет по данным анализа радиозатменных и зондовых измерений**

**Аннотация:**

- 1) Обнаружены насыщенные внутренние гравитационные волны и реконструированы их характеристики в атмосфере Марса по данным анализа радиозатменных измерений.
- 2) Проведен радиозатменный мониторинг активности внутренних гравитационных волн в атмосфере Арктики и Антарктики.

Разработан метод идентификации волновых событий и реконструкции характеристик внутренних гравитационных волн (ВГВ) по данным анализа индивидуального вертикального профиля температуры, плотности или квадрата частоты Брента-Вяйсяля в атмосфере

планеты. Сформулирован и обоснован пороговый критерий идентификации внутренних гравитационных волн, в случае выполнения которого анализируемые флуктуации могут рассматриваться как волновые проявления. Применение разработанного метода к вертикальным профилям температуры радиозатменной миссии *MARS GLOBAL SURVEYOR* дало возможность впервые обнаружить насыщенные внутренние волны в атмосфере Марса и определить величины ключевых волновых характеристик. Показано, что распространение этих волн вызывает сильную модуляцию стабильности атмосферной стратификации и приводит к сдвиговой неустойчивости, а также к возникновению тонких слоев перемежающейся турбулентности в атмосфере Марса.

Проведен статистический анализ активности внутренних волн в полярных районах атмосферы Арктики и Антарктики, расположенных на широтах более 60°. Для этого были использованы радиозатменные данные о температуре миссии *FORMOSAT-3/COSMIC*, собранные за период измерений с июля 2006 по март 2009 года. Определены и проанализированы географические и сезонные распределения потенциальной энергии ВГВ на единицу массы (индикатор волновой активности) в интервале высот от 15 до 35 км. Найдено, что существенное увеличение потенциальной энергии волн регулярно обнаруживается зимой и весной над горными массивами, такими как Скандинавия, Исландия, Гренландия, Антарктический полуостров и Трансантарктические горы.

#### **Руководители проекта:**

Павельев Александр Геннадьевич и Губенко Владимир Николаевич,  
ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, e-mail: [vngubenko@gmail.com](mailto:vngubenko@gmail.com).

#### **Состав группы:**

Павельев А.Г., Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.А., Матюгов С.С.

#### **Публикации:**

1. Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г., Андреев В.Е. (2016). Обнаружение насыщенных внутренних гравитационных волн и реконструкция их характеристик в атмосфере Марса // Известия ВУЗов. Физика. Т. 59. №12/2.
2. Губенко В.Н., Кириллович И.А., Лиу Й.-А., Павельев А.Г. (2016). Мониторинг активности внутренних гравитационных волн в атмосфере Арктики и Антарктики // Известия ВУЗов. Физика. Т. 59. №12/3.

3. Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Pavelyev A.G., Andreev V.E. (2016). Characteristics of individual internal gravity waves in the Martian atmosphere obtained from Mars Global Surveyor radio occultation data: Evidence for wave saturation // Abstract # 1297 of the 47th Lunar and Planetary Science Conference, 21–25 March 2016, The Woodlands, Texas, USA, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/1297.pdf>.
4. Kirillovich I.A., Gubenko V.N., Liou Y.A., Pavelyev A.G. (2016). Activity of internal waves in the Arctic and Antarctic atmosphere revealed by COSMIC RO data // Abstract # 1304 of the 47th Lunar and Planetary Science Conference, 21–25 March 2016, The Woodlands, Texas, USA, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/1304.pdf>.
5. Pavelyev A.G., Matyugov S.S., Pavelyev A.A., Gubenko V.N. (2016). Reanalysis of the bistatic radar results: the Venus surface and lower atmosphere // Abstract # 2094 of the 47th Lunar and Planetary Science Conference, 21–25 March 2016, The Woodlands, Texas, USA, <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/pdf/2094.pdf>.
6. Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г., Андреев В.Е. (2016). Обнаружение насыщенных внутренних гравитационных волн (ВГВ) и реконструкция их характеристик в атмосфере Марса на основе анализа профилей температуры миссии Mars Global Surveyor // Труды XXV Всероссийской открытой конференции «РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН», посвященной 80-летию отечественных ионосферных исследований, 4-9 июля 2016 г., Томск, Т. 1, С. 85–88, ISBN 978-5-86889-734-4.
7. Губенко В.Н., Кириллович И.А., Лиу Й.-А., Павельев А.Г. (2016). Радиозатменный мониторинг активности внутренних гравитационных волн (ВГВ) в атмосфере Арктики и Антарктики за период с 2006 по 2009 годы // Труды XXV Всероссийской открытой конференции «РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН», посвященной 80-летию отечественных ионосферных исследований, 4-9 июля 2016 г., Томск, Т. 3, С. 51–55, ISBN 978-5-86889-736-8.
8. Pavelyev A.G., Liou Y.-A., Gubenko V.N., Matyugov S.S., Pavelyev A.A. and Yakovlev O.I. (2016). Advances and Perspectives of GNSS Radio Occultation Remote Sensing // International Workshop for Probing Atmosphere and Climate (OPAC–IROWG 2016), 8–14 September 2016, Schloss Seggau, Leibnitz near Graz, Austria, Programme and Abstract Book, P. 24, <https://wegcwww.uni-graz.at/opacirowg2016/>.
9. Gubenko V.N., Kirillovich I.A., and Andreev V.E. (2016). Parameters of saturated internal gravity waves identified in the Martian atmosphere from an analysis of MARS GLOBAL

SURVEYOR radio occultation data // Abstracts of presentations at the Seventh Moscow Solar System Symposium, 7MS3-MS-14, P. 26–29-ab, 10–14 October 2016, Space Research Institute (IKI RAS), Moscow, Russia.

10. Gubenko V.N., Kirillovich I.A., and Liou Y.-A. (2016). Geographical distributions of an internal gravity wave activity in the Earth's polar atmosphere for different seasons revealed by radio occultation FORMOSAT-3/COSMIC data // Abstracts of presentations at the Seventh Moscow Solar System Symposium, 7MS3-PS-66, P. 287–289-ab, 10–14 October 2016, Space Research Institute (IKI RAS), Moscow, Russia.

11. Pavelyev A.G, Matyugov S.S., Pavelyev A.A., Gubenko V.N. (2016). Venera 9, 10 and Venera 15, 16 bistatic radar results: The Venus surface and lower atmosphere // Abstracts of presentations at the Seventh Moscow Solar System Symposium, 7MS3-VN-05, P. 82–83-ab, 10–14 October 2016, Space Research Institute (IKI RAS), Moscow, Russia.

12. Губенко В.Н., Кириллович И.А., Андреев В.Е., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В. (2016). Насыщенные внутренние волны в атмосфере Марса по данным анализа радиозатменных измерений // Тезисы докладов 14<sup>ой</sup> Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», ИКИ РАН, Москва, 14–18 ноября 2016 г.

## **ПРОЕКТ 5.5 Исследование водяного пара и озона на Марсе по данным надирных наблюдений**

### **Аннотация.**

1) Исследован коэффициент корреляции одновременных наблюдений озона, свечения молекулярного кислорода в полосе 1.27 мкм и водяного пара для различных сезонов и широтного расположения на Марсе.

2) Восстановлено вертикальное распределение водяного пара на Марсе в полярных областях по одновременным наблюдениям экспериментов СПИКАМ и ПФС на КА «Марс-Экспресс».

1) Исследована корреляция (коэффициент корреляции) одновременных наблюдений озона, свечения молекулярного кислорода в полосе 1.27 мкм и водяного пара по данным СПИКАМ УФ и СПИКАМ ИК для различных сезонов и широтного расположения на Марсе

(Guslyakova et al., 2016; Lefevre et al., 2016 in preparation). По всему массиву данных найдена высокая степень антикорреляции озона и водяного пара (как и ожидалось), за исключением низких и средних широт в сезон афелия (лето в северном полушарии). Вариации высоты гидропаузы в этот период недостаточны, чтобы объяснить настолько низкий коэффициент корреляции. Сделан вывод, что распределение водяного пара является лишь одним из факторов, влияющих на содержание озона в этот период.

Проведено сравнение сезонного распределения свечения кислорода в атмосфере Марса, как трейсера озона, восстановленного по надирным наблюдениям прибора СПИКАМ (Guslyakova et al., 2016) за МУ30 (марсианский год 30) с моделью GEM-MARS (Nearly et al., 2014). Это новая трехмерная модель общей циркуляции атмосферы Марса от поверхности до 150 км, основанная на канадской модели GEM (Global Environmental Multiscale) и активно развиваемая в настоящий момент в приложении к Марсу бельгийской научной группой института ВІРА. Одним из нововведений модели стало включение фотохимического блока с циклом озона. Для апробации результатов модели были использованы данные наблюдений СПИКАМ. Сравнение в МУ30 показало хорошее согласие модели и данных на протяжении всего года, за исключением экваториальных областей в период лета в северном полушарии.

2) Продолжена работа по сравнению одновременных наблюдений содержания водяного пара в атмосфере, полученных приборами ПФС и СПИКАМ на КА «Марс-Экспресс». Разработан алгоритм выборки данных для сравнения. Для поиска межгодовых и сезонных вариаций данные разбиваются на интервалы в 30 градусов  $L_s$ , начиная с  $L_s = 330$  в МУ27. Расхождение содержания наблюдается в средних широтах во время  $L_s = 150-210$  в МУ27, при этом в МУ28 и 29 расхождений нет. Северные полярные области летом в МУ27, 28 и 29 показывают большое содержание воды по данным СПИКАМ. Южные же полярные области летом показывают преимущественно большее содержание  $H_2O$  по данным ПФС и в МУ28 и в МУ29. СПИКАМ показывает большие значения в экваториальных областях на  $L_s = 0-30$  в МУ29. К  $L_s = 30-60$  в том же году разница уже не заметна. В 27 и 28 годах в тот же сезон наблюдается нулевая разница или больше содержание по данным ПФС в экваториальных областях.

**Руководитель проекта:**

зав. лаб. к.ф.-м.н. Федорова А.А. ИКИ РАН, [fedorova@iki.rssi.ru](mailto:fedorova@iki.rssi.ru)

### **Состав группы:**

зав. отд. д.ф.-м.н. О.И.Кораблев, гл. спец. Трохимовский А.Ю., м.н.с. Гусякова С.А.

### **Публикации:**

1. Guslyakova S., A. Fedorova, F. Lefèvre, O. Korablev, F. Montmessin, A. Trokhimovskiy, J.L. Bertaux, Long-term nadir observations of the O<sub>2</sub> dayglow by SPICAM IR, Planetary and Space Science, Volume 122, March 2016, Pages 1-12, ISSN 0032-0633, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2015.12.006>.
2. Frank Montmessin, Michael D. Smith, Yves Langevin, Michael T. Mellon and Anna Fedorova, Chapter 11: The water cycle; in The Atmosphere and Climate of Mars by [Dr Robert M. Haberle](#) (Editor), [Dr R. Todd Clancy](#) (Editor), [Dr François Forget](#) (Editor), [Dr Michael D. Smith](#) (Editor), [Dr Richard W. Zurek](#) (Editor), 820 pp., Cambridge University Press, 31 May 2017.

### **ПРОЕКТ 5.6 Климатология надоблачной дымки в атмосфере Венеры**

#### **Аннотация.**

Получены распределения содержания серосодержащих аэрозольных и газовых частиц, а также водяного пара над облаками Венеры (высоты 70-100 км).

В 2016 году был проведен анализ данных, полученных прибором СПИКАВ при наблюдениях атмосферы Венеры над облаками с борта КА «Венера-Экспресс». Статистика наблюдений составила весь период работы миссии – с 2006 по 2014 гг. В режиме солнечного и звездного просвечиваний в УФ диапазоне спектра (180-300 нм) получена карта ночного распределения содержания двуокиси серы (SO<sub>2</sub>) в области мезопаузы (85-100 км). Наблюдается пик содержания газа в области полуночи, в 2-3 раза превышающий содержание в области терминатора планеты (сумерки). При солнечном просвечивании в ИК диапазоне (0.7-1.7 мкм) были восстановлены высотные профили размеров аэрозольных частиц и их счетной концентрации над облаками. По ним были оценены значения шкалы высот аэрозоля: в среднем, 3.6±0.7 км. Кроме того, при наблюдениях в надир на дневной стороне в ИК диапазоне была построена карта широтно-долготного распределения водяного пара в полосе поглощения 1.38 мкм на уровне верхней границе облаков (68-73 км). Результаты

проведенных работ опубликованы в одной статье журнала Icarus [C1] и в двух тезисах международной конференции [K1, K2].

**Руководитель проекта:**

Игнатъев Николай Игоревич, ИКИ РАН, [niignatiev@gmail.com](mailto:niignatiev@gmail.com)

**Список опубликованных работ:**

**[C1]** Fedorova A., Luginin M., Korablev O. et al., 2016. Variations of water vapor and cloud top altitude in the Venus' mesosphere from SPICAV/VEx observations. Icarus 275, 143–162.

**[K1]** Luginin M., Fedorova A., Belyaev D. et al., 2016. Analysis of upper haze of Venus from Venus Express SPICAV-IR data. The 7<sup>th</sup> Moscow Solar System Symposium, 10-14 October 2016. [http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7m-s3\\_program.pdf](http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7m-s3_program.pdf)

**[K2]** Belyaev D., Evdokimova D. et al., 2016. Sulphur bearing species at the night side of Venus' upper mesosphere. The 7<sup>th</sup> Moscow Solar System Symposium, 10-14 October 2016. [http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7m-s3\\_program.pdf](http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7m-s3_program.pdf)

**ПРОЕКТ 5.7 Исследование процессов выноса с поверхности и переноса пустынного аэрозоля в атмосфере Марса и его термических эффектов**

**5.7.1 Аннотация.**

Получены оценки обратного влияния поднятой пыли на динамику вихрей. Проведено эмпирическое исследование досальтационных процессов выноса субмикронного аэрозоля в аридных регионах в условиях слабых и умеренных ветров. Выполнен обзор парниковых и антипарниковых эффектов в атмосферах планет земной группы.

Представлен обзор различных идеализированных моделей пыльных вихрей, в которых центростремительное ускорение воздушных частиц объясняется градиентом давления и допустимо аналитическое описание распределения скорости и давления в них. Оценено, что мощность, необходимая для поддержания в квазиравновесном состоянии «типичного» пыльного вихря на Марсе составляет 10 кВт или даже более. Оценено обратное влияние – термическое, механическое и электрическое – поднятой марсианскими вихрями пыли на их

динамику. Сделан вывод, что прямое поглощение солнечной радиации пылью крайне важно для «гигантских» пыльных вихрей на Марсе, особенно в конце дня при боковом освещении оптически плотного столба пыли Солнцем. Отрицательная плавучесть за счет поднятой пыли в марсианских вихрях может сравняться по величине с положительной плавучестью термического происхождения (в нагретом от марсианской поверхности воздухе в центре вихря) и для поддержания вихря опять важно производство дополнительной положительной плавучести за счет прямого поглощения пылью солнечной радиации. Для модели вихря Рэнкина оценено, что в марсианских пыльных вихрях, в однородно (по объему) заряженном отрицательным электрическим зарядом (за счет трибоэлектрического эффекта) вихревом ядре, сила электрического отталкивания примерно на порядок меньше гидродинамической центробежной силы инерции. Указанный эффект может способствовать концентрации пыли на границе вихревого ядра.

Обнаружено, что в условиях слабых ветров в земных условиях существует постоянный поток субмикронного аэрозоля в диапазоне  $0.5-3 \text{ мкг м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Наблюдается хорошая корреляция с турбулентным потоком тепла, подтверждая полученные ранее выводы о связи процессов выносов аэрозоля с режимом свободной конвекции, реализуемом в узкой области приповерхностного слоя воздуха при сильном прогреве подстилающей поверхности.

**Со-руководитель темы:**

Чхетиани Отто Гурамович, заведующий лабораторией, доктор физ.-мат. наук, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, e-мейл: [ochkheti@rssi.ru](mailto:ochkheti@rssi.ru)

**Состав группы:**

Курганский Михаил Васильевич, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, e-мейл: [kurgansk@ifaran.ru](mailto:kurgansk@ifaran.ru),

Гинзбург Александр Самуилович, заведующий лабораторией, доктор физ.-мат. наук, Институт физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, e-мейл: [gin@ifaran.ru](mailto:gin@ifaran.ru), Фалалеева Виктория Александровна, младший научный сотрудник, e-мейл: [victory@ifaran.ru](mailto:victory@ifaran.ru)

### **Публикация:**

Kurgansky M.V., Lorenz R.D., Renno N.O., Takemi T., Gu Zh., Wei W. Dust devil steady-state structure from a fluid dynamics perspective // Space Science Reviews. 2016. DOI 10.1007/s11214-016-0281-0.

### **Доклады на конференциях:**

1. O.G. Chkhetiani, M.S. Artamonova, M.A. Iordanskii, M.V. Kurgansky, V.A. Lebedev, L.O. Maximenkov, Y.I. Obvintsev and N.V. Vazaeva *Aerosol emission in the arid and semi-arid regions of Southern Russia*, Report Series in Aerosol Science, №180 (2016), Proceedings of the 2nd Pan-Eurasian Experiment (PEEX) Conference and the 6th PEEX Meeting, Helsinki, 2016, p.111-113.

2. А.С. Гинзбург Парниковый и антипарниковый эффект в планетных атмосферах [http://downloads.igce.ru/seminars2/Ginzburg\\_A\\_S\\_Annotation\\_IGCE\\_30052016.pdf](http://downloads.igce.ru/seminars2/Ginzburg_A_S_Annotation_IGCE_30052016.pdf) (выступление на семинаре ИГКЭ 30.05.2016).

### **5.7.2 Аннотация.**

Получены новые экспериментальные и теоретические данные, относящиеся к индуцированному поглощению чистого CO<sub>2</sub> и его смесей с водородом и метаном в дальней ИК области.

Столкновительно-индуцированное поглощение углекислого газа рассматривается в качестве одного из ключевых факторов, которые могли определять климатическую систему палеоатмосферы Марса. Объем и точность известной на сегодняшний день спектроскопической информации, относящейся к индуцированному поглощению чистого CO<sub>2</sub> и его смесей в далекой ИК области, не удовлетворяет потребности климатического моделирования. В рамках настоящего проекта были проведены экспериментальные и теоретические исследования. Впервые с помощью установки AILES на синхротроне SOLEIL (Франция) были получены индуцированные спектры углекислого газа при температуре 200 К. Данные квантово-химических расчетов *ab initio* о поверхностях потенциальной энергии и индуцированного дипольного момента для смешанных пар CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> были использованы при моделировании соответствующих бинарных коэффициентов поглощения,

для которых ни экспериментальных, ни теоретических данных прежде получено не было. Рассчитанные нами коэффициенты поглощения были использованы для климатических расчетов при условиях, характерных для палеоатмосферы Марса. Была показана важная климатическая роль, принадлежащая парниковому эффекту, связанному с индуцированным поглощением симметричных молекул.

**Со-руководитель:**

Вигасин Андрей Алексеевич, ИФА им. А.М. Обухова РАН, [vigasin@ifaran.ru](mailto:vigasin@ifaran.ru)

**Публикации:**

1. Y.N. Kalugina, S.E. Lokshantov, V.N. Cherepanov, and A.A. Vigasin. Ab initio 3D potential energy and dipole moment surfaces for the CH<sub>4</sub>-Ar complex: Collision-induced intensity and dimer content // Journal of Chemical Physics 144, 054304 (2016); doi: 10.1063/1.4940779
2. А.А. Вигасин, И.И. Мохов. Парниковый эффект планетных атмосфер в связи со свойствами симметрии их молекулярных составляющих // Изв. РАН, сер. ФАО, принято к печати.
3. R. Wordsworth, Y. Kalugina, S. Lokshantov, A. Vigasin, B. Ehlmann, J. Head, C. Sanders, and H. Wang. Transient reducing greenhouse warming on early Mars // Geophysical Research Letters, сдано в печать.

**Доклады на конференции:**

1. R. Wordsworth, Y. Kalugina, S. Lokshantov, and A. Vigasin. Climate modeling of primitive atmospheres and exoplanets: Progress, problems and key spectroscopic uncertainties 13th Atmospheric Spectroscopy Applications Conference (united with 14th HITRAN Conference), Reims, 24 - 26 August 2016, Book of abstracts, P. 13.
2. Y. Kalugina, S. Lokshantov, A. Vigasin, and R. Wordsworth. Far-infrared collision-induced absorption by CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> and applications to modeling of the early Martian atmosphere // 13th Atmospheric Spectroscopy Applications Conference (united with 14th HITRAN Conference), Reims, 24 - 26 August 2016, Book of abstracts, P. 31.
3. B. Joalland, M. Goubet, R. Georges, L. Manceron, and A. Vigasin. Far-infrared collision-induced absorption in CO<sub>2</sub> at T = 200 K // 13th Atmospheric Spectroscopy Applications Conference (united with 14th HITRAN Conference), Reims, 24 - 26 August 2016, Book of abstracts, P. 32.

## **ПРОЕКТ 5.8 Динамика мезосферы Венеры**

### **Тема 5.8.1 Следы деталей рельефа в области верхней границы облаков**

#### **Аннотация.**

Обнаружена корреляция с географической долготой – рельефом поверхности, скорости зонального ветра, альбедо, содержания воды в области Земли Афродиты, связанная, вероятно, с генерацией волн Ли в гористой области.

В результате обработки данных камеры VMC VEX было показано, что зональная компонента скорости горизонтального потока в южном полушарии демонстрирует существенные вариации в зависимости от географической долготы Венеры и коррелирует с рельефом поверхности Земли Афродиты (Aphrodite Terra) (рис. 5.1 а). В диапазоне широт 5°-15° ю.ш. скорость меняется от 101 до 83 м/с. Замедление потока на 18% наблюдается над «материком» Земля Афродиты со смещением на 30-40° по долготе в сторону суперротации. Также в низких широтах к западу от Земли Афродиты наблюдается темный шлейф в УФ (365 нм) альбедо (рис. 5.1 б), свидетельствующий о влиянии 4.5-километровой возвышенности на вертикальный перенос УФ поглотителя. И наконец, в той же области наблюдается избыток содержания водяного пара H<sub>2</sub>O (рис. 5.1 с).

Обнаруженный эффект был интерпретирован как результат проявления стационарных гравитационных волн, возникающих при столкновении горизонтального потока с горными возвышенностями Земли Афродиты.

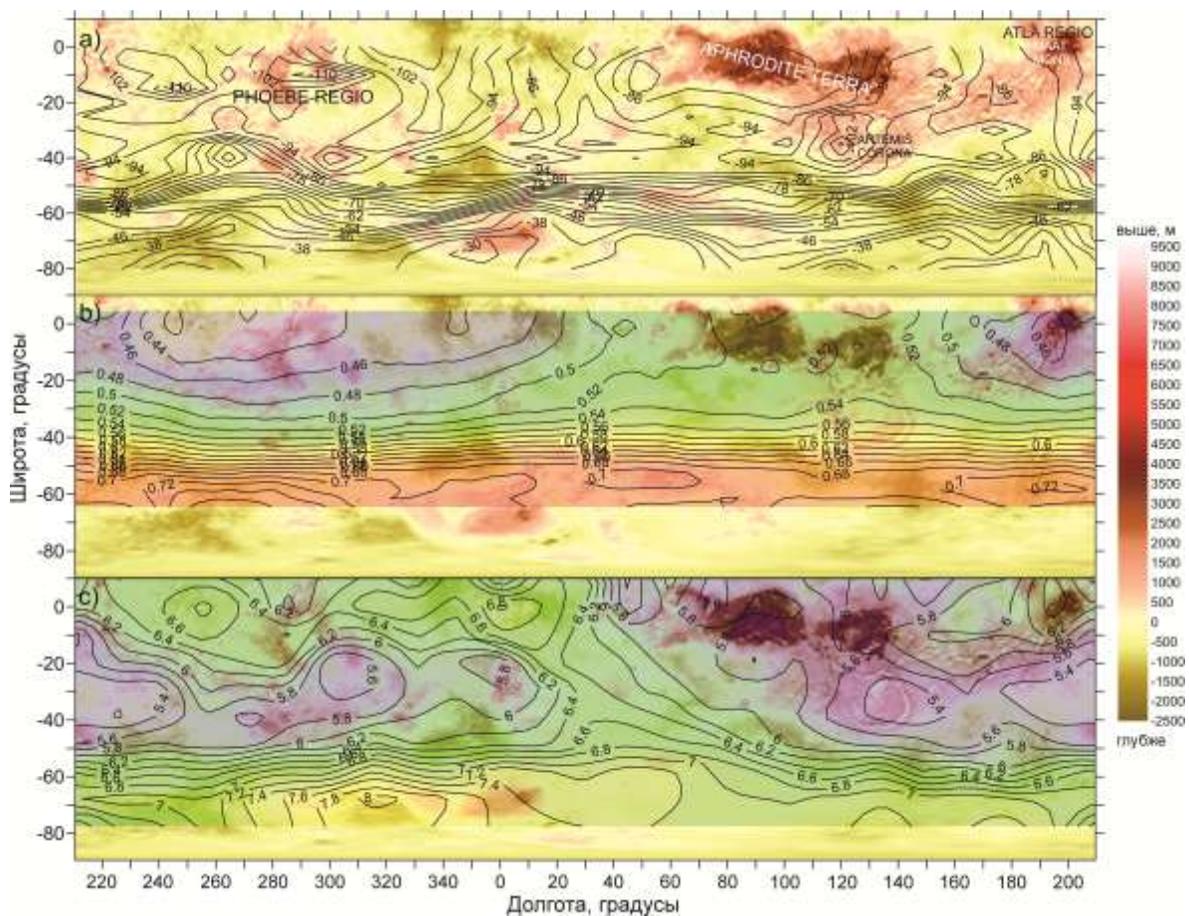


Рис. 5.1 – Топографическая карта Венеры с наложенными данными: а – распределение скорости зональной компоненты горизонтального потока для измерений с местным временем от 12 до 13 часов (карта скоростей смещена на 35° на восток), б – распределение УФ альbedo (365 нм), с – содержание H<sub>2</sub>O.

#### Публикации:

1. Bertaux, J.-L., I.V. Khatuntsev, A. Nauchecorne, W.J. Markiewicz, E. Marcq, S. etwaves // J. Geophys. Res. Planets. 2016. 121, 1087–1101, doi:10.1002/2015JE004958
2. Хатунцев И.В., Федорова А.А., Пацаева М.В., Тюрин А.В // Рельеф поверхности Венеры проступает сквозь толщу облаков, Природа, №10 (1214), с.87, 2016

## Тема 5.8.2 Циркуляция внутри облачного слоя Венеры по результатам многолетних наблюдений VMC в ближнем ИК диапазоне с борта Venus Express

### Аннотация.

Впервые получены поля зональной и меридиональной компонент скорости ветра на высоте  $55\pm 4$  км в координатах долгота-широта для южного полушария Венеры. Очевидна корреляция с деталями рельефа (Афродита) и преимущественное направление меридионального потока в области верхней границы среднего облачного слоя – к экватору, тогда как вблизи границы и выше облаков – к полюсу. Таким образом, наблюдаются две ветви (облачной) ячейки Хэдли.

Для обработки низко-контрастных ( $< 4\%$ ) изображений камеры VMC в ближнем ИК диапазоне (965нм) был разработан алгоритм на основе двумерной вейвлет-фильтрации. Полученные поля зональной и меридиональной компонент скорости ветра на высоте  $55\pm 4$  км в координатах долгота-широта для южного полушария Венеры показывают корреляцию с рельефом.

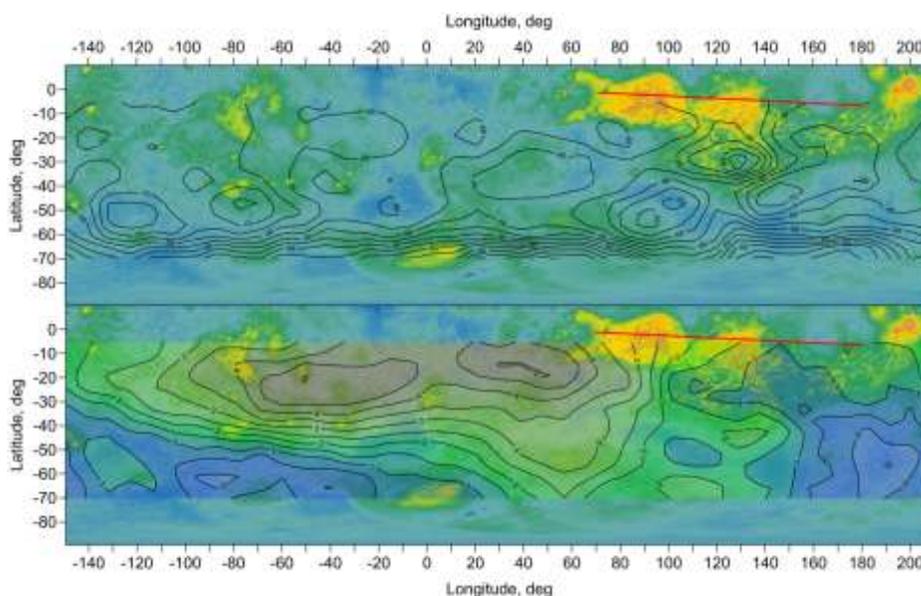


Рис. 5.2 – Зональная (вверху) и меридиональная (внизу) компоненты скорости горизонтального потока на высоте  $55\pm 4$  км, наложенные на альтиметрическую карту поверхности Венеры, полученную по данным Magellan. Красной линией представлена траектория движения баллона ВЕГА-2.

В низких широтах скорость зонального ветра составляет 68-70 м/с. Меридиональный поток преимущественно направлен к экватору, максимум скорости  $+5.8 \pm 1.2$  м/с, наблюдается на широте  $15^\circ$  ю.ш., а затем скорость медленно падает до нуля вблизи  $65-70^\circ$  ю.ш.

Баллон ВЕГА-2 плавал на высоте 53 км (траектория на рис. 5.2). Средняя зональная скорость баллона составила  $-66 \pm 1.9$  м/с, средняя меридиональная –  $+2.5 \pm 1.2$  м/с. По данным VMC средние скорости вблизи Земли Афродиты соответственно  $-67.5 \pm 1.5$  м/с – зональная и  $+2.0 \pm 1.5$  м/с меридиональная.

#### **Публикации:**

1. Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., Ignatiev N.I., Markiewicz W.J.; Winds in the middle cloud deck from VMC near-ir imaging on Venus Express. International Venus Conference 2016. Held 4-8 April 2016, in Oxford, UK;
2. Khatuntsev I.V., Patsaeva M.V., Titov D.V., Ignatiev N.I., Markiewicz W.J.; Winds in the middle cloud deck from the near-IR imaging by the Venus Monitoring Camera onboard Venus Express. The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S<sup>3</sup>), [http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7m-s3\\_program.pdf](http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7m-s3_program.pdf)
3. Patsaeva M., Khatuntsev I.; Influence of Venus topography on variations of zonal and meridional winds according to measurements in UV and IR channels of VMC/Venus Express. The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S3), held 10-14 October 2016, in Moscow, Russia; [http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7m-s3\\_program.pdf](http://ms2016.cosmos.ru/sites/ms2016.cosmos.ru/files/7m-s3_program.pdf)
4. Хатунцев И.В., Пацаева М.В., Титов Д.В., Игнатъев Н.И., Тюрин А.В., Маркевич В.Дж.; Циркуляция внутри облачного слоя Венеры по результатам наблюдений VMC в ближнем ИК диапазоне с борта Venus Express; Четырнадцатая Всероссийская Открытая конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"; 14 - 18 ноября 2016 г. в Москве; [http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\\_conf/files/conf\\_2016/dzz-program-2016-final.pdf](http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/files/conf_2016/dzz-program-2016-final.pdf)

### **Тема 5.8.3 Свечение кислорода O<sub>2</sub> 1.27мкм на ночной стороне Венеры на ночной стороне Венеры**

#### **Аннотация.**

В данной работе рассматривается распределение кислорода на ночной стороне по надирным (южное полушарие) и лимбовым (северное полушарие) измерениям инфракрасного канала M прибора VIRTIS (КА «Венера-Экспресс»), учитываются все имеющиеся данные, ранее не принимавшиеся во внимание.

Максимум усреднённого свечения приходится на антисолнечную точку, что указывает на доминирование SS-AS (subsolar-antisolar) режима циркуляции. Тем не менее, свечение имеет высокую вариативность, и максимум свечения на разных изображениях может оказываться как до, так и после полуночи по местному времени. Средняя интенсивность свечения до полуночи (0,43 МРл) превышает таковую после полуночи (0,26 МРл) – эффект, обратный тому, какой мог бы наблюдаться в случае присутствия на этих высотах зональной суперротации. На наблюдаемое явление может оказывать волновая активность с диагональным фронтом, что хорошо наблюдается по многим изображениям. Работа продолжается.

#### **Доклады и тезисы:**

1. Gorinov, D., Zasova, L., Shakun, A., Khatuntsev, I. Oxygen nightside airglow on Venus in relation to atmospheric dynamics based on VIRTIS-M observations. International Venus Conference, Oxford, UK, 4-8 апреля 2016 г.
2. Горинов Д.А. Свечение кислорода на ночной стороне Венеры в приложении к динамике верхней мезосферы. XIII Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования», Москва, 13-15 апреля 2016 г.
3. Gorinov, D., Zasova, L., Shakun, A., Khatuntsev, I. Oxygen nightside airglow on Venus in relation to atmospheric dynamics based on VIRTIS-M observations. The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S3), 10-14 октября 2016 г.

## **ПРОЕКТ 5.9 Электрические поля и разряды в атмосферах планет Солнечной системы**

### **Аннотация.**

Исследован вклад турбулентности в электризацию дисперсных многофазных систем с приложениями к грозовым облакам, снежным бурям и пылевым бурям.

Исследован вклад турбулентности в электризацию дисперсных многофазных систем с приложениями к грозовым облакам, снежным бурям и пылевым бурям. Используется модель генерации крупномасштабного электрического поля за счёт столкновений в слабо проводящей среде, содержащей два типа частиц. Проведено сравнение результатов расчётов с экспериментальными данными для грозовых облаков, метелей и пылевых бурь; установлено, что ситуация заметно различается для индукционного и безындукционного механизмов разделения зарядов. При индукционном механизме разделения зарядов существует область параметров грозового облака или снежной бури (наиболее важными факторами при этом являются проводимость и радиусы частиц), в которой электрическое поле растёт экспоненциально. В случае безындукционного (или трибоэлектрического) механизма разделения зарядов напряжённость электрического поля может расти линейно по времени из-за значительных флуктуаций заряда, которые способны играть важную роль в превышении порога, определяющего инициацию разряда. Наиболее значительное влияние турбулентности на безындукционную зарядку можно ожидать в пылевых бурях, в то время как на электризацию грозовых облаков безындукционная турбулентная зарядка оказывает незначительное влияние. Особое внимание уделено возможным приложениям к электризации во время пылевых бурь на Марсе.

### **Руководитель проекта:**

зам. директора ИПФРАН по научной работе, член-корр. РАН Мареев Евгений Анатольевич  
Место работы: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН) E-mail: [mareev@appl.sci-nnov.ru](mailto:mareev@appl.sci-nnov.ru)

**Публикация:**

E.A. Mareev, S.O. Dementyeva, The role of turbulence in thunderstorm, snowstorm and dust storm electrification, submitted to Journal of Geophysical Research - Atmospheres, 2016JD026150

## Публикации по направлению

5.1.	Моделирование УФ свечений атомов водорода и кислорода в планетных коронах с учетом надтепловых характеристик среды	Шематович Кайгородов	Icarus PSS Аствест 1 conf
5.2.	Газовые эмиссии из земной коры как важный фактор взаимодействия литосферы и атмосферы	Пулинец	4 conf
5.3.	Влияние вариаций ионизирующего излучения, аккреции межзвездной и межпланетной пыли, падения крупных тел на состав и химию атмосферы и климата Земли и Марса	Павлов Васильев Ануфриев	Изв. РАН в печати, 2 росс конф
5.4.	Исследование слоистых структур, турбулентности и внутренних волн в атмосферах Земли и планет по данным анализа радиозатменных и зондовых измерений	Павельев Губенко	2 Изв Вузов 7 conf 3 росс коф
5.5.	Исследование водяного пара и озона на Марсе по данным надирных наблюдений	Фёдорова	PSS Гл. в книге (Cambridge UP)
5.6.	Климатология надоблачной дымки в атмосфере Венеры	Игнатъев	Icarus 2 conf
5.7.	Исследование процессов выноса с поверхности и переноса пустынного аэрозоля в атмосфере Марса и его термических эффектов	Чхетиани Вигасин	SSRv 1 conf 1 росс конф
5.8.	Динамика мезосферы Венеры	Засова	-
5.9.	Электрические поля и разряды в атмосферах планет Солнечной системы	Мареев	JGRD

## НАПРАВЛЕНИЕ 6. Магнитосфера

Кураторы направления: Петрукович А.А. (ИКИ РАН), Демехов А.Г. (ИПФ РАН).

6.1	Проект 6.1: Низкочастотные электромагнитные волны и структуры в околоземной плазме	ИФЗ РАН	Похотелов О.А.
6.2	Проект 6.2: Сравнительный анализ взаимодействия высокоэнергичных заряженных частиц с различными волновыми модами в радиационных поясах Земли	ИКИ РАН	Шкляр Д.Р., Могилевский М.М.
6.3	Проект 6.3: Авроральные проявления возмущений баллонного типа в плазменном слое хвоста магнитосферы	ПГИ КНЦ РАН	Головчанская И.В.
6.4	Проект 6.4: Вторжения заряженных частиц в атмосферу Земли: взаимосвязь с геомагнитной активностью и волновыми явлениями в магнитосфере. Авроральное структурирование и связанные с ним явления в магнитосферно-ионосферной плазме	ПГИ КНЦ РАН	Яхнин А.Г., Козелов Б.В.
6.5	Проект 6.5: Исследования механизмов ускорения плазмы индукционными и потенциальными электрическими полями	ИКИ РАН	Зелёный Л.М.
6.6	Проект 6.6: Комплексное исследование околопланетных плазменных границ и физических процессов, определяющих их образование	ИКИ РАН	Веригин М.И.
6.7	Проект 6.7: Коллективные процессы в плазменном магнитосферном мазере и вблизи него	ИПФ РАН	Беспалов П.А., Демехов А.Г.
6.8	Проект 6.8: Формирование крупномасштабной магнитной структуры хвоста магнитосферы Земли в части компоненты магнитного поля ВУ	ИКИ РАН	Петрукович А.А., Григоренко Е.Е., Ковражкин Р.А.

### Проект: 6.1 Низкочастотные электромагнитные волны и структуры в околоземной плазме

#### Аннотация.

Экспериментально обнаружены и теоретически исследованы новые типы электромагнитных структур в космической плазме и изучено их нелинейное взаимодействие.

Выявлен новый, неизвестный ранее вид высокочастотных (выше 4 кГц) ОНЧ излучений по данным высокочувствительных финских наблюдений во время зимних ОНЧ кампаний на выносном пункте Каннуслахто (Kannuslehto,  $L \sim 5.5$ ), расположенном в 35 км от геофизической обсерватории Соданкюля, Финляндия. Неизвестные ранее излучения были обнаружены в результате применения специальной цифровой фильтрации, очищающей

записи ОНЧ от импульсных сигналов интенсивных атмосфериков, не позволяющих увидеть на спектрограммах другие виды ОНЧ излучений в том же частотном диапазоне. Оказалось, что на частотах выше 4 кГц помимо хорошо известных всплесков авроральных ОНЧ шипений и дискретных квазипериодических излучений, существует также неизвестный ранее вид дневных право-поляризованных ОНЧ волн.

Эти излучения наблюдаются в виде серий отдельных коротких дискретных широкополосных (от 4 до 10 кГц и более) сигналов длительностью каждый от одной до нескольких минут. Обнаруженные излучения на слух воспринимаются, как щебет птиц, а динамические спектры отдельных сигналов часто напоминают летящих птиц, поэтому они были названы «bird-emissions» ОНЧ излучениями («птички»). Эти излучения чаще наблюдаются в дневное время в магнитно-спокойных условиях. Поскольку частота обсуждаемых ОНЧ излучений выше половины экваториальной электронной гирочастоты на  $L \sim 5.5$ , они не могут распространяться к ионосфере Земли каналом вдоль данной  $L$ -оболочки. Высказано предположение, что генерация «птичек» происходит на существенно меньших расстояниях от Земли, однако механизм их генерации и особенности распространения волн от области генерации к точке наблюдения на земной поверхности пока не установлены.

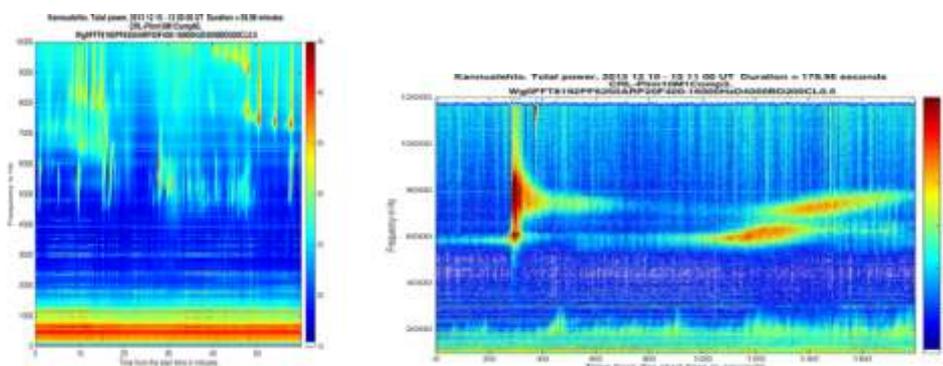


Рис. 6.1 – Пример часовой (левая панель) и 3-х мин (правая панель) спектрограмм ОНЧ колебаний («птички»).

По данным наземных и спутниковых наблюдений исследованы пространственно-временные вариации эквивалентных ионосферных токов в утреннем секторе авроральных широт во время двух случаев внезапного прекращения резонансных геомагнитных пульсаций Pc5. Эквивалентные ионосферные токи были рассчитаны по данным наблюдений на сети наземных магнитометров на скандинавском профиле IMAGE. Было отмечено, что в обоих случаях внезапное ослабление утренних Pc5 пульсаций регистрировалось на несколько минут позже начала брейкапа полярных сияний,

наблюдаемого в ночном секторе Земли. Анализ данных показал, что в одном из рассмотренных случаев (19 февраля 2008 г.) наиболее вероятной причиной прекращения геомагнитных пульсаций Pc5 могло быть внезапное изменение знака  $V_z$  компоненты ММП с положительного на отрицательный. В другом событии (18 января 2008 г.) наблюдались значительные пространственно-временные изменения в ионосферных эквивалентных токах. Обычно генерация Pc5 пульсаций сопровождается появлением в ионосфере вихря с направлением вращения по часовой стрелке, что отождествляется с усилением втекающего в ионосферу продольного электрического тока с изменяющейся во времени интенсивностью. Выполненный анализ показал, что в случае 18 января 2008 г. в утреннем секторе на скандинавском меридиане наблюдался интенсивный вихрь противоположного направления вращения (что соответствует вытекающему продольному току), который распространялся в антисолнечном направлении и поглотил слабый вихрь, соответствующий резонансным Pc5 пульсациям, что привело к резкому уменьшению амплитуды Pc5. Появление вихря может быть связано с вариациями продольных электрических токов, вызванных резким падением динамического давления солнечного ветра (с 1.0 до 0.2 нПа).

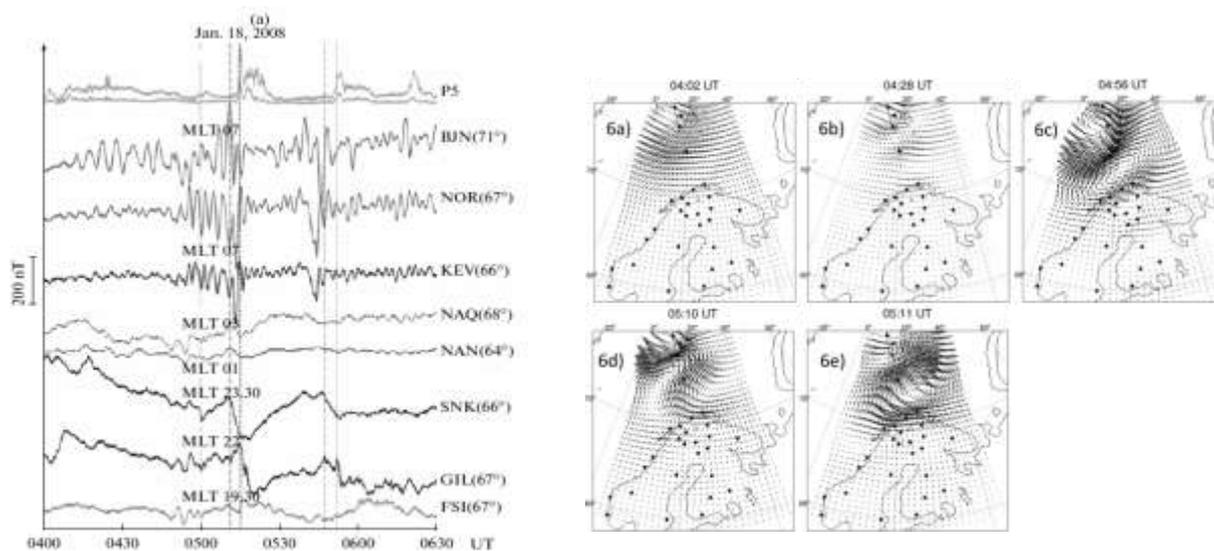


Рис. 6.2 – Резкое прекращение геомагнитных пульсаций Pc5 в утреннем секторе в обл. BUN-KEV с началом суббури в ночном секторе в обл. SNK и GIL – (левая панель) и соответствующий вихрь эквивалентного ионосферного тока (правая панель).

В рамках гидродинамической модели исследована генерация вихревых структур в конвективно неустойчивой атмосфере. Показано, что в атмосфере с зародышевым медленным крупномасштабным движением (вращением вдоль вертикальной оси) из конвективных ячеек генерируются мелкомасштабные вихри с интенсивным

тороидальным вращением. Используя полученное точное аналитическое решение в приближении идеальной гидродинамики, исследована структура вертикальной завихренности и тороидальной скорости атмосферного вихря. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с наблюдениями, а также с результатами лабораторного и численного моделирования.

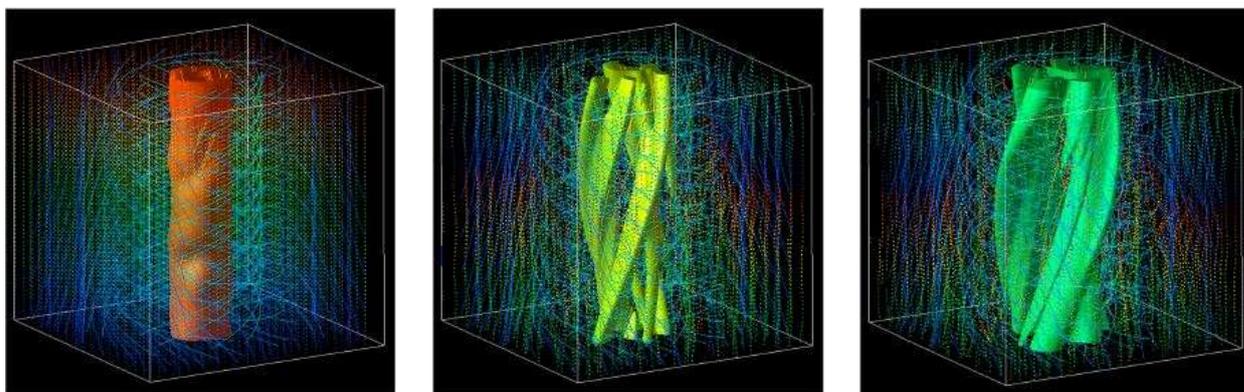


Рис. 6.3 – Результаты численного моделирования трехмерной нестационарной вихревой структуры – на картинках слева направо показана эволюция пылевого дьявола во времени.

Исследована распадная неустойчивость Фарли-Бунемана (Farley-Buneman) (ФБ) волн конечной амплитуды. Показано, что этот процесс приводит к насыщению неустойчивости. Полученные результаты используются для интерпретации численного моделирования нелинейных структур и наблюдений в земной ионосфере магнитосфере.

Исследовано влияние пондеромоторной силы на модификацию фоновой плазмы в области магнитных ям, формирующихся на дневной границе магнитосферы Земли под действием давления солнечного ветра. Показано, что этот эффект приводит к аномальному увеличению величины нелинейной плотности фоновой плазмы. Исследована зависимость пондеромоторной силы от магнитосферных параметров: магнитной долготы, удаленности от поверхности Земли, отношения частоты волны к гирочастоте протонов, амплитуды электромагнитных ионно-циклотронных волн. Наибольшее увеличение нелинейной плотности фоновой плазмы соответствует геомагнитным долготам от 0 до 30 градусов, где нелинейная плотность плазмы имеет два максимума вдоль силовой линии магнитного поля. Аналогичный эффект наблюдается и в зависимости нелинейной плотности фоновой плазмы от других магнитосферных параметров.

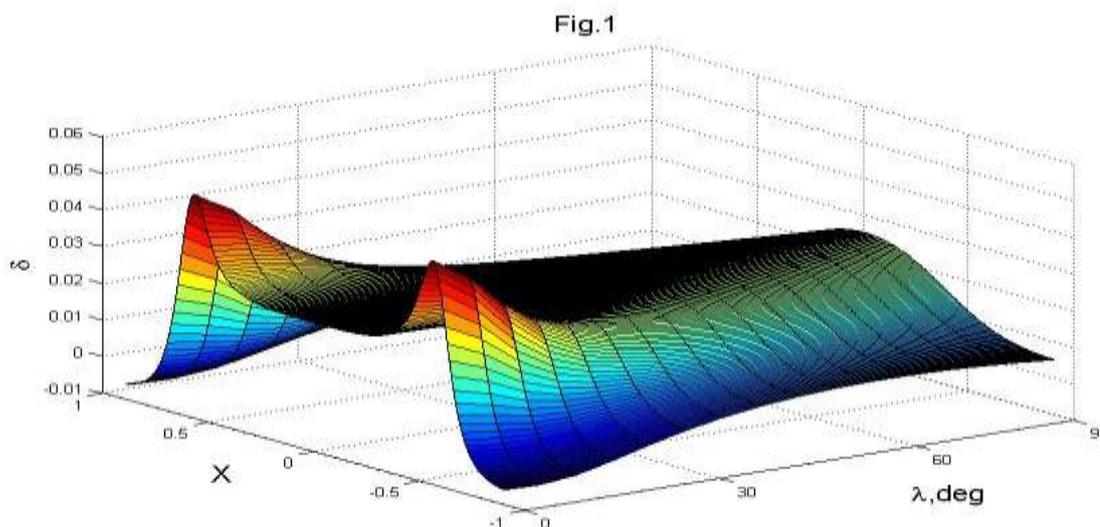


Рис. 6.4 – Распределение нелинейного возмущения плотности плазмы вдоль магнитной силовой линии как функция широты.

#### Руководитель проекта:

Похотелов Олег Александрович, д.ф.-м.н., профессор, ИФЗ РАН, pokh@ifz.ru, 8(499)2548805.

#### Публикации

1. Manninen J., Turunen T., **Kleimenova N.**, Rycroft M., Gromova L., Sirvio I., Unusually high frequency natural VLF radio emissions observed during daytime in Northern Finland hael; //Environmental Research Lett., Article reference:ERL-102680.R1, 2016.
2. Kauristie K., M.V. Uspensky, **N.G. Kleimenova**, O.V. Kozyreva, M. M. J. L. Van De Kamp, S.V. Dubyagin. Equivalent currents associated with morning sector geomagnetic Pc5 pulsations during auroral substorms // Ann. Geophys.34, 1-14, 379-392. 2016.
3. [Onishchenko O. G.](#), **Pokhotelov O. A.**, Horton W., Fedun V., “Explosively growing” vortices of unstably stratified atmosphere, J. Geophys. Res.: Atmospheres, 121(19), 11264-11268, 2016.
4. [Onishchenko O. G.](#), **Pokhotelov O. A.**, Horton W., [E. Scullion](#), FedunV., Responseto “Comment on ‘Large-scale Alfvén vortices’” Phys. Plasmas, V. 23, 034704, 2016.
5. Litt S.K., Smolyakov A.I., Bains A.S., **Pokhotelov O.A.**, **Onishchenko O.G.**, Horton W. Nonlinear theory of Farley-Buneman waves in multi-species plasma, Физика плазмы, 42(5), 410-416, 2016.

6. Некрасов А. К., Фейгин Ф. З., Влияние пондеромоторной силы, обусловленной альвеновскими волнами, на фоновую плазму на дневной стороне магнитосферы Земли. Геомагнетизм и аэрономия, Т. 56. № 4. С. 472-478.2016.

## **Проект 6.2 Сравнительный анализ взаимодействия высокоэнергичных заряженных частиц с различными волновыми модами в радиационных поясах Земли**

### **Аннотация.**

Квазиэлектростатические свистовые волны большой амплитуды, наблюдаемые в приэкваториальной области магнитосферы, могут эффективно рассеивать энергичные электроны в конус потерь, приводя к их высыпанию в ионосферу.

Взаимодействие энергичных протонов с низкочастотными свистовыми волнами в неоднородной плазме существенно отличается от резонансного взаимодействия этих волн с электронами. В силу большого гиропериода протонов выход частицы из резонанса с волной из-за неоднородности внешнего магнитного поля происходит за время порядка гиропериода, что по существу означает отсутствие циклотронного резонанса. Тем не менее, при достаточно большой поперечной энергии частицы ее взаимодействие с волной остается нелинейным и имеет стохастический характер. При этом динамика частиц в фазовом пространстве представляет собой диффузию. Коэффициент диффузии, однако, пропорционален не квадрату амплитуды резонансной гармоник, как в случае классической квазилинейной теории, а среднему квадрату амплитуды суммарного поля. Разработанные представления были сопоставлены с результатами наблюдений потоков высыпающихся протонов на спутнике NOAA 18 и одновременными наблюдениями квазиэлектростатических свистовых волн большой амплитуды на спутниках STEREO-A и STEREO-B и нашли качественное подтверждение.

### **Руководитель проекта:**

Шкляр Давид Рувимович, ИКИ РАН, [david@iki.rssi.ru](mailto:david@iki.rssi.ru)

### **Публикации:**

1. Шкляр, Д. Р., Е. Е. Титова (2017), Взаимодействие протонов с квазиэлектростатическими свистовыми волнами в неоднородной плазме (магнитосфере). Геомагнетизм и аэрономия. Том 57, вып. 1, с. 1–8.

2. Вавилов Д. И., Д. Р. Шкляр (2016), Волновые эффекты, связанные с высотным изменением ионного состава ионосферы, Известия вузов. Радиофизика. Том LIX, вып. 7, с. 575 – 592.

### **Проект 6.3 Авроральные проявления возмущений баллонного типа в плазменном слое хвоста магнитосферы**

#### **Аннотация.**

С помощью наземных оптических наблюдений полярных сияний обнаружены признаки альфвеновского резонанса в поведении авроральных дуг перед началом суббури, проявляющиеся как периодическое реструктурирование дуги с повторяющимися в широтном направлении экскурсиями в месте последующего начала суббури.

Эволюция авроральной дуги перед началом суббури в момент времени  $T_0$  изучалась с помощью отфильтрованных наземных оптических наблюдений полярных сияний, т.к. ожидаемые авроральные проявления альфвеновского резонанса (FLR) довольно слабые и могут быть обнаружены и исследованы только при фильтрации. Наблюдения проводились на Кольском полуострове в обсерваториях Полярного геофизического института Ловозеро, Лопарская и Туманный.

В одном из трех представленных событий предбрейкаповая дуга, как показано на рис. 6.5, проявляет периодическое реструктурирование с повторяющимися экскурсиями к полюсу в течение  $\sim 10$  минут перед  $T_0$ . Экскурсии простираются на  $1^\circ$  по широте и повторяются с периодом 2.5 минуты (частота 6.7 мГц), указывая на классический альфвеновский резонанс (FLR), который образуется на месте последующего начала суббури. В двух других событиях предбрейкаповая дуга развивалась иначе. Появившись за 15-20 минут перед брейкапом, дуга интенсифицируется и начинает структурироваться в широтном направлении, новые дуги отщепляются и распространяются от нее. Мы предполагаем, что это может означать нелинейный дисперсионный FLR, порождающий единичные волновые структуры, которые развиваются периодически вне области резонанса.

Результаты этих исследований поддерживают точку зрения, что суббуря может начинаться внутри области альфвеновских резонансов и, таким образом, альфвеновские резонансы могут играть значительную роль в триггировании суббури.

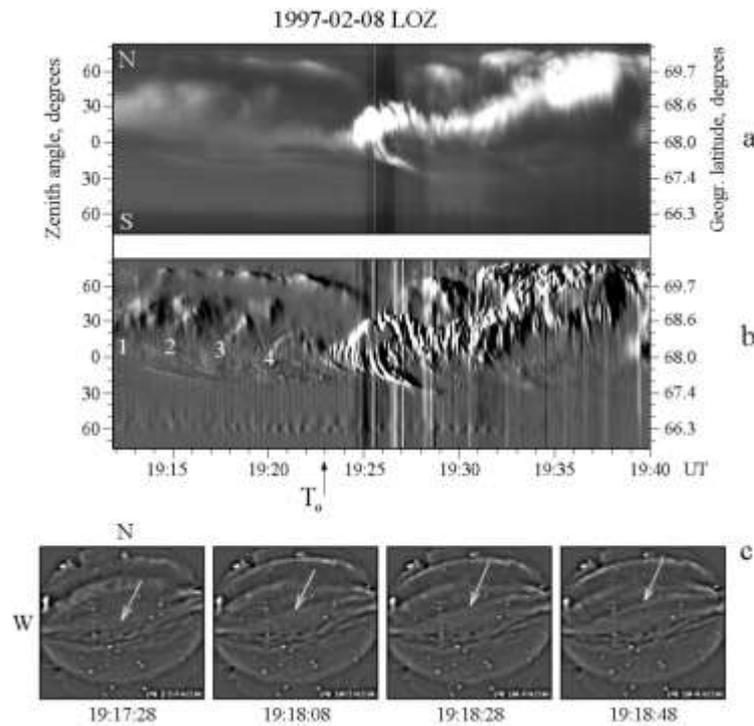


Рис. 6.5 – Оригинальные(*a*) и фильтрованные (*б*) кеограммы в направлении север-юг (N-S), построенные по наблюдениям камер всего неба на станции LOZ, 8 февраля 1997 года. Номера на фильтрованной кеограмме обозначают периодические экскурсии авроральных признаков перед началом экспансии в  $T_0 = 19:22:58$  UT. (*в*) Выбранные изображения камеры всего неба в LOZ, взятые во время 3-ей экскурсии к полюсу, отмеченной на фильтрованной кеограмме цифрой 3. Географический север вверху, и географический запад слева. Стрелки указывают на движущуюся к полюсу дугу.

**Руководитель проекта:**

Головчанская Ирина Владимировна, ИПГ КНЦ.

**Публикация:**

И.В. Головчанская, И.А. Корнилов, Т.А. Корнилова, О.И. Корнилов, Т.Г. Когай, Признаки альфвеновского резонанса в поведении авроральной дуги перед началом суббури // Направлена в журнал Geophysical Research Letters.

## **Проект 6.4 Вторжения заряженных частиц в атмосферу Земли: взаимосвязь с геомагнитной активностью и волновыми явлениями в магнитосфере. Авроральное структурирование и связанные с ним явления в магнитосферно-ионосферной плазме**

### **6.4.1 Аннотация.**

Обнаружен двухступенчатый отклик ночных полярных сияний на отрицательный внезапный импульс (SI) при резком уменьшении давления солнечного ветра. Отклик состоит в 1) резком увеличении яркости и полярной экспансии сияний во время импульса и 2) уменьшении интенсивности сияний через 6-8 минут после импульса.

Данные меридиональных сканирующих фотометров сети NORSTAR и камер всего неба сети THEMIS использованы для детального исследования отклика ночных полярных сияний на резкое уменьшение динамического давления солнечного ветра, наблюдаемое 28 сентября 2009 г. Уменьшение динамического давления сопровождалось соответствующей депрессией магнитного поля в индексе SYM-H и появлением отрицательного внезапного импульса SI длительностью 5–8 мин и амплитудой 150–200 нТл в горизонтальной компоненте магнитного поля на станциях ночного сектора авроральной зоны. Магнитному импульсу предшествовал длительный магнитоспокойный период, хотя Vz-компонента ММП в течение ~1.5 часа до SI была отрицательной. Начало SI, определенное по вариациям магнитного поля в ~06:50 UT, сопровождалось резким увеличением интенсивности дискретных форм полярных сияний в полуночном секторе авроральной зоны и их быстрым распространением к полюсу. Примерно через 6–8 мин после SI в ночном секторе началось быстрое уменьшение интенсивности аврорального свечения в эмиссиях, возбуждаемых потоками как высыпающихся электронов, так и протонов. Анализ оптических наблюдений, таким образом, показал, что в рассмотренном событии отклик ночных полярных сияний на SI имел двухступенчатый характер: сначала наблюдалась быстрое движение к полюсу дискретных форм сияний со значительным увеличением их интенсивности, а затем с задержкой в ~6–8 мин относительно SI – быстрое уменьшение интенсивности аврорального свечения. Возможной причиной отклика 1 вероятно является триггирование суббури, задержка отклика 2, возможно, связана с распространением фронта уменьшения давления в область развития суббури.

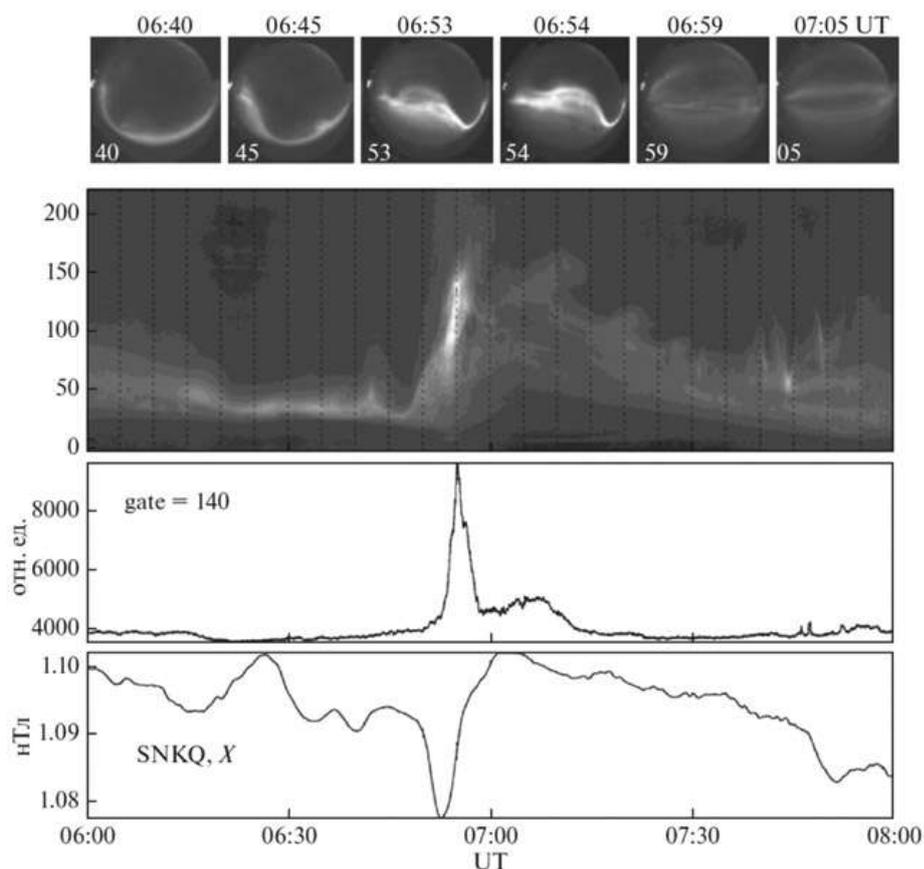


Рис. 6.6 – Снимки камеры всего неба обсерватории SNKQ в полуночном секторе в 06:40 UT, 06:45 UT, 06:53 UT, 06:54 UT, 06:59 UT и 07:05 UT (верхняя панель). Ниже показана кеограмма полярных сияний в интервале 06:00–08:00 UT, широтный разрез интенсивности сияний и вариации  $X$ -компоненты геомагнитного поля на станции SNKQ. Отрицательный импульс был зарегистрирован около 06:50 UT.

#### 6.4.2 Аннотация.

Рассмотрен вопрос о минимальном поперечном по отношению к внешнему магнитному полю масштабе альфвеновской турбулентности в верхней ионосфере авроральной зоны. Приведены примеры и дана интерпретация событий, в которых степенной вид спектров электрических флуктуаций сохраняется до локальных значений акустического гирорадиуса или гирорадиуса иона.

С привлечением наблюдений электрических полей КА FAST (разрешение  $512 \text{ с}^{-1}$ ) исследуется вопрос о минимальном поперечном по отношению к внешнему магнитному полю масштабе альфвеновской турбулентности в верхней ионосфере авроральной зоны. Впервые приводятся примеры событий, в которых степенной вид вейвлет спектров электрических флуктуаций с наклоном 2.0–2.5, характерный для альфвеновской турбулентности, сохраняется до локальных значений акустического гирорадиуса  $\rho_s$  или

гирорадиуса иона  $\rho_i$ . При этом изменений характера спектра на масштабах порядка инерционной длины электрона  $\lambda_e$ , которая для высот КА FAST (апогей  $\sim 4000$  км) значительно превышает  $\rho_s$  и  $\rho_i$ , не происходит. Сделана попытка объяснить этот экспериментальный факт, рассматривая известные сценарии появления малого поперечного масштаба в альфвеновском возмущении. Отмечено, что эффекты укручения фронта в инерционной альфвеновской волне конечной амплитуды, распространяющейся под углом меньшим, чем  $(m_e/m_i)^{1/2}$  к поперечному направлению, могут приводить к появлению в возмущении малых поперечных масштабов, сравнимых с акустическим гирорадиусом.

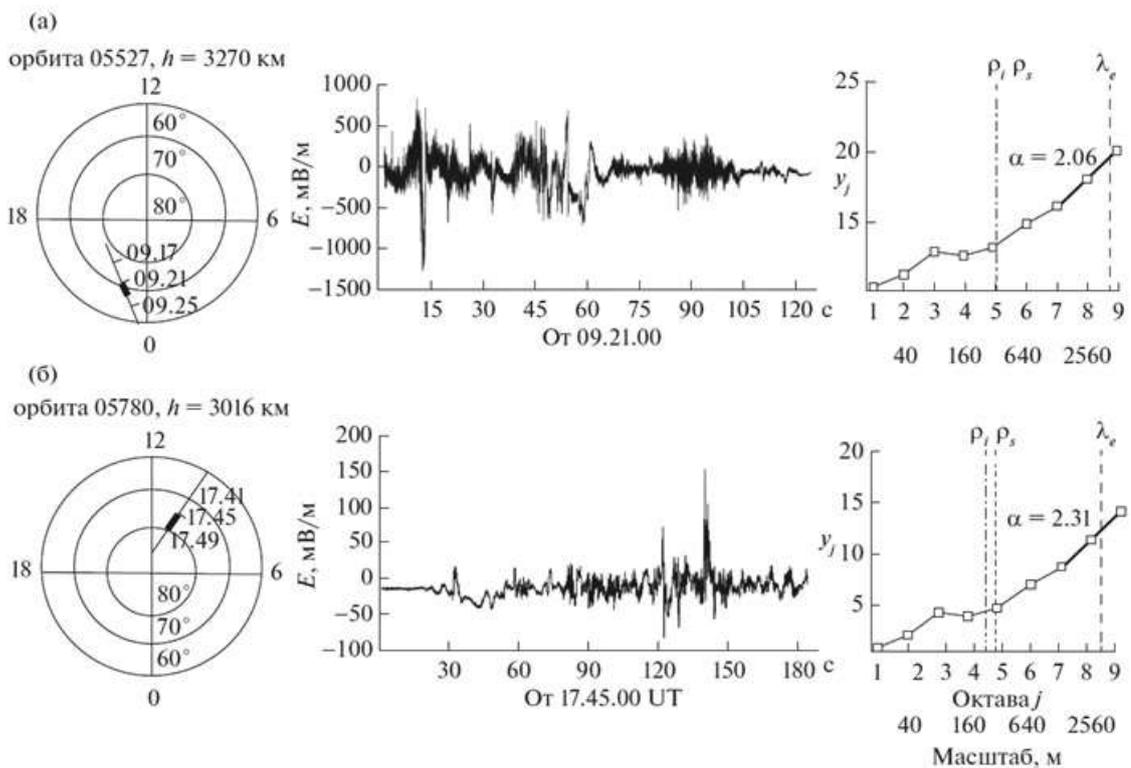


Рис 6.7 – а – пересечение КА *FAST* авроральной зоны; б – наблюдения структурированного электрического поля (компонента вдоль траектории КА *FAST*); в – логарифмическая диаграмма, построенная с использованием вейвлета Добеши 5-го порядка. Степенной участок зависимости мощности флуктуаций от масштаба показан сплошной линией. Штриховой линией показано локальное значение инерционной длины электрона  $\lambda_e$ . Штрихпунктирной и пунктирной линиями показаны локальные значения ионного гирорадиуса  $\rho_i$  и акустического гирорадиуса  $\rho_s$ .

#### Руководители проекта:

Козелов Б.В., Яхнин А.Г., Полярный геофизический институт,

[boris.kozelov@gmail.com](mailto:boris.kozelov@gmail.com), [ayahnin@gmail.com](mailto:ayahnin@gmail.com)

**Состав группы:**

Белаховский В.Б., Воробьев В.Г., И. В. Головчанская, Б. В. Козелов.

**Публикации:**

1. В. Б. Белаховский, В. Г. Воробьев. Отклик ночных полярных сияний на отрицательный внезапный импульс. Геомagnetизм и аэрономия, 2016, Т.56, №6, с. 733–744.
2. Головчанская И.В., Козелов Б.В. Диапазон масштабов альфвеновской турбулентности в верхней ионосфере авроральной зоны //Космические исследования. 2016. Т.54, № 1. С. 52–57.

**Проект 6.5 Исследования механизмов ускорения плазмы индукционными и потенциальными электрическими полями****Аннотация.**

Исследованы кинетические эффекты динамики и энергизации ионов в токовых слоях с широм магнитного поля. Установлено, что присутствие магнитного шира способствует утолщению токового слоя и уменьшению плотности тока в нем, а также формированию асимметричного профиля плотности тока в слое.

Самосогласованное кинетическое моделирование тонких токовых слоев в хвосте магнитосферы Земли в зависимости от величины и пространственного профиля шировой компоненты магнитного поля показало, что наличие ненулевой шировой компоненты способствует утолщению токового слоя и ослаблению плотности тока в нем. Данные эффекты обусловлены особенностями квазиadiaбатической динамики ионов в токовом слое. Также выявлен эффект формирования асимметричных токовых конфигураций, в которых максимум плотности тока смещен от нейтральной плоскости в северную или южную часть плазменного слоя в зависимости от знака шировой компоненты магнитного поля в центре слоя. Данные структурные особенности токовых слоев с магнитным широм, полученные в результате моделирования, согласуются с результатами наблюдений токовых слоев с магнитным широм в хвосте магнитосферы Земли спутниками Cluster.

**Руководитель проекта:**

академик Зеленый Лев Матвеевич, Институт космических исследований РАН,  
[lzelenyi@iki.rssi.ru](mailto:lzelenyi@iki.rssi.ru)

**Публикация:**

Л.М. Зеленый, Х.В. Малова, Е.Е. Григоренко, В.Ю. Попов, Тонкие токовые слои: от работ Гинзбурга-Сыроватского до наших дней, Успехи Физических Наук, т.186, №11, 1153-1188, 2016.

**Проект 6.6 Комплексное исследование околопланетных плазменных границ и физических процессов, определяющих их образование****6.6.1 Аннотация.**

Верификация эмпирических критериев определения положения плазмопаузы на основе физического моделирования.

Для определения положения плазмопаузы по экспериментальным данным используются различные формальные эмпирические критерии. Наиболее часто за плазмопаузу принимается внутренняя граница, после которой плотность плазмы падает в 5 или более раз при увеличении  $L$  – оболочки на 0,5. Данные измерений холодной плазмы на космическом аппарате ИНТЕРБОЛ-1 (1995-2000 гг.) позволяют также определить плазмопаузу визуально по временной последовательности энергетических спектров ионов. Внутри этой границы спектры холодной плазмы регулярные и плотность более  $5-10 \text{ см}^{-3}$ . Ранее авторами разработана модель плазмосферы Земли, которая основана на теоретических выражениях, описывающих распределение плазмы в плазмосфере. Эта модель позволяет по данным измерений вдоль одного пролета спутника восстановить распределение плазмы во всей плазмосфере и найти положение плазмопаузы, определяемой как последняя замкнутая линия потока плазмы. На основании анализа данных ИНТЕРБОЛа-1 показано, что модельное положение плазмопаузы приблизительно совпадает с границей, определенной эмпирически по падению плотности (рис. 6.8). При этом различие в положении границ, определенных по двум эмпирическим методикам позволяет оценить толщину пограничного слоя плазмосферы. Толщина пограничного слоя около плазмопаузы в среднем составляет  $0.4 - 0.5 R_e$  в экваториальной плоскости, но может достигать  $1.4 R_e$  (рис. 6.9).

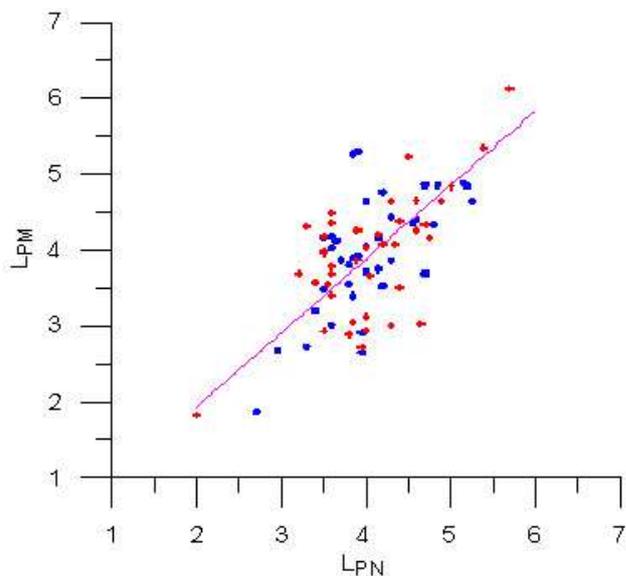


Рис. 6.8 – Сравнение положения плазмопаузы, определенного по изменению плотности с изменением  $L$  – оболочки ( $LPN$ ), при входе спутника в плазмосферу (синие точки) и при выходе из нее (красные крестики) с положением плазмопаузы  $LPM$ , определенным как последняя замкнутая линия потока плазмы при трехмерном моделировании распределения плазмы в плазмосфере. Прямая линия – аппроксимирующая зависимость  $LPM = 0.97LPN$ .

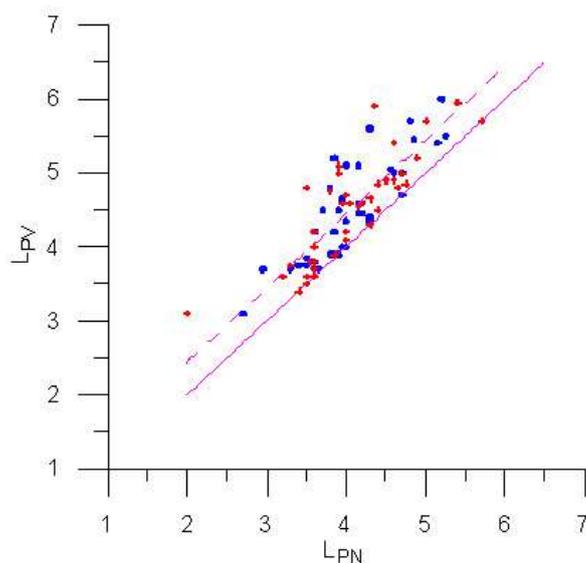


Рис. 6.9 – Сравнение положений плазмопаузы, определенных по энергетическим спектрам ионов ( $LPV$ ) и по изменению плотности с изменением  $L$  – оболочки ( $LPN$ ), при входе спутника в плазмосферу (синие точки) и при выходе из нее (красные крестики). На прямой линии  $LPV = LPN$ . Штриховая линия показывает аппроксимирующую зависимость  $LPV = LPN + 0.44$ .

**Публикация:**

**Котова Г.А., Веригин М.И., Безруких В.В.,** Использование физического моделирования для выбора адекватного метода определения положения плазмопаузы, Геомагнетизм и Аэрномия, 2016 (принята в печать).

**6.6.2 Аннотация.**

Обнаружение вертикальных дрейфов плазмы в полосе регистрации поляризационного джета.

По данным доплеровских измерений на Якутской меридиональной сети субавроральных ионосферных станций исследованы вертикальные дрейфы плазмы во время регистрации поляризационного джета (ПД) в слое  $F_2$  ионосферы. Поляризационный джет характеризуется быстрым западным дрейфом плазмы в ионосфере, возникающем при электрическом поле, направленном к полюсу. Часто наблюдаются протяженные по широте полосы западного дрейфа, называемые субароральными поляризационными потоками SAPS. Обнаружено, что в периоды наблюдения ПД скорости вертикальных дрейфов также значительно выше, чем фоновые движения, и могут достигать 150 м/с на высотах области F. Доплеровские измерения на ионозондах DPS-4 сопоставлены с синхронными измерениями дрейфа плазмы на спутниках DMSP при их пролете вблизи якутского меридиана. Два вида измерений хорошо согласуются между собой (рис. 6.10). Показано, что на полярной кромке главного ионосферного провала происходит изменение направления вертикального движения ионосферной плазмы с восходящего на нисходящее (рис. 6.11).

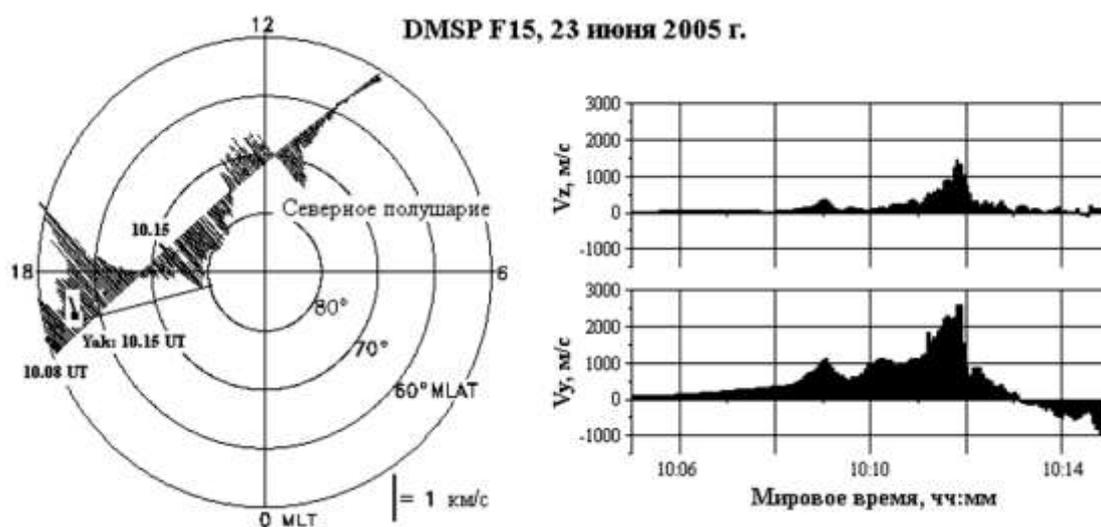


Рис. 6.10 – Одновременные измерения дрейфа плазмы на спутнике F-15 при пролетах в северном полушарии и дигизондом DPS-4 на ст. Якутск. Полоса SAPS перекрывает диапазон более 15 градусов по широте. Слева на полярной проекции стрелкой отмечена величина и направление дрейфа плазмы по наземным данным.

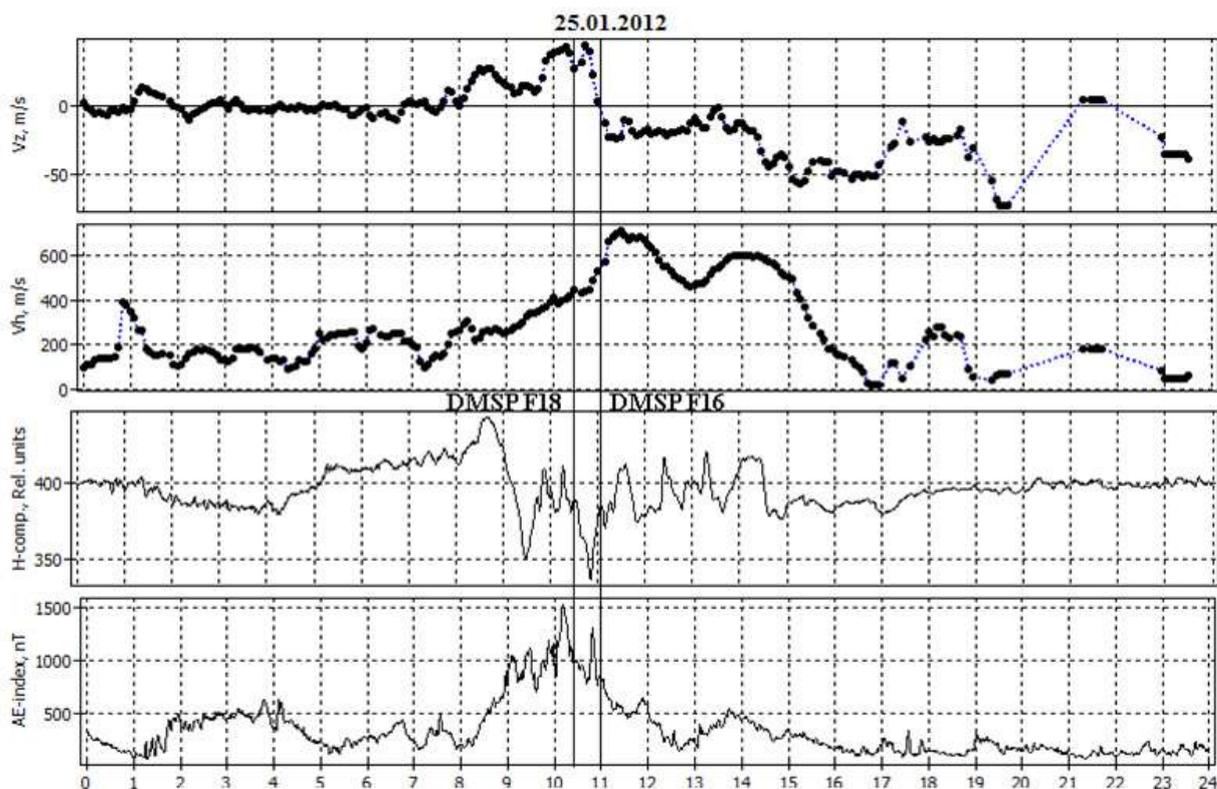


Рис. 6.11 – Доплеровские измерения скоростей вертикального –  $V_z$  и горизонтального –  $V_h$  дрейфов плазмы ионозондом DPS-4 25.01.2012 г. Подъем скоростей выше фоновых значений начинается с повышением магнитной активности. Вертикальными прямыми линиями показаны моменты пролета спутников DMSP вблизи меридиана наземных измерений. В нижней части рисунка приведены вариации Н-компоненты магнитного поля в относительных единицах на станции Якутск и ход AE-индекса за этот день. В 11.00 UT полярная кромка провала ионизации сместилась в зенит станции наблюдения и направление дрейфа изменилось с восходящего на нисходящее.

**Руководитель темы:**

д.ф.-м.н. М.И.Веригин, ИКИ РАН ([verigin@iki.rssi.ru](mailto:verigin@iki.rssi.ru))

**Состав группы:**

к.ф.-м.н. Халипов В.Л., [khalipov@iki.rssi.ru](mailto:khalipov@iki.rssi.ru), к.ф.-м.н. Котова Г.А., к.ф.-м.н. Безруких В.В.

**Публикации:**

1. В.Л. Халипов, А.Е. Степанов, Г.А. Котова, С.Е. Кобякова, В.В. Богданов, А.В. Кайсин, В.А. Панченко. Вертикальные скорости дрейфа плазмы при наблюдении поляризационного джета по наземным доплеровским измерениям и данным дрейфометров

на спутниках DMSP, Геомагнетизм и аэрономия, Т. 56, №5. С.568-578, 2016.  
DOI:10.7868/S0016794016050060.

2. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Котова Г.А., Кобякова С.Е. Вертикальные скорости дрейфа плазмы в поляризационном джете по наземным и спутниковым данным, в сб. Труды XXV Всероссийской научной конференции "Распространение радиоволн", Т.1, с. 93-96, ТГУСУР, Томск, 2016.

3. В.Л. Халипов, А.Е. Степанов, Г.А. Котова, Е.Д. Бондарь. Вариации положения поляризационного джета и границы инжекции энергичных ионов во время суббурь, Геомагнетизм и аэрономия, т.56, № 2, с.187-193, 2016.

DOI: 10.7868/S0016794016020085.

4. А.Е. Степанов, В.Л. Халипов, Г.А. Котова, М.С. Заболоцкий, И.А. Голиков. Данные наблюдений крупномасштабной конвекции плазмы в магнитосфере в зависимости от уровня геомагнитной активности, Геомагнетизм и аэрономия, т.56, №2, с.194-199, 2016, DOI: 10.7868/S0016794016010119.

## **Проект 6.7 Коллективные процессы в плазменном магнитосферном мазере и вблизи него**

### **Аннотация.**

Рассмотрен вопрос о причинах и проявлениях радиальной диффузии высокоэнергичных электронов в средней магнитосфере Юпитера. Показано, что эффективность радиальной диффузии тесно связана с десятичасовой динамикой плазменного магнитосферного мазера в зоне кольцевого тока. Полученная в результате расчетов величина и функциональная зависимость коэффициента радиальной диффузии поперек магнитных оболочек близка к известной экспериментально.

В качестве причины радиальной диффузии высокоэнергичных электронов в средней магнитосфере Юпитера рассмотрена десятичасовая динамика плазменного магнитосферного мазера. Для отдельной трубки магнитного поля характерны высокочастотные колебания, характеризующиеся периодическим накоплением высокоэнергичных частиц и их высыпанием в ионосферу во время импульсов электромагнитного излучения свистового диапазона частот. В быстровращающейся магнитосфере Юпитера с азимутально-неоднородной ионосферой реализуется эффект

глобального резонанса, обеспечивающий синхронизацию указанных колебательных процессов в отдельных трубках магнитного поля.

Временная модуляция потоков энергичных электронов при глобальном резонансе модулирует кольцевой ток вне плазменного тора спутника Ио и обеспечивает импульсы азимутальной компоненты электрического поля в средней магнитосфере. Определены величины связанных с электрическими импульсами случайных переносов энергичных электронов поперек магнитных оболочек и получено выражение для модельного коэффициента радиальной диффузии. Функциональный вид и величина модельного коэффициента радиальной диффузии находятся в хорошем соответствии с известными для магнитосферы Юпитера экспериментальными данными, согласно которым в средней магнитосфере  $D_{LL} \propto L^4$ . Для сравнения отметим, что в условиях магнитосферы Земли основным драйвером радиальной диффузии частиц в радиационных поясах служат электромагнитные импульсы, обусловленные колебаниями давления солнечного ветра. В этом случае коэффициент радиальной диффузии характеризуется намного более резкой зависимостью от магнитной оболочки:  $D_{LL} \propto L^{10}$ .

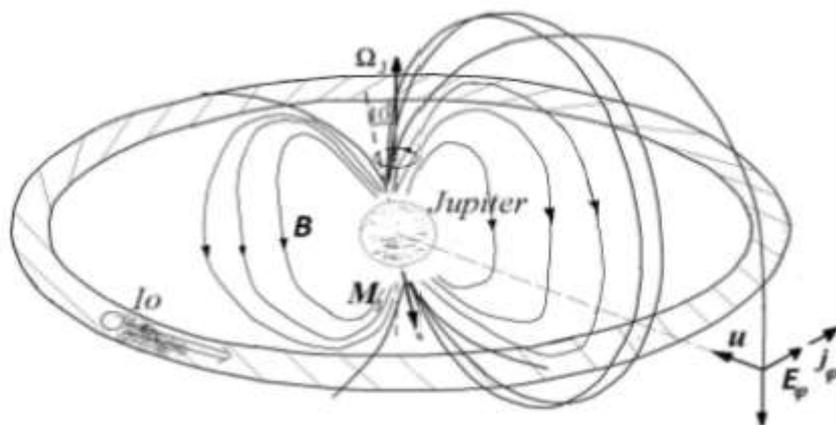


Рис. 6.12

Радиальная диффузия энергичных электронов определяет пространственную структуру электронных радиационных поясов, а с ней и дециметровое излучение Юпитера. Знания о функциональной зависимости коэффициента радиальной диффузии частиц служат одной из важных основ дальнейших исследований квазистатических и нестационарных явлений в средней магнитосфере Юпитера.

**Руководитель проекта:**

профессор Беспалов Петр Алексеевич, ИПФ РАН, [peter@appl.sci-nnov.ru](mailto:peter@appl.sci-nnov.ru)

### **Публикации:**

1. Беспалов П.А., Савина О.Н., Особенности радиальной диффузии энергичных электронов в средней магнитосфере Юпитера //Космические исследования. 2016. Т. 54. № 3. С. 204-208.
2. Беспалов П.А., Мизонова В.Г. Динамика мелкомасштабных трехмерных плазменных структур в зоне авроральных продольных токов / Сборник тезисов 11-й ежегодной конференции "Физика плазмы в солнечной системе". ИКИ РАН. 2016. С. 93.

## **Проект 6.8 Формирование крупномасштабной магнитной структуры хвоста магнитосферы Земли в части компоненты магнитного поля $B_y$**

### **6.8.1 Аннотация.**

Установлен механизм дополнительного нагрева электронов и значительного уменьшения отношения протонной и электронной температур во время магнитных диполизаций в ближнем хвосте магнитосферы Земли.

На основе созданного каталога наблюдений магнитных диполизаций спутниками Cluster в плазменном слое ближних областей геомагнитного хвоста, включающего около 100 событий, выполнен статистический анализ динамики электронной ( $T_e$ ) и протонной ( $T_p$ ) температур и отношения  $T_p/T_e$ . Установлено, что сильные вариации  $T_p/T_e$  и транзитные уменьшения этой величины до  $T_p/T_e \sim 2.0$  наблюдаются после начала диполизации, когда  $B_z$  – компонента магнитного поля в ТС имеет значительную положительную величину и наблюдаются всплески волновой активности в широком диапазоне частот. Статистически установлено, что на данной фазе диполизации возрастания  $T_e$  совпадают с возрастаниями мощности электростатических или электромагнитных флуктуаций вблизи электронной гирочастоты. Данные результаты позволяют заключить, что высокочастотные моды, развивающиеся в ТС во время возмущения и ослабления поперечного тока хвоста, могут резонансно взаимодействовать с электронами и вызвать их нагрев.

### **Руководитель темы:**

д.ф.-м.н., внс Григоренко Елена Евгеньевна, Институт космических исследований РАН,  
elenagrigorenko2003@yandex.ru

### **Публикации:**

1. Григоренко Е.Е., Е.А. Кронберг, П. Дали, Нагрев и ускорение заряженных частиц во время магнитных диполизаций, *Космические исследования*, № 1, 2017.
2. E. E. Grigorenko, E. A. Kronberg, P. W. Daly, N. Yu. Ganushkina, B. Lavraud, J.- A. Sauvaud, L. M. Zelenyi, Origin of low proton-to-electron temperature ratio in the Earth's plasma sheet, *J. Geophys. Res., Space Physics*, 121, doi:10.1002/2016JA022874, 2016.

### **6.8.2 Аннотация.**

Установлена взаимосвязь плазменных инъекций в авроральной магнитосфере и геомагнитных пульсаций типа Pi3 в фазу экспансии суббури.

Выполнен комплексный анализ структур электронов и протонов 0.1-20 эВ и магнитного поля по данным спутника ИНТЕРБОЛ-2 в авроральной магнитосфере на высотах ~2.7 - 3.0  $R_E$ , магнитного поля по данным спутников GOES-8 и GOES-9 на  $R = 6.6 R_E$ , планетарной картины полярных сияний по данным спутника POLAR, а также пульсаций Pi2-Pi3 по данным магнитных обсерваторий программы CARISMA. Показано, что фаза экспансии суббури 09.01.1997 г. состоит из двух этапов: первый этап происходит на широтах аврорального овала, второй – на более высоких широтах с распространением авроральной выпуклости вплоть до полярной шапки. Во время второго этапа четко регистрируется зона инъекций пакетов высокоскоростных потоков электронов, ассоциирующихся с BBF – Bursty Bulk Flows, вплоть до  $E = 3$  кэВ и ускоренных протонов вплоть до  $E = 10$  кэВ (две верхние панели рис. 6.13; инъекции обозначены вертикальными линиями A1, A2 и A3). На четырех нижних панелях представлены Pi3 пульсации, полученные на магнитных обсерваториях. Впервые выявлено, что инъекции ускоренных протонов в форме дисперсионных структур типа TDIS – Temporally Dispersed Ion Structures, инъекции электронов и Pi3 пульсации повторяются с периодом ~ 180 с. причем взаимосвязь инъекций и пульсаций наблюдается только для пульсаций на станциях CONT и RANK с параметром  $L = 11.7-12.1$ . Характерно, что зона инъекций частиц проецируется в экваториальную плоскость также на  $R = 11-13 R_E$ . В области этого источника могут образовываться транзиентные пересоединения и генерируется альфвеновская волна, вызывающая нагрев и ускорение протонов до  $10^6$  и электронов до  $10^7$  частиц/(см<sup>2</sup> с стер кэВ) и стимулирующая появление цуга геомагнитных пульсаций Pi3 с амплитудой H-компонента +/-50 нТ.

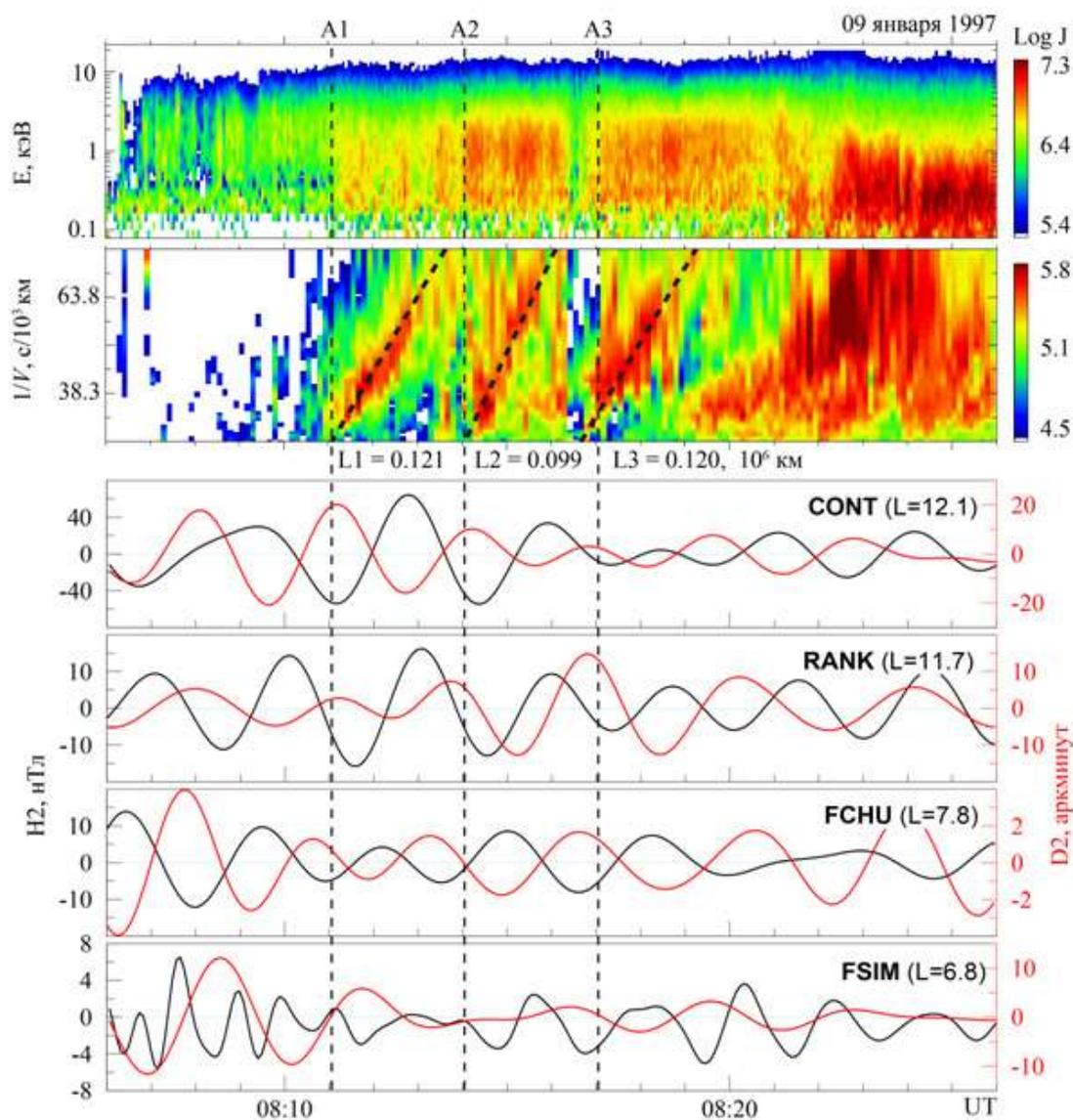


Рис 6.13 – Спектрограммы электронов и протонов по данным ИНТЕРБОЛ-2, Pi3 пульсации по данным магнитных обсерваторий: Contwoyto (CONT), RankInlet (RANK), FortChurchill (FCHU), FortSimpson (FSIM) в период магнитосферной суббури 09.01.1997.

**Руководитель темы:**

д.ф.-м.н., внс Григоренко Елена Евгеньевна, Институт космических исследований РАН, [elenagriorenko2003@yandex.ru](mailto:elenagriorenko2003@yandex.ru)

**Состав группы:**

Ковражкин Ростислав Алексеевич, д.ф.-м.н., ИКИ РАН, [rkovrazh@iki.rssi.ru](mailto:rkovrazh@iki.rssi.ru)

### **Публикации:**

1. Р.А. Ковражкин, Г.А. Владимирова, А.Л. Глазунов, Ж.-А. Сово, О природе ионных структур TDIS (Temporally Dispersed Ion Structures) в плазменном слое, Сборник тезисов 11-ой конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, стр. 106-107 (2016).
2. Р.А. Ковражкин, Д.Г. Баишев, А.Л. Глазунов, Г.А. Владимирова, Ж.-А. Сово, М. О.Филинжим, Обнаружение отклика сверхтепловой плазмы и Pz пульсаций на генерацию альвеновской волны в фазу экспансии суббури, Физика плазмы, (в печати, 2016).

### **6.8.3 Аннотация.**

Анализ моделей восстановления ионосферных токов по данным меридиональной цепочки магнитометров.

Исследованы модели восстановления профиля западного электроджета по данным магнитного поля меридиональной цепочки магнитометров. Эта задача представляет интерес в связи с тем, что данные магнитного поля известны в конечном, довольно небольшом количестве точек. Сделан обзор существующих линейных моделей и показана их применимость на сети IMAGE. В первой модели (A.L. Kotikov, Yu.O. Latovand, O.A. Troshichev, 1987) токи представляются в виде бесконечно тонких проводов. Во второй (V.A. Popov, V.O. Papitashvili, J. F. Waterman, 2001) электроджет моделируется последовательностью узких бесконечно длинных полос. Оптимальной является модель с большим числом равномерно проводов (полос). Однако большое число параметров (токов) приводит к большим ошибкам, и на более разреженной сети станций описанные методы плохо применимы. Для малого количества станций оптимальной является нелинейная модель с малым числом некоррелированных параметров. Была построена модель одной полосы с плавающим центром и границами и вычислены ошибки параметров.

**Руководитель темы: член-корр. А.А. Петрукович, ИКИ РАН**

### **Публикации:**

1. Евдокимова М.А., Петрукович А.А. Анализ моделей восстановления ионосферных токов по данным меридиональной цепочки магнитометров. Одиннадцатая ежегодная

конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», 15-19 февраля 2016 г., ИКИ РАН, Москва, <http://plasma2016.cosmos.ru/>

2. Evdokimova M.A., Petrukovich A.A., Analysis of methods for estimating equivalent ionospheric current from meridian magnetometer chain data, Проблемы Геокосмоса», 3-7 октября 2016, Санкт-Петербург. <http://geo.phys.spbu.ru/geocosmos/>.

3. Evdokimova M.A. , Petrukovich A.A., Analysis of methods for estimating westward auroral electrojet current with meridian magnetometer chain data. ESWW 13, November 14-18, Belgium, Oostende. <http://www.stce.be/esww13/>

## Направление 7. ИОНОСФЕРА

Координаторы: В.Д. Кузнецов (ИЗМИРАН), М.И. Веригин (ИКИ РАН)

7.1.	Проект 7.1: Эффективные индексы солнечной и геомагнитной активностей для параметров ионосферы	ИЗМИРАН	Деминов М.Г.
7.2.	Проект 7.2: Особенности F области низкоширотной и экваториальной ионосферы в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь	ИЗМИРАН	Карпачев А.Т.
7.3.	Проект 7.3: Пространственная структура и динамика проявления флуктуаций ГЛОНАСС/GPS сигналов в Арктике и их влияние на точность позиционирования	ЗО ИЗМИРАН	Шагимуратов И.И.
7.4.	Проект 7.4: Экспериментальное исследование реакции полярной ионосферы на вторжения энергичных частиц магнитосферного происхождения с помощью трехкомпонентной установки для измерения ОНЧ излучений. Исследование экстремальных проявлений солнечной активности по данным наземной сети нейтронных мониторов	ПГИ КНЦ РАН	Федоренко Ю.В., Балабин Ю. В.

### Проект 7.1 Эффективные индексы солнечной и геомагнитной активностей для параметров ионосферы

#### Тема 7.1.1 Эффективные индексы солнечной и геомагнитной активностей для параметров ионосферы

##### Аннотация.

Дано первое решение задачи – каким уровням геомагнитной активности соответствуют медианы критической частоты F2-слоя на разных широтах. Установлено, что в дневные часы эти уровни на относительно высоких широтах систематически ниже, чем на средних широтах.

На основе статистической обработки данных ионосферных станций вертикального зондирования определены свойства уровней геомагнитной активности для медиан критической частоты F2-слоя foF2:

1. Дано первое решение задачи – каким уровням геомагнитной активности соответствуют медианы foF2 на разных широтах. Установлено, что в дневные часы эти уровни геомагнитной активности для медиан foF2 на относительно высоких широтах систематически ниже, чем на средних широтах. Кроме того, дисперсия уровней геомагнитной активности для медиан foF2 на относительно высоких широтах меньше, чем

на средних широтах. Эти закономерности связаны с тем, что обычно высокая геомагнитная активность приводит к отчетливому отклонению foF2 от типичного среднего значения, т.е. от медианы foF2, и такое отклонение более значительно на относительно высоких широтах. Поэтому уровни геомагнитной активности для медиан foF2 на относительно высоких широтах меньше, чем на средних широтах.

2. Найдены свойства геомагнитной активности для медианы foF2 в области главного ионосферного провала (ГИП). Получено, что ГИП не характерен для медианы foF2 за месяц, по крайней мере, для низкой и средней солнечной активности. Для объяснения этого эффекта дополнительно рассмотрены свойства foF2 в ночной субавроральной ионосфере для низкой геомагнитной активности, когда локализация ГИП известна достаточно надежно. Получено, что при низкой и средней солнечной активности в ночные часы зимой в области ГИП данные foF2 по ионосферным станциям часто отсутствуют, поэтому модель медианы foF2 за месяц, построенная по оставшимся данным этих станций, не содержит ГИП или содержит очень слабо выраженный ГИП.

Определены оптимальные индексы солнечной активности для долгосрочного прогноза параметров ионосферы. Показано, что поток солнечного радиоизлучения (индекс F10.7) точнее числа солнечных пятен (индекс Rz) для основных параметров ионосферы, включая критическую частоту F2-слоя foF2. Данное преимущество индекса F10.7 стало особенно отчетливым в последние десятилетия.

**Руководитель темы:**

Деминов Марат Гарунович, ИЗМИРАН, [deminov@izmiran.ru](mailto:deminov@izmiran.ru)

**Публикации:**

1. Деминов М.Г. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза ионосферы // Космические исследования. 2016. Т. 54. № 1. С. 3–9.
2. Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Какой геомагнитной активности соответствует медиана критической частоты F2-слоя на разных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 5. С. 606–611.
3. Деминов М.Г., Непомнящая Е.В., Обридко В.Н. Свойства солнечной активности и ионосферы для солнечного цикла 25 // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 6. С. 742–749.

4. Деминов М.Г., Деминов Р.Г., Шубин В.Н. Свойства медианы критической частоты F2-слоя в ночной субавроральной ионосфере при низкой и средней солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. 2016. Т. 56. № 6. С. 750-756.
5. Деминов М.Г., Деминов Р.Г., Шубин В.Н. Свойства медианы критической частоты F2-слоя в субавроральной ионосфере // Труды XXV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» – Томск: Изд-во ТУСУР, 2016. Т. 1. С. 97–100.
6. Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Зависимость геомагнитной активности для медианы критической частоты F2-слоя в полдень от широты // Труды XXV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» – Томск: Изд-во ТУСУР, 2016. Т. 1. С.158–161.
7. Деминов М.Г. Свойства медианы критической частоты F2-слоя в ночной субавроральной ионосфере // 11 конф. "Физика плазмы в Солнечной системе" (Сборник тезисов). – М.: ИКИ РАН, 2016, 65–66.
8. Obridko V.N., Deminov M.G., Nepomnyashchaya E.V. The Characteristics of solar activity and the ionosphere in the period of extremely low solar cycle // Atmosphere, ionosphere, safety (ed. I.V. Karpov) – Kaliningrad, 2016. С. 399–401.

### **Тема 7.1.2 Долговременные изменения параметров термосферы и ионосферы Земли**

#### **Аннотация.**

Разработан новый самосогласованный подход к анализу долговременных изменений (трендов) в термосфере и ионосфере Земли. На этой основе по данным в Европейском регионе получено, что эти тренды имеют естественное (не антропогенное) происхождение и связаны с долговременными вариациями солнечной и геомагнитной активности.

Разработан новый самосогласованный подход к анализу долговременных изменений (трендов) в термосфере и ионосфере Земли. Данный подход включает: а) метод по извлечению долговременных трендов критических частот слоев F1 и F2 ( $f_oF_1$ ,  $f_oF_2$ ) из данных наблюдений станций наземного ионосферного зондирования; б) метод по восстановлению нейтрального состава (O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>), экзосферной температуры T<sub>ex</sub> и полного потока солнечного EUV с  $\lambda < 105$  нм из рутинных наблюдений критических частот  $f_oF_1$ ; в) совместный анализ долговременных изменений термосферных и ионосферных параметров на основе теории формирования F- области ионосферы. Показано, что в соответствии с ранее предложенной концепцией геомагнитного контроля

полуденные 11-летние сглаженные значения  $(\delta f_oF_2)_{11y}$  и  $(\delta f_oF_1)_{11y}$  по европейским станциям Слау-Чилтон, Юлиусру и Рим демонстрируют противофазные изменения с 11-летним сглаженным индексом геомагнитной активности  $Ap_{11y}$ . Периоды возрастающей геомагнитной активности сопровождаются отрицательными трендами в  $(\delta f_oF_2)_{11y}$  и  $(\delta f_oF_1)_{11y}$  и наоборот. Данная тенденция сохраняется и в 21-м столетии, включая период глубокого минимума солнечной активности в 2008-2009 г.г., более того, зависимость от геомагнитной активности стала более выраженной после 1990 года. Одновременный анализ долговременных изменений  $f_oF_2$  и  $f_oF_1$  повышает надежность сделанных заключений и помогает понять физический механизм выявленных вариаций. Благодаря общему нейтральному составу и общности фотохимических процессов полуденные  $f_oF_2$  и  $f_oF_1$  демонстрируют похожие долговременные изменения.

Для выяснения физического механизма формирования долговременных изменений  $f_oF_2$  и  $f_oF_1$  был разработан метод по восстановлению основных аэрономических параметров, ответственных за формирование ионосферы в области F. На этой основе по трем европейским станциям впервые были восстановлены вариации термосферных параметров и солнечного EUV с  $\lambda < 105$  нм за 5 циклов солнечной активности, что позволило понять механизм геомагнитного контроля долговременных трендов  $f_oF_2$  и  $f_oF_1$ . Было показано, что этот контроль осуществляется по двум каналам: через вариации [O] и [O]/[N<sub>2</sub>]. Оба канала, в свою очередь, контролируются долговременными изменениями солнечной и геомагнитной активности.

Восстановленные термосферные параметры за 5 циклов солнечной активности позволяют проанализировать долговременные тренды в термосфере и сопоставить их с трендами общей плотности и температуры, полученными по данным о торможении спутников и данным обратного некогерентного рассеяния, которые дают крайне противоречивые результаты, особенно по тренду нейтральной температуры. В такой ситуации результаты, полученные на основе нашего метода, представляют несомненный интерес.

Восстановленные из  $f_oF_1$  термосферные параметры приводились к единым гелиогеофизическим условиям двумя методами: с помощью эмпирической модели MSIS-86 и с помощью регрессии с 3-месячным индексом  $F_{10.7}$ . В обоих случаях были получены очень малые (< 1% за декаду) и статистически незначимые тренды. Специальный анализ был проведен для лет минимумов солнечной активности, который также дал статистически незначимые тренды как по общей плотности атмосферы, так и по нейтральной температуре, что отличается от результатов, полученных по торможению спутников. Несмотря на указанные различия, в целом, тренды, полученные по восстановленным термосферным параметрам, значительно ближе к спутниковым оценкам

нежели к трендам, полученным по наблюдениям методом обратного некогерентного рассеяния. Проведенный анализ позволяет заключить, что восстановленные из месячных медиан  $f_oF_1$  термосферные параметры демонстрируют (после удаления эффектов солнечной и геомагнитной активности) очень малые и статистически незначимые тренды, т.е. они имеют естественное (не антропогенное) происхождение и полностью связаны с долговременными вариациями солнечной и геомагнитной активности.

**Руководитель темы:**

Михайлов Андрей Валерьевич, ИЗМИРАН, [mikhailov71@gmail.com](mailto:mikhailov71@gmail.com)

**Публикации:**

1. Perrone, L., and A. V. Mikhailov (2016), Geomagnetic control of the midlatitude foF1 and foF2 long-term variations: Recent observations in Europe, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, 7183–7192, doi:10.1002/2016JA022715.
2. Mikhailov, A. V., and L. Perrone (2016), Geomagnetic control of the midlatitude daytime foF1 and foF2 long-term variations: Physical interpretation using European observations, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, 7193–7203, doi:10.1002/2016JA022716.
3. Mikhailov, A. V., and L. Perrone (2016), Thermospheric parameters long-term variations retrieved from ionospheric observations in Europe, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, doi:10.1002/2016JA023234.
4. Лещинская, Т.Ю., В.В. Михайлов (2016), Модель SIMP-1: картирование месячных медиан foF2 по северному полушарию, Геомагнетизм и Аэрoномия, 2016, том 56, № 6, с. 772–780.

**Проект 7.2 Особенности F области низкоширотной и экваториальной ионосферы в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь**

**Тема 7.2.1 Особенности F области низкоширотной и экваториальной ионосферы в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь**

**Аннотация.**

Впервые построено глобальное распределение высоты максимума F2-слоя  $hmF_2$  в экваториальной ионосфере для высокой солнечной активности для всех часов местного времени для летних, зимних и равноденственных условий.

Впервые построено глобальное распределение высоты максимума F2-слоя  $hmF2$  в экваториальной ионосфере для высокой солнечной активности для всех часов местного времени для летних, зимних и равноденственных условий. Для этого были использованы данные внешнего зондирования на спутнике Интеркосмос-19 за 1979-1981 г. Для построения карт всего было рассчитано 71 000  $N(h)$ -профилей для летних условий (май-август), 39 000 для зимних (ноябрь-февраль) и 69 000 для равноденственных условий (март-апрель и сентябрь-октябрь).

Проведен анализ вариаций структуры экваториальной ионосферы, которые следуют из данной модели. На этой основе выявлен ряд характерных особенностей этой структуры. Получено, в частности, что в полночь характеры широтно-долготной структуры высоты максимума F2-слоя экваториальной ионосферы для летнего и зимнего солнцестояний различаются даже качественно. Причины такого типа особенностей экваториальной ионосферы остаются невыясненными и требуют детального анализа с привлечением модели ГСМ ТИП.

**Руководитель темы:**

Карпачев Александр Трофимович, ИЗМИРАН, [karp@izmiran.ru](mailto:karp@izmiran.ru)

**Публикации:**

1. Клименко В.В., Карпачев А.Т., Клименко М.В., Ратовский К.Г., Коренькова Н.А. Широтная структура долготного эффекта в ночной ионосфере в период летнего и зимнего солнцестояния // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 1, 21–30.
2. Карпачев А.Т., Денисенко П.Ф. Диагностика неоднородной структуры ионосферы по данным спутникового зондирования // Труды XXV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» – Томск: Изд-во ТУСУР. 2016. Т. 1. С. 33–39. (ISBN 978-5-86889-734-4).
3. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Cherniak I.V., Galkin I.A., Chirik N.V., Chugunin D.V. Satellite observation and modeling of longitudinal variations in the ionosphere F region, topside ionosphere, and plasmasphere during december solstice // Proceedings of the V International conference “Atmosphere, Ionosphere, Safety” (AIS-2016). 2016. P. 462–468.
4. Карпачев А.Т., Клименко М.В., Клименко В.В. Суточные и долготные вариации экваториальной аномалии в период равноденствия по данным внешнего зондирования на спутнике Интеркосмос-19 // Геомагнетизм и аэрономия, 2017 (подготовлено к печати).

## Тема 7.2.2 Модельно-информационное обеспечение ионосферных проектов

### Аннотация.

Предложена коррекция обновленного ряда чисел солнечных пятен при использовании с ионосферными моделями.

В настоящее время возникла необходимость переоценки солнечных и ионосферных индексов в ионосферных моделях в связи с переходом с 1 июля 2015 г. на обновленный расчет ряда солнечных пятен, SSN2. Результаты модельных расчетов зависят от задания солнечных и ионосферных управляющих параметров в ионосферных моделях, таких как эмпирическая Международная справочная модель ионосферы IRI и ее расширение на высоты плазмосферы IRI-Plas. Модель IRI использует в качестве показателя уровня солнечной активности эффективный ионосферный индекс  $IG_{12}$ , выведенный по измерениям критической частоты foF2 сетью ионозондов. В модели ионосферы и плазмосферы IRI-Plas в качестве эффективного показателя уровня солнечной активности используется глобальное электронное содержание (GEC, global electron content), сглаженное скользящим 12-месячным фильтром,  $GEC_{12}$ . Расчеты GEC выполнены по глобальным картам полного электронного содержания (TEC, total electron content) с 1998 г. по настоящее время, а реконструкция его за предыдущие годы и прогноз на будущее выполнены по эмпирической модели линейной зависимости GEC от солнечной активности.

Использование SSN2 вместо прежнего ряда SSN1 приводит к увеличению погрешности результатов прогноза по ионосферным моделям, если не учитывать связь между этими индексами. Предложена формула для преобразования сглаженного 12-месячным скользящим фильтром ряда SSN2<sub>12</sub> в эквивалент ранее принятого базового индекса SSN1<sub>12</sub> =  $R_{12}$ , используемого для долгосрочного прогнозирования в моделях IRI, IRI-Plas, SMI, NeQuick, ITU-R. Выведены регрессионные соотношения между  $GEC_{12}$ , индексом солнечных пятен  $R_{12}$  и индексом потока солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см,  $F10.7_{12}$ .

Коррекция ежедневных индексов чисел солнечных пятен реализована в ежедневном режиме на сайте «Ионосферная погода» ИЗМИРАН, на котором эти индексы используются для расчета ежечасных карт критической частоты и высоты максимума слоя F2 по модели IRI-Plas, и карт W индекса ионосферной погоды по глобальным картам полного электронного содержания TEC.

**Руководитель темы:**

Гуляева Тамара Лазаревна, к.ф.-м.н., ИЗМИРАН, [gulyaeva@izmiran.ru](mailto:gulyaeva@izmiran.ru).

**Публикации:**

1. Гуляева Т.Л. Модификация индексов солнечной активности в международной справочной модели ионосферы IRI и IRI-Plas в связи с пересмотром ряда чисел солнечных пятен, Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3, С. 59-68, DOI:10.12737/20872.
2. Gulyaeva, T., and Arikan F. Statistical discrimination of global post-seismic ionosphere effects under geomagnetic quiet and storm conditions. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2016. DOI: 10.1080/19475705.2016.1246483.
3. Gulyaeva, T., Arikan, F., Stanislawska, I. Persistent long-term (1944-2015) ionosphere-magnetosphere associations at the area of intense seismic activity and beyond. Adv. Space. Res. 2016. DOI:10.1016/j.asr.2016.11.022.

**Проект 7.3 Пространственная структура и динамика проявления флуктуаций ГЛОНАСС/GPS сигналов в Арктике и их влияние на точность позиционирования****Тема 7.3.1 Пространственная структура и динамика проявления флуктуаций ГЛОНАСС/GPS сигналов в Арктике и их влияние на точность позиционирования****Аннотация.**

На основе разработанных программ и алгоритмов обработки фазовых GPS/ГЛОНАСС наблюдений на сети станций получены данные о пространственно-временной структуре флуктуаций полного электронного содержания в высокоширотной ионосфере. Выявлена связь проявления флуктуаций с авроральными возмущениями.

Реализован программный комплекс, обеспечивающий обработку одновременных фазовых измерений по 120-150 GPS/ГЛОНАСС станциям, на основе которых формируются карты ТЕС для европейского региона с высоким пространственно-временным разрешением. Данные обработки высокоширотных станций используются для анализа проявления флуктуаций полного электронного содержания (ТЕС) в Арктике. Частота появления и интенсивность флуктуаций усиливаются во время геомагнитных возмущений. Флуктуации вызывают нарушения, сбои в работе навигационных приёмников и в конечном итоге это приводит к ухудшению точности позиционирования.

В качестве меры флуктуационной активности использовался параметр ROT (Rate OF TEC), а интенсивность оценивалась индексом ROTI. Детальный анализ проведён для магнитной бури 7 января 2015 г. Данные магнитометров сети IMAGE свидетельствуют, что в период активной фазы бури 7 января 2015 г. наблюдались интенсивные бухты в магнитном поле, свидетельствующие о суббуревой активности на интервале 09-13UT. Широтное проявление ТЕС флуктуаций показывает, что на этом интервале регистрировалось усиление флуктуаций на всех насматриваемых широтах (рис. 7.1).

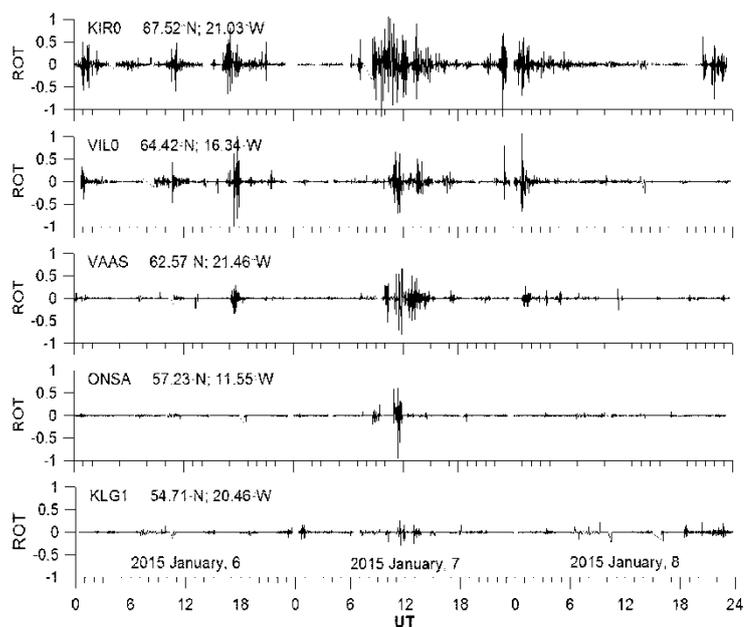


Рис. 7.1

Даже на среднеширотной станции Калининград наблюдались заметные по интенсивности флуктуации (рис. 7.1). Особенность рассматриваемого события заключается в том, что флуктуации ТЕС наблюдались на субавроральных широтах в дневное время. Типично флуктуации в авроральной зоне они наблюдаются в ночное местное время. Это означает, что в данный период авроральный овал опускался к экватору.

**Руководитель темы:**

Шагимуратов Ирк Ибрагимович, ЗО ИЗМИРАН, [Shagimuratov@mail.ru](mailto:Shagimuratov@mail.ru)

**Публикации:**

1. Шагимуратов И. И., Черняк Ю. В., Захаренкова И. Е., Якимова Г. А., Тепеницына Н. Ю., Ефишов И. И. Интернет-сервис по созданию GPS/ГЛОНАСС карт полного электронного содержания ионосферы для Европейского региона.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Том 13, № 1, 2016, С. 197-209.

2. Shagimuratov I. I., Chernouss S. A., Efishov I. I., Cherniak Iu. V., Tepenitsyna N. Yu. Total Electron Content fluctuations during auroral activity 20 December 2015.// Atmosphere, Ionosphere, Safety. Proceedings of V International conference. Kaliningrad, pp. 486-490 , 2016.
3. Irk Shagimuratov, Sergej Chernouss, Ivan Efishov, Iury Cherniak, Nadezhda Tepenitsyna, Luisa Koltunenکو and Galina Yakimova. The Phase Fluctuations of GPS Signals at High Latitudes During 7 January 2015 Geomagnetic Storm// Proceedings of the 9th European conference on antennas and propagation, 12-17 April 2015, paper №1570053943, 2016.
4. I. Shagimuratov, Iy. Cherniak, I. Efishov, S. Chernouss, N. Tepenitsyna, GPS-TEC Fluctuations and Aurora, // 2016 Beacon Satellite Symposium. Trieste, Italy. 26 June – 1 July 2016. Proceeding Book. 4 p.

### **Тема 7.3.2. Источники электромагнитного дрейфа ионосферной плазмы, его реакция на внутренние процессы и внешние воздействия, и влияние на распределение околоземной космической плазмы**

#### **Аннотация.**

Дано объяснение аномалии моря Уэдделла и Якутской аномалии, которые заключаются в том, что летом над этими областями значения критической частоты F2-слоя в ночное время больше, чем днем, несмотря на отсутствие авроральной ионизации. На основе численного моделирования получено, что эти аномалии обусловлены наложением эффектов электрического поля, термосферного ветра и нейтрального состава термосферы.

На основе численного моделирования показано, что, несмотря на наличие солнечной ионизации над областями аномалии моря Уэдделла (WSA) и Якутской аномалии (YA) в дневное время и ее отсутствие в ночное время, значения критической частоты F2-слоя foF2 в ночное время больше, чем днем. Причины появления YA и WSA одни и те же, главной из которых является геометрический фактор суперпозиции действия термосферного ветра, нагрева и ионизации нейтральной атмосферы солнечным излучением и горизонтального переноса плазмы за счет электромагнитного дрейфа. Хотя долготные вариации foF2 на различных широтах и связаны между собой, но основные механизмы их формирования существенно отличаются друг от друга. Так, в высоких широтах главенствующую роль в формировании долготных вариаций играет горизонтальный электромагнитный дрейф, на средних широтах – вертикальный перенос

плазмы под действием термосферного ветра, а на низких широтах – вертикальный электромагнитный дрейф.

**Руководитель темы:**

Клименко Максим Владимирович, ЗО ИЗМИРАН, [maksim.klimenko@mail.ru](mailto:maksim.klimenko@mail.ru)

**Публикации:**

1. Клименко В.В., Карпачев А.Т., Клименко М.В., Ратовский К.Г., Коренькова Н.А. Широтная структура долготного эффекта в ночной ионосфере в период летнего и зимнего солнцестояния // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 1, 21–30.
2. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Karpachev A.T., Zakharenkova I.E., Vesnin A.M., Cherniak I.V., Galkin I.A., Chirik N.V., Chugunin D.V. Satellite observation and modeling of longitudinal variations in the ionosphere F region, topside ionosphere, and plasmasphere during December solstice // Atmosphere, ionosphere, safety (ed. I.V. Karpov) – Kaliningrad, 2016. P. 462–468.

**Тема 7.3.3 Влияние процессов в стратосфере и мезосфере на глобальное распределение ионосферных параметров**

**Аннотация.**

На основе современных глобальных численных моделей обосновано, что изменения зонального электрического поля являются ключевым элементом отклика ионосферы низких широт на внезапные стратосферные потепления (ВСП). Тем не менее, совместное применение существующих моделей средней и верхней атмосферы не дает приемлемого согласия модельных возмущений полного электронного содержания электронов в ионосфере на низких широтах с данными наблюдений в периоды ВСП.

Исследования ионосферных эффектов внезапных стратосферных потеплений доказывают, что изменения зонального электрического поля (вертикального дрейфа плазмы) являются ключевым механизмом формирования отклика ионосферы на низких широтах на внезапные стратосферные потепления (ВСП). Однако остается открытым вопрос о механизмах генерации таких зональных электрических полей на низких широтах во время внезапных стратосферных потеплений. Совместное применение существующих моделей средней и верхней атмосферы не дает приемлемого согласия модельных возмущений

полного электронного содержания электронов в ионосфере на низких широтах с данными наблюдений в период внезапных стратосферных потеплений.

**Руководитель темы:**

Кореньков Юрий Николаевич, ЗО ИЗМИРАН, office@wdizmiran.ru

**Публикации:**

1. Клименко М.В., Клименко В.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н., Розанов Е.В., Рэддманн Т., Захаренкова И.Е., Толстиков М.В. Использование моделей средней и верхней атмосферы для описания возмущений полного электронного содержания, вызванных стратосферным потеплением 2009 года // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 1, 41–48.
2. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Bessarab F.S., Korenkov Y.N., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Zakharenkova I.E. Morphology and mechanisms of the ionospheric F region electron density disturbances during geomagnetic storm and sudden stratospheric warming // Atmosphere, ionosphere, safety (ed. I.V. Karpov) – Kaliningrad, 2016. P. 17–23.

**Тема 7.3.4 Ионосферные неоднородности, возбуждаемые инфразвуковыми источниками в атмосфере**

**Аннотация.**

Экспериментально обосновано, что метеорологические штормы могут приводить к существенным уменьшениям полного электронного содержания (до 40%). Получено, что этот эффект связан с генерацией акусто-гравитационных волн в нижней атмосфере и распространением этих волн в верхние слои атмосферы.

Анализ результатов наблюдений ионосферных параметров, проведенных в Калининграде, показал, что в периоды метеорологических штормов отмечаются существенные понижения полного электронного содержания (ТЕС) и критической частоты F2-слоя foF2. Амплитудные значения выявленных понижений по отношению к метеорологически спокойным дням в ТЕС достигают 40% и 15% в вариациях foF2. Такие ионосферные возмущения отмечаются достаточно устойчиво в периоды метеорологических штормов, что позволяет рассматривать выявленные возмущения как морфологические признаки ионосферных возмущений инициируемых метеорологическими процессами.

Ионосферные возмущения развиваются достаточно быстро в течение нескольких часов после возмущений метеорологической обстановки. Быстрые изменения атмосферных параметров в штормовых условиях усиливают процессы генерации АГВ в приземной атмосфере. Распространение таких АГВ в верхнюю атмосферу приводит к формированию локальных возмущений в термосфере, которые, в свою очередь, влияют на рекомбинацию ионов.

**Руководитель темы:**

Карпов И.В., ЗО ИЗМИРАН, [ivkarpov@inbox.ru](mailto:ivkarpov@inbox.ru).

**Публикации:**

1. Карпов И.В., Кшевецкий С.П., Борчевкина О.П., Радиевский А. В., Карпов А.И. Возмущения верхней атмосферы и ионосферы, инициированные источниками акустико-гравитационных волн в нижней атмосфере // Химическая физика, 2016, том 35, № 1, 1–6.
2. Карпов И.В., Борчевкина О.П., Дадашев Р.З., Ильминская А.В. Влияние метеорологических штормов на параметры ионосферы в балтийском регионе в 2010 г. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 2, 64-68.
3. Васильев П.А., Карпов И.В., Кшевецкий С.П. Моделирование воздействия внутренних гравитационных волн на состояние верхней атмосферы в период внезапного стратосферного потепления // Солнечно-земная физика, 2016. Т. 2, № 3, 1-6.
4. Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Клименко М.В. Модельное исследование отклика ионосферы на возмущения мезосферных приливов и планетарных волн в период внезапного стратосферного потепления// Химическая физика, 2016. Т. 35, № 1, 49–58.

**Проект 7.4 Экспериментальное исследование реакции полярной ионосферы на вторжения энергичных частиц магнитосферного происхождения с помощью трехкомпонентной установки для измерения ОНЧ излучений. Исследование экстремальных проявлений солнечной активности по данным наземной сети нейтронных мониторов**

**Тема 7.4.1 Экспериментальное исследование экстремальных проявлений солнечной активности в нижней ионосфере по данным наземной сети трёхкомпонентных установок для измерения СНЧ/ОНЧ излучений**

**Аннотация.**

Экспериментально обнаружено, что в возмущенных гелиогеофизических условиях среднесуточная скорость распространения атмосфериков на трассе Ловозеро-Баренцбург снижается на 20-30 тыс. км/с, а волновой импеданс в обл. Ловозеро может более чем в 2 раза превышать его среднее значение, что свидетельствует о возникновении неоднородности проводимости D-слоя в этих условиях.

Впервые в авроральной области произведены непрерывные измерения скорости распространения и волнового импеданса электромагнитных (ЭМ) возмущений на трассе Ловозеро-Баренцбург в СНЧ диапазоне. Экспериментально показано, что в возмущенных гелиогеофизических условиях среднесуточная скорость распространения атмосфериков снижается на 20–30 тыс. км/с по сравнению со скоростью, измеренной в спокойных условиях. Это может быть связано с уменьшением действующей высоты волновода вследствие изменения профиля проводимости ионосферы во время солнечной вспышки. Показано, что во время сильных гелиогеофизических возмущений наблюдаются выраженные всплески волнового импеданса, максимумы которых превышают его среднее значение более чем в 2 раза. Такие отклонения являются индикатором возникновения неоднородностей проводимости D слоя. Во время более слабой вспышки (5 марта 2012 г.) отсутствовала реакция импеданса при наличии изменений поведения измеренной скорости. По-видимому, возмущения проводимости ионосферы затронули только часть трассы Ловозеро-Баренцбург, где измерялась скорость распространения ЭМ возмущений, но не достигли обл. Ловозеро, где измерялся волновой импеданс. Изменения характера зависимости скорости и волнового импеданса от времени можно использовать в качестве индикаторов возмущенности нижней ионосферы для мониторинга изменений ее состояния в окрестности трассы.

**Руководитель темы:**

Федоренко Юрий Валентинович, ПГИ КНЦ РАН, yury.fedorenko@gmail.com

**Публикации:**

1. Лебедь О.М., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В. Влияние вспышек на Солнце в марте 2012 г. на профили проводимости высокоширотной нижней ионосферы // Вестник Мурманского государственного технического университета, 2016, Т. 19, № 1-2, 240–248.
2. Ларченко А.В., Лебедь О.М., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Эффекты распространения электромагнитных возмущений от молниевых разрядов по данным наземных наблюдений в СНЧ диапазоне // 39 семинар «Физика авроральных явлений», Апатиты, 2016. С. 44.
3. Лебедь О.М., Ларченко А.В., Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В. Реакция высокоширотной нижней ионосферы на солнечные протонные события по данным наблюдений в СНЧ диапазоне // 11 конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» (Сборник тезисов), М.: ИКИ РАН, 2016. С. 168-169.

**Тема 7.4.2 Исследование экстремальных проявлений солнечной активности по данным наземной сети нейтронных мониторов****Аннотация.**

На созданном в ПГИ программном комплексе RUSCOSMICS проведены детальные расчеты ионизации атмосферы на высотах 0-40 км с малым шагом. Расчет ионизации выполнен как для периода относительно спокойного Солнца, так и во время крупного события GLE.

Атмосфера Земли постоянно подвергается облучению энергичными частицами. В обычном случае это поток частиц галактических космических лучей (ГКЛ). Во время вспышек на Солнце и событиях GLE дополнительно появляется поток солнечных космических лучей (СКЛ). При этом поток СКЛ может превосходить поток ГКЛ на энергиях до 10 ГэВ на 2-3 порядка. Известно, что повышение степени ионизации атмосферы ведет к образованию различных химически активных веществ и радикалов, которые в свою очередь влияют на концентрацию малых газовых составляющих атмосферы. Прежде всего, это касается непосредственно озонового слоя. Расчеты профиля ионизации в атмосфере проводились много раз, но имеются существенные трудности. Во-

первых, необходимо задавать спектр СКЛ в абсолютных единицах (поток частиц/(м<sup>2</sup> с MeB)), тогда как многие методики определения СКЛ дают только приближенные значения. Во-вторых, в силу сложности при расчетах атмосфера разбивается на слои 4 км толщиной. Плотность воздуха уменьшается на 0.6 при изменении высоты на 4 км, так что слои получаются довольно толстые, а усреднение грубым. В-третьих, программный пакет GEANT-4 наиболее полно и точно учитывает вторичные процессы при прохождении энергичной частицей вещества, а также развитие ливней и дочерних частиц, а обычно используемые (KORSIKA, FLUKA) не настолько развиты.

Программный пакет RUSCOSMICS, созданный в ПГИ, основан на базе GEANT-4, использует все его библиотеки и модели по мере необходимости. Результаты расчетов на RUSCOSMICS неоднократно проверялись экспериментально. Для этого использовались данные полетов шаров-зондов в Апатитах, с помощью которых получают информацию о высотном профиле потоков ионизирующих частиц до высот 35 км. Для построения модели применялась концепция так называемой «плоской» геометрии, когда выделяется столб атмосферы Земли на заданной широте и долготе, задается его высота и длина граней, а также вычисляются физические параметры каждого слоя (процентное соотношение масс составляющих элементов, плотность, давление и температура) с помощью NRLMSISE-00. Толщина слоя устанавливалась в 500 м, т.е. на порядок лучше, чем в других работах. Размеры атмосферного столба задавались 10×10 км. Выбран столь большой размер для того, чтобы исключить уход вторичных частиц за границы столба.

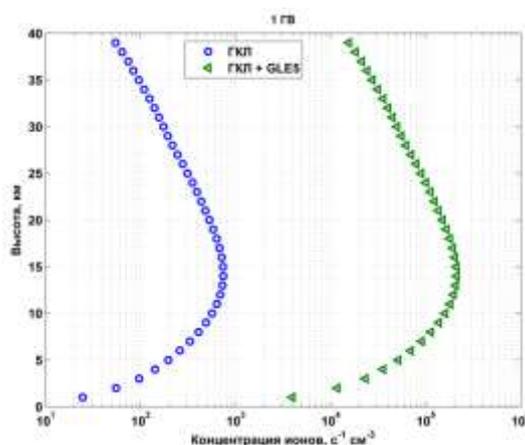


Рис.7.2 – Профиль мгновенной ионизации атмосферы на высотах 0-40 км, образованной потоком ГКЛ и СКЛ.

Как можно видеть по рис. 7.2, во-первых, концентрация ионов в атмосфере повышается кратно увеличению потока энергичных частиц. Во-вторых, максимум ионизации при

событиях GLE смещается по высоте на несколько километров вверх. Связано это с тем, что в глубокие слои атмосферы могут проникать только частицы высоких энергий, тогда как поток СКЛ увеличивает плотность потока частиц примерно до единиц ГэВ. Следовательно, при событиях GLE преимущественно дополнительное ионизирующее воздействие приходится на верхние слои атмосферы (от 20 км) – как раз там, где находится озоновый слой.

**Руководитель темы:**

Балабин Юрий Васильевич, ПГИ КНЦ РАН, [balabin@pgia.ru](mailto:balabin@pgia.ru)

**Публикации:**

1. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Модуль для сравнения результатов расчета RUSCOSMIC© с экспериментальными данными. // Тезисы 34-ой Российской конференции по космическим лучам. Дубна, 15-19 августа 2016 г.
2. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В. Программный комплекс RUSCOSMIC как инструмент для расчета ионизации вещества атмосферы Земли протонами первичных космических лучей. // Тезисы 34-ой Российской конференции по космическим лучам. Дубна, 15-19 августа 2016 г.
3. Maurchev E.A., Balabin Yu.V. A Practical Application Of RUSCOSMICS Software Package In A Cosmic Rays Physics // Proceedings of IV International conference "Atmosphere, ionosphere, safety", Kaliningrad, June 19-25, 2016.
4. Маурчев Е.А. Численное моделирование в различных задачах физики космических лучей // Вестник Кольского научного центра РАН, № 6 (32), с. 152-156, 2016

## НАПРАВЛЕНИЕ 8. МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Кураторы направления: А.В. Захаров (ИКИ), Л.В. Рыхлова (ИНАСАН).

8.1	Проект 8.1: Исследование физико-механических свойств реголита кометных ядер на основе результатов миссий к кометам и астероидам и новых наблюдений дисков экзопланетных систем в стадии формирования	ИКИ РАН	Ксанфомалити Л.В., Эйсмонт Н.А.
8.2	Проект 8.2: Происхождение и эволюция метеоритного вещества и космической пыли	ГЕОХИ РАН	Назаров М.А.
8.3	Проект 8.3: Свойства, динамика и проявления лунной пыли	ИКИ РАН	Попель С.И.
8.4	Проект 8.4: Эволюция вещества метеоритов при ударных процессах на ранних этапах формирования Солнечной системы	ИКИ РАН	Герасимов М.В.
8.5	Проект 8.5: Комплексное исследование избранных астероидов и комет небесно-механическими и астрофизическими методами	ИНАСАН	Рыхлова Л.В., Багров А.В., Емельяненко В.В.
8.6	Проект 8.6: Небесно-механические факторы, вызывающие существенную трансформацию движения малых тел Солнечной системы	ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	Сидоренко В.В.
8.7	Проект 8.7: Форма, состав и физико-механические свойства малых силикатных и ледяных тел Солнечной системы	ГЕОХИ РАН	Слюта Е.Н.
8.8	Проект 8.8: Изучение процессов формирования и эволюции поверхности, а также состава ядра кометы 67P Чурюмова-Герасименко по данным миссии «Розетта» в сравнении с таковыми ядер других комет	ГЕОХИ РАН	Базилевский А.Т.
8.9	Проект 8.9: Динамика пыли на безатмосферных телах. Методы исследований	ИКИ РАН	Захаров А.В.

**Проект 8.1 Исследование физико-механических свойств реголита кометных ядер на основе результатов миссий к кометам и астероидам и новых наблюдений дисков экзопланетных систем в стадии формирования**

**Тема 8.1.1 Исследования физико-механических свойств и образования кометных ядер на основе результатов миссий к кометам**

### Аннотация.

Предварительные расчеты показали, что относительные скорости импакторов при гипотетическом объединении протоядер составляли: у кометы 67P/CG 3-5 м с<sup>-1</sup>, у кометы 103P/Hartley-2 67-80 м с<sup>-1</sup>, у кометы 1P/Halley 3.7-4.4 м с<sup>-1</sup>.

Непосредственное исследование кометных ядер, начатое 30 лет назад космическими аппаратами ВЕГА, показывает многообразие природы кометных тел, их атмосфер и областей их образования. Сравнение наиболее подробно исследованных комет, как комета 1P/Галлея и комета 67P/Чурюмова-Герасименко, указывает на существенные различия в их физико-химических свойствах, динамике и эволюции. Идея образования ядра из сталкивающихся тел не нова, но встречается с той трудностью, что энергия, выделяющаяся при столкновениях, скорее разрушает импакторы, чем их объединяет. Разумеется, в большинстве случаев именно такие разрушающие столкновения и происходили. Вероятность разрушения при столкновениях тел во время образования Солнечной системы была намного выше, чем их объединения, но среди бесчисленных первичных тел происходили и низкоскоростные столкновения. Снимки рис. 8.1 представляют обе альтернативы.

В ходе выполнения темы 8.1 было показано, что если геометрия и размеры шейки ядра известны, как у 67P/CG и 103P/Хартли 2, имеется возможность оценить относительные скорости импакторов, необходимых для её образования. Предварительные расчеты показали, что относительные скорости импакторов при гипотетическом объединении протоядер 67P/CG 103P/Хартли 2 и 1P/Галлея составляли:

У кометы 67P/CG	$3\text{-}5 \text{ м с}^{-1}$ ,
у кометы 103P/Hartley-2	$67\text{-}80 \text{ м с}^{-1}$ ,
у кометы 1P/Halley	$3.7\text{-}4.4 \text{ м с}^{-1}$ .

Расчет осложняется тем, что за длительную историю эволюции ядра 67P/CG, значительная часть поверхности ядра, прежде всего – шейки, уже потеряна, а количественные характеристики потерь неизвестны. Поэтому к результатам расчетов следует относиться достаточно критически.



Рис. 8.1 – Ядро кометы 67P/CG в 4 положениях, показывающих вид шейки с разных сторон.

Снимки сделаны камерой NavCam (copyright: ESA/Rosetta/Navcam – CC BY-SA IGO 3.0).

Кадр 3 выделяется интенсивными газопылевыми выбросами. На всех снимках шейка выглядит как звено, соединяющее 2 крупных тела, размерами около 2 и 4 км. Снимки дополнительно обработаны.

Более надёжными могут быть подобные оценки для кометы Галлея (рис. 8.1, правый кадр), где шейка менее деформирована, а обе половины ядра также выглядят разнородно.

Сталкивающихся тел было очень много, среди них встречались и такие, у которых скорости столкновений составляли единицы  $\text{м с}^{-1}$ , а импакторы могли объединяться без существенных разрушений, спрессовывая материал будущей шейки. Прямые столкновения тел с формой, близкой к сферической, могли привести к образованию гантелеобразных ядер комет (103P/Hartley-2, 19P/Borreli), что конечно, не противоречит происходящему их постепенному разрушению в узком сечении.

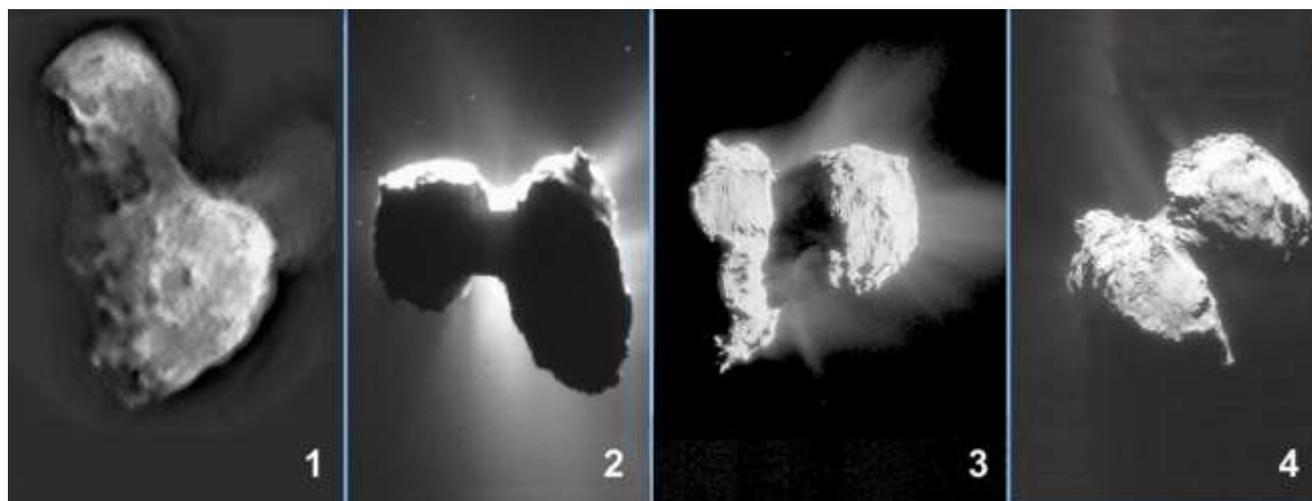


Рис. 8.2 – 1 – снимок ядра кометы Галлея, полученный с аппарата Джотто, в новой обработке (публикуется впервые), масштаб  $\frac{1}{4}$ ; 2 – снимок ядра кометы 67P/CG (copyright: <http://rosetta.esa.int/>) масштаб 1:1. Справа: те же объекты в одинаковом масштабе.

В случае кометного реголита при смятии происходит его уплотнение, от исходной плотности внешних слоёв, вероятно, менее  $10 \text{ кг/м}^3$ , до уплотнения пустот, возможно до  $(2-2.5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Соответственно, в ходе уплотнения под действием энергии импактора  $E_0$  давление  $p$  должно **возрастать**, как и площадь контакта  $\sigma$ , вплоть до остановки процесса смятия. Работа смятия  $W$  есть:

$$W = \int_0^S p(s) \cdot \sigma(s) \cdot ds$$

Но кинетическая энергия импактора  $E_0 = M v^2/2$  будет израсходована на пути  $s$  главным образом в его последней части,  $S$ . Путь  $S$  составляет длину шейки. Сечение сжимающейся массы (площадь контакта  $\sigma$ ) быстро возрастает в начале и мало изменяется в конце пути

сжатия. Поэтому для приближенных оценок можно принять конечное значение  $\sigma$ , определяемое, как и  $S$ , по реальным изображениям. Коэффициент 0.7 учитывает интегрирование зависимости  $p(s)$ . Приравнивая работу смятия  $W$  энергии импактора  $E_0$  и задавая различные значения давления  $p_{\max}$ , можно попытаться определить скорость  $v$  импактора:

$$W = 0.7 \sigma S p_{\max} = M v^2 / 2 \quad \text{и} \quad v = (1.4 \sigma S p_{\max} / M)^{1/2}.$$

Размеры «тела» и «головы» ядра кометы 67P/CG 4.1×3.3×1.8 и 2.6×2.3×1.8 км. Из опубликованных снимков ядра (рис. 8.2, 8.4), работ [6, 10] и других получены следующие примерные оценки: сечение  $\sigma = 2.09 \cdot 10^6 \text{ м}^2$  и длина шейки  $S = 1300 \text{ м}$ . Масса ядра  $10^{13} \text{ кг}$ , причем принимается, что массы большей и меньшей частей относятся как их объемы. Ядро имеет среднюю плотность  $533 \text{ кг м}^{-3}$  и высокую пористость, 72-74%. Если  $p_{\max} = 7 \text{ кПа}$  и  $10 \text{ кПа}$ , начальные скорости импактора должны быть  $v = 3$  и  $3.5 \text{ м с}^{-1}$  соответственно. Как можно видеть, полученные значения намного меньше разрушающей энергии  $Q_{\text{crit}}$ .

Интересно сравнить полученные результаты с таким же расчетом для других комет, 103P/Hartley-2 и 1P/Halley, если предположить их образование в процессе низкоскоростных столкновений. В первом случае  $\sigma = 1.96 \cdot 10^5 \text{ м}^2$ ,  $S = 410 \text{ м}$ , масса меньшей части  $M = 1.74 \cdot 10^8 \text{ кг}$ . Плотность ниже, чем у 67P/CG,  $320 \text{ кг м}^{-3}$ . Для 103P/Hartley-2 начальные скорости импактора получаются значительно большими,  $v = 67$  и  $80 \text{ м с}^{-1}$  соответственно, но  $Q_{\text{crit}}$  не достигается,  $Q = 3 \text{ кДж кг}^{-1}$ .

Плотность ядра 1P/Halley оценивается как  $550 \text{ кг м}^{-3}$ , но эту цифру нельзя считать достаточно надёжной, так как имеются противоречия плотности с полным значением массы ядра ( $2.2 \cdot 10^{14} \text{ кг}$ ). Так как меньшая часть ядра, «голова», имеет близкую к сферической форму (рис. 8.2) и диаметр около 8 км, её масса должна составлять почти  $1.5 \cdot 10^{14} \text{ кг}$ , что превышает половину всей массы ядра. Как плотность, так и полная масса ядра 1P/Halley точно не определены. Поэтому, исходя из объемов частей ядра, принимается, что масса меньшей части ядра составляет  $0.8 \cdot 10^{14} \text{ кг}$ . Сечение  $\sigma = 5.86 \cdot 10^7 \text{ м}^2$  и длина шейки  $S = 1920 \text{ м}$ . Начальные скорости импактора получаются  $v = 3.7$  и  $4.4 \text{ м с}^{-1}$ , соответственно, почти такими же, как у 67P/CG.

Гипотеза слияния кометных ядер в низкоскоростных столкновениях находит многочисленных сторонников. Процесс объединения первичных тел должен происходить по-разному у тел малой и большой массы. У последних, даже при малых скоростях столкновения, рассеиваемая энергия настолько значительна, что контактная область должна полностью сминаться. Если предположить, что ядро кометы Галлея также прошло через подобный процесс, его вид, возможно, подтверждает эту мысль. Но статистика еще слишком мала. Таким образом,

«шейки» должны встречаться у кометных тел (и астероидов) тем чаще, чем меньше их масса, как у ядра 67P/CG. Конечно, снимки (как рис. 8.1) не могут быть прямым доказательством когда-то произошедшего слияния независимых ядер, но возможно, что такое объединение действительно произошло, причем именно по плоскости узкого сечения.

**Руководитель темы:**

Ксанфомалити Леонид Васильевич, ИКИ РАН, ksanf@iki.rssi.ru

**Публикации:**

1. Л.В. Ксанфомалити. К 30-летию миссии *ВЕГА*: Сравнение некоторых свойств комет 1P/Галлея и 67P/Чурюмова-Герасименко // УФН, 2016 г. (принята в печать).
2. Л.М. Зеленый, Л.В. Ксанфомалити. Образование кометных ядер в процессе низкоскоростных столкновений планетезималей // Доклады Академии Наук, 2016. Принята в печать.
3. Л.В. Ксанфомалити, А.В. Тавров. Наследие миссии KEPLER – особый объект КИС 8462852. Критика кометной гипотезы.// *Астрономический Вестник*, 2016 г. Принята в печать.

**Доклады:**

1. L.V. Ksanfomality, L.M.Zelenyi. Does regional surface morphology of comets 67P/CG and 1P/Halley carry any traces of their origin in low velocity collisions? (7 MS 2016). 11.10.2016.
2. Л.В. Ксанфомалити. Наследие миссии KEPLER: Странный объект КИС 8462852. ГАИШ, 15.02.2016.
3. Л.В. Ксанфомалити. Кометы – гости из прошлого (к 30-летию миссии ВЕГА). ИКИ РАН, 16.04.2016.
4. Л.В. Ксанфомалити, Л.М. Зеленый. Кометные исследования (к 30-летию миссии ВЕГА). РКК Энергия 6.09.2016 г.
5. L.V. Ksanfomality. KEPLER Mission Heritage: Strange Events around the Star KIC 8462852. International Conference “Future of Earth's civilization“. Sofia, 6-7 November, 2016.

## Тема 8.1.2 Параметры траекторий к околоземным астероидам с целью доставки образцов грунта на Землю

### Аннотация.

Определен список околоземных астероидов и характеристики траекторий полета к ним с возвратом образцов грунта.

Приводимые ниже таблицы построены на основе приведенных в ссылках [1, 2] работ, направленных на оценки возможностей перевода околоземных астероидов или их фрагментов на резонансные с Землей орбиты. В левой колонке указаны номера астероидов. Во второй колонке даются величины характеристической скорости, необходимой для перевода астероида на траекторию гравитационного маневра у Земли. Но ровно та же скорость необходима для возврата образца породы астероида на Землю.

Таблица 8.1 – Ключевые параметры орбит для возврата грунта.

ID астероида	$\Delta V_3$ м/с	a  км/с	b  км/с	c  км/с	$\varphi$ гр.	$\alpha$ гр.	$V_{smin}$ км/с	$V_{smax}$ км/с	$V_{st}$ км/с	$T_3$	$T_4$
2004 MN4	2.2	5.8	29.7	28.4	71.6	78.8	23.9	34.9	29.7	2028/11/13	2029/04/13
2012 TC4	5.6	6.6	29.8	33.9	123.0	71.0	26.3	36.2	29.8	2016/12/12	2017/10/12
2006 SU49	7.9	5.0	30.3	34.3	140.0	89.1	27.4	33.8	30.3	2027/06/11	2029/01/23
2011 AG5	9.9	9.5	30.2	34.4	108.0	46.6	27.0	39.0	30.2	2021/08/14	2023/02/04
1997 XF11	10.0	14.1	30.0	34.2	95.1	26.7	28.0	39.2	30.0	2027/04/27	2028/10/26
2011 ES4	11.0	7.7	29.5	30.8	92.0	59.8	23.3	36.5	29.5	2027/10/27	2028/09/01
2012 VE77	12.6	15.4	30.1	35.4	97.0	23.3	29.7	40.1	30.1	2030/01/05	2031/11/18
2010 VQ	14.0	4.6	29.8	27.3	53.4	95.5	26.6	33.8	29.8	2034/03/04	2034/10/08
2012 KP24	14.6	12.7	29.4	34.0	100.2	31.1	27.5	39.0	29.4	2021/08/12	2023/05/29
2011 UK10	15.9	7.5	29.8	32.5	104.3	62.2	24.8	37.1	29.8	2025/09/13	2026/10/10
2006 SR131	16.8	8.4	29.7	33.3	108.5	54.1	25.7	37.8	29.7	2016/08/06	2017/09/23
2012 PB20	18.8	4.0	30.2	30.9	97.4	103.7	26.2	33.9	30.2	2024/06/11	2025/02/11
2010 CA	19.3	14.6	29.4	32.8	90.2	25.2	26.7	38.0	29.4	2027/03/07	2028/08/06

В предпоследней колонке указана дата старта космического аппарата с поверхности астероида, несущего капсулу с образцами породы астероида к Земле. В последней колонке указана дата прибытия аппарата. Как видно из таблицы, время полета к Земле во всех, кроме одного, случаях не превышает полутора лет, когда оно равно одному году и девяти месяцам.

Но главная особенность состоит в том, что астероиды были выбраны по следующему главному критерию: минимальная характеристическая скорость, необходимая для возвращения к Земле, не должна превышать 20 м/с. Минимизация этой величины достигалась оптимальным выбором дат старта с астероида и прибытия к Земле. В нашей таблице максимальное значение этой скорости равно 19.3 м/с. Минимальная скорость равна всего 2.2 м/с. С учетом массы аппарата, который можно доставить на поверхность астероида, максимальная масса образцов грунта, возвращаемого на Землю, огромна и измеряется тоннами.

В третьей колонке таблицы приводятся значения скорости относительно Земли возвращаемого аппарата на бесконечности.

Следующая таблица дает длительности перелета к астероидам. В последнем столбце приводятся значения массы аппарата (включая оставшееся рабочее тело) после приземления на поверхность астероида в предположении, что для торможения используется плазменный двигатель малой тяги, а перелетная траектория оптимизировалась по конечной массе аппарата путем выбора даты старта и времени перелета, а также весовых коэффициентов  $W_1, W_2$ .

Таблица 8.2 – Ключевые параметры орбит перелета к астероидам для возврата грунта.

$W_1$	$W_2$	Длительность полета, дни	$C_{3,2}^2$ , км <sup>2</sup> /с	Разгонный импульс при старте с НКО км/с	Масса КА после старта с НКО, т	Импульс торможения у астероида км/с	Масса КА после торможения, кг
<b>2004 MN4</b>							
0.5	2.0	307	2.4 (1.549)	3.335	6.168	2.8	5672.5
<b>2006 SU49</b>							
1	10	518	17.2(4.147)	3.981	4700	0.6	5594.2
<b>2011 AG5</b>							
1	10	532	27.9(5.282)	4.428	3690	1.5	5254.2
<b>1997 XF11</b>							
1	10	793	38.3(6.189)	4.846	2950	3.2	4847.2
<b>2011 ES4</b>							
0.5	2	217	5.1(2.258)	3.456	5870	3.2	5472.9
<b>2012 VE77</b>							
1	10	883	57.1(7.556)	5.569		3.4	4612.0
<b>2010 VQ</b>							
1	1	225	0.4(0.632)	3.245	6420	2.9	5869
<b>2012 KP24</b>							
1	5	401.1	6.8(2.608)	3.531	5680	10.1	4376.1
<b>2011 UK10</b>							
0.5	10	422.3	47.2(6.870)	5.194		0.5	5433
<b>2012 PB20</b>							
1	1	324	1(1)	3.272	6355	4	5616
<b>2010 CA</b>							
0.8	10	669	42.0(6.481)	4.992	2750	4.6	4600

В заключение следует отметить, что для выбора астероидов для включения в список был выбран достаточно низкий предел допустимой характеристической скорости (20 м/с). При его расширении до допускаемых техническими возможностями носителя и космического аппарата пределов определяющим при выборе астероидов может стать, в первую очередь, научная ценность ожидаемых результатов миссии по возврату грунта.

**Руководитель темы:**

Эйсмонт Натан Андреевич, ИКИ РАН, neismont@iki.rssi.ru

**Литература**

1. A. A. Ledkov, N. A. Eismont, M.N. Boyarskii, K. S. Fedyaev, and R. R. Nazirov, "Control of the Motion of Near-Earth Asteroids", *Astronomy Letters*, 2015, Vol. 41, Nos. 1–2, pp. 67–83., 2015.
2. N. A. Eismont, M. N. Boyarskii, A. A. Ledkov, R. R. Nazirov, D. W. Dunham and B. M. Shustov, "On the Possibility of the Guidance of Small Asteroids to Dangerous Celestial Bodies Using the Gravity Assist Maneuver", *Solar System Research*, 2013, Vol. 47, No. 4, pp. 325–333., 2013.

**Проект 8.2 Происхождение и эволюция метеоритного вещества и космической пыли**

**Аннотация.**

Классифицированы и зарегистрированы новые поступления метеоритов в коллекцию РАН, промоделированы возможные процессы образования тугоплавких включений, изучены особенности геохимии и минералогии некоторых метеоритов, лунных пород и микрометеоритов.

Исследовано и зарегистрировано в Международном метеоритном номенклатурном комитете 15 новых метеоритов, которые поступили в Метеоритную коллекцию РАН. Среди этих метеоритов 3 из России, остальные из Египта и др. стран. За исключением одного железного метеорита, все они относятся к обыкновенным хондритам. При экспертизе образцов, поступивших от населения (всего за год 296 шт.), выявлен новый железный метеорит из России (Брянская обл.)

Проведен расчет термодинамических свойств расплавов системы CaO–MgO–SiO<sub>2</sub> в области температур 1600–2400 К. В рамках разработанной полуэмпирической модели рассчитано изменение состава остаточного расплава тугоплавких включений в углистых хондритах и хондрита Крымка при температуре 2300 К. Обнаружен эффект инверсии относительной

летучести  $MgO/SiO_2$ , приводящей к преимущественному испарению  $MgO$  (по сравнению с  $SiO_2$ ) из расплавов тугоплавких включений, что позволяет объяснять особенности их образования.

В лунной метеоритной брекчии Dhofar 025 были найдены возможные аналоги шпинелевых анортозитов – нового типа лунных пород, обнаруженных по данным орбитального высокоточного минералогического картирования поверхности Луны аппаратом “Chandrayaan-1” и характеризующихся присутствием значительного количества шпинели (20-30%) и плагиоклаза. Эти аналоги представляют собой необычные катодолуминесцирующие участки в ударно-расплавной матрице, которые имеют полевошпатовый состав, содержат микролиты Fe-Mg шпинели и характеризуются геохимическими признаками испарения ударного расплава. Ударное происхождение исследованных объектов подтверждает гипотезу о том, что шпинелевые анортозиты могут являться результатом ударного смешения и плавления анортозитов с оливин-содержащими породами – пикритами или троктолитами – с последующим фракционированием таких ударных расплавов.

На основе оригинальных данных о составе матриц в 71 тонкозернистом микрометеорите проведено сопоставление валовой химии матриц с данными о составах космических шариков различных структурных разновидностей. Микрометеориты по составу матрицы разделяются на 2 группы – высоко- и низкожелезистые. Первая группа может быть родоначальником порфириновых и полосчатых космических шариков, тогда как вторая – криптокристаллических и стеклянных. Предполагается, что структурные особенности космических шариков в основном определяются составом исходного вещества, а не степенью нагрева при пролете в атмосфере, как это предполагалось ранее.

Изучены новые метеориты в коллекции Академии Наук – мезосидериты North West Africa 8741 и North West Africa 8742, образовавшиеся при столкновениях железных астероидов с поверхностью крупного дифференцированного родительского тела наподобие астероида Веста. Метеорит NWA 8742 представляет собой мезосидерит подтипа 3В, содержащий габбро, пироксениты и никелистое железо. Мезосидерит NWA 8741 относится к редкой разновидности мезосидеритов (4А) в которой силикатная составляющая представлена магматической породой (долеритом) с включениями габбро, пироксенитов, дунитов и никелистого железа. Во включениях пироксенитов обнаружены симплектитовые агрегаты хромита и кремнезема, которые могут представлять собой результат внедрения по трещинам высокотемпературного расплава и его реакции с вмещающим пироксеном. В ксенолитах дунита обнаружены симплектиты троилита, пироксена и никелистого железа, которые, возможно, являются продуктами внедрения по трещинам высокотемпературных восстановительных флюидов, обогащенных карбонилсульфидом ( $CO$ ), и их реакций с

вмещающим оливином. Такие объекты могут являться индикаторами состава летучих компонентов в недрах родительских тел примитивных и дифференцированных метеоритов.

**Руководитель проекта:**

Бадюков Дмитрий Дмитриевич (вместо Назарова Михаила Александровича)

ФГБУ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

[badyukov@geokhi.ru](mailto:badyukov@geokhi.ru)

**Состав группы:**

Демидова С.И., Лоренц К.А., Скрипник А.Я., Теплякова С.Н., Хисина Н.Р., Шорников С.И.,  
Лаборатория метеоритики ГЕОХИ РАН.

**Публикации:**

1. Bezaeva N. S., Swanson-Hysell N. L., Tikoo S. M., Badyukov D. D., Kars M., Egli R., Chareev D. A., Fairchild L. M., Khakhalova E., Strauss B. E., Lindquist A. K. (2016) The effects of 10 to >160 GPa shock on the magnetic properties of basalt and diabase. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. available online at <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2016GC006583/pdf>
2. Хисина Н.Р., Бадюков Д.Д., Вирт Р. Микроструктура, наноминералогия и локальная химия криптокристаллических космических сферул. *Геохимия*. 2016, № 1, С. 78-88.

**Проект 8.3 Свойства, динамика и проявления лунной пыли**

**Аннотация.**

Решена проблема отрыва пылевых частиц от лунной поверхности для частиц метеороидного происхождения и определены параметры указанных пылевых частиц в плазменно-пылевой системе над поверхностью Луны; показано, что в окрестности лунного терминатора существует область, представляющая собой аналог плазменного слоя, в которой возникают значительные электрические поля, приводящие к подъему положительно заряженных микронных пылевых частиц на высоты порядка нескольких десятков сантиметров и достаточные для объяснения свечения над областью лунного терминатора, наблюдавшегося космическими аппаратами Surveyor; показано, что при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны успевают установиться развитая ионно-звуковая и пылевая звуковая плазменная турбулентность, что может сопровождаться возбуждением

электрических полей, вполне значимых для установления адекватной картины электрических полей над Луной.

1. Показано, что удары метеороидов представляют собой важный источник микрометровых пылевых частиц в плазменно-пылевой системе над поверхностью Луны. Удары метеороидов имеют существенное значение с точки зрения описания процессов отрыва пылевых частиц от лунной поверхности. При рассмотрении процессов, значимых при отрыве пылевых частиц, следует учитывать адгезию, эффект которой ослабляется, если учитывать шероховатость поверхности. Определено количество соударений метеороидов с единицей площади лунной поверхности в единицу времени и проведена оценка предела прочности лунного реголита на растяжение за счет эффекта адгезии. Приведено описание процессов, происходящих при соударении высокоскоростного метеороида с лунной поверхностью. Найдены характерные параметры зон испарения вещества, его плавления, разрушения частиц лунного реголита, необратимых деформаций частиц, упругих деформаций вещества реголита. Показано, что большая часть частиц, покидающих поверхность Луны вследствие ударов метеороидов, происходит из зоны упругих деформаций вещества реголита. Для различных высот над Луной проведено вычисление количества пылевых частиц, отрывающихся в единицу времени от единицы площади лунной поверхности вследствие ударов метеороидов, и определена их функция распределения по размерам. Учет микрометровых пылевых частиц, образованных вследствие ударов метеороидов, может внести определенный вклад в описание процесса рассеяния солнечного света на пылевых частицах над областью лунного терминатора для объяснения свечения над этой областью, которое наблюдалось космическими аппаратами Surveyor. В рамках будущих лунных миссий «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс» для обнаружения и идентификации микрометровых пылевых частиц, появляющихся в плазменно-пылевой системе над поверхностью Луны вследствие ударов метеороидов, могут быть использованы пьезоэлектрические ударные сенсоры. Отличительными особенностями таких частиц являются высокие скорости (порядка 10-100 м/с) и микрометровые размеры.

2. Рассмотрена пылевая плазма в области лунного терминатора. Показано, что в окрестности терминатора существует область, которая представляет собой аналог плазменного слоя. Такой слой создает потенциальный барьер в области терминатора, благодаря которому в плазме над освещенной частью Луны за счет электростатических сил удерживаются электроны. Ширина плазменной возмущенной области, связанной с терминатором, определяется ионным дебаевским радиусом. В этой области возникают значительные электрические поля (порядка нескольких сотен В/м), которые приводят к подъему положительно заряженных микронных пылевых частиц на высоты порядка нескольких десятков сантиметров. Предложенный эффект

может быть использован для объяснения свечения над областью лунного терминатора, которое наблюдалось космическими аппаратами Surveyor.

3. Представлено описание волновых процессов при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны. Картина волновых процессов существенным образом зависит от параметров плазменно-пылевой системы. Так, например, возбуждение ионно-звуковых волн возможно в областях магнитного переходного и/или пограничного слоев магнитосферы. Возбуждение пылевых звуковых волн возможно во всей области взаимодействия хвоста магнитосферы с пылевой плазмой у Луны. В обеих ситуациях развитие неустойчивостей обусловлено относительным движением ионов магнитосферы и заряженных пылевых частиц. Оказывается, что в силу довольно длительного характера развития неустойчивостей в указанных двух ситуациях успевает установиться развитая плазменная турбулентность. Ионно-звуковая турбулентность рассматривается с позиций сильной турбулентности. Тогда как для описания пылевой звуковой турбулентности следует использовать теорию слабой турбулентности. Для случаев ионно-звуковой и пылевой звуковой турбулентности определены эффективные частоты столкновений, характеризующие аномальную потерю импульса ионов вследствие их взаимодействия с волнами, а также определены возникающие в системе электрические поля. Оказывается, что при развитии ионно-звуковой турбулентности в плазменно-пылевой системе у Луны могут возбуждаться электрические поля, несколько меньшие электрических полей у поверхности Луны, возникающих в процессе зарядки ее поверхности при взаимодействии Луны с солнечным излучением, но, тем не менее, вполне значимые для установления адекватной картины электрических полей над Луной. Полученные эффективные частоты столкновений следует учитывать при записи гидродинамических уравнений для ионов пылевой плазмы с учетом ее турбулентного нагрева. Волновые движения в области взаимодействия хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны (или те или иные их проявления) могут быть зафиксированы с помощью аппаратуры, которую предполагается разместить на спускаемых аппаратах станций «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс». Так, в состав выносных датчиков на станции «Луна-Ресурс», входит зонд Ленгмюра, с помощью которого возможны локальные измерения флуктуаций концентрации и потенциала в плазме. С другой стороны возможность возникновения волновых движений в приповерхностной лунной плазме должна быть учтена при обработке вольт-амперной характеристики зонда Ленгмюра и интерпретации данных наблюдений. Проведено теоретическое исследование и численное моделирование пылевых звуковых солитонов в приповерхностном слое Луны. Определены зависимости амплитуды солитона от его скорости и высоты движения над освещенной частью лунной поверхности.

Описаны свойства указанных солитонов с учетом эффектов адиабатического захвата электронов.

**Руководитель проекта:**

Попель Сергей Игоревич, ИКИ РАН, [serg.i.popel@gmail.com](mailto:serg.i.popel@gmail.com)

**Публикации:**

1. Попель С.И., Зеленый Л.М., Атаманюк Б. Пылевая плазма в области лунного терминатора // Физика плазмы. 2016. Т. 42, № 5. С. 555-560.
2. Попель С.И., Голубь А.П., Лисин Е.А., Извекова Ю.Н., Атаманюк Б., Дольников Г.Г. Захаров А.В., Зеленый Л.М. Удары высокоскоростных метеороидов и отрыв пылевых частиц от поверхности Луны // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, № 9. С. 641-646.
3. Зеленый Л., Попель С., Волокитин А., Атаманюк Б. Турбулентность и пылевая плазма // Научное сотрудничество между Российской Академией Наук и Польской Академией Наук в области Фундаментальных космических исследований. М.: ИКИ РАН, 2016, стр. 215-235.
4. Popel S.I., Golub' A.P., Lisin E.A., Izvekova Yu.N., Atamaniuk B., Dolnikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M. Meteoroid impacts and dust particles in near-surface lunar exosphere // Journal of Physics: Conference Series. 2016, in press.
5. Попель С.И., Морозова Т.И. Волновые процессы при взаимодействии хвоста магнитосферы Земли с пылевой плазмой у поверхности Луны // Физика плазмы. 2017. Т. 43, в печати.
6. Попель С.И. Нелинейные волновые явления в плазменно-пылевых системах // Нелинейные волны' 2016. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2017, в печати.
7. Морозова Т.И., Попель С.И. Электростатические волны и неустойчивости в плазме приповерхностного слоя Луны при ее взаимодействии с магнитосферой Земли // XLIII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 8-12 февраля 2016 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2016. – с. 245.
8. Морозова Т.И., Попель С.И. Волны и неустойчивости в плазме приповерхностного слоя Луны при ее взаимодействии с магнитосферой Земли // Одиннадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе». 15-19 февраля 2016 г., ИКИ РАН. Сборник тезисов. М.: ИКИ РАН, 2016. – с. 128.
9. Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M. Dusty Plasmas at Atmosphereless Cosmic Bodies, 14th International Workshop “Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation”, P. 32 (Moscow, Russia, 2016).

10. Dubinskii A.Yu., Popel S.I. Solar Wind Interaction with Surface of the Moon and Formation of Water Molecules in Lunar Regolith // 14th International Workshop “Complex Systems of Charged Particles and their Interactions with Electromagnetic Radiation”, P. 34 (Moscow, Russia, 2016).
11. Popel S., Golub' A., Izvekova Y., Lisin E., Atamaniuk B., Dolnikov G., Zakharov A., Zelenyi L. Dust Particle Release from the Lunar Surface: Influence of Adhesion and Meteoroid Impacts // Abstracts General Assembly of the European Geosciences Union (Vienna, Austria, 2016), Geophysical Research Abstracts, Volume 18, EGU2016-7541, 2016.
12. Popel S., Zelenyi L., Atamaniuk B. Dusty Plasma Sheath-Like Structure in the Lunar Terminator Region // 41th COSPAR Scientific Assembly 2016. Abstracts from the meeting that was to be held 30 July-7 August at the Istanbul Congress Center (ICC), Turkey, but was cancelled, C5.2-0022-16.
13. Popel S., Golub' A., Izvekova Yu., Lisin E., Atamaniuk B., Dolnikov G., Zakharov A., Zelenyi L. Meteoroid Impacts and Dust Particles over the Surface of the Moon // 41th COSPAR Scientific Assembly 2016. Abstracts from the meeting that was to be held 30 July-7 August at the Istanbul Congress Center (ICC), Turkey, but was cancelled, C5.2-0023-16.
14. Popel S., Zelenyi L. Space Dusty Plasmas: Recent Developments, Advances, and Unsolved Problems // 41th COSPAR Scientific Assembly 2016. Abstracts from the meeting that was to be held 30 July-7 August at the Istanbul Congress Center (ICC), Turkey, but was cancelled, D3.3-0016-16.
15. Popel S.I., Zelenyi L.M. Dusty Plasmas in the Solar System: Recent Developments, Advances, and Unsolved Problems // The Seventh Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia, 2016), 7MS3-DP-01, pp. 97-ab-99-ab.
16. Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I. Adiabatic Trapping of Electrons and Localized Wave Structures in Lunar Dusty Plasmas and Earth's Mesosphere // The Seventh Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia, 2016), 7MS3-PS-46, pp. 247-ab-248-ab.
17. Morozova T.I., Popel S.I. Waves in the Region of Interaction between Earth's Magnetosphere and Lunar Dusty Plasma // The Seventh Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia, 2016), 7MS3-PS-47, pp. 249-ab-251-ab.

## **Проект 8.4 Эволюция вещества метеоритов при ударных процессах на ранних этапах формирования Солнечной системы**

### **Тема 8.4.1 Оценка качественного состава экзогенного ударно-генерированного органического вещества на поверхности ледяных спутников планет по результатам исследования органического вещества, содержащегося в углистых хондритах и продуктах модельного ударного преобразования углистых хондритов и их минеральных аналогов**

#### **Аннотация.**

Показано, что «экзогенное» ударно-генерированное органическое вещество на поверхности ледяных спутников планет может состоять из различных углеводов (алифатических и ароматических, включая полициклические и алкилароматические углеводороды), кислородсодержащих (карбоновых кислот), серосодержащих (тиофена, алкил- и бензотиофенов), азотсодержащих (амидов, нитрилов, гетероциклов, относительно простых белковых и небелковых аминокислот, содержащих 2-4 атома углерода и т.д.) органических соединений (ОС) и высокомолекулярного органического вещества (рис. 8.3-8.4).

Главной целью планируемых миссий по исследованию ледяных спутников планет, таких как Ганимед и Европа и др., является поиск внеземной жизни, следы которой могут быть определены при *in situ* анализе органики, присутствующей на поверхности данных космических объектов. Адекватная интерпретация результатов невозможна без принятия во внимание «экзогенных» ОС, которые могут быть представлены как неизменённым органическим веществом аккрецируемых астероидов и комет, так и органическим веществом, синтезируемым в результате ударных событий. Для успешной интерпретации результатов космических экспериментов *in situ* при определении принадлежности ОС к «эндогенному» (в т.ч. биологическому) источнику, необходимо создать базу данных, содержащую информацию об ОС «экзогенного» происхождения, в т.ч. об их изотопном составе, полученную в результате изучения продуктов модельного ударного преобразования метеоритов и их аналогов.

Нами изучен состав ОС, содержащихся в углистых хондритах Murchison (CM2), Каинсаз (CO3) и твёрдых конденсатах, полученных при модельном ударно-испарительном преобразовании данных хондритов их минерального аналога – перидотита.

Условия высокотемпературного пара (4000-5000 К), формирующегося при ударно-индуцированном испарении ударника и мишени (при скорости столкновения ~10-15 км/с) моделировали с помощью импульсного лазера на Nd стекле ( $\lambda = 1,06$  мкм, длительность

импульса –  $10^{-3}$  с, энергия  $\sim 600-700$  Дж, плотность потока энергии  $\sim 10^6-10^7$  Вт/см<sup>2</sup>). Испарение метеоритов проводили в гелиевой и водородной атмосфере, испарение перидотита – в смесях азота и метана, содержащих 4 % об. (соответствует составу современной атмосферы Титана) и 50 % об. CH<sub>4</sub>.

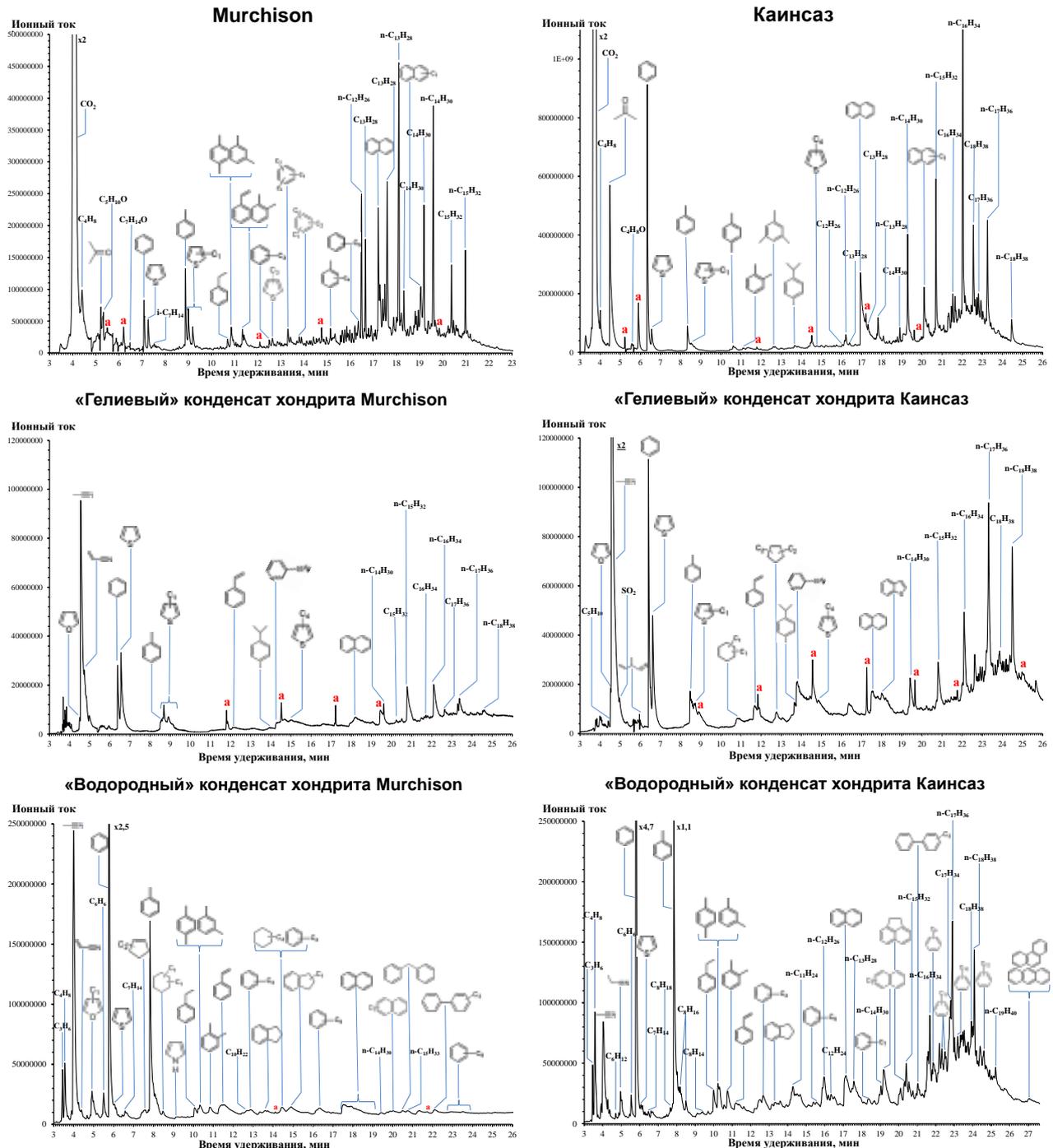


Рис. 8.3 – Хроматограммы продуктов пиролиза при 460°C углистых хондритов Murchison и Каинсаз и твёрдых конденсатов, полученных в результате лазерного испарения данных метеоритов в гелиевой и водородной атмосфере. «а» – артефакты.

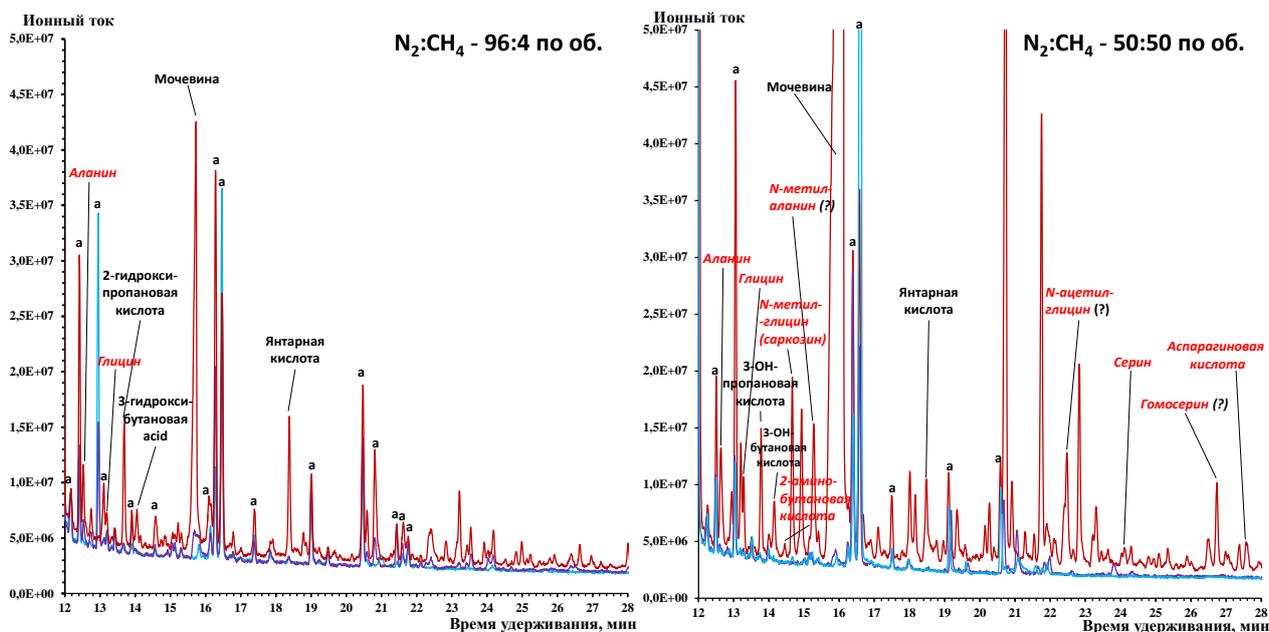


Рис. 8.4 – Хроматограммы трет-бутилдиметилсилильных производных ОС, выделенных при ультразвуковой экстракции водой 20 мг твёрдых конденсатов, полученных при лазерном испарении перидотита в газовых смесях азот-метан (96:4 и 50:50 по объёму). Основные хроматограммы показаны красным цветом, хроматограммы холостых опытов с перидотитом – фиолетовым, без образца – светло-синим. Названия аминокислот приведены красным шрифтом. «?» – неуверенная идентификация; «а» – артефакты.

### Руководитель темы:

Зайцев Максим Андреевич, м.н.с. лаб. № 532 ИКИ РАН, [mzaitsev@iki.rssi.ru](mailto:mzaitsev@iki.rssi.ru)

### Состав группы:

м.н.с. Зайцев М.А., вед. техн. Сафонова Э.Н., инженер Васильева А.С., с.н.с. Диков Ю.П.

### Публикация:

Зайцев М.А., Герасимов М.В., Сафонова Э.Н., Васильева А.С. (2016) Особенности синтеза сложных органических веществ в азотно-метановой атмосфере при высокоскоростных ударных событиях. *Астрономический вестник*. Т. 50. № 2. С. 123-140. DOI: 10.7868/S0320930X16020080.

### Доклады:

1. М.А. Зайцев. Особенности синтеза сложных органических веществ при высокоскоростных ударных событиях. Семинар ИНАСАН, 03.03.2016.

2. М.А. Зайцев, М.В. Герасимов, Э.Н. Сафонова, А.С. Васильева (2016). Оценка состава экзогенных органических веществ на поверхности планет и их спутников по результатам исследования продуктов модельного ударного преобразования углистых хондритов. Доклад на семинаре «Астробиология: методы и приборы обнаружения признаков внеземной жизни». ИКИ РАН, Москва, 21 апреля 2016 г.

#### **Тема 8.4.2 Проведены модельные эксперименты по высокотемпературному испарению одного из основных минералов метеоритов – оливина, с целью изучения особенностей ударно-испарительной модификации его состава**

##### **Аннотация.**

Экспериментально установлено, что в условиях высокотемпературного испарения, характерного для высокоскоростных ударных процессов, улетучивание вещества из оливина происходит при ведущей роли энстатитового ( $MgSiO_3$ ) кластера.

Высокоскоростные ударные процессы играли фундаментальную роль в преобразовании силикатного вещества в Солнечной системе, как на допланетном этапе ее развития, так и на ранних этапах аккумуляции планет. Ударные процессы рассматриваются как один из механизмов образования хондр метеоритов. Формирование химического состава летучих веществ в парогазовом облаке во многом зависит от состава конденсированных силикатных частиц, участвующих в гетерогенных химических процессах. Изменение химического состава ударного расплава происходит в результате селективного испарения, основные закономерности которого оцениваются по индивидуальной летучести входящих в расплав веществ.

Наши эксперименты, моделирующие высокотемпературное испарение при ударном нагреве вещества, показывают, что в этих условиях испарение идет преимущественно по кластерному типу. Такое испарение характеризуется выходом из расплава в парообразное состояние атомно-молекулярных группировок (кластеров), что обеспечивает одинаковую летучесть входящих в группировку элементарных веществ, индивидуальные свойства которых могут сильно различаться между собой. С другой стороны, образуются предпосылки для формирования объектов с составами, стехиометричность которых задается составом кластеров.

**Руководитель темы:**

Герасимов Михаил Владимирович, зав. лаб. № 532 ИКИ РАН, [mgerasim@mx.iki.rssi.ru](mailto:mgerasim@mx.iki.rssi.ru)

**Состав группы:**

м.н.с. Зайцев М.А., вед. техн. Сафонова Э.Н., инженер Васильева А.С., с.н.с. Диков Ю.П.

**Проект 8.5 Комплексное исследование избранных астероидов и комет небесно-механическими и астрофизическими методами****Аннотация.**

Изучены динамические процессы перехода комет из внешней части Солнечной системы в околоземное пространство.

Проведено согласование наблюдаемых распределений транснептуновых объектов, кентавров и объектов облака Оорта на основе модели образования кометного облака Солнечной системы. Проведены наблюдения на 11-м телескопе SALT и уточнены орбиты транснептуновых объектов 2016 FL59, 2016 FN59 и 2016 FP59. Найдены и изучены тесные сближения наблюдаемых малых тел с Сатурном, Ураном и Нептуном.

**Руководитель проекта:**

Емельяненко Вячеслав Васильевич, ИНАСАН, [vvemel@inasan.ru](mailto:vvemel@inasan.ru)

**Публикация:**

Emel'yanenko V.V. Lessons from the Chelyabinsk event. Asteroids: New Observations, New Models. Proceedings IAU Symposium No. 318. Cambridge University Press. 2016. P. 239-241.

**Проект 8.6 Небесно-механические факторы, вызывающие существенную трансформацию движения малых тел Солнечной системы****Аннотация.**

Построена теория эксцентрического эффекта Козаи-Лидова, проявляющегося в долгопериодической модуляции колебаний наклонов и эксцентриситетов в системе трех гравитирующих тел.

Изучая эволюцию слабозмущенного кеплеровского движения в рамках ограниченной задачи трех тел, М.Л.Лидов (1961) и Й.Козаи (1962) независимо обнаружили взаимосвязанные колебания эксцентриситета и наклона (КЛ-циклы). Двукратно осреднив приближенное выражение для возмущающей функции, Лидов и Козаи получили интегрируемую модель вековой эволюции. Используемое Лидовым и Козаи приближенное выражение соответствует квадрупольному (первому нетривиальному) члену разложения возмущающей функции в ряд по степеням отношения большой полуоси оскулирующей орбиты возмущаемого тел к большой полуоси возмущающего тела: предполагается, что это отношение достаточно мало.

Если приближенное выражение для возмущающей функции дополнить следующим (октупольным) членом разложения, то подобная модификация позволяет выявить модуляции циклов Козаи-Лидова, заключающиеся в долгопериодическом изменении максимальных и минимальных значений эксцентриситета и наклона в этих циклах [1, 2, 3]. Но особенно примечательной представляется обнаруженная в [2, 3] возможность перескоков (флипов) возмущаемого тела между прямым и обратным движением. Так как флипы наблюдаются только тогда, когда эксцентриситет орбиты возмущающего тела отличен от нуля, данное явление получило название «эксцентрического эффекта Козаи-Лидова» [3].

Как оказалось, этот эффект можно интерпретировать как резонансное явление. Для этого в интегрируемой модели Козаи-Лидова были введены переменные «действие-угол», а затем с помощью современных методов исследования резонансов в гамильтоновых системах удалось получить в аналитической форме условие чередования прямого и обратного орбитального движения возмущаемого тела.

Полученный результат важен для понимания причин появления в планетных системах объектов, у которых направление орбитального движения которых вокруг звезды-«хозяина» противоположно направлению ее собственного вращения.

В 2016 году также было продолжено изучение резонансных семейств объектов пояса Койпера. С помощью численного интегрирования было установлено, что для некоторых плутино (2011UU412, 1999CY131, 2001FV185) возможно чередование интервалов либрационного и ротационного изменения резонансной фазы  $\varphi = 3\lambda - 2\lambda' + \Omega$ .

## Литература

- [1] Ford, E.B., Kozinsky, B., Rasio, F.A.: Secular evolution of hierarchical triple star systems, *Astrophys. J.*, 535, 385-401 (2000)
- [2] Katz, B., Dong, S., Malhotra, R.: Long-term cycling of Kozai-Lidov cycles: extreme eccentricities and inclinations excited by a distant eccentric perturber. *Physical Review Letters*, **107**, 181101 (2011)

[3] Lithwick, Y., Naoz, S.: The eccentric Kozai mechanism for a test particle. *Astroph. J.*, **742**, 94 (2011)

**Руководитель проекта:**

Сидоренко Владислав Викторович, в.н.с., Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН; [vyvsidorenko@list.ru](mailto:vyvsidorenko@list.ru)

**Состав группы:**

Батхин Б.М., к.ф.-м.н., с.н.с., Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН,  
Ефимов С.С., аспирант МФТИ.

**Публикации:**

1. Ефимов С.С., Сидоренко В.В.: Модельная система, описывающая некоторые свойства динамики небесных тел при резонансе средних движений первого порядка. Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, N 65 (2016).
2. Sidorenko V.V.: The eccentric Kozai-Lidov Effect as a Resonance Phenomenon // Abstracts of International Conference “Dynamics, Bifurcations and Chaos”, Nizhny Novgorod (2016).
3. Efimov S., Sidorenko V.: Intermittency in dynamics of resonant Kuiper belt objects // Abstracts of 7<sup>th</sup> Moscow Solar System Symposium, Space Research Institute (2016)
4. Ефимов С.С.: Динамика резонансных объектов пояса Койпера. Магистерская диссертация. МФТИ (2016).

**Проект 8.7 Форма, состав и физико-механические свойства малых силикатных и ледяных тел Солнечной системы**

**Аннотация.**

Предел текучести для реального состава ледяных тел при низких температурах оценивается в интервале  $0.14 < \sigma_p < 0.87$  МПа, где нижнее значение соответствует величине девиаторных напряжений в Гиперионе (самое крупное малое ледяное тело), а верхнее – в Мимасе (самое малое ледяное планетное тело). Наблюдаемый переход обусловлен критической массой тела, величиной предела текучести твердого льда и является результатом гравитационной деформации, а не термального эффекта, т.е. плавления ледяных тел.

Рассматривается гравитационная деформация малых ледяных тел, состоящих преимущественно из водного льда и характеризующихся, как правило, высоким альбедо (от

0.4 до 1.0) (Buratti и др., 2010). Как было показано в отчете за 2015 год, пространственная или объемная задача теории упругости в условиях гравитационного сжатия относится к классу задач с обратной связью, когда любое изменение формы влияет на гравитационный потенциал, и наоборот. Единственной силой, способной преодолеть барьер фундаментальной прочности малого тела и преобразовать его неправильную фигуру в равновесную, шарообразную фигуру планетного тела, является гравитация или сила тяжести.

В результате аналитического решения пространственной задачи теории упругости самогравитирующего твердого упругого тела была получена универсальная функция величины и распределения девиаторных напряжений в исследуемом малом теле, которая записывается в удобном для вычислений виде (Слюта, Воропаев, 2015)

$$\tau_{max} = \sigma_0 F(\varepsilon, \nu) \quad (1)$$

где размерный коэффициент  $\sigma_0 = \frac{9}{8\pi} \frac{GM^2}{a^2bc}$ ,  $G$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса тела

$M = \frac{4}{3} \pi \rho_0 R_m^3$  (где  $R_m$  – средний радиус равнообъемного тела),  $a$ ,  $b$  и  $c$  – главные полуоси фигуры тела, а  $F(\varepsilon, \nu)$  – безразмерная функция. В результате проведенного анализа и полученного аналитического решения было установлено, что величина и распределение девиаторных напряжений зависят от химического и минерального состава малых тел и определяются такими основными параметрами, как масса тела, плотность, размеры и форма тела, предел текучести и коэффициент Пуассона.

Высокая пористость малых ледяных тел указывает на отсутствие гравитационного сжатия и гравитационной деформации (табл. 8.3).

Таблица 8.3 – Девиаторные напряжения ( $\tau_{max}$ ) в малых ледяных телах диаметром >40 км.

№	Малое тело	Диаметр, км	$R_{ср}$ , км	Плотность, кг м <sup>-3</sup>	$\tau_{max}$ для $\varepsilon_{ср}$ , МПа	$\varepsilon_{ср}$
1	Пандора	104.0×81.0×64.0	40.7	490±60	0.019	0.722
2	Прометей	135.6×79.4×59.4	43.1	480±90	0.012	0.863
3	Эпиметей	129.8×114.0×106.2	58.1	640±62	0.026	0.534
4	Амальтея	250×146×128	83.5	857±99	0.130	0.837
5	Янус	203.0×185.0×152.6	89.5	630±30	0.062	0.564
6	Гиперион	360.2×266.0×205.4	135.0	544±50	0.135	0.761

Повышенная плотность спутника Юпитера Амальтеи (и низкое альbedo) объясняется повышенным содержанием силикатной пыли. Спутник Сатурна Гиперион (рис. 8.5), обладая

наибольшей массой и размерами среди малых ледяных тел, характеризуется и наибольшим девиаторным напряжением (0.14 МПа) (табл. 8.3). Если величина девиаторных напряжений не превышает предела текучести вещества, в данном случае льда, то малое тело (Гиперион) таковым и остается.

Самым маленьким планетным телом, также состоящим преимущественно из водного льда, является спутник Сатурна Мимас со средним радиусом 198.2 км (рис. 8.5). Гравитационная деформация сопровождается сокращением пористости и уплотнением вещества (Slyuta, Voropaev, 1997). Плотность Мимаса, равная  $1149 \text{ кг м}^{-3}$ , почти вдвое превышает плотность пористых малых ледяных тел, не подвергавшихся гравитационной деформации. Найденная величина девиаторных напряжений для Мимаса составляет 0.87 МПа. Полученный диапазон значений предела текучести  $0.14 < \sigma_p < 0.87 \text{ МПа}$  для реального состава ледяных тел Солнечной системы хорошо согласуется с имеющимися экспериментальными данными по пределу текучести для чистого льда при низких температурах ( $0.1 < \sigma_p < 2 \text{ МПа}$ ) (Goodman и др., 1981).

Таким образом, на примере Гипериона и Мимаса мы наблюдаем переход между малыми и планетными телами ледяного состава, который обусловлен гравитационной деформацией твердого льда, а не термальным эффектом, т.е. разогревом и плавлением льда в результате каких-либо внешних и внутренних причин.

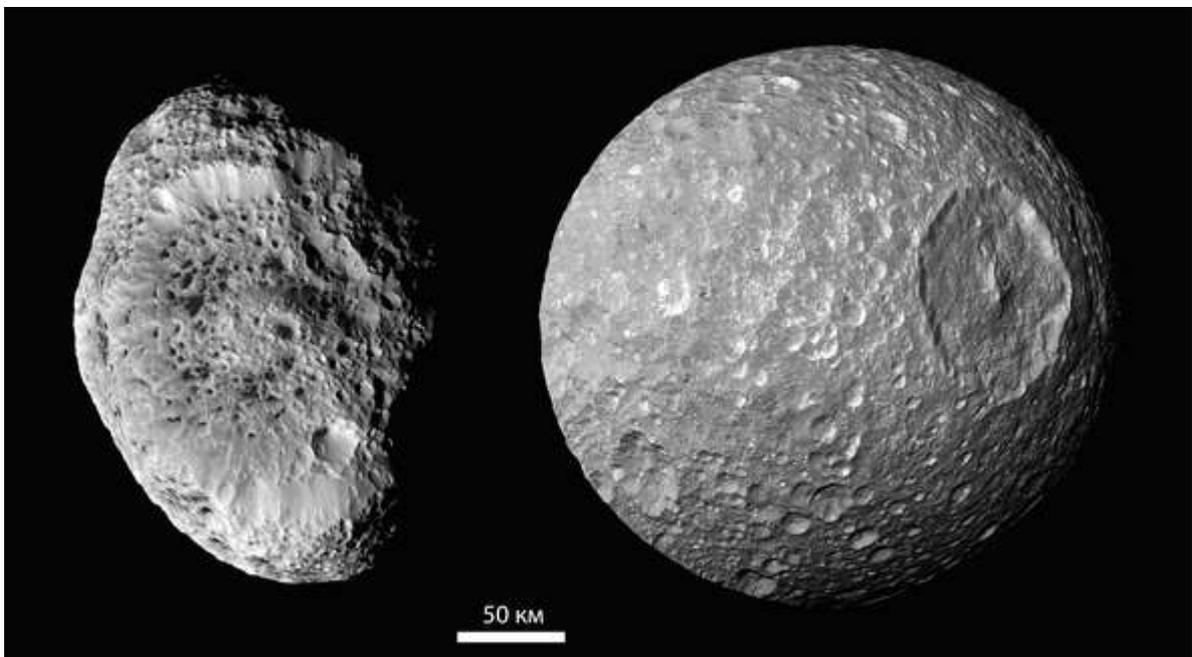


Рис. 8.5 – Ледяные спутники Сатурна Гиперион (слева) и Мимас (справа), показанные в одном масштабе. Фото АМС «Кассини», NASA.

Используя в уравнении (1) параметры Гипериона (плотность и эксцентриситет фигуры) (табл. 8.3) и ориентируясь на максимальное девиаторное напряжение Мимаса (0.87 МПа), были

оценены максимальные размеры, которые имело пористое малое ледяное тело до того, как оно подверглось гравитационной деформации. Радиус его оценивается как  $R = 465 \times 302$  км, а средний равнообъемный радиус равен  $R_{cp} = 349$  км. Примерно так (рис. 8.6), по-видимому, выглядел Протомимас, пока он в результате гравитационной деформации не превратился в ледяное планетное тело с плотностью, вдвое превышающей первичную плотность, например, характерную для Гипериона. Средний радиус Протомимаса составлял 349 км, что почти в два раза больше настоящего размера.

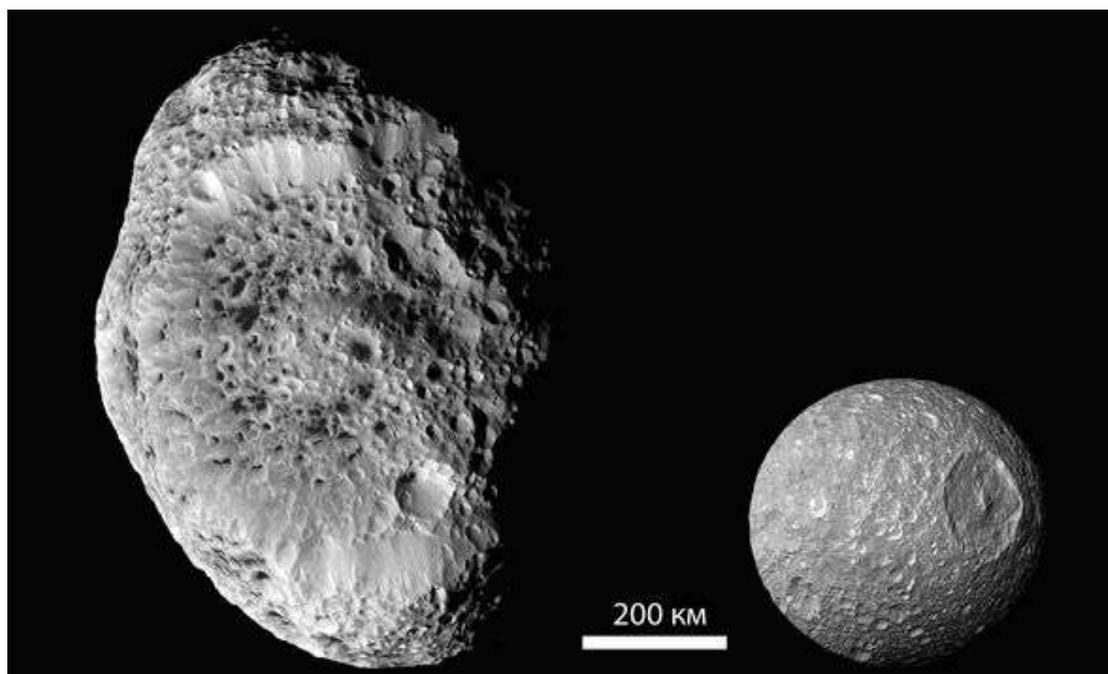


Рис. 8.6 – Протомимас, представленный в соответствующем масштабе изображением Гипериона, и спутник Сатурна Мимас, показанные в одном масштабе.

**Руководитель проекта:**

Слюта Евгений Николаевич, к.г.-м.н., зав. лабораторией геохимии планет, ГЕОХИ РАН,  
[slyuta@mail.ru](mailto:slyuta@mail.ru)

**Состав группы:**

Слюта Евгений Николаевич, к.г.-м.н., зав. лаб., ГЕОХИ РАН,  
Воропаев Сергей Александрович, к.ф.-м.н., с.н.с., ГЕОХИ РАН.

**Публикация:**

Voropaev S.A. Phobos evolution under the tidal action of Mars. The 7<sup>th</sup> Moscow Solar System Symposium. Moscow, 2016. Abstr. P. 170-171.

## **Проект 8.8 Изучение процессов формирования и эволюции поверхности, а также состава ядра кометы 67P Чурюмова-Герасименко по данным миссии «Розетта» в сравнении с таковыми ядер других комет**

### **Аннотация.**

Рассмотрены детали морфологии и оценки прочности материала ядра кометы 67P и перекрывающего его рыхлого материала. Предложена модель механизма кратковременных газопылевых выбросов из трещин растяжения в ядре. Анализ опубликованных в 2016 г. результатов определения состава отлетающих от ядра 67P газов и пыли в постперигельный период инструментами КА «Розетта» позволил выявить особенности состава кометы, а также ограничения на физические модели образования и термической эволюции комет. Продолжена работа по проблеме соответствия экспериментальных данных по составу вещества комы веществу ядер комет.

Работа проводилась по двум направлениям:

1) Анализ изображений поверхности ядра кометы 67P, дополненный анализом прочности материала ядра и разработкой модели механизма наблюдавшихся кратковременных газопылевых выбросов из трещин в ядре, 2) Изучение состава отлетающих от ядра газов и пыли.

### **Тема 8.8.1 Изучение изображений поверхности ядра кометы 67P и сопутствующий анализ свойств материала ядра**

Путем анализа геометрии крутых уступов, где на поверхность выходит консолидированный материал ядра кометы, нами, совместно с коллегами из Макс-Планк института по изучению Солнечной системы, г. Геттинген, Германия, оценена прочность этого материала на разрыв – от 1.5 до 100 Па, на сдвиг от  $\sim 13$  до  $\geq 30$  Па, а также на сжатие от 30 до 150 Па и, возможно, до 1.5 кПа (Базилевский и др., 2016а,б). С учетом зависимости результатов измерений от размеров измеряемого объекта, эти значения прочности близки к таковым для сухого свежеснежного снега при  $-10^\circ\text{C}$ . Прочность рыхлого материала поверхности на сжатие в месте первого контакта аппарата Philae с ядром была оценена Biele et al. (2015) по измерениям динамики удара по поверхности опорами аппарата и геометрии ямок от удара как 1–3 кПа. Нами рассмотрено влияние на эти оценки скорости деформации. Поскольку последняя была на 4 порядка выше таковой в типичных земных лабораторных и полевых измерениях, это должно было приводить к завышению оценок прочности примерно на порядок.

Анализ снимков ядра кометы позволил выявить «зернистую» текстуру консолидированного материала ядра, что, по-видимому, свидетельствует о том, что составляющие этот материал «зерна» различаются по устойчивости к сублимационному выветриванию (**Базилевский и др., 2016б,с**). Эта зернистость прослежена на размерах от десятков метров до сантиметров и далее до субмиллиметровых размеров и носит иерархический характер. Такой характер сложения вещества ядра накладывает ограничения на процессы его формирования.

На снимках ядра кометы нами обнаружены пикообразные выступы, возвышающиеся над окружающей поверхностью на десятки-первые сотни метров, вероятно, сложенные материалом относительно устойчивым к сублимационному выветриванию (**Krasilnikov et al., 2016**). Выполнен предварительный анализ этих образований. В журнал *Planetary and Space Science* послана статья.

На снимках ядра кометы несколько раз наблюдались кратковременные (порядка одного часа) струи газопылевых выбросов, не похожие на обычную газопылевую активность освещенных Солнцем кометных ядер. В одном случае удалось установить, что в районе их источника есть система трещин растяжения, размеры которых позволяют считать, что трещины уходят на глубины большие, чем суточная и сезонная тепловая волна. Нами совместно с коллегами из Макс-Планк института по изучению Солнечной системы был предложен механизм, объясняющий эти кратковременные выбросы внедрением трещин растяжения в участки недр ядра, содержащие льды очень летучих веществ ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ) и проведены соответствующие расчеты, подтверждающие эту возможность (**Skorov et al., 2016**).

### **Тема 8.8.2 Изучение состава отлетающих от ядра газов и пыли**

За истекший год был опубликован ряд важных результатов наблюдений кометы 67P в постперигельный период (после прохождения перигелия 13 августа 2015 года), когда максимальному освещению подвергалась южная полушарие кометы. При прохождении перигелия происходило частичное разрушение внешних обедненных летучими слоями ядра кометы и обнажение внутренних, богатых летучими слоями.

1. Измерения с помощью инструмента VIRTIS-H показали увеличение содержаний компонентов комы до максимальных значений через 1-2 недели после прохождения точки перигелия (Snodgrass et al., 2016, Bockelée-Morvan et al., 2016), что объясняется тепловой инерцией внешнего слоя вещества ядра кометы и является важной характеристикой его теплофизических свойств, необходимых при моделировании термической эволюции кометных ядер. Такое моделирование недавно нами начато (**Русол, Дорофеева, 2016**).

2. Результаты измерений с помощью инструмента VIRTIS-H содержаний в коме кометы  $\text{CO}_2$ ,  $^{13}\text{CO}_2$ , OCS и  $\text{CH}_4$  относительно  $\text{H}_2\text{O}$  показали их значительное увеличение постперигельный

период. Так, если с 8 июля по 10 августа относительные содержания  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{OCS}$  составляли 14, 0.23 и 0.12% соответственно, то в период с 16 августа по 27 сентября они в среднем достигали значений 32%, 0,47% и 0,18% (Bockelée-Morvan et al., 2016). Отметим, что полученное значение мольного отношения  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  является самым высоким из наблюдаемых у кометных ком. Ранее наибольшее  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O} \sim 10\text{-}20\%$  было установлено у гиперактивной кометы 103P/Hartley 2. Полученные значения интерпретируются авторами как представительные для вещества кометы 67P, в отличие от доперигельных значений, когда освещалось северное полушарие кометы и значения  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  определялось в интервале 1-3% (Bockelée-Morvan et al. 2015; Migliorini et al. 2016). Полученные результаты доказывают актуальность проблемы интерпретации экспериментальных данных по составу вещества комы и их соответствия веществу ядер комет, рассмотренных в частности нами в (Дорофеева, 2016а, 2016б).

3. Выявлена не только крупномасштабная гетерогенность вещества кометы 67P, которая отмечалась и ранее, например, для кометы 103P/Hartley 2 (Fougere et al., 2013), но и мелкомасштабная, на шкале сотен метров (Ciarletti et al., 2016). Это обстоятельство является весьма важным ограничением для физических моделей образования ядер комет, которые начали разрабатываться в самое последнее время (Davidsson et al., 2016).

4. При анализе состава  $\sim 200$  твердых частиц комы 67P с помощью инструмента COSIMA, в двух из них были идентифицированы твердые высокомолекулярные органические соединения, аналогичные найденным в углистых хондритах (Fray et al., 2016). Подобные органические вещества были найдены ранее в пылевой компоненте кометы 1P/Halley (Kissel et al., 1986; Kissel, Krueger, 1987), но из-за высоких относительных скоростей пыли и приемника ( $> 60$  км/с) соединения были в значительной мере разрушены. Этот факт доказывает уникальность эксперимента «Розетта», а полученные результаты помогут оценить возможную роль комет при зарождении жизни на телах Солнечной системы.

#### **Руководитель проекта:**

Базилевский Александр Тихонович, доктор геол.-мин. наук, главный научный сотрудник ГЕОХИ РАН, [atbas@geokhi.ru](mailto:atbas@geokhi.ru)

#### **Состав группы:**

- 1) Ведущий научный сотрудник ГЕОХИ РАН, доктор хим. наук, В.А. Дорофеева;
- 2) Старший научный сотрудник Института динамики геосфер РАН, кандидат физ.-мат. наук, Н.А. Артемьева;
- 3) Старший научный сотрудник ГЕОХИ РАН, кандидат геол.-мин. наук Н.Э. Демидов;

4) Младший научный сотрудник ГЕОХИ РАН, С.С. Красильников.

### **Литература:**

Bockelée-Morvan et al. 2016. MNRAS. V. 462. Suppl 1, S170-S183.

Bockelée-Morvan et al. 2015. A&A, 583, A6

Ciarletti et al. 2016. 47th LPSC. No. 1903, p.2722.

Davidsson et al. 2016. A&A, 592. A63, 30 pp.

Fougere et al. 2013. Icarus, 225, 688–702

Fray et al. 2016. Nature. V. 538. Is.7623. 72-74

Migliorini et al. 2016. A&A, 589. A45. 30 pp.

Snodgrass et al., 2016. A&A, 588. A80. 12 pp.

### **Публикации:**

1. Базилевский А.Т., Красильников С.С., Ширяев А.А., Маль У., Келлер Х.У., Скоров Ю.В., Моттола С., Хвид Ш.Ф., 2016а. Оценка прочности материала ядра кометы 67P Чурюмова–Герасименко. *Астрономический вестник*. Т. 50, № 4, с. 241–251. DOI: 10.7868/S0320930X16040010.

2. Базилевский А.Т., Красильников С.С., Скрипник А.Я., Лоренц К.А., Ширяев А.А., Маль У., Келлер Х.У., Скоров Ю.В., Моттола С., Хвид С.Ф. 2016б. Прочность и текстура материала ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко по результатам миссии «Розетта». *Труды ВЕСЭМПГ-2016*, 80-81.

3. Skorov Yu.V. , Rezac L. , Hartogh P. , Bazilevsky A.T. and Keller H.U., 2016. A model of short-lived outbursts on the 67P from fractured terrains. *Astronomy & Astrophysics*, V. 593. A76. 10 pp. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201628365>.

4. Basilevsky A.T., Krasilnikov S.S., Mall U., Keller H.U., Skorov Yu.V., Hviid S.F. 2016. Estimation of strength of the 67P Churyumov-Perasimenko comet nucleus material. 47th Lunar and Planetary Science Conference, March 21-25, 2016. Woodlands, USA, abs. 1215.

5. Basilevsky A.T., Mall U., Keller H.U., Skorov Yu.V., Hviid S.F., Mottola S., Krasilnikov S.S. 2016с. Graininess of the material of the comet 67P nucleus as deduced from analysis of the Rosetta NavCam, Osiris and ROLIS images. The 7th Moscow Solar System Symposium, Abstract 7MS3-SB-06.

6. Krasilnikov S.S., Basilevsky A.T., Mall U., Skorov Yu.V., Keller H.U., S. and Hviid S.F., 2016. Pinnacles on the 67P/Churyumov-Gerasimenko comet nucleus The 7th Moscow Solar System Symposium, Abstract 7MS3-SB-05.

7. Дорофеева В.А. Проблемы интерпретации экспериментальных данных по составу вещества комет. В сборнике: [Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии \(ВЕСЭМПГ-2016\)](#). 2016. С. 86-87. (а).
8. Русол А.В., Дорофеева В.А. Термическая модель поверхности кометы: на примере ядра кометы 67P/Чурюмова-Герасименко. В сб.: [Труды Всероссийского ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии \(ВЕСЭМПГ-2016\)](#). 2016. С. 110-111
- Дорофеева В.А. Кометное вещество и его роль в формировании регулярных спутников Юпитера и Сатурна. 2016. V Бредихинские чтения. Труды международной конференции. М. Янус-К. с.57-81. (б)

### **Проект 8.9 Динамика пыли на безатмосферных телах. Методы исследований**

#### **Аннотация.**

Показано, что частицы лунной пыли в диапазоне нанометров могут подниматься с поверхности Луны в результате тепловых флуктуаций. Агрессивные свойства лунных наночастиц могут быть связаны с их вращением (скорость вращения частиц наноразмеров может достигать миллионы оборотов в секунду). Адгезия пылевых частиц на поверхность космических аппаратов может быть результатом их загрязнений, а не электростатических зарядов.

Среди особенностей поведения лунной пыли две кажутся наиболее трудно объяснимыми. Во-первых, телевизионные камеры каждого из лунных посадочных аппаратов Surveyor 5, 6, and 7 регистрировали локальное свечение над поверхностью Луны в районе терминатора сразу после захода солнца. В последующих работах было показано, что это приповерхностное свечение обязано рассеянию солнечного света на разреженных облаках пылинок, загадочным образом парящих на высотах порядка метра. Во-вторых, астронавтами экспедиции Apollo-17, высадившимися на поверхность Луны, было сделано заключение, что лунная пыль имеет сильный разрушительный эффект на различные материалы. В частности, астронавт Harrison Schmitt написал, что после посещения лунной поверхности на каждом из шести космических аппаратов Apollo, были нарушены вакуумные уплотнения кабин аппаратов. До сих пор нет четкого понимания механизмов этих эффектов.

Проект ставил своей задачей попытку проанализировать с единой точки зрения две группы важных проблем, которые давно известны, но в настоящее время считаются не связанными друг с другом.

В первую группу входят:

- левитация пыли на малых высотах над поверхностью Луны;
- исключительно сильное разрушительное воздействие этой пыли.

Ко второй группе относятся:

- крайне высокая адгезия лунной пыли к скафандрам, приборам и другим артефактам;
- практически неизбежное возникновение в земных условиях низкоразмерных структур из слипающихся наночастиц в мелкодисперсных порошках.

Все эти четыре проблемы представляются связанными с явлениями, возникающими при превращении твердого тела в газ не в результате плавления и последующего испарения (или в результате прямой возгонки), а в результате раздробления тела на все более и более мелкие частички.

По мере того, как пылевые частицы в результате выветривания делаются мельче, в их поведении становятся заметными эффекты, связанные с тепловыми флуктуациями (проблемы первой группы). Процессы слипания порошинок (аналог конденсации) определяются конкуренцией между тепловыми флуктуациями и силами притяжения между ними. С этой точки зрения в пыли, возникшей и существующей в лунном вакууме, превалируют флуктуационные эффекты, а в порошках, изготовленных в земных условиях или контактирующих с загрязненными артефактами, на первый план выходят силы притяжения между порошинками.

**Руководитель проекта:**

Захаров Александр Валентинович, ИКИ РАН, zakharov@iki.rssi.ru

**Публикация:**

Е.В. Розенфельд, А.В. Королев, А.В. Захаров, Lunar Nanodust: Is it a Borderland between Powder and Gas?, Advance in Space Research, vol.58, pp. 560-563, 20169.

## НАПРАВЛЕНИЕ 9. Методы исследований Солнечной системы

Кураторы направления: Герасимов М.В. (ИКИ), Боровин Г.К. (ИПМ), Гальченко В.Ф. (ИНМИ).

9.1	Проект 9.1: Применение НПВО спектроскопии для выявления биомаркеров в составе инопланетного грунта и льда	ИКИ РАН	Григорьев А.В., Воробьева Е.А.
9.2	Проект 9.2: Методика и аппаратура нового поколения, предназначенная для выявления биомассы земного типа на космических объектах Солнечной Системы	ИКИ РАН	Манагадзе Г.Г.
9.3	Проект 9.3: Антенная диагностика неравновесных электромагнитных излучений и параметров околоземной плазмы и плазмы солнечного ветра	ИПФ РАН	Чугунов Ю.В.
9.4	Проект 9.4: Создание архива данных радиофизических экспериментов и программного обеспечения для анализа результатов радиопросвечивания и радиолокации.	ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН	Гаврик А.Л., Юшкова О.В.

### Проект 9.1 Применение НПВО спектроскопии для выявления биомаркеров в составе инопланетного грунта и льда

#### Тема 9.1.1 Устойчивость биоформ и биомаркеров в космической и инопланетной среде

##### Аннотация.

Проведено исследование устойчивости критериев жизнеспособности земных микроорганизмов и динамики биомаркеров в условиях, моделирующих марсианский грунт и лед (низкая температура, радиация, окислители, низкое давление).

Задачами 2016 г. было: 1) Оценка устойчивости микробных сообществ экстремальных экосистем к воздействию облучения высокоэнергичными электронами в высоких дозах; 2) Сравнение устойчивости микроорганизмов *in vitro* и *in situ*; 3) Исследование устойчивости к электронам почвенных белков-ферментов как перспективных биомаркеров.

## Основные результаты.

1. Показано присутствие жизнеспособных бактерий в грунте после облучения высокоэнергичными электронами дозами 10 кГр, 100 кГр, 1 МГр при температуре  $T = -130^{\circ}\text{C}$  и давлении  $P = 8-9 \times 10^{-3}$  мм рт. ст.

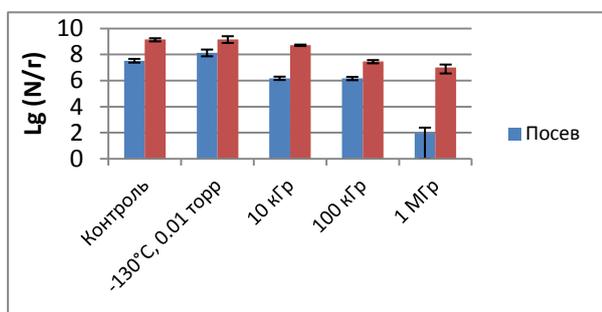


Рис. 9.1 – Содержание бактерий в аридной почве SN2 до и после облучения высокоэнергичными электронами (синий – репродуцирующие клетки, красный – общее содержание жизнеспособных клеток).

Культуры бактерий *in vitro* проявляют значительно более высокую чувствительность (3-5 порядков) к воздействию электронов по сравнению с бактериальными сообществами в образцах *in situ*.

Ингибирующее воздействие электронов превышает воздействие гамма-радиации в тех же дозах.

Почвенные ферменты показали высокую устойчивость к облучению электронами дозой до 100 кГр, сохранив 90-100% исходной активности. Ферменты могут быть перспективными маркерами в астробиологических исследованиях.

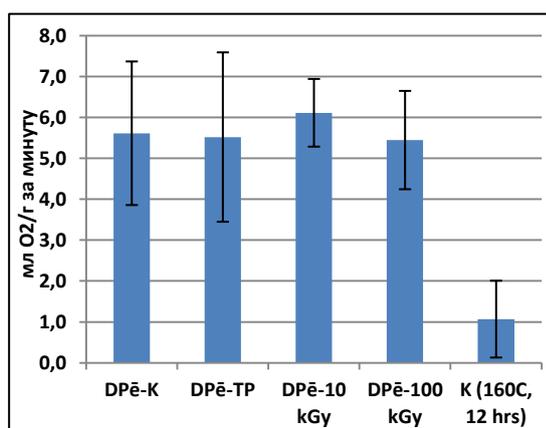


Рис. 9.2 – Влияние облучения электронами, низкого давления и низкой температуры на каталазную активность почвы (д/п).

Задачи 2016 г. выполнены полностью. Планируется в 2017 г.: молекулярно-генетический и цитоморфологический анализ устойчивых микроорганизмов, исследование возможных постэффектов высоких доз.

**Руководитель проекта:**

Воробьева Елена Алексеевна, ИКИ РАН, к.б.н., инж. тел. +7 915-495-5336,  
[esautin@yandex.ru](mailto:esautin@yandex.ru)

**Состав группы:**

Воробьева Елена Алексеевна, Павлов Анатолий Константинович (ФТИ РАН им. А.Ф. Иоффе); Чепцов Владимир Сергеевич (МГУ, ф-т почвоведения).

**Публикации:**

1. Чепцов В.С., Воробьева Е.А., Тамбиев А.Х., Павлов А.К., Вдовина М.А., Ломасов В.Н., Звягинцев Д.Г. 2016. Влияние гамма-излучения, низкого давления и низкой температуры на активность каталазы и реакционную способность экзометаболитов *Kocuria rosea* и *Arthrobacter polychromogenes*. *Современные проблемы науки и образования*, № 5, с. 25133-25133.
2. Чепцов В.С., Воробьева Е.А., Осипов Г.А., Булат С.А., Горленко М.В., Манучарова Н.А., Павлов А.К., Вдовина М.А., Ломасов В.Н. Реголит марса как потенциальная среда сохранения микробных экосистем. 2016. В сб. *Материалы конференции "Актуальные проблемы радиобиологии и астробиологии. Генетические и эпигенетические эффекты ионизирующих излучений"*, Изд. ОИЯИ. Дубна, с. 136-142
3. Чепцов В.С., Воробьева Е.А., Осипов Г.А., Булат С.А., Горленко М.В., Манучарова Н.А., Павлов А.К., Вдовина М.А., Ломасов В.Н. Пределы устойчивости микробных сообществ в экстремальных местообитаниях к воздействию ионизирующих излучений. 2016. В сб. *Материалы конференции "Актуальные проблемы радиобиологии и астробиологии. Генетические и эпигенетические эффекты ионизирующих излучений"*. Изд. ОИЯИ, Дубна, с. 133-135
4. Kruchkova M.O., Ivanova A.E., Vorobyova E.A., Cheptsov V.S., Pavlov A.K., Lomasov V.N. Can the Fungal Communities of the Earth Deserts Survive in Simulated Martian Conditions? 2016. In: *The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S3)*, 10-14 Oktober 2016. Ed. IKI PAS, Moscow, pp. 272-ab-273-ab

5. Cheptsov V.S., Vorobyova E.A., Tambiev A.H., Pavlov A.K., Vdovina M.A., Lomasov V.N. Influence of Gamma Irradiation in Simulated Martian Conditions on Catalase Activity and Reactivity of Exometabolites of *Kocuria rosea* and *Arthrobacter polychromogenes*. 2016. In: *The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S3)*, 10-14 Oktober 2016, ed. IKI PAS, Moscow, pp. 262-ab-264-ab
6. Cheptsov V.S., Vorobyova E.A., Bulat S.A. Limits of Resistance of Soil Microbial Communities to Impact of Gamma Radiation. 2016. In: *The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S3)*, 10-14 Oktober 2016, ed. IKI PAS, Moscow, pp. 265-ab-267-ab
7. Vorobyova E.A., Cheptsov V.S., Pavlov A.K., Vdovina M.A., Lomasov V.N., Osipov G.A., Bulat S.A., Dol'nikov G.G., Shashkova I.A., Kuznetsov I.A., Zakharov A.V. Life in the Alien Environments: Simulation of the Physical Parameters of Extraterrestrial Habitats on the Earth Analog Environments. 2016. In: *The Seventh Moscow Solar System Symposium (7M-S3)*. Ed. IKI RAS, Moscow, p. 245-ab

### **Тема 9.1.2 Применение НПВО-спектроскопии для выявления биомаркеров в составе инопланетного грунта и льда**

#### **Аннотация.**

В течение 2016 г. проводилась подготовка экспериментальной базы для будущих лабораторных измерений НПВО-спектров биологических объектов в специальной вакуумной камере.

Проведены работы по адаптации лабораторного Фурье-спектрометра АФ-3 для работы внутри вакуумной камеры в атмосфере CO<sub>2</sub>. Сдана в печать статья, в которой проведено обобщение и углублённый анализ проведенных ранее исследований по применению НПВО-спектроскопии в астробиологических исследованиях на посадочных аппаратах.

При измерениях спектров в атмосфере Земли возникают значительные помехи от атмосферных газов, имеющих полосы поглощения в тех же областях электромагнитного спектра, что и биологические объекты. Особенно мешают пары воды, перекрывающие важнейшую био-полосу белков – «Амид-2».

Желательно производить измерения в вакуумируемом Фурье-спектрометре, но его стоимость не позволяет планировать такие исследования. Имеющийся же в нашем распоряжении лабораторный Фурье-спектрометр АФ-3 приспособлен для работы только в атмосфере, в вакууме его электроника перегревается из-за отсутствия конвекции.

Поэтому был предложен вариант работы АФ-3 в атмосфере углекислого газа, который мешает значительно меньше паров воды. АФ-3 помещается в вакуумную камеру, камера откачивается, но АФ-3 включается не сразу, а после заполнения камеры сухим углекислым газом, обеспечивающим теплоотвод от электронных плат и механизмов.

Проводились подготовительные работы по адаптации лабораторного Фурье-спектрометра АФ-3 для работы внутри вакуумной камеры.

Такая методика позволяет, в частности, имитировать работу в условиях атмосферы Марса.

**Руководитель темы:**

гл. спец. Григорьев А.В., ИКИ РАН. (495)333-4455, (963)757-9112. [avgrim@gmail.com](mailto:avgrim@gmail.com)

**Состав группы:**

Григорьев А.В., Воробьева Е.А., Чепцов В.С.

**Публикация:**

Григорьев А.В., Воробьева Е.А., Чепцов В.С. «Применение НПВО-спектроскопии в астробиологических исследованиях на планетных посадочных аппаратах», «Вестник МГУ» (серия Почвоведение), сдано в печать.

**Проект 9.2 Нарушения зеркальной симметрии энантиомеров в процессе их синтеза в локальных хиральных физических полях плазменного факела метеоритного удара**

**Аннотация.**

За отчётный период были обработаны результаты прямого ударного эксперимента воспроизводящего в условиях лаборатории процессы сопутствующие падению метеорита.

Было показано, что свойства плазменного факела обеспечивают:

- синтез протеиновых аминокислот – глицина, аланина и серина;
- нарушение зеркальной симметрии аланина с превышением содержания L-изомера над D не менее 1,68, и знаком полярности нарушения симметрии, совпадающим с биоорганическим;
- синтез ОС с массами ~1300 а.е.м., содержащих фрагменты пептидов с массами ~300 а.е.м. состоящего из глицина, аланина и серина;
- сборку и упорядочивание сложных молекулярных структур.

Эти результаты были получены впервые и свидетельствовали, что выбор L-энантиомеров для образования протеинов и ферментов в природе был не случайным, а определялся локальными хиральными плазменными полями факела.

В плазменном факеле могли возникать «диссипативные структуры» (аналогичные химическим структурам Пригожина) которые обеспечивали усложнение молекулярных структур при скорости сборки  $10^8$ - $10^9$  раз выше по сравнению с химической средой.

**Руководитель темы:**

Манагадзе Георгий Георгиевич, ИКИ РАН, managa@iki.rssi.ru

**Публикация:**

George G. Managadze, Michael H. Engel, Stephanie Getty, Peter Wurz, William B. Brinckerhoff, Anatoly G. Shokolov, Gennady V. Sholin, Sergey A. Terent'ev, Alexander E. Chumikov, Alexander S. Skalkin, Vladimir D. Blank, Vyacheslav M. Prokhorov, Nina G. Managadze, Konstantin A. Luchnikov. Excess of L-alanine in amino acids synthesized in a plasma torch generated by a hypervelocity meteorite impact reproduced in the laboratory. Planetary and Space Science 131 (2016) 70–78.

### **9.3 Антенная диагностика неравновесных электромагнитных излучений и параметров околоземной плазмы и плазмы солнечного ветра**

**Аннотация.**

Изучены вопросы регистрации хоровых излучений в магнитосфере Земли антеннами на спутниках и интерпретации полученных данных.

Были исследованы различные аспекты регистрации хоровых излучений в магнитосфере Земли антеннами на спутниках и интерпретации полученных данных. Было получено линейное интегральное уравнение, которое связывает неизвестное распределение заряда вдоль «эффективного» диполя, моделирующего область генерации хоровых излучений, и заданную функцию отклика (по напряжению) приемной антенны. Это уравнение следует из построенной ранее в квазистатическом приближении теории резонансного отклика короткой (в масштабах длины электромагнитной волны в плазме) приемной антенны в анизотропной плазме, которая позволила, в частности, проанализировать (на этапе 2015 г.) шумовые и спорадические излучения, регистрируемые на спутниках «Cluster II» в плазме

солнечного ветра в окрестности плазменной частоты электронов. Решение полученного уравнения проводилось численно методом моментов, т. е. путем его сведения к системе линейных алгебраических уравнений. В результате было показано, что пространственный масштаб локализации найденного распределения заряда в большинстве типичных для магнитосферы условий составляет величину порядка 1 км, что как минимум на порядок величины меньше длины электромагнитной волны в плазме. Тем самым было обосновано априорное использование приближения квазистатики. Следует отметить, что хоровые излучения обычно распространяются квазипродольно геомагнитному полю, однако недавние наблюдения, например, на спутниках THEMIS, показали, что возможно распространение и вдоль резонансного конуса в нижнегибридном (свистовом) диапазоне частот. Последнему случаю и соответствует проведенный анализ.

**Руководители темы:**

Чугунов Юрий Владимирович (скончался 24.08.2016) — chugun@appl.sci-nnov.ru

Губченко Владимир Михайлович (с 24.08.2016) — ua3thw@appl.sci-nnov.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПФ РАН).

**Состав группы:**

Грач Вероника Савельевна, Пасманик Дмитрий Львович, Широков Евгений Алексеевич.

**Публикации:**

1. Чугунов Ю. В., Широков Е. А. Квазистатический диполь в магнитоактивной плазме в резонансной полосе частот. Отклик приемной антенны и распределение заряда на антенном проводе // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 3. С. 209—216.

2. Губченко В. М. О датчике для измерения электромагнитной добротности потока солнечного ветра // 11-я ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе» (Москва, 15—19 февраля 2016 г.): тезисы докладов. Москва, 2016. С. 147—148.

## **Проект 9.4 Создание архива данных радиофизических экспериментов и программного обеспечения для анализа результатов радиопросвечивания и радиолокации**

### **Аннотация.**

На основе информации о радиофизических экспериментах, подготовленной для архива «Solar System Data Archive», по данным радиолокации определена отражательная способность поверхности астероида "1991 JX". По данным радиопросвечивания со спутников "Венера-15,-16" на Венере выявлены квазигармонические колебания разных масштабов в области границы атмосфера-ионосфера, обусловленные распространением внутренних гравитационных волн.

### **Руководители группы:**

А.Л. Гаврик, внс ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, к.ф.-м.н., [alg248@ire216.msk.su](mailto:alg248@ire216.msk.su)

О.В. Юшкова, снс ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, к.ф.-м.н., [o.v.y@mail.ru](mailto:o.v.y@mail.ru)

### **Состав группы:**

Смыслов А.А. студент МИРЭА, Бондаренко М.И. инженер ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, З. Анненков М.А., аспирант МГУ / ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, Гаврик Ю.А. Senior Front-End Engineer, Apple Inc (USA), к.ф.-м.н.

### **Публикации:**

1. Ю.А. Гаврик, А.Л. Гаврик, А.А. Смыслов. Распределение радиояркости поверхности астероида Голевка по данным радиолокации // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. №12. С. 1168-1175.
2. Козлов В.Н., Гаврик А.Л., Головин С.С., Коротун В.М. Анализ результатов распознавания объектов по их радиолокационным портретам с учетом рефракционных ошибок распространения радиоволн в атмосфере//Успехи современной радиоэлектроники 2016. №9. С.54-59. <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr4&art=18375>
3. Юшкова О.В., Юшков В.В. Угол Брюстера: определение комплексной диэлектрической проницаемости грунта Луны в режиме бистатической радиолокации // Известия ВУЗов: Радиофизика. Направлена в печать.
4. А.Л. Гаврик, Я.А. Илюшин, Т.Ф. Копнина, А.А. Смыслов. Дифракционные эффекты при радиопросвечивании ионосферы / В 87 VI Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред /

Материалы VII Всероссийской научной конференции. –Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2016. –464 с. ISSN 2304-0297 (CD-ROM). С. 411-418 [http://www.mivlgu.ru/conf/armand2016/rmdzs-2016/pdf/S5\\_2.pdf](http://www.mivlgu.ru/conf/armand2016/rmdzs-2016/pdf/S5_2.pdf)

5. Я.А. Илюшин, А.Л. Гаврик, В.И. Захаров. Комплексные методики регионального мониторинга атмосферы на основе спутникового и наземного приема навигационных сигналов / XXV Всероссийская открытая конференция «Распространение радиоволн». РРВ-25. 4-9 июля 2016 года, Томск. Труды конференции. Т. 1. С. 247-249. ISSN 0135-3748. [http://symp.iao.ru/files/symp/rwp/25/ru/abstr\\_7913.pdf](http://symp.iao.ru/files/symp/rwp/25/ru/abstr_7913.pdf)

## НАПРАВЛЕНИЕ 10. ЭКЗОПЛАНЕТЫ

10.1	Проект 10.1: Динамические процессы в атмосферах горячих экзопланет вызванные их магнитной проводимостью	ИКИ РАН	Петросян А.С., Родин А.В.
10.2	Проект 10.2: Изучение эволюции планетных систем, астероидов, кратных звезд, поиск и исследование экзопланет	ГАО РАН	Шевченко И.И., Девяткин А.В.

### Проект 10.1 Динамические процессы в атмосферах горячих экзопланет, вызванные их магнитной проводимостью

#### Аннотация 10.1.1.

Составлены новые уравнения крупномасштабной динамики магнитоактивных атмосфер экзопланет, захваченных приливами несущей звезды.

Для описания магнитоактивных атмосфер экзопланет, захваченных приливами несущей звезды, используются уравнения магнитной гидродинамики в приближении мелкой воды. В работе получены новые магнитогидродинамические уравнения мелкой воды для течений тонкого вращающегося слоя плазмы со свободной границей в поле силы тяжести во внешнем вертикальном магнитном поле.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h v_x}{\partial x} + \frac{\partial h v_y}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial h v_y}{\partial t} + \frac{\partial (h v_x^2 - h B_x^2)}{\partial x} + g h \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial (h v_x v_y - h B_x B_y)}{\partial y} + B_0 B_x - f h v_y = 0 \\ \frac{\partial h v_x}{\partial t} + \frac{\partial (h v_x v_y - h B_x B_y)}{\partial x} + \frac{\partial (h v_y^2 - h B_y^2)}{\partial y} + g h \frac{\partial h}{\partial y} + B_0 B_y + f h v_x = 0 \\ \frac{\partial h B_x}{\partial t} + \frac{\partial (h B_x v_y - h B_y v_x)}{\partial y} + v_x B_0 = 0 \\ \frac{\partial h B_y}{\partial t} + \frac{\partial (h B_y v_x - h B_x v_y)}{\partial x} + v_y B_0 = 0 \\ \frac{\partial B_z}{\partial t} + B_0 \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) = 0 \\ \frac{\partial h B_x}{\partial x} + \frac{\partial h B_y}{\partial y} + B_z = 0 \end{array} \right.$$

Первые пять уравнений системы записаны относительно переменных  $h$  – высоты слоя,  $v_x, v_y$  – средних по высоте горизонтальных скоростей,  $B_x, B_y$  – средних по высоте слоя горизонтальных магнитных полей;  $g$  – ускорение свободного падения,  $f$  – параметр

Кориолиса,  $B_0$  – внешнее вертикальное магнитное поле. Полученные уравнения являются результатом интегрирования трехмерных уравнений магнитной гидродинамики вдоль вертикальной координаты при условии гидростатического распределения давления. В случае, когда внешнее вертикальное магнитное поле отсутствует, полученная система уравнений сводится к хорошо известным магнитогидродинамическим уравнениям мелкой воды. В нашем случае уравнение для вертикальной составляющей магнитного поля может быть исключено, и для дальнейшего анализа линейных волн и слабонелинейных взаимодействий достаточно рассматривать упрощенную систему. В традиционном выводе МГД уравнений мелкой воды из полной системы трехмерных уравнений магнитной гидродинамики вертикальная составляющая магнитного поля принимается равной нулю. Отметим, что наличие вертикального магнитного поля приводит к существенным изменениям горизонтальной динамики магнитного поля в приближении мелкой воды. В присутствии внешнего вертикального магнитного поля горизонтальное магнитное не соленоидально. Таким образом, показано, что вертикальные изменения магнитного поля отличны от нуля, и условие бездивергентности содержит вертикальную составляющую. Поэтому, чтобы корректно удовлетворить условию бездивергентности магнитного поля, необходимо учесть уравнение для вертикального изменения магнитного поля. Таким образом, найдено, что магнитное поле является принципиально трехкомпонентным, и каждая из его компонент зависит только от горизонтальных координат. В нашем случае условие бездивергентности выполняется тождественно как следствие уравнений для магнитного поля и используется для задания корректных начальных условий, а также для анализа применимости различных численных методов для решения полученной системы. Уравнение на вертикальную составляющую магнитного поля и уравнение бездивергентности являются важными в МГД приближении мелкой воды во внешнем магнитном поле не только как технические детали, необходимые для получения правильного следствия из условия бездивергентности для приближения мелкой воды, но также они показывают существование вертикальной компоненты магнитного поля, уравнение для которой отделяется от уравнений мелкой воды.

Предложенные в работе новые уравнения магнитной гидродинамики плазмы в приближении мелкой воды во внешнем вертикальном магнитном поле использованы для изучения трехволновых взаимодействий в тонком слое астрофизической плазмы со свободной границей в поле силы тяжести. Показано существование эффектов параметрического усиления и распадных неустойчивостей, найдены их инкременты.

### **Аннотация 10.1.2.**

Предсказаны параметрические неустойчивости волн Пуанкаре в магнитоактивных атмосферах экзопланет, захваченных приливами несущей звезды.

Поведение различных звезд и планет описывается магнитной гидродинамикой тонких слоев планетных атмосфер со свободной границей в поле силы тяжести. Например, динамика атмосфер нейтронных звезд, захваченные приливами экзопланеты с магнитоактивными атмосферами. Для описания таких течений используется магнитогидродинамическое приближение мелкой воды и квазигеострофическое приближение в магнитной гидродинамике. В работе получены новые уравнения магнитной гидродинамики в приближении мелкой воды, описывающие течения тонкого слоя атмосферы (магнитной жидкости) со свободной границей, в однородном поле силы тяжести, во вращающейся системе отсчета, во внешнем вертикальном магнитном поле. Магнитогидродинамические уравнения мелкой воды получены из классических уравнений магнитной гидродинамики несжимаемой плазмы осреднением по высоте в предположении гидростатичности распределения давлений и малости толщины слоя по отношению к характерному горизонтальному линейному размеру задачи. Настоящая работа посвящена изучению слабонелинейных волновых взаимодействий в магнитогидродинамическом приближении мелкой воды.

В линейном приближении система магнитогидродинамических уравнений мелкой воды имеет решения, описывающие магнитогравитационные (или волны Пуанкаре магнитной гидродинамики) волны и магнитоострофические волны. Найдено, что в магнитогидродинамическом приближении мелкой воды в нашем случае появляются дополнительные слагаемые, описывающие в линейном приближении два типа быстрых волн: волны магнито-Пуанкаре и магнитоострофические волны. В работе осуществлено обобщение линейной теории магнитогидродинамических течений мелкой воды на случай волн конечной амплитуды в приближении слабой нелинейности и показано, что закон дисперсии линейных волн во внешнем вертикальном магнитном поле обеспечивает условия синхронизма, необходимые для нелинейных взаимодействий. В отсутствии же внешнего вертикального магнитного поля, исчезают магнитоострофические волны и остаются только гравитационные волны Пуанкаре в гидродинамике нейтральной жидкости в поле силы тяжести со свободной границей.

Мы исследовали взаимное влияние волновых пакетов во вращающейся магнитной гидродинамике мелкой воды. Анализ вида дисперсионных соотношений для обоих мод показал, что возможны несколько видов трехволновых взаимодействий: три магнито-

Пуанкаре волны, три магнитострофические волны, а также межмодовые взаимодействия: две магнито-Пуанкаре волны и магнитострофическая волна, две магнитострофические волны и магнито-Пуанкаре волна. Для описания нелинейного взаимодействия волн использован асимптотический метод многомасштабных разложений. Для всех четырех случаев получены нелинейные уравнения взаимодействия амплитуд волн. Анализ полученных нелинейных уравнений, описывающих трехволновые взаимодействия, показал существование двух типов неустойчивостей: распадные неустойчивости и параметрическое усиление волн. Найдено, что существуют следующие четыре типа распадных неустойчивостей: магнито-Пуанкаре волна распадается на две магнито-Пуанкаре волны, магнитострофическая волна распадается на две магнитострофические волны, магнито-Пуанкаре волна распадается на одну магнито-Пуанкаре волну и одну магнитострофическую, магнитострофическая волна распадается на одну магнитострофическую и одну магнито-Пуанкаре волну. Получены инкременты найденных распадных неустойчивостей. Исследованы также следующие четыре механизма параметрического усиления волн: параметрическое усиление магнито-Пуанкаре волн, параметрическое усиление магнитострофических волн, а также усиление магнито-Пуанкаре волны в поле магнитострофической и усиление магнитострофической волны в поле магнито-Пуанкаре волны. Для всех видов неустойчивостей найдены коэффициенты параметрического усиления.

### **Аннотация 10.1.3.**

Точные решения уравнений динамики магнитоактивных атмосфер экзопланет с учетом эффектов сжимаемости.

В работе осуществлено развитие классической теории мелкой воды на случай нелинейных течений тонкого сжимаемого слоя планетной атмосферы со свободной границей в поле силы тяжести в магнитогидродинамическом приближении. Нелинейная динамика таких течений описывает атмосферную динамику экзопланет, захваченных приливами ведущей звезды, описывается полной системой магнитной гидродинамики сжимаемой жидкости на всех масштабах, не допускает аналитического исследования, являясь сложной задачей для компьютерного моделирования даже в несжимаемом приближении. В таких случаях требуется развитие упрощенных моделей, допускающих аналитическое рассмотрение и численное исследование. В работе получена система магнитогидродинамических уравнений сжимаемой плазмы в приближении мелкой воды для вращающихся течений над границей произвольной формы из полной системы магнитогидродинамических

уравнений для сжимаемой жидкости в предположении гидростатичности распределения давления и малости толщины слоя по отношению к характерному линейному размеру задачи путем усреднения по высоте слоя. В результате в этом приближении фильтруются звуковые волны и учитывается зависимость плотности от давления на крупных масштабах, описывающая эффекты статической сжимаемости по сравнению с несжимаемым случаем. Полученная система квазилинейных гиперболических уравнений допускает полный аналитический анализ простых волн и решение задачи распада произвольного разрыва в простейшем варианте невращающихся течений.

Полученные в работе уравнения мелкой воды сжимаемой атмосферы планеты существенно отличаются и естественным образом переходят в уравнения в несжимаемом приближении. В классической магнитогидродинамической теории мелкой воды для несжимаемой жидкости физическими переменными являются высота свободной поверхности, усредненные по глубине горизонтальные скорости и усредненные горизонтальные составляющие магнитного поля. В этой теории уравнение для высоты свободной поверхности играет роль закона сохранения массы, а сама высота свободной поверхности в силу постоянства плотности жидкости во всем объеме является массой столба жидкости. Показано, что в нашем случае сжимаемой атмосферы в магнитогидродинамическом приближении мелкой воды массой столба газа является произведение высоты свободной поверхности на среднюю по высоте плотность атмосферы. Как следствие в полученных в работе уравнениях появляется новая переменная, определяющая закон сохранения массы и однозначно связанная с высотой свободной поверхности. Таким образом, при наличии эффектов крупномасштабной сжимаемости, закон сохранения массы формулируется для переменной, нетривиально зависящей от формы подстилающей поверхности, характерного вертикального масштаба течения и масштаба высот, на котором вариация плотности становится существенной. Как следствие перечисленные физические характеристики течения и форма подстилающей поверхности модифицируют закон сохранения импульса.

В простейшем случае отсутствия силы Кориолиса полученная система уравнений допускает полное аналитическое решение в виде простых волн. В работе получены простые автомодельные решения уравнений магнитной гидродинамики в приближении мелкой воды над ровной границей: магнитогравитационные волны разрежения, магнитогравитационные ударные волны и альфвеновские волны. Такие решения являются основополагающими в исследовании нелинейных волновых явлений и позволяют найти точное решение задачи распада произвольного разрыва. Получено точное явное решение начальной задачи с кусочно-постоянными начальными условиями для уравнений

магнитной гидродинамики в приближении сжимаемой мелкой воды на ровной границе, впервые возникшей в газовой динамике (задача Римана). Показано, что решение представляет собой одну из пяти волновых конфигураций: «две магнитогравитационные ударные волны, две альфвеновские волны»; «левая магнитогравитационная ударная волна, правая магнитогравитационная волна разрежения, две альфвеновские волны»; «левая магнитогравитационная волна разрежения, правая магнитогравитационная ударная волна, две альфвеновские волны»; «две магнитогравитационные волны разрежения, две альфвеновские волны»; «две магнитогравитационные волны разрежения, зона вакуума». Найдены условия на начальные данные, при которых реализуется каждая конкретная конфигурация. Несмотря на формальное сходство решений в классическом случае магнитогидродинамических течений несжимаемой жидкости и сжимаемого случая, нелинейная динамика, описываемая полученными решениями, существенно отличается вследствие различия выражений для квадрата скорости распространения слабых возмущений.

**Руководитель темы:**

Петросян Аракел Саркисович, ИКИ РАН, тел.: (495)333-54-78, email: [apetrosy@iki.rssi.ru](mailto:apetrosy@iki.rssi.ru)

**Публикация:**

1. Klimachkov D.A., Petrosyan A.S., Parametric Instabilities in Shallow Water Magnetohydrodynamics Of Astrophysical Plasma in External Magnetic Field, Phys. Lett. A, DOI 10.1016/j.physleta.2016.10.011, 8 p., 2016.
2. Климачков Д.А., Петросян А.С., Нелинейная теория магнитогидродинамических течений сжимаемой жидкости в приближении мелкой воды, ЖЭТФ, Том 150, Вып. 3, стр. 602, 2016
3. Климачков Д.А., Петросян А.С., Нелинейные взаимодействия волн в магнитной гидродинамике астрофизической плазмы в приближении мелкой воды, Журнал экспериментальной и теоретической физики, Том 149, Вып. 5, стр. 965-983, 2016.
4. Климачков Д.А., Петросян А.С., Нелинейная теория магнитогидродинамических течений сжимаемой жидкости в приближении мелкой воды, Журнал экспериментальной и теоретической физики, Том 150, Вып. 3, стр. 602-624, 2016.
5. A.A. Chernyshov, A. S. Petrosyan. Discrete filters for large-eddy simulation of forced compressible magnetohydrodynamic turbulence // PhysicaScripta. 2016. Volume 91, Number 6, p. 064002.

### Тезисы докладов на конференциях:

1. D. Klimachkov, A. Petrosyan, Nonlinear waves in compressible shallow water magnetohydrodynamic equations, Geophysical Research Abstracts Vol. 18, EGU2016-17887, 2016. <http://www.egu2016.eu/>
2. D. Klimachkov, A. Petrosyan, Three-wave interactions in shallow-water magnetohydrodynamics, 11<sup>th</sup> European Fluid Mechanics Conference, 2016. <http://www.efmc11.org/>
3. D. Klimachkov, A. Petrosyan, Parametric instabilities in rotating space and astrophysical plasmas, AGU Fall Meeting, SH31B-2552, 2016. <https://fallmeeting.agu.org/2016/>
4. Rohit Chhiber, Arcadi V. Usmanov, William H Matthaeus, Arakel Petrosyan, Tulasi Parashar, Yan Yang, Melvyn L Goldstein Turbulence Causality-Constrained PANS Model for MHD Simulation of the Solar Wind, AGU Fall Meeting, SH41A-2519, 2016. <https://fallmeeting.agu.org/2016/>
5. S. Safonov, A. Petrosyan Rapid Distortion Theory in astrophysical turbulence, Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-17796, 2016. <http://www.egu2016.eu/>
6. Зиняков Т.А., Петросян А.С. Моделирование двумерной магнито-гидродинамической турбулентности в плазме на  $\beta$ -плоскости, XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, Сборник аннотаций, с. 223, 2016. <http://www.nrcki.ru/pages/main/5509/5512/7358/18106/index.shtml>
7. Климачков Д.А., Петросян А.С. Нелинейные взаимодействия волн Россби в магнитной гидродинамике тонкого слоя плазмы со свободной границей в поле силы тяжести, XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, Сборник аннотаций, с. 225, 2016. <http://www.nrcki.ru/pages/main/5509/5512/7358/18106/index.shtml>
8. Сафонов С.И., Петросян А.С. Метод быстрых искажений для изучения анизотропной турбулентности плазмы в приближении холловской магнитной гидродинамики, XIV Курчатовская междисциплинарная молодежная научная школа, Сборник аннотаций, с. 246, 2016. <http://www.nrcki.ru/pages/main/5509/5512/7358/18106/index.shtml>
9. Сафонов С.И., Петросян А.С., Метод быстрых искажений для изучения турбулентности плазмы в приближении холловской магнитной гидродинамики, Труды 59-й научной конференции МФТИ, 2016. <http://conf59.mipt.ru/ru/info/main/>
10. Зиняков Т.А., Петросян А.С., Численное моделирование зональных течений двумерной магнито-гидродинамической турбулентности в космической и астрофизической плазме, Труды 59-й научной конференции МФТИ, 2016. <http://conf59.mipt.ru/ru/info/main/>

11. Климачков Д.А., Петросян А.С., Нелинейные взаимодействия волн на бета-плоскости в магнитной гидродинамике тонкого слоя плазмы со свободной границей в поле силы тяжести, Труды 59-й научной конференции МФТИ, 2016. <http://conf59.mipt.ru/ru/info/main/>

## **Проект 10.2 Изучение эволюции планетных систем, астероидов, кратных звезд, поиск и исследование экзопланет**

### **Тема 10.2.1 Исследование динамической и космогонической эволюции мультипланетных систем и планетных систем кратных звезд**

#### **Аннотация 10.2.1.1.**

Впервые определены наиболее вероятные орбиты циркумбинарных планет в системах Alpha Cen и EZ Aqr; показано, что в системе EZ Aqr (одной из ближайших к нам двойных) циркумбинарная планета может находиться в зоне обитаемости; дано полное аналитическое описание диаграмм устойчивости для циркумбинарных планетных систем.

Впервые определены наиболее вероятные орбиты циркумбинарных планет в системах Alpha Cen и EZ Aqr; показано, что в системе EZ Aqr (одной из ближайших к нам двойных) циркумбинарная планета может находиться в зоне обитаемости; дано полное аналитическое описание диаграмм устойчивости для циркумбинарных планетных систем. Путем массовых численных экспериментов выявлены области хаотического движения на плоскости начальных условий «перигелийное расстояние — эксцентриситет» планетных орбит. Исходя из аналитического критерия Шевченко (Shevchenko I. I., *Astrophys. J.*, 2015, 799, 8) хаотичности планетных орбит в двойных звездных системах, построены теоретические кривые, описывающие глобальную границу области динамического хаоса вокруг центральной двойной для каждой из систем. На основе теории Мардлинг (Mardling R., *Lect. Notes Phys.*, 2008, 760, 59), описывающей отдельные резонансные «зубцы» (соответствующие целым резонансам между орбитальными периодами планеты и двойной), построены локальные границы хаоса (см. рис. 10.1). Показано, что теоретические модели успешно описывают как глобальную, так и локальные границы «хаос–порядок» на построенных численно диаграммах устойчивости, что говорит об адекватности этих теорий и их эффективности в обеспечении аналитических критериев хаотичности планетных орбит. Проведен анализ возможных циркумбинарных конфигураций планетных систем двойных звезд Alpha Cen A-B и EZ Aqr

А-С. Исходя из современных представлений о динамике и архитектуре циркумбинарных систем, определены наиболее вероятные орбиты циркумбинарных планет. В случае EZ Aqr А–С циркумбинарная зона обитаемости располагается от  $\sim 0.033$  до  $\sim 0.064$  а.е. по радиусу от барицентра двойной, и планета в резонансной ячейке на границе центральной зоны хаоса может находиться в зоне обитаемости.

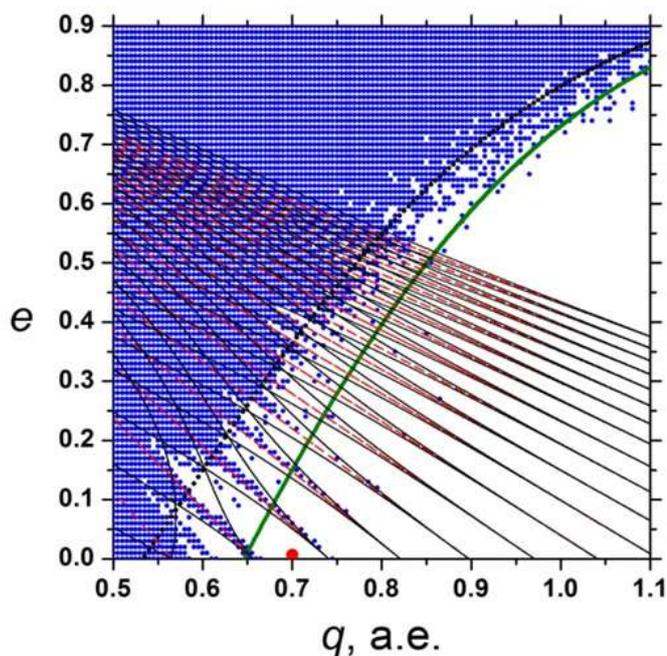


Рис. 10.1

#### Аннотация 10.2.1.2.

Впервые установлены закономерности формирования кольцевых многополосных структур, обусловленных наличием планет, в планетезимальных дисках одиночных и двойных звезд. Теоретически и путем численного моделирования показано, как планета в планетезимальном диске формирует в нем многополосную структуру, состоящую из нескольких колец вокруг центральной одиночной или двойной звезды, заполненных веществом или свободных от него. В наиболее яркой форме этот эффект проявляется в случае циркумбинарных дисков. Оценена предельная масса планеты, при которой система из многих колец сокращается до трехполосной: заполненного веществом коорбитального с планетой кольца и двух кольцеобразных полостей, положение которых соответствует орбитальным резонансам 2:1 и 1:2 с планетой. В рамках предложенной теории объяснена природа трехполосной структуры в диске HL Tau, присутствующей на изображениях, полученных с помощью телескопа ALMA. На рисунке 10.2 приведен пример кольцевой структуры в циркумбинарном диске с планетой, полученный путем численного моделирования.

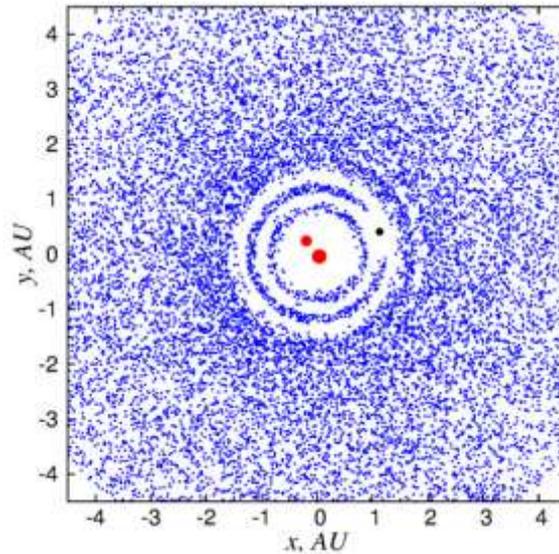


Рис. 10.2

### Аннотация 10.2.1.3.

Строго обоснована резонансная природа эффекта Лидова–Козаи.

В издательстве Springer опубликована монография, посвященная эффекту Лидова–Козаи, в которой дано полное изложение теории эффекта и ее многочисленных приложений в динамической астрономии и экзопланетных исследованиях. Начиная с работы М.Л.Лидова 1961 г., теория эффекта и ее приложения получили многоплановое развитие, однако резонансный характер эффекта оставался дискуссионным. В монографии впервые строго обоснована резонансная природа эффекта. На иллюстрации 10.3 приведена обложка книги.

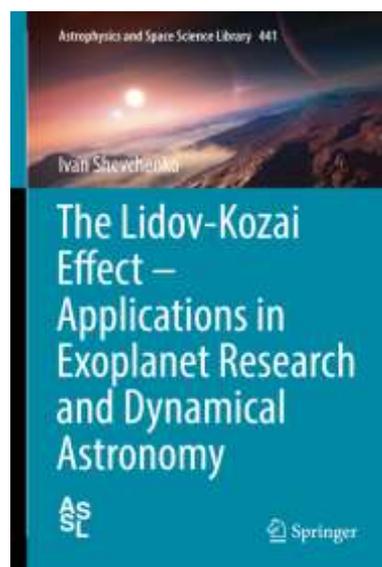


Рис. 10.3

#### Аннотация 10.2.1.4.

Разработан новый метод для вычисления величин релятивистской теории вращения (геодезической прецессии и геодезической нутации) тел Солнечной системы. Впервые для Луны, Солнца, больших планет Солнечной системы и Плутона определены новые наиболее существенные вековые и периодические члены релятивистской теории вращения.

Задача о геодезическом вращении тел Солнечной системы (больших планет, Плутона, Луны и Солнца) изучалась относительно собственной координатной системы исследуемых тел. Используя фундаментальную эфемериду DE422/LE422, определяющую положения и скорости тел, для каждого исследуемого тела (за исключением Луны) в углах Эйлера (для Луны в возмущающих членах её физической либрации) с шагом в 1 сутки на 2000 летнем интервале времени (от AD1000 до AD3000) были получены значения скоростей их геодезического вращения. Наиболее существенные члены скорости геодезического вращения исследуемого тела были найдены методами наименьших квадратов и спектрального анализа.

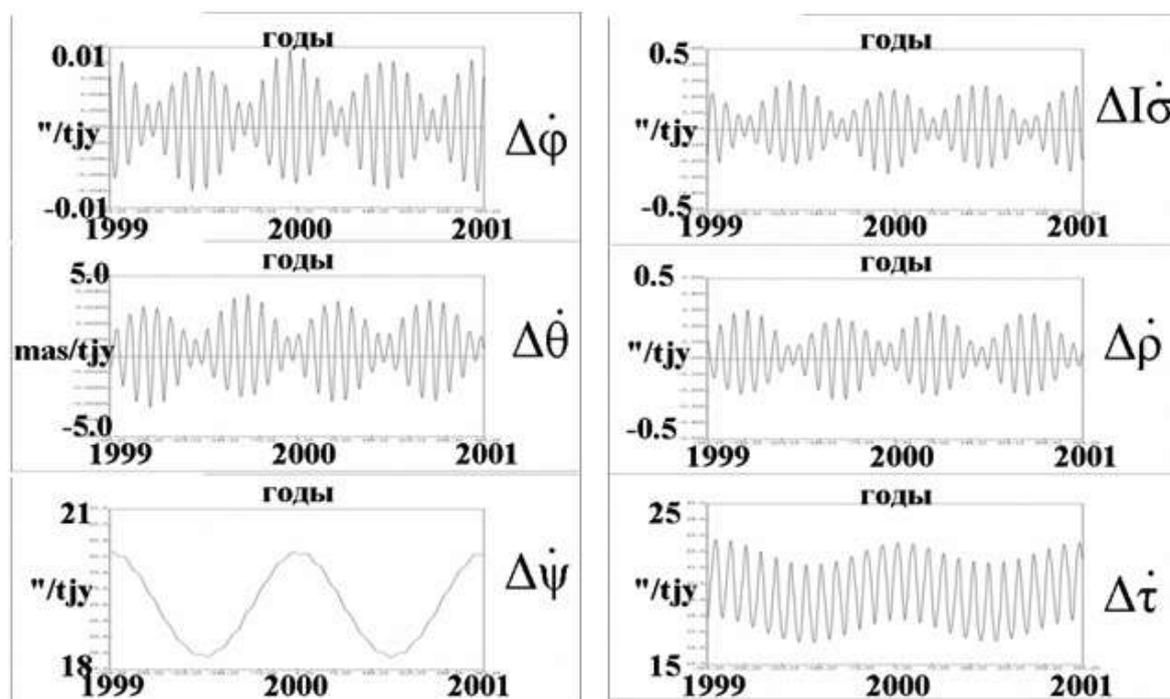


Рис. 10.3

Аналитически интегрируя систематические и периодические члены скорости геодезического вращения, впервые были получены систематические и периодические члены релятивистской теории вращения, динамически согласованные с эфемеридой DE422/LE422. Полученные полуаналитические значения величин релятивистской теории

вращения тел Солнечной системы могут быть использованы при построении высокоточных теорий вращательного движения этих тел в релятивистском приближении. На рис. 10.3 иллюстрируется вращение в углах Эйлера для Земли и в возмущающих членах физической либрации для Луны, соответственно.

#### **Публикации:**

1. Е.А. Попова, И.И. Шевченко «Об устойчивости циркумбинарных планетных систем» // Письма в Астрон. журн., т. 42, № 6, с. 525–532 (2016).
2. Е.А. Попова, И.И. Шевченко «О возможных циркумбинарных конфигурациях планетных систем Alpha Centauri и EZ Aquarii» // Письма в Астрон. журн., т. 42, № 4, с. 294–301 (2016).
3. T.V.Demidova, I.I.Shevchenko “Three-lane and multi-lane signatures of planets in planetesimal disks.” // MNRAS, 463, L22–L26 (2016).
4. I.I.Shevchenko “The Lidov-Kozai Effect – Applications in Exoplanet Research and Dynamical Astronomy.” Springer, 2017. 198 pp. ISBN 978-3-319-43520-6.
5. Пашкевич В.В., «Геодезическое (релятивистское) вращение тел Солнечной системы». // Вестник СПбГУ. Серия 1. Том 3 (61). Вып. 3. с. 506–516 (2016).
6. Pashkevich V.V. (2016) New high-precision values of the geodetic rotation of the major planets, Pluto, the Moon and the Sun. // Artificial Satellites. Vol. 51, No. 2 Pp. 61–73 (2016).
7. Батмунх, Н., Санникова, Т. Н., Холшевников, К. В., Шайдулин, В. Ш. Норма смещения положения небесного тела при вариации его орбиты // *Астрономический журнал*. – 2016. – Т. 93. – № 3. – С. 331.
8. Кузнецов, Э. Д., Холшевников, К. В., Шайдулин, В. Ш. О представлении гравитационного потенциала некоторых модельных тел // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 1. Математика. Механика. Астрономия*. – 2016. – Т. 3. – № 3. – С. 489–497.
9. Матвиенко, А. С., Орлов, В. В. Движения в широких парах на разных галактоцентрических расстояниях // *Письма в Астрономический журнал*. 2016. Т. 42. № 6. С. 399.
10. Микрюков, Д. В., Холшевников, К. В. Разложение основных функций кеплеровского движения с использованием комплексных переменных // *Письма в Астрономический журнал*. – 2016. – Т. 42. – № 4. – С. 302.
11. Орлов, В. В., Титов, В. А., Шомбина, Л. А. Периодические орбиты в задаче трех свободно падающих тел // *Астрономический журнал*. 2016. Т. 93. № 12. С. 1061.

**Руководитель проекта:**

Д.ф.-м.н. Шевченко Иван Иванович, ГАО РАН, [iis@gao.spb.ru](mailto:iis@gao.spb.ru)

**Состав группы:**

д.ф.-м.н. И.И.Шевченко (ГАО РАН), д.ф.-м.н. проф. В.В.Орлов (ГАО РАН, СПбГУ), д.ф.-м.н. проф. К.В.Холшевников (ГАО РАН, СПбГУ), к.ф.-м.н. Т.В.Демидова (ГАО РАН), к.ф.-м.н. А.В.Мельников (ГАО РАН), к.ф.-м.н. В.В.Пашкевич (ГАО РАН), Е.А.Попова (ГАО РАН), Е.А.Смирнов (ГАО РАН)

**Тема 10.2.2 Результаты исследования опасных для Земли астероидов и других тел Солнечной и экзопланетных систем****Аннотация 10.2.2.1.**

Часть наблюдений астероидов, опасных для Земли, получена с использованием перспективного базисного метода наблюдений. На основе астрометрических наблюдений уточнены параметры их орбит и проведено моделирование их эволюции. По фотометрическим наблюдениям астероидов получены новые данные об их физических параметрах.

Проведены высокоточные астрометрические, спекл-интерферометрические и фотометрические наблюдения тел Солнечной системы.

Для ряда астероидов, опасных для Земли, получены синхронные базисные наблюдения. На основе астрометрических и фотометрических наблюдений астероидов уточнены параметры их орбит, проведено моделирование их эволюции и получены новые данные об их физических параметрах.

Во время тесного сближения с Землёй проведены наблюдения уникального явления: потенциально опасный астероид Дуэнде находился в состоянии «вращения с кувырканием».

По фотометрическим и спекл-интерферометрическим наблюдениям исследованы астероиды Главного пояса (18) Melpomene и (532) Herculina с предполагаемой двойственностью, свидетельств наличия спутников у астероидов не было обнаружено.

В связи с пролётом космической станции «New Horizons» вблизи Плутона проведена переработка астрометрических наблюдений Плутона, выполненных на телескопах ГАО РАН (ЗА-320М и МТМ-500М) в 1999-2010 гг., в системе каталога UCAC4 — получен новый ряд положений Плутона.

На телескопах ЗА-320М и МТМ-500М наблюдались АСЗ, доступные для наблюдений. По данным базы NEODyS в России около 2/3 наблюдений астероидов, сближающихся с Землёй, получено в ГАО РАН.

На основе наблюдений, проведённых во время тесного сближения с Землёй астероида (367943) Duende, выполнены и опубликованы исследования — астрометрические (436 положений) и фотометрические (показатели цвета  $B-V$ ,  $V-R$ ,  $R-I$  и две кривых блеска длительностью около 10 часов). Путём численного моделирования на основе полученных наблюдательных данных исследованы эволюция орбиты и режим вращения астероида. Установлено, что во время тесного сближения Дуэнде находился в состоянии «вращения с кувырканием» (т.е. вращение не вокруг главной оси инерции).

Организованы наблюдательные кампании по квазиодновременным наблюдениям двух астероидов (2004 BL86 и 2015 TB145) с целью проведения их триангуляционных измерений во время сближения с Землёй. К участию в кампаниях привлечены как российские (Краснодар, Иркутск, Уссурийск), так и зарубежные (Казахстан, Испания, Чили) обсерватории.

На телескопах ЗА-320М и МТМ-500М с 1999 по 2010 гг. проводились астрометрические наблюдения Плутона. Их результаты публиковались после обработки с доступными тогда каталогами USNO-A2.0 и USNO-B1.0. В связи с пролётом в 2015 г. космического аппарата «New Horizons» вблизи Плутона было решено переобработать и опубликовать все наблюдения этой планеты в единой системе. Кроме того, стал доступен каталог UCAC-4, обладающий большей точностью и однородностью. В единой системе этого каталога и был переобработан весь ряд наших наблюдений.

В результате проведённых в 1978 году фотометрических наблюдений покрытий звёзд HD 47239 и HR 5584 астероидами Главного пояса 18 Melpomene и 532 Herculina соответственно было предсказано существование спутников у данных астероидов. Но в результате тщательного исследования данных астероидов с использованием телескопа Хаббл и 2.2-метрового телескопа, расположенного на Гавайский островах, никаких свидетельств наличия спутников у астероидов не было обнаружено.

Зафиксированные фотометрические особенности на кривой блеска, обнаруженные при прохождении астероидов по дискам звёзд могут также говорить и о двойственности самих звёзд, которые были покрыты астероидами в 1978 году.

Совместно с сотрудниками САО РАН с 2014 года с использованием спекл-интерферометра 6-метрового телескопа БТА, проводился поиск спутников у астероидов 18 Melpomene и 532 Herculina, а также у звёзд HD 47239 и HR 5584. В результате

проведённых нескольких серий наблюдений наличия спутников у астероидов обнаружено не было. У звезды HR 5584 также не удалось обнаружить компоненты.

У звезды HD 47239 в феврале 2016 года был обнаружен слабый тесный компонент на расстоянии 20 mas. Наличие спутника у данной звезды даёт нам возможность полагать, что в 1978 году при покрытии астероидом 18 Melromene звезды HD 47239 был зафиксирован спутник самой звезды и астероид не имеет гравитационно-связанных с ним спутников. Таким образом, с большой вероятностью, астероид 18 Melromene является одиночным.

#### **Аннотация 10.2.2.2.**

На основе фотометрических и спекл-интерферометрических наблюдений был проведён поиск, а также исследование кратных звёзд и внесолнечных планет. В рамках проекта по поиску и изучению внесолнечных планет активно проводились фотометрические наблюдения транзитов экзопланет, мониторинг избранных площадок на небе с целью поиска экзопланет прямым транзитным методом, а также проводился астрометрический анализ двойных и кратных звёздных систем.

Наблюдения проводились как для уже известных транзитных экзопланет, так и для звёзд, которые потенциально могут иметь звёздные спутники или экзопланеты.

В частности, в 2016 году количество наблюдателей, активно участвующих в проекте поиска экзопланет, увеличилось. Добавились обсерватории в США, Канаде, Испании и Новой Зеландии.

На основе мониторинга (прямого транзитного метода), проведённого в Коуровской обсерватории, частной обсерватории США, обсерватории на Горной Астрономической Станции Пулковской обсерватории, а также при участии других обсерваторий из Европы и США, которые проводили дальнейшую проверку, были представлены кандидаты в экзопланеты и обнаружены затменно-двойные звёзды. Данные результаты представлены в публикации (Artem Burdanov, Paul Benni, Eugene Sokov et al., 2016). Наиболее перспективный кандидат, обнаруженный из представленного мониторинга, для дальнейшей проверки с измерением лучевых скоростей – KPS-663. Кривая блеска KPS-663, полученная на 1.65-метровом телескопе Обсерватории в Вильнюсе, представлена на рис. 10.4.

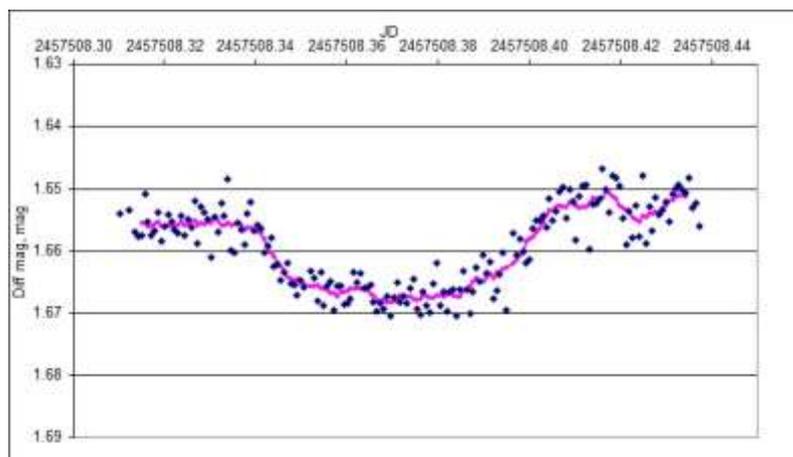


Рис. 10.4 – Кривая блеска кандидата в экзопланеты у звезды KPS-663.

В рамках исследования внесолнечных планет с возможным таймингом транзитов в 2012 году была отобрана для дальнейших наблюдений и исследований экзопланета WASP-17 b. В рамках изучения экзопланеты WASP-17 b Пулковской обсерваторией была организована международная наблюдательная кампания с участием телескопов, расположенных в профессиональных обсерваториях Аргентины (2.15-метровый телескоп обсерватории Complejo Astronomico EL Leoncito; 1.54-м телескоп Observatorio Astronomico de Cordoba), а также частных обсерваториях Австралии и острова Паротонга. Первый этап данной наблюдательной кампании позволил зафиксировать удаление экзопланеты WASP-17 b от звезды, вокруг которой она вращается. Проявляется оно в увеличении периода обращения планеты вокруг звезды, а также увеличении продолжительности прохождения планеты по диску звезды. Подобное поведение транзитных экзопланет ранее не встречалось и на данный момент является уникальным. На данном этапе исследований этой проблемы невозможно дать чёткого ответа меняется ли период обращения экзопланеты с линейным увеличением или период будет оставаться неизменным. В случае линейного увеличения периода вращения экзопланеты вокруг звезды можно говорить о стремительном удалении планеты от звезды. В случае сохранения периода обращения WASP-17 b можно говорить резком его изменении, при котором увеличилась большая полуось орбиты данной экзопланеты. При этом можно зафиксировать приблизительный момент такого резкого изменения периода в пределах 2010 – 2012 годов. Следствием такого явления могло стать достижение экзопланетой состояния устойчивого равновесия со звездой после произошедшего гравитационного возмущения от другого пока не обнаруженного объекта. Наблюдения и дальнейшее изучение данной экзопланеты продолжатся для установления причин подобного изменения периода. График изменения моментов прохождения середины транзитов

представлен на рис. 10.5. Первые результаты исследования WASP-17 b представлены в (E. N. Sokov, 2016).

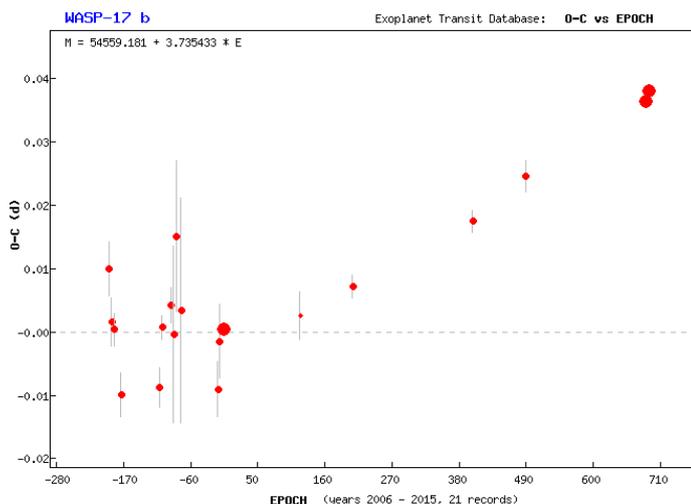


Рис. 10.5 – Тайминг экзопланеты WASP-17 b, характеризующий изменение периода обращения планеты относительно звезды.

#### **Руководитель проекта:**

Девяткин Александр Вячеславович, ГАО РАН, [adev@gao.spb.ru](mailto:adev@gao.spb.ru)

#### **Состав группы:**

д.ф.-м.н. А.В.Девяткин (ГАО РАН), к.ф.-м.н. Д.Л.Горшанов (ГАО РАН), к.ф.-м.н. В.В.Куприянов (ГАО РАН), к.ф.-м.н. В.Н.Львов (ГАО РАН), С.Д.Цекмейстер (ГАО РАН), к.ф.-м.н. И.А.Сокова (ГАО РАН), н.с. Е.Н.Соков (ГАО РАН), А.А.Мартюшева (ГАО РАН), С.А.Русов (ГАО РАН).

#### **Публикации:**

1. Devyatkin, A.V.; Gorshanov, D.L.; Yershov, V.N.; Melnikov, A.V.; Martyusheva, A.A.; Petrova, S.N.; L'vov, V.N.; Tsekmeister, S.D.; Naumov, K.N. «A study of the asteroid (367943) Duende at Pulkovo Observatory» // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, Volume 459, Issue 4, p. 3986-3997.
2. Slesarenko, V.Yu.; Bashakova, E.A.; Devyatkin, A.V. «Astrometrical observations of Pluto-Charon system with the automated telescopes of Pulkovo observatory» // Planetary and Space Science, 2016, Volume 122, p. 66-69.
3. А.В. Девяткин, Д.Л. Горшанов, В.Н. Львов, С.Д. Цекмейстер, М.С. Чубей, «Астрометрические базисные наблюдения тел Солнечной системы» // Кинематика и

физика небесных тел, 2016, т. 32, No. 5, с. 45–51. (A.V.Devyatkin, D.L.Gorshanov, V.N.L'vov, S.D.Tsekmeister, M.S.Chubey «Astrometric Baseline Observations of Solar System Bodies» // Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 2016, Vol. 32, No. 5, pp. 241–244).

4. Artem Burdanov, Paul Benni, Eugene Sokov et al., « First results of the Kourvka Planet Search: discovery of transiting exoplanet candidates in the first three target fields», MNRAS, 2016, Volume 461, Issue 4, p.3854-3863.

5. E. N. Sokov, WASP-17b – possibly the first moving away from parent star exoplanet. International campaign on its observations, Journal of Physics: Conference Series (17th Russian Youth Conference on Physics and Astronomy (PhysicA.SPb/2014)), 2016.

6. Sokova I. A., Sokov E. N., Dyachenko V. V., Rastegaev D. A., Balega Yu. Yu., «The results of the checking of the presence of satellites of 18 Melpomene and 532 Herculina based on speckle-interferometry method.», ASP Conference Series, в печати.

**Состав научного совета Программы 1.7а Президиума РАН  
«Экспериментальные и теоретические исследования объектов  
Солнечной системы и планетных систем звезд»**

Председатель совета, куратор Программы:

Академик РАН **Зеленый Лев Матвеевич** (ИКИ РАН)

Заместитель Председателя Программы:

Академик РАН **Маров Михаил Яковлевич** (ГЕОХИ РАН)

Совет Программы:

Доктор физ.-мат.наук **Боровин Геннадий Константинович** (ИПМ РАН)

Доктор физ.-мат.наук **Демехов Андрей Геннадиевич** (ИПФ РАН)

Доктор физ.-мат.наук **Ермолаев Юрий Иванович** (ИКИ РАН)

Доктор физ.-мат.наук **Захаров Александр Валентинович** (ИКИ РАН)

Доктор физ.-мат.наук **Кораблев Олег Игоревич** (ИКИ РАН)

Доктор физ.-мат.наук **Кузин Сергей Вадимович** (ФИАН)

Доктор физ.-мат.наук **Кузнецов Владимир Дмитриевич** (ИЗМИРАН)

Доктор физ.-мат.наук **Рыхлова Лидия Васильевна** (ИНАСАН)

Член-корр. РАН **Степанов Александр Владимирович** (ГАО РАН)

Член-корр. РАН **Гальченко Валерий Федорович** (ИНМИ РАН)

**Конференция по Программе 1.7 Президиума РАН  
«Экспериментальные и теоретические исследования  
объектов Солнечной системы и планетных систем звезд»  
(подпрограмма 1.7а)**

14 декабря 2016 г.,  
ИКИ РАН, ком. 200

***Программа конференции***

11.00	<i>Л.М. Зеленый</i>	Вступительное слово.
11.10	<i>М.Я. Маров</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 1: ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ (4 темы)
11.30	<i>А.В. Степанов, ГАО Ю.И. Ермолаев, ИКИ</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 2: СОЛНЦЕ И ГЕЛИОСФЕРА (18 тем)
12.20	<i>А.Т. Базилевский, ГЕОХИ Б.А. Иванов, ИДГ</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 3: ЛУНА И ПЛАНЕТЫ ЗЕМНОЙ ГРУППЫ, СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПЛАНЕТОЛОГИЯ (8 тем)
12.40	<i>О.Л. Кусков, ГЕОХИ, Ю.М. Торгашин, ИНАСАН П.А. Беспалов, ИПФ</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 4: ПЛАНЕТЫ ГИГАНТЫ, –ИХ СПУТНИКИ И КОЛЬЦА (5 тем)
13.00	<i>Перерыв на обед</i>	
13.45	<i>О.И. Кораблев, ИКИ, В.И. Шематович, ИНАСАН</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 5: АТМОСФЕРЫ И КЛИМАТ ПЛАНЕТ (9 тем)
14.20	<i>А.А. Петрукович, ИКИ, А.Г. Демехов, ИПФ</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 6: МАГНИТОСФЕРА (8 тем)
14.50	<i>В.Д. Кузнецов, ИЗМИРАН М.И. Веригин, ИКИ</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 7: ИОНОСФЕРА (4 темы)
15.10	<i>Л.В. Рыхлова, ИНАСАН, А.В. Захаров, ИКИ</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 8: МАЛЫЕ ТЕЛА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ (9 тем)
15.40	<i>М.В. Герасимов, ИКИ, Г.К. Боровин, ИПМ, В.Ф. Гальченко, ИНМИ</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 9: МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ (4 темы)
16.10	<i>TBD</i>	НАПРАВЛЕНИЕ 10: ЭКЗОПЛАНЕТЫ (2 темы)
16.30	<i>Л.М. Зеленый</i>	Заключительное слово