

**13–15 апреля 2022**

**Москва, ИКИ РАН**

**КМУ** 

**XIX Конференция молодых ученых  
«Фундаментальные и прикладные  
космические исследования»**



**Сборник  
тезисов**

**НОЦ**  
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИКИ РАН

**ИКИ**  
ИНСТИТУТ  
КОСМИЧЕСКИХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
РАН

---

# ХІХ КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

## ”Фундаментальные и прикладные космические исследования”

ИКИ РАН, Москва, 13–15 апреля 2022 г.

### Сборник тезисов докладов

Под ред. Садовского А.М.

Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (<http://kmi.cosmos.ru>), посвященная Дню космонавтики, традиционно проходит в начале апреля. Конференция 2022 года оказалась первой, проводимой по окончании ограничительных мероприятий из-за Covid-19, и как это принято в последние годы в ней можно было участвовать как очно, так и онлайн. Следует отметить, что конференция 2021 года проводилась в апреле онлайн, а конференция 2020 года была перенесена сначала на июнь, а потом на сентябрь и тоже прошла онлайн.

Проведение конференции онлайн, к сожалению, меняет дух мероприятия, поскольку одна из целей конференции — дать возможность студентам, аспирантам и молодым ученым возможности отточить навыки публичного выступления перед большой аудиторией, а также принять участие в обсуждении научных результатов (как получить комментарии к своей работе, так и задать вопросы другим докладчикам).

В этом году на Конференцию поступило более 140 заявок со всех концов страны, а также из Беларуси и Казахстана. Количество докладов по сравнению с предыдущими годами немного увеличилось, что говорит об актуальности космических исследований и растущем интересе к космосу. Следует отметить, что конференция представляет собой самое крупное научное мероприятие по космическим исследованиям среди молодежи.

В этом году поменялся оргкомитет конференции — в основном Конференция организовывалась Советом молодых ученых и специалистов ИКИ РАН. Надо сказать, что оргкомитет полностью справился со своей задачей.

В конференции принимают участие студенты, аспиранты и молодые ученые (до 35 лет), чья деятельность связана с космосом и космическими исследованиями. «Сборник тезисов Конференции молодых ученых» содержит тезисы, присланные участниками Конференции.

Садовский А.М.

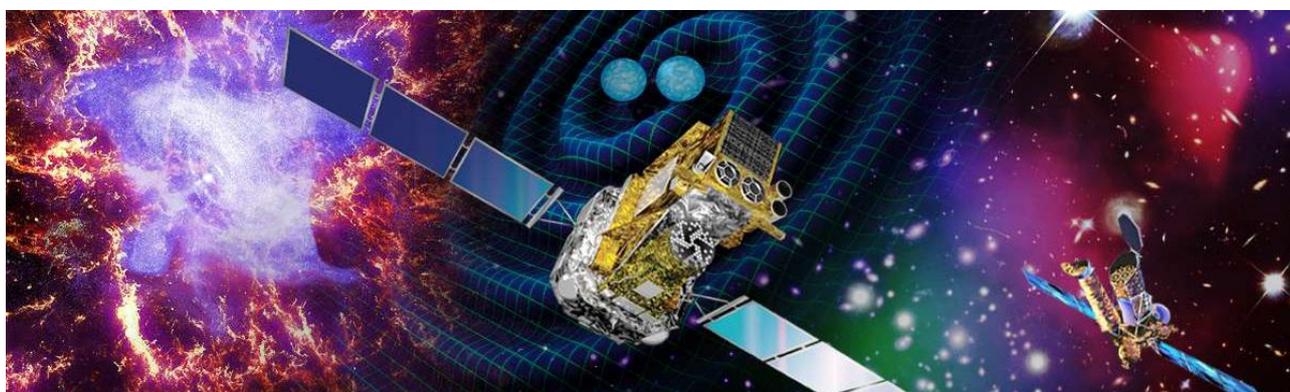
Компьютерная вёрстка: Сапунова О.В.

# Оглавление

АСТРОФИЗИКА И РАДИОАСТРОНОМИЯ . . . . .	4
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ . . . . .	27
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНЕТ . . . . .	66
КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ . . . . .	98
ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ . . . . .	124
ФИЗИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ . . . . .	153

---

# АСТРОФИЗИКА И РАДИОАСТРОНОМИЯ



# РАЗНООБРАЗИЕ КРИВЫХ БЛЕСКА СВЕРХНОВЫХ, АССОЦИИРОВАННЫХ С ГАММА-ВСПЛЕСКАМИ

Белкин С.О., Позаненко А.С.

*Институт космических исследований РАН*

Впервые гамма-всплески (GRB) были зарегистрированы в 1967 году. С тех пор было обнаружено более 10 000 гамма-всплесков (GRBs). Длительные наблюдения послесвечения около 850 гамма-всплесков в оптическом диапазоне с 1998 г. показали, что прародителями гамма-всплесков могут быть, в частности, сверхновые (SNe) с коллапсирующим ядром. На сегодняшний день примерно 50 случаев связи гамма-всплесков со сверхновыми получили свое фотометрическое и/или спектроскопическое подтверждение. В данной работе представлено около двух десятков многоцветных кривых блеска сверхновых, ассоциированных с гамма-всплесками, и их феноменологическое сравнение. Выборка основана на опубликованных данных, полученных при наблюдениях случаев GRB-SN наземными обсерваториями по всему миру, включая наши собственные наблюдения. Приводится обсуждение текущего состояния и проблем исследования сверхновых, связанных с гамма-всплесками.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИРОДЫ СПЕКТРАЛЬНОГО КОНТИНУУМА И СТАБИЛЬНОСТЬ ЦИКЛОТРОННОЙ ЛИНИИ В РЕНТГЕНОВСКОМ ПУЛЬСАРЕ GRO J2058+42

Горбан А.С.<sup>1,2</sup>, Мольков С.В.<sup>1</sup>, Цыганков С.С.<sup>1,3</sup>,  
Муштуков А.А.<sup>1,4</sup>, Лутовинов А.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Высшая школа экономики*

<sup>3</sup> *Обсерватория Туорла, Университет Турку, Турку, Финляндия*

<sup>4</sup> *Лейденская обсерватория, Лейденский университет, Лейден, Нидерланды*

В настоящей работе представлены результаты исследования транзиентного рентгеновского пульсара GRO J2058+42 в широком диапазоне энергий в состоянии со светимостью  $L_x \simeq 2.5 \times 10^{36}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ . В ходе работы было обнаружено, что профиль импульса источника, так же как и доля пульсирующего излучения, значительно изменились по сравнению с предыдущими наблюдениями обсерватории NuSTAR, когда пульсар был в ярком состоянии. Положение циклотронной линии на энергии  $\sim 10$  кэВ в узкой фазовой области согласуется с наблюдениями в высоком состоянии. Был проведен спектральный анализ, который показал при высоких светимостях  $L_x \simeq (2.7 - 3.2) \times 10^{37}$  эрг  $\text{с}^{-1}$  типичную для аккрецирующих пульсаров форму спектра, в то время как при уменьшении светимости примерно на порядок, до  $L_x \simeq 2.5 \times 10^{36}$  эрг  $\text{с}^{-1}$ , для описания спектра необходимо использование двухкомпонентной модели.

# СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОСТ-ОБРАБОТКИ КРИВЫХ БЛЕСКА ZTF ДЛЯ ДВОЙНОЙ ИМВН J163159.59+243740.3

Демьяненко М.В.<sup>1,2,3</sup>, Чилингарян И.В.<sup>2,4</sup>, Гришин К.А.<sup>2</sup>,  
Катков И.Ю.<sup>2,6,7</sup>, Гораджанов В.С.<sup>2,5</sup>, Топтун. В.А.<sup>2,5</sup>,  
Кузьмин И.А.<sup>2,5</sup>

<sup>1</sup> НИУ Московский физико-технический институт

<sup>2</sup> Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга МГУ

<sup>3</sup> НИУ Высшая школа экономики

<sup>4</sup> Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики, Кембридж, США

<sup>5</sup> Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

<sup>6</sup> Нью-Йоркский университет, Абу-Даби, ОАЭ

<sup>7</sup> Центр астрофизики, физики элементарных частиц и планет, Нью-Йоркский университет Абу-Даби, ОАЭ

Обзоры неба, проводящиеся в течение нескольких лет, предоставляют возможность обнаружения переменности слабых объектов в оптическом диапазоне спектра, что используется для поиска и подтверждения кандидатов в активные ядра галактик (AGN) I-го типа, питаемых черными дырами промежуточных масс (ИМВН). Данная работа предоставляет возможность сравнить вклад различных методов пост-обработки в фотометрическую коррекцию, что в свою очередь позволяет понять, какой вклад в изменение статистики хи-квадрат временного ряда вносит каждый этап пост-процессинга на примере объекта J163159.59+243740.3. Преимуществом данного метода является доступность данных для большого числа объектов-кандидатов, в отличие от альтернативного подхода к подтверждению активности ядер путем проведения дорогостоящих рентгеновских наблюдений с помощью космических обсерваторий.

В данной работе представлен анализ методов обработки кривых блеска, получаемых с помощью сервиса разностной фотометрии Zwicky Transient Facility (ZTF) Forced Photometry service. Данные ZTF имеют несовершенную фотометрию. По этой причине рассматриваются методы, направленные на устранение несуществующих трендов в кривых блеска, и подавление других эффектов, мешающих отождествить реальную переменность в двух фотометрических полосах (ZTF\_g, ZTF\_r). В число важных факторов обработки двумерных временных рядов входят: фильтрация точек путём отбрасывания некорректных наблюдений по критериям из инструкций фотометрии ZTF, коррекция цвета и коррекция фотометрического нуля-пункта, коррекция за медианную звезду сравнения, полученную из 50 ближайших к источнику звёзд на снимке, из которого извлекается наблюдение для каждой даты.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ В ОДНОТЕМПЕРАТУРНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Круглов А.А., Хабибуллин И.И., Лыскова Н.С.

*Институт космических исследований РАН*

Скопления галактик занимают особое место в современной астрофизике и космологии. Число скоплений и их свойства непосредственно зависят от свойств темной материи и темной энергии, что позволяет использовать скопления как мощный инструмент наблюдательной космологии. Наблюдения горячего газа, заполняющего гравитационную яму скопления, открывают возможность изучения различных газодинамических и плазменных эффектов и влияния сверхмассивных черных дыр на нагрев и охлаждение газа. Одной из основных характеристик горячего газа, заполняющего объем скоплений и групп галактик, определяющей свойства и физические процессы в этих объектах, является температура. Температура газа обычно измеряется путем аппроксимации наблюдаемого рентгеновского спектра. Как правило, спектр собирается с области, которая содержит несколько компонентов с разной металличностью и, возможно, температурой. Современные детекторы, такие как ПЗС на борту Чандра и ХММ-Ньютон, не могут спектрально разделить излучение от различных компонентов. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев статистические ошибки в наблюдаемом спектре слишком велики, чтобы обнаружить присутствие нескольких эмиссионных компонент. Поэтому, как правило, применяются однотемпературные модели для спектров скоплений галактик с надеждой, что полученное значение температуры будет репрезентативным средним значением. Используя численные космологические симуляции, планируется выявить типичное распределение меры эмиссии и разработать алгоритм для учета этого распределения при оценке средней температуры скопления. Разработанный подход будет применен к выборке реальных скоплений галактик.

# КАЛИБРОВКА ДАННЫХ ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ПАНОРАМНОГО ОБЗОРА НЕБА

Логишева Ю.Е.<sup>1</sup>, Дерри С.Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГБОУ Школа № 956

<sup>2</sup> Институт Астрономии РАН

В работе представлены результаты наблюдений на роботизированном телескопе Звенигородской обсерватории ИНАСАН, для составления панорамного обзора неба. Полученные данные с телескопа были откалиброваны и астрономически привязаны к координатам поля.

Данные обзора неба необходим для уточнения точных координат гамма-всплесков, для дальнейшего изучения остаточного свечения в видимом диапазоне и УФ.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В ПРОТОПЛАНЕТНОМ ДИСКЕ В $1+1D$ ПРИБЛИЖЕНИИ

Максимова Л.А., Павлюченков Я.Н., Акимкин В.В.

*Институт астрономии РАН*

Нагрев центральной звездой является одним из ключевых факторов, определяющих физическую структуру протопланетных дисков. Из-за большой оптической толщины в радиальном направлении прогрев экваториальных областей диска осуществляется инфракрасным излучением с поверхности (атмосферы) диска, которая в свою очередь нагревается прямым излучением звезды. Ранее было показано, что в дисках могут возникать возмущения, распространяющиеся по направлению к звезде, что связано с эффектами перехвата излучения звезды неоднородностями на поверхности диска. В данной работе в рамках детальной  $1+1D$ -мерной численной модели протопланетного диска исследована картина возникновения подобных волн. Найдено, что в оптически толстом к собственному излучению диске действительно формируются и распространяются по направлению к звезде поверхностные возмущения, что подтверждает выводы других авторов. Однако в отличие от аналитических предсказаний, мы получили, что для достаточно массивных дисков тепловые волны затрагивают лишь верхние слои без существенных колебаний температуры в экваториальной плоскости. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости изучения данной неустойчивости в рамках более согласованных гидродинамических моделей.

# ОГРАНИЧЕНИЕ НА КОЛИЧЕСТВО ПЕРВИЧНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР ИЗ-ЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПЫЛЬЮ

Мелихов А.Н., Михеева Е.В.

*Астрокосмический центр ФИАН*

Интерес к ПЧД сильно возрос после недавнего детектирования LIGO гравитационных волн от сливающихся черных дыр. Во-первых, особенно интересен обнаруженный в результате анализа данных близкий к нулю собственный момент вращения этих черных дыр, который сложно объясняется для астрофизических черных дыр, но оказывается вполне логичным для ПЧД. Во-вторых, интересно то, что массы сливающихся черных дыр оказались значительно больше, чем массы черных дыр, полученных по другим наблюдательным данным. Кроме того, до сих пор не решен вопрос относительно того, что является носителем темной материи. Стоит также отметить, что космологические свойства ПЧД сходны со свойствами холодной темной материи. Поэтому, ПЧД можно рассматривать в качестве кандидата на роль темной материи.

В работе ищутся ограничения на долю первичных черных дыр (ПЧД) в темной материи для разных распределений ПЧД с массами  $10^{15} - 10^{17}$  г, при этом фотоны, излученные этими ПЧД вследствие эффекта Хокинга, взаимодействуют с межзвездной пылью. Рассматривается модель, в которой ПЧД равномерно распределены во Вселенной, а пылинки — в нашей Галактике. Данный метод поиска ограничений на долю ПЧД в темной материи был предложен впервые и ранее не рассматривался.

Фотон, излученный ПЧД, поглощается пылинкой и приводит в тепловое движение частицы пылинки. Пылинка поглощает фотоны с энергиями на всех длинах волн, нагревается и начинает излучать в непрерывном спектре, который может быть аппроксимирован планковским спектром абсолютного черного тела. Равновесная температура пыли  $T_d$  для графитовой и силикатной составляющих определяется из условия теплового баланса. Излучение от других источников при расчете скорости нагрева пыли не учитывается. В качестве модели межзвездной пыли была выбрана модель MRN, согласно которой частицы межзвездной пыли имеют сферическую форму и состоят из смеси силикатных и графитовых частиц примерно в равной массовой пропорции. Размеры частиц 0.005

# ВЛИЯНИЕ МЕРТВОГО ВРЕМЕНИ НА ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ГАММА-ДИАПАЗОНЕ

Мкртчян А.А.<sup>1</sup>, Позаненко А.С.<sup>2</sup>, Минаев П.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН*

Исследуется влияние мертвого времени на измерения линейной поляризации в гамма-диапазоне комптоновскими детекторами. Мертвое время детектора влияет на темп и статистику регистрации и, как следствие, на точность измерения степени линейной поляризации. Оценка влияния мертвого времени актуальна для измерения мощных транзиентных событий, таких как космические гамма-всплески (GRB) и гамма-вспышки земного происхождения (TGF).

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАММА-ФОНА В ДИАПАЗОНЕ 0.1 – 2 МЭВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ SPI-ACS КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ INTEGRAL

Мозгунов Г.Ю.<sup>1,2</sup>, Позаненко А.С.<sup>1,2</sup>, Минаев П.Ю.<sup>1,2</sup>,  
Человеков И.В.<sup>1</sup>, Гребенев С.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

Проводится изучение фоновой обстановки на высокоапогейной орбите с помощью данных экспериментов SPI-ACS и IREM за 19 лет работы обсерватории INTEGRAL. Показано, что основной вклад в формирование фона SPI-ACS вносят Галактические Космические Лучи. Исследуется вклад заряженных частиц и гамма-излучения в формирование фонового сигнала SPI-ACS. Получено значение потока для фонового потока гамма-излучения в диапазоне энергий 0.1 – 2 Мэв. Обсуждается вклад в это излучение Галактического, внегалактического фона и фонового потока от Солнца.

# СВЯЗЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЫЛИ ПО РАЗМЕРАМ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ С ЭФФЕКТАМИ ЗАРЯДКИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ

Морозова Т.И., Гарасев М.А., Кузнецов И.А.

*Институт космических исследований РАН*

Проведено самосогласованное численное моделирование динамики пыли, окружающей плазмы и рентгеновского излучения в различных областях протопланетных дисков с помощью комбинации методов Монте-Карло и частиц в ячейках. С помощью развитой теории взаимодействия пыли между собой, а также с окружающей плазмой и с рентгеновским излучением молодой звезды объяснено наблюдаемое распределение пыли по размерам в протопланетных дисках. Рассмотрен случай вспыхивающих звезд. Приведены профили распределения пыли по размерам в молодых протопланетных дисках.

# ИЗМЕРЕНИЕ КОСМИЧЕСКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ФОНА ПО ДАННЫМ БОКОВОЙ ЗАСВЕТКИ ОРБИТАЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА NUSTAR

Мухин А.А.<sup>1,2</sup>, Кривонос Р.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

Задача исследования космического рентгеновского фона (КРФ) остается открытой и актуальной с момента начала рентгеновских исследований. С 60-х годов прошлого века многочисленные эксперименты и аппараты служили источником информации для уточнения этого фона и разделения сигнала на источники конечных размеров. Позже утвердилось идея о том, что КРФ представляет собой излучение активных ядер галактик. Для исследования пространственного распределения активных ядер галактик, уточнения их количества и исследования их эволюции необходимо собрать больше информации с различных участков неба.

Данные обсерватории NuStar, в силу архитектуры телескопа, содержат информацию о боковой засветке детекторов. Эта засветка имеет определенную, моделируемую форму, а потому может быть эффективно использована для исследования КРФ, которым эта засветка и обеспечивается.

В данном докладе будет представлен метод, позволяющий из данных орбитальной обсерватории NuStar выделить излучение боковой засветки от КРФ среди прочих компонент принимаемого сигнала и получить его спектр в диапазоне энергий 3-20 КэВ.

Также будут представлены результаты работы метода на наборе наблюдений поля COSMOS и продемонстрирован алгоритм предварительной обработки произвольных наблюдений для дальнейшего использования в построении карты КРФ по всему небу.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС И ХАРАКТЕРНЫХ РАЗМЕРОВ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Нежин А.Н.<sup>1,2</sup>, Лыскова Н.С.<sup>2</sup>, Хабибуллин И.И.<sup>2,3,4</sup>

<sup>1</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>3</sup> *Университет Людвига и Максимилиана, Мюнхен*

<sup>4</sup> *Институт Астрофизики общества им. Макса Планка, Гархинг*

Рост наиболее массивных объектов во Вселенной - скоплений галактик - происходит в результате поглощения индивидуальных объектов меньшей массы, а также непрерывной аккреции темной материи и газа межгалактической среды. Космологическая эволюция данного процесса чувствительна к динамике расширения Вселенной, что делает анализ наиболее массивных скоплений мощным инструментом для изучения, в частности, роли темной энергии и характеристик темной материи.

С наблюдательной точки зрения, принципиальным моментом является максимально точное измерение масс скоплений, позволяющее напрямую использовать теоретические предсказания для определения космологических параметров. А такие измерения невозможны без качественного определения характерных размеров скопления галактик. Таким образом, работа состоит из двух частей: моделирование положения аккреционной ударной волны и определение массы системы.

В первой части описывается моделирование самоподобной аккреции вещества на скопление галактик в модели Вселенной Эйнштейна-де Ситтера. Рассматриваются основные положения теории самоподобного процесса и особенности решения задачи, затем приводятся результаты численного моделирования при различных начальных параметрах: положение ударной волны, распределения давления и плотности газа, скорости и массы газа и темной материи.

Во второй части рассматриваются различные методы определения динамических масс скоплений галактик. В частности, демонстрируется применение теоремы вириала и сферического уравнения Джинса на модельных системах.

# СВОЙСТВА "ИСКОПАЕМЫХ" ГРУПП И СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

Океанова А.М.Г.<sup>1,2</sup>, Лыскова Н.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИУ Высшая школа экономики

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН

Как известно, большинство галактик является частью более крупных систем — групп и скоплений галактик. В оптическом диапазоне группы и скопления галактик выглядят как участки неба, где плотность галактик заметно выше, чем в других местах. Богатое скопление может содержать сотни галактик (из них несколько десятков действительно яркие галактики, а остальные — весьма слабые), заключенных в области размерами до нескольких миллионов световых лет. Бедные скопления/группы содержат несколько ярких и несколько десятков более тусклых галактик. В типичных группах/скоплениях масса заметную долю ( $\sim 15\%$ ) от общей массы скопления обеспечивает разреженный газ, заполняющий весь объем скопления. Газ в скоплениях разогрет до температур в десятки и сотни миллионов градусов. Он полностью ионизован, и “видеть” такой газ можно по его рентгеновскому излучению. «Ископаемые» (англ. fossil) группы отличаются от обычных тем, что в оптическом диапазоне в них доминирует одна яркая изолированная галактика, а в рентгеновском диапазоне наблюдается излучение, характерное для групп/скоплений, а не для одиночной галактики. Вероятнее всего, такие системы в течение длительного времени (несколько миллиардов лет) не претерпевали слияния с другими группами/скоплениями, а галактики в пределах группы в конце концов слились в одну большую и массивную галактику. Детали механизма формирования «ископаемых» систем до сих пор не известны. Таким образом, «ископаемые» группы являются слабо изученными объектами, и задача изучения их свойств и истории формирования является актуальной и перспективной. Более того, «ископаемые» группы, как изолированные системы, позволяют изучать процессы образования и эволюции галактик, внутригалактической и межгалактической среды в «невозмущенных» условиях, то есть в отсутствии слияний с другими группами.

На основе космологических симуляций Magneticum сформирован список кандидатов в «ископаемые» группы и описаны их свойства. Проведено сравнение свойств модельных «ископаемых» групп с обычными скоплениями галактик в разных диапазонах длин волн.

# ГАЛАКТИКИ, ПРОЛЕТАЮЩИЕ СКВОЗЬ ДРУГИЕ ГАЛАКТИКИ

Осипова А.М.

*НИУ Высшая школа экономики*

Галактики распределены в пространстве не однородно, а образуют группы и скопления, это вызвано эволюцией неоднородностей в распределении темной материи. Наша Галактика входит в состав Местной Группы. Близость Млечного Пути и МЗ1 заставляет большую часть гало малой массы взаимодействовать с более массивными гало темной материи, что увеличивает их плотность, а также выбрасывает из них газ. Некоторые маломассивные гало пролетают через гало Млечного Пути или МЗ1 и либо выбрасываются в поле, либо переходят между двумя основными хозяевами. Гало, пролетевшие сквозь другие гало, в литературе называют «бэксплеш».

Недавно был предсказан и описан новый класс полевых гало, которые когда-то пролетели и через Млечный Путь, и через МЗ1, а сейчас являются почти в два раза более плотными, чем изолированные полевые галактики. (Полевыми называют галактики или гало, которые не принадлежат к более крупной группе или скоплению галактик и, следовательно, являются гравитационно не связанными с чем-либо.) Было получено, что такие «гермесовские» гало распределены более анизотропно на больших расстояниях от барицентра МГ, чем полевые галактики, и, по-видимому, группируются вблизи Млечного Пути и МЗ1 в проекции на соединяющую их линию. Также получено, что некоторые гермесовские гало могут содержать галактики, которые являются многообещающими целями для непрямого поиска темной материи и могут конкурировать с сигналами от других карликовых галактик.

Гермесовские гало ещё слабо изучены, поэтому интересно узнать о них больше. Необходимо понять, насколько редко гермесовские гало встречаются во Вселенной. Для этого были рассмотрены численные модели групп и скоплений галактик с произвольными характеристиками. Важно понять, при каких «вариантах» МГ в ней можно обнаружить такие объекты. Устройство МГ известно не полностью, поэтому гермесовские галактики могут стать индикатором истории и свойств самой МГ. Если гермесовские гало встречаются часто, явление многократного пролета одних гало через другие может оказывать влияние и на средние свойства гало в целом.

В данной работе были проанализированы результаты двух крупных симуляций (ESMDPL и VSMDPL), выполненных международным консорциумом в рамках проекта MULTIDARK. Ниже приведены основные результаты исследования.

Доля гермесовских гало, появившихся в симуляции за примерно 5.8 млрд. лет, в VSMDPL в рассматриваемом интервале масс составляет 1.5 – 2%, что примерно в 10 раз меньше, чем доля бэксплеш гало. Начиная с некоторой массы сначала большая часть, а потом и все гало в симуляции являются мишенями для гермесовских гало. Примечательно, что более 95% всех гало с массой не менее  $10^{12} M_{\odot}/h$  хотя бы раз были мишенями. Это позволяет предположить, что объекты типа МГ с большой вероятностью содержат гермесовские гало. При увеличении минимальной массы гермесовского гало в 10 раз число массивных мишеней не поменялось. Это позволяет предположить, что при достаточно высоком разрешении симуляции, вокруг любого гало могут быть гермесовские гало. Большинство мишеней пролетало только одно гермесовское гало. Однако есть и гало, через которые было совершено несколько тысяч пролетов. Можно сказать, что описанный в работе [1] групповой пролет встречается значительно реже, чем пролет единичных гало, но исключать его из рассмотрения нельзя. Полученные результаты позволяют делать

аккуратные предположения о том, что гермесовские гало могут быть обнаружены около Млечного Пути.

Литература:

1. Newton O., Libeskind N.I., Knebe A., et al., 2021, eprint arXiv:2104.11242

# НАБЛЮДЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ БЫСТРЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНЗИЕНТОВ ZTF

Панков Н.С.<sup>1</sup>, Позаненко А.С.<sup>2</sup>, Белкин С.О.<sup>1,2</sup>,  
Ким В.Ю.<sup>1,3</sup>, Минаев П.Ю.<sup>2</sup>, Вольнова А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИУ Высшая школа экономики

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН

<sup>3</sup> Астрофизический институт имени В. Г. Фесенкова, Республика Казахстан

В больших оптических обзорах, таких как ZTF, регистрируется много транзиентов, часть которых являются "быстрыми" т.е. с быстрым степенным падением потока. С учетом цвета g-r (разница фотометрических значений в фильтрах g и r) такие транзиенты классифицируются как послесвечение космических гамма-всплесков. Некоторые из них находят своего прародителя, например, как ZTF22aabjpxh/AT2022cva (GRB 220219B). Другие не находят своего родительского компонента в другом диапазоне (гамма-, рентгеновское излучение), и для их классификации необходимы дальнейшие наблюдения. Такие транзиенты могут быть, например, всплесками-сиротами (наблюдаемыми под большим углом к оси джета гамма-всплеска, когда излучение в гамма-диапазоне подавлено), а могут иметь иную природу. Мы приводим результаты оптических наблюдений и поиска компонента в гамма-диапазоне, а также классификацию транзиентов ZTF21aayokph/AT2021fa, ZTF22aabjpxh/AT2022cva, ZTF22aaaajesp/AT2022cmc, ZTF21aakruew/AT2021c wd и ZTF21aaeyldq/AT2021any.

# СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОИСКА СИГНАЛА НА ТЕЛЕСКОПАХ TAIGA-IACT

Разумов А.Ю.

*НИИЯФ МГУ им. Скобелъцына*

Атмосферные черенковские телескопы являются мощным инструментом гамма-астрономии сверхвысоких энергий. Астрофизический комплекс TAIGA [1] (Тункинская долина, Республика Бурятия) включает в себя два атмосферных черенковских телескопа TAIGA-IACT, и в ближайшей перспективе их число будет увеличено до пяти. Для

В настоящем докладе описывается методика поиска сигнала от астрофизических источников гамма-квантов сверхвысоких энергий (более 1 ТэВ) по данным наблюдения источника HAWC J2019+368 Dragonfly Nebula [2] в созвездии Лебедь за 2020 – 2021 гг. Источник представляет из себя пульсарную туманность (PWN) со спектром энергий гамма-квантов более 100 ТэВ.

Приведены обзор источника и методов обработки данных моделирования и экспериментальных данных. За 2020 год по результатам обработки 60 ч совместных наблюдений двух атмосферных черенковских телескопов, выделен сигнал с уровнем значимости в  $3\sigma$  с возможным улучшением обработки методами машинного обучения.

Литература:

1. Budnev N., Astapov I., Bezyazeev P. et al. TAIGA an advanced hybrid detector complex for astroparticle physics and high energy gamma-ray astronomy in the tunka valley //Journal of Instrumentation. 2020. sep. Vol. 15, no. 09. P. C09031–C09031, <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/C09031>
2. A. Albert, R. Alfaro and HAWC Collaboration. Spectrum and Morphology of the Very-High-Energy Source HAWC J2019+368. 2021, arXiv:2101.01649v1 [astro-ph.HE].
3. Cadwallader, M.T. Migration and Residential Mobility: Macro and Micro Approaches. Madison, Wis.: University of Wisconsin Press. 1992.
4. A. Grinyuk, E. Postnikov, P. Volchugov, Stereoscopic and monoscopic operation of the five IACTs in the TAIGA experiment, ICRC2021, 2021

# ПЕРВОЕ ОПИСАНИЕ НОВОЙ МАССИВНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ В БОЛЬШОМ МАГЕЛЛАНОВОМ ОБЛАКЕ eRASSU J050810.4–660653 ПО ДАННЫМ SRG/ART-XC, NUSTAR AND SWIFT

Салганик А.

*Санкт-Петербургский государственный университет  
Институт космических исследований РАН*

Мы сообщаем результаты первых детальных спектрально-временных исследований недавно открытой Ве-рентгеновской двойной eRASSU J050810.4-660653 в БМО по данным приборов *SRG/ART-XC*, *NuSTAR* и *Swift/XRT*, полученных в наблюдениях декабря 2021 г. - января 2022 г. в широком диапазоне энергий 0.5-79 кэВ. В кривой блеска источника обнаружены пульсации с периодом  $40.5773 \pm 0.0001$  с, доля пульсирующего излучения монотонно возрастает с ростом энергии. Спектр источника можно хорошо аппроксимировать степенной моделью, модифицированной экспоненциальным обрезанием на высоких энергиях. Фазово-разрешённая спектроскопия показывает сильное изменение спектральных параметров в зависимости от фазы вращения нейтронной звезды. Каких-либо особенностей, связанных с циклотронной линией поглощения, мы не обнаружили как в усреднённом по фазе, так и в фазово-разрешённых спектрах eRASSU J050810.4-660653. Магнитное поле нейтронной звезды было оценено примерно в несколько  $\times 10^{13}$  Гс с использованием различных косвенных методов. Обнаруженные изменения жёсткости излучения в зависимости от фазы обсуждаются с точки зрения физических и геометрических свойств излучающей области.

# АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК ГИГАНТСКИХ ГАЛАКТИК НИЗКОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЯРКОСТИ

Самородова Е.Б.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Гигантские дисковые галактики, обладающие слабо светящимися протяженными отдаленными областями на расстоянии  $> 30$  кпк от центра галактики (giant Low Surface Brightness, gLSB) – редкие, но крайне интересные астрономические объекты. Вопросы формирования гигантских дисков, сохранившихся в процессе слияний с другими галактиками, представляют интерес для понимания эволюции галактик в целом. Однако на данный момент известно всего около сотни gLSB галактик, тогда как увеличение числа известных gLSB галактик позволит перейти к статистическому подходу в исследованиях. Задача поиска новых gLSB галактик особенно актуальна сейчас в связи с появлением глубоких фотометрических обзоров (The DECam Legacy Survey, Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program). Ручная инспекция таких обзоров практически невозможна, поэтому необходимо разрабатывать автоматический поиск исследуемых галактик, в частности на основе методов машинного обучения.

В данной работе мы развиваем аппарат автоматического поиска gLSB галактик. Главная идея подхода заключается в использовании радиальных профилей поверхностной яркости галактик вместо двумерных изображений галактик, что является физически мотивированным понижением размерности задачи для упрощения обучения классификатора. Мы разработали систему поточной обработки (pipeline) изображений для расчета радиальных профилей галактик, а также применили полученный pipeline к глубоким фотометрическим данным обзора Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program DR2 [1], доступным через cutout-сервис проекта Legacy Survey, для небольшой области неба ( $29 < \alpha < 40$ ,  $-7 < \delta < 3$ ), в которой ранее вручную было задетектировано 53 gLSB галактики (Saburova et al. in prep). Чтобы иметь физические размеры дисков галактик, рассматриваются галактики только с известными красными смещениями в диапазоне  $0.03 < z \leq 0.3$ . В результате проведен анализ данных 33748 галактик.

Этот массив данных будет использован для обучения и тестирования различных методов классификации, включая статистические методы и алгоритмы машинного обучения (Random Forest Classifier, SVM). Методы машинного обучения, включая сверточные нейронные сети, уже применялись для анализа поверхностной яркости галактик [2] и для поиска галактик низкой поверхностной яркости по оптическим изображениям [3], однако потребуется существенная модификация подходов для поиска гигантских галактик с протяженностью свыше 30 кпк при обучающей выборке всего несколько десятков объектов.

Литература:

1. Hiroaki Aihara, et al. Second data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program. // Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol. 71, Oct 2019.
2. R. Li, et al. Galaxy Light profile convolutional neural NETWORKs (GaLNets). I. Fast and accurate structural parameters for billion galaxy samples, 2021.
3. D. Tanoglidis, A. Ćiprijanović, and A. Drlica-Wagner. DeepShadows: Separating Low Surface Brightness Galaxies from Artifacts using Deep Learning, 2020.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ТРАНЗИЕНТА IGR J16195-4945 ПО ДАНЫМ SRG/ART-XC

Сатыбалдиев М.Н.<sup>1,2</sup>, Мереминский И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

IGR J16195-4945 был обнаружен обсерваторией INTEGRAL в 2003 году и является типичным представителем класса SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient). В таких системах происходит аккреция ветра звезды компаньона - голубого сверхгиганта - на компактный объект. Характерными признаками таких объектов являются яркие рентгеновские вспышки на масштабах 1000 секунд и сильно поглощенные рентгеновские спектры.

Это делает SFXT хорошими объектами для изучения телескопами, работающими в жестком рентгеновском диапазоне.

В докладе будут представлены результаты временного и спектрального анализа источника IGR J16195-4945, полученные в ходе длительного непрерывного наблюдения телескопом ART-XC в марте 2021 года.

# ШИРОКОПОЛОСНЫЙ АНАЛИЗ ВЕТРОВОЙ СИСТЕМЫ X1908+075 ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ NUSTAR

Штыковский А.Е., Лутовинов А.А., Арефьев В.А.

*Институт космических исследований РАН*

Представлены результаты исследования спектральных и временных свойств излучения рентгеновского пульсара X1908+075 по данным обсерватории NuSTAR в широком рентгеновском диапазоне энергий 3-79 кэВ. Наряду с детальным анализом усредненного спектра излучения источника, впервые получены и исследованы широкополосные спектры, соответствующие разным фазам цикла собственного вращения нейтронной звезды. Показано, что модель комптонизированного излучения хорошо описывает спектр источника, и прослежена эволюция его параметров в зависимости от фазы импульса. Для всех спектров (усредненных и фазовых) в диапазоне энергий 5–55 кэВ проведен поиск циклотронной линии поглощения. Полученный верхний предел на оптическую глубину циклотронной линии  $\tau \sim 0.16$  ( $1\sigma$ ) указывает на отсутствие такой особенности в указанном диапазоне энергий, что позволяет получить ограничение на величину магнитного поля нейтронной звезды:  $B < 3 \times 10^{11}$  Гс и  $B > 6.5 \times 10^{12}$  Гс. Проведен подробный анализ переменной профилей импульсов X1908+075 в различных диапазонах энергий, показано что основная эволюция профиля импульса происходит в области энергий менее 10 кэВ, по результатам анализа выдвинуто предположение о наличии нескольких излучающих зон.

# КРОСС-ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКИХ КАТАЛОГОВ SDSS И PANSTARRS

Щекотихин Е.А.<sup>2</sup>, Панков Н.С.<sup>2</sup>, Позаненко А.С.<sup>1</sup>,  
Минаев П.Ю.<sup>1</sup>, Белкин С.О.<sup>1,2</sup>

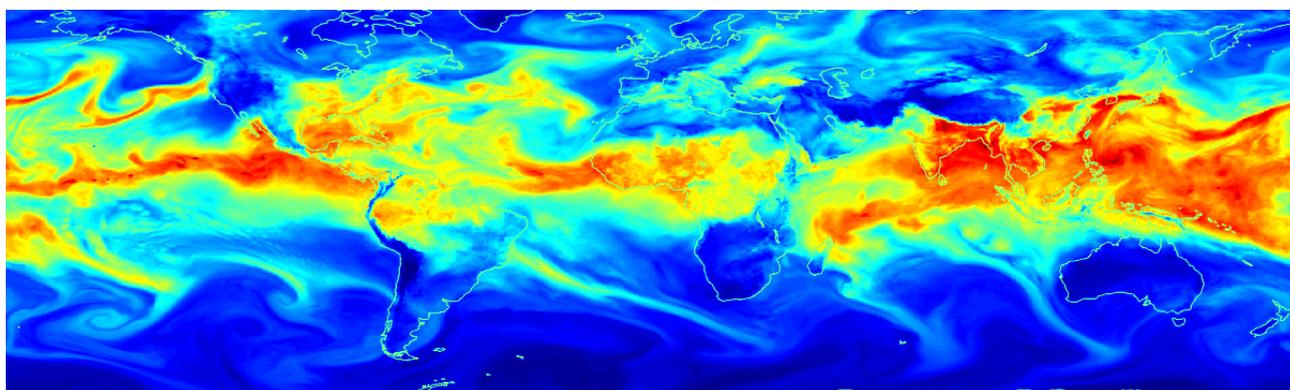
<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Высшая школа экономики*

Кросс-идентификация является важным инструментом исследования новых, ранее неизвестных транзиентных объектов, и стандартной составляющей любого автоматизированного конвейера по обработке астрономических данных. Необходимость установить взаимно-однозначное соответствие между объектами, зафиксированными в ходе различных наблюдений одной и той же площадки неба, возникает в астрометрии, в изучении объектов в различных диапазонах длин волн, а так же при поиске транзиентов. На примере полей каталогов SDSS DR12 и Pan-STARRS PS1 рассмотрена эффективность различных методов и представлены результаты кросс-идентификации двух каталогов.

---

# ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ



# АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВА ОБЛАЧНОСТИ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Алимпиева М. А.<sup>1</sup>, Морозова С.В.<sup>2</sup>, Короткова Н.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Саратовский национальный исследовательский университет имени Н.Г. Чернышевского

Облачный покров принадлежит к числу основных факторов формирования климата. Этот фактор является довольно мощным, но в то же время и довольно изменчивым регулятором радиационного режима Земли. Отметим, что не смотря на большое количество публикаций по исследованию связи облачности и термического режима, например, выполненных авторами настоящей публикации [1 - 7], роль облаков в настоящих климатических изменениях в должной степени не определена.

Визуальные наблюдения за облаками недостаточно репрезентативны, так как наблюдения почти всегда ограничиваются светлым временем суток, и к тому же являются фрагментарными с точки зрения глобального охвата. Авторы настоящей публикации считают, что наиболее достоверные оценки о количестве облаков можно получить, используя спутниковую информацию.

В настоящем исследовании поставлена задача рассмотреть изменение облачного покрова над Северным полушарием в январе и июле за период с 2000 по 2009 гг. Исходными материалами послужили сведения об облаках с сайта NASA ([https://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MODAL2\\_M\\_CLD\\_FR](https://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/view.php?d1=MODAL2_M_CLD_FR)). На основании данных сайта построены карты средних месячных значений количества облаков, а также их среднего многолетнего количества (2000-2009 гг.) в январе и июле. Составлены таблицы широтно-долготного распределения облаков.

На средних многолетних картах хорошо прослеживается известная закономерность о большем количестве облаков над океанами, чем над сушей. Причем это характерно и для января, и для июля.

В табл. 1 представлена повторяемость различных градаций облачности в январе в зависимости от широты

Таблица 1: Повторяемость (%) различных градаций облачности по широтам в Северном полушарии в январе (по спутниковым данным)

Облачность, баллы	Широта								
	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0
1-3	33,3	5,6	0,0	0,0	0,0	27,8	38,9	16,7	22,2
4-6	41,7	44,4	22,2	11,1	8,3	16,7	33,3	38,9	27,8
7-8	16,7	27,8	41,7	41,7	50,0	41,7	22,2	30,6	22,2
9-10	5,6	19,4	33,3	44,4	38,9	11,1	2,8	8,3	25,0

Как видно из табл. 1, на экваторе (0° широты) не бывает безоблачных дней. Повторяемость других градаций в районе экватора приблизительно равновероятны. Отметим, что в январе ясной погоды не отмечается и на всех остальных широтах за исключением 10.0° широты, где повторяемость ясной погоды составляет 3%. Самыми пасмурными районами зимой являются сороковые – шестидесятые широты полушария.

Таблица 2: Повторяемость (%) различных градаций облачности по широтам в Северном полушарии в июле (по спутниковым данным)

Облачность, баллы	Широта								
	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,9	8,3	0,0	0,0
1-3	2,8	0,0	0,0	0,0	27,8	5,6	8,3	2,8	13,9
4-6	19,4	33,3	30,6	41,7	33,3	50,0	44,4	13,9	25,0
7-8	69,4	55,6	47,2	27,8	19,4	25,0	16,7	61,1	52,8
9-10	8,3	11,1	22,2	30,6	19,4	5,6	22,2	22,2	8,3

В табл. 2 представлены аналогичные данные для июля. Летом ясная погода имеет место в широтной зоне  $20^{\circ} - -30^{\circ}$  с.ш. Повторяемость пасмурного неба максимальна на широте  $50^{\circ}$  с.ш. Оказывается интересным, что летом малооблачной погоды (1 – 3 балла) практически не бывает в широтной зоне  $50 - 70^{\circ}$  широты.

Авторы планируют сопоставить полученные результаты с данными о количестве облаков в другие десятилетия, а также провести сравнение спутниковых данных с материалами наземных наблюдений.

#### Литература:

1. Завьялова Е.В., Морозова С.В. Исследование годового хода температуры и общей облачности по м/с Пермь и Оренбург В сб.: Цифровая география. Пермь, 2020. С. 370-373.
2. Завьялова Е.В., Морозова С.В., Молчанова Н.П. Облачно-радиационные процессы и климатическая изменчивость. В сб.: Геоэкология и природопользование: актуальные вопросы науки, практики и образования. 2018. С. 129-133.
3. Завьялова Е.В., Морозова С.В., Кононова Н.К., Полянская Е.А. Сравнительная характеристика годового хода температуры и общей облачности. В сб.: Проблемы географии Урала и сопредельных территорий. Челябинск, 2020. С. 10-15.
4. Морозова С.В., Завьялова Е.В., Алимбиева М.А. Сравнение режима облачности в аридных регионах по данным метеостанций Воронеж, Саратов и Оренбург. В сб.: Комплексные проблемы техносферной безопасности. Воронеж, 2021. С. 104-109.
5. Морозова С.В., Полянская Е.А., Кононова Н.К. Сравнительный анализ режима облачности в Нижнем Поволжье и Южном Предуралье на фоне меняющегося климата. В сб.: Степи Северной Евразии. Материалы девятого международного симпозиума. Оренбург, 2021. С. 580-584.
6. Морозова С.В. О возможной роли облачности в настоящих климатических изменениях // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2017. № 586. С. 251-260.
7. Morozova S.V., Polyanskaya E.A., Kononova N.K., Molchanova N.P., Zhelezovskaya G.I. On the role cloudiness in climatic changes. В сб.: Environmental transformation and sustainable development in the Asian region. Иркутск, 2020. С. 110.

# КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ВЫГОРЕВШИХ ПЛОЩАДЕЙ НА ЧЕРНЫХ ЗЕМЛЯХ

Берденгалиева А.Н.

*ФНЦ Агрэкологии РАН*

В работе приводятся результаты геоинформационного картографирования выгоревших площадей за 1985-2021 гг. на территории Черных земель. Источником данных для исследования являлись спутниковые изображения Landsat, Sentinel-2, MODIS, а также информационные продукты детектирования активного горения FIRMS и выгоревших площадей MCD64A1, FireCCI51, FireCCI 5.1 и GABAM. Использование данных различного пространственного разрешения широко используется для оценки площади пожаров [1]. Установлены закономерности многолетней динамики горимости ландшафтов, повторяемость пожаров и длительность пирогенных сукцессий в разрезе ООПТ. Ландшафтные пожары являются существенным экзогенным фактором динамики состояния травянистых экосистем, который характерен для степных регионов. В условиях опустыненных степей и северных пустынь пожары приводят к существенному изменению растительного покрова [2, 3].

Целью работы является анализ закономерностей пространственно-временной динамики выгоревших площадей на территории Черных земель.

На первом этапе были определены сезонные закономерности пожарного режима ландшафтов изучаемой территории на основе анализа архива данных детектирования активного горения (термоточек FIRMS). В соответствии с особенностями сезонной и многолетней динамики горимости подбирались спутниковые снимки для определения пройденных огнем территорий. Для исследования использовались цветные RGB-композиции в комбинации "спектральных каналов" естественные цвета и комбинации с включением ближнего и коротковолнового инфракрасных каналов. Также анализировались данные выгоревших площадей FireCCI5.1 и MCD64A1, GABAM.

Всего в результате работы идентифицировано около четырех тысяч пожаров общей площадью 7,17 млн. га без учета повторяемости. В период до 1988 г. пожаров не зафиксировано. Это может быть связано с низким качеством спутниковых данных до 1984 гг. и значительно меньшей горимостью в эти годы. Меньшая горимость в период 1984-1990 гг. подтверждается также данными [4]. До середины 90-х преобладали относительно небольшие по площади пожары (до 1 тыс. га). В 1998 г. произошли первые пожары площадью более 25 тыс. га каждый. В дальнейшем большая часть выгоревших площадей была представлена именно пожарами более 10-15 тыс. га каждый. Причины пожаров требуют дополнительных исследований.

Работа выполнена по темам НИР ФНЦ агроэкологии РАН № 122020100311-3, № 122020100405-9 и № 122020100406-6.

Литература:

[1] Барталев С.А., Егоров В.А., Ефремов В.Ю., Лупян Е.А., Стыценко Ф.В., Флитман Е.В.. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №2. С. 9-26.

[2] Кулик К.Н., Петров В.И., Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. К 30-летию Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ// Аридные экосистемы. 2018. №1. С. 5-12.

[3] Шинкаренко С.С. Пожарный режим ландшафтов Северного Прикаспия по данным очагов активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т.16. № 1. С. 121-133.

[4] Dubinin M., Potapov P., Lushekina A., Radeloff V.C. Reconstructing long time series of burned areas in arid grasslands of southern Russia by satellite remote sensing // Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 1638–1648 DOI: 10.1016/j.rse.2010.02.010.

# РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СТАНДАРТНОГО НАБОРА ДАННЫХ ATL08 СПУТНИКОВОГО ЛИДАРА ATLAS/ICESAT-2 ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫСОТЫ ЛЕСНОГО ПОКРОВА

Богодухов М.А.<sup>1,2</sup>, Барталев С.А.<sup>1,2</sup>, Жарко В.О.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

Для мониторинга лесов на больших территориях необходимо использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса. Одной из ключевых характеристик лесного покрова является его высота, необходимая для решения ряда прикладных и научных задач, в частности связанных с оценкой бюджета углерода лесов России. Непосредственные измерения высоты объектов земной поверхности, включая получение информации о вертикальной структуре растительности, на больших территориях могут выполняться с использованием спутниковых лидарных данных.

Стандартный продукт ATL08 данных ATLAS/ICESat-2 предоставляет информацию о распределении высоты лесного покрова на участках земной поверхности размером 100x14 м (Neuenschwander et al., 2021). В 2021 году разработчики модифицировали указанный набор данных, добавив дополнительный параметр, характеризующий высоту леса в пределах участков 20x14 м, что потенциально позволяет проводить ее оценку с более высоким уровнем пространственной детальности.

В докладе описано развитие методов предварительной обработки данных ATL08, направленное на преобразование исходной информации о расположении и высоте участков лесного покрова размером 20x14 м в векторный формат для дальнейшего геоинформационного анализа. Также в рамках данной работы была проведена оценка влияния повышения пространственной детальности лидарных данных на точность оценки высоты лесов на основе сравнения с результатами наземных измерений характеристик лесного покрова.

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 19-77-30015. Обработка данных ДЗЗ проводилась с использованием ресурсов ЦКП "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2019), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы "Мониторинг" (госрегистрация № 122012400187-6).

Литература:

1. A.L. Neuenschwander, K.L. Pitts, B.P. Jelley, J. Robbins, B. Klotz, S.C. Popescu, R.F. Nelson, D. Harding, D. Pederson, and R. Sheridan. 2021. ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, Version 5. [Data set]. Boulder, Colorado USA.

NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL08.005>. [2022-01-17].

2. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП "ИКИ-Мониторинг") // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С.151-170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

# ОПЫТ СОЗДАНИЯ ВЕБ-ГИС ОРОШАЕМЫХ ЗЕМЕЛЬ ВОЛГО-АХТУБИНСКОЙ ПОЙМЫ НА ТЕРРИТОРИИ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

**Васильченко А.А.**

*ФНЦ Агроэкологии РАН*

Главной целью создания локальной ГИС орошаемых земель Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области является создание информационного продукта для потенциальных будущих землепользователей, в котором кроме местоположения объектов (орошаемых земель) будет комплекс иных данных, которые укажут на степень привлекательности участков. Предоставляемые данные с web-ГИС могут использоваться для выбора свободных орошаемых сельхозугодий на территории Волго-Ахтубинской поймы. Комплексность данных позволит выбрать наиболее подходящие участки для земледелия, а комплексная геоинформационная оценка покажет инфраструктурную доступность и общую привлекательность орошаемого участка с точки зрения коммерциализации. Повышенная точность, по сравнению с аналогами позволит использовать данные для точного земледелия.

Web-ГИС орошаемых земель Волго-Ахтубинской поймы состоит из оцифрованных посредством дешифрирования объектов: орошаемых земель, водных объектов, объектов инфраструктуры, а также характеристик территории. Основными качественными параметрами является пространственное разрешение и качество дешифрирования. По сравнению с аналогами данная веб-ГИС будет превосходить в качестве определения границ объектов. С точки зрения временных затрат, по сравнению с аналогами (в основе которых лежит машинное определение объектов) данная веб-ГИС уступает, однако локализованность работы и качество объектов (которые в дальнейшем могут использоваться для точного земледелия) нивелируют временные затраты. С точки зрения экономической обоснованности - ручное дешифрирование уступает машинному, однако, машинное обучение для определения земель сельскохозяйственного назначения развито только в сфере обрабатываемого земледелия (пашни), в определении орошаемых земель, особенно долгое время находящихся в состоянии залежей, машинное обучение дает очень низкую точность определения, поэтому иных способов в данный момент для определения и анализа орошаемых земель не имеется.

Конечная структура web-ГИС постоянно находится в динамике, геоинформационные слои дополняются данными и атрибутами. Базовая структура ГИС орошаемых земель Волго-Ахтубинской поймы имеет следующий вид:

- Базовый вспомогательный слой гидрологии;
- Группа вспомогательных слоев с площадями затопления;
- Базовый слой лесных насаждений всех видов;
- Вспомогательный слой с населенными пунктами;
- Вспомогательный слой с границами муниципальных образований;
- Группа слоев с дорогами;
- Основной слой с сельскохозяйственными полями.

# РАЗВИТИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ЗАПАСА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ TERRA-MODIS

Ворушилов И.И.<sup>1,2</sup>, Барталев С.А.<sup>1,2</sup>, Егоров В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

Данная работа представляет собой развитие исследования, направленного на ежегодную оценку запаса стволовой древесины на территории России. Цель данной работы – разработать и опробовать метод ежегодной модификации опорной выборки. Данный подход позволяет дополнительно использовать данные, которые не представляется возможным нормализовать между собой внутри многолетнего временного ряда измерений, однако их использование в качестве признаков является целесообразным. В отличие от предшествующих исследований, описанных ранее, где опорная выборка запасов стволовой древесины строилась единожды и на её основе строилась ежегодная оценка запаса стволовой древесины, в данном подходе разработан метод ежегодной актуализации опорной выборки. Разработанный метод в качестве входных данных для получения величин запасов использует радиометрически нормализованные композитные изображения снежного покрова и оценку запасов стволовой древесины за ближайший год, а также ненормализованные между собой разносезонные композитные изображения растительного покрова. Также помимо самой перенесённой на необходимый год выборки строится оценка достоверности. В качестве изначальной оценки запасов стволовой древесины используются результаты проекта Globbiomass за 2010 год.

Исследование выполнено в рамках гранта РНФ 019-77-30015 - разработка методов и технологии комплексного использования данных дистанционного зондирования Земли из космоса для развития системы национального мониторинга бюджета углерода лесов России в условиях глобальных изменений климата.

Литература:

1. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263-284.

2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208с.

3. ESA DUE Globbiomass project (<https://globbiomass.org/>)

# ОЦЕНКА СОХРАННОСТИ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЛОС ПО ДАННЫМ SENTINEL-2

**Выприцкий А.А.**

*ФНЦ Агроэкологии РАН*

В данном докладе представлен анализ сохранности трех водораздельных государственных защитных лесных полос (ГЗЛП): "Каменск – Пенза" "Камышин – Волгоград" "Волгоград – Черкесск". В работе была посчитана сохранность ГЗЛП с помощью вегетационного индекса NDVI. Использовались данные дистанционного зондирования земли со спутника Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 метров. Было произведено сравнение с альтернативными источниками открытого доступа по заполненной лесными насаждениями территории исследования: GlobalLandCover30 (GLC30), ESRI, Global Forest Change (GFC). Картографирование объекта и подготовка статистических данных проводилось в геоинформационной системе QGIS из-за его бесплатного характера использования и разносторонних модулей для работы с данными дистанционного зондирования Земли. Для подготовки полигонов проектной площади исследуемых ГЗЛП использовались RGB-изображения Sentinel-2 A-B и публичная кадастровая карта для уточнения границ объекта. Дальнейшая работа заключалась в классификации лесного полога с помощью NDVI на август-сентябрь. Причиной выбора этих месяцев является исключение из анализа естественной растительности и сельскохозяйственных культур, по причине окончания их вегетационного периода и, соответственно, уменьшения показателя значения NDVI. На основе почвенной карты Волгоградской области 1984 г. М 1:400000 была подсчитана площадь лесного полога в границах ГЗЛП на различных почвообразующих породах. Проектная площадь ГЗЛП составила 13094,1 га на территории 9 лесничеств Волгоградской области. Была проведена оценка точности определения сохранности объекта исследования на основе NDVI и информационных продуктов типов земного покрова и проективного покрытия леса и их сравнение.

# СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЯРКОСТИ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ: СУДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Дерягин Д.Н.<sup>1,2</sup>, Глуховец Д.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> НИУ Московский физико-технический институт

<sup>2</sup> Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН

Спектральный коэффициент яркости моря  $R_{rs}$  рассчитывается как отношение спектральной яркости выходящего из водной толщи излучения непосредственно под поверхностью моря к спектральной облученности излучения, падающего на поверхность. Регулярные измерения величин  $R_{rs}$  для всей акватории Мирового океана выполняются спутниковыми сканерами цвета. Эта величина несет информацию о пространственной и временной изменчивости биооптических характеристик поверхностного слоя моря.

Моделирование спектров коэффициента яркости моря проводилось при помощи программного обеспечения HYDROLIGHT, с использованием данных судовых измерений биооптических характеристик поверхностного слоя морской воды и дальнейшее сравнение результатов моделирования с подспутниковыми измерениями  $R_{rs}$  с борта судна, а также спутниковыми данными OLCI и MODIS. Для работы была выбрана станция 7013 в Баренцевом море, измерения на которой произведены в первом этапе 83-го рейса НИС "Академик Мстислав Келдыш" в июне 2021 года. Для измерения величин  $R_{rs}$  использовался палубный спектрофотометр ASD HandHeld. Значения показателя поглощения взвешенными частицами  $ap(\lambda)$  измерены спектрофотометром с интегрирующей сферой ICAM. Прямые измерения концентрации хлорофилла (Хл) выполнялись экстракционным методом.

Моделирование проводилось в предположении о первом типе исследуемых вод, что позволяет параметризовать значения первичных гидрооптических характеристик через концентрацию Хл. В этом случае полученный в результате моделирования спектр  $R_{rs}$  в сравнении с измеренным спектром имеет высокий коэффициент детерминации  $R^2 = 0,97$ , но в то же время достаточно большую относительную ошибку - 35%. Использование спектральных величин удельного показателя поглощения  $a^*(\lambda)$ , которое определяется как отношение  $ap(\lambda)$  к концентрации Хл, позволяет значительно улучшить результаты моделирования -  $R^2 = 0,97$ , относительная ошибка 11%. Полученное улучшение связано с учётом вклада взвешенных частиц. Проведена проверка результатов модельных расчетов с использованием метода дискретных ординат (DISORT). Эти расчеты выполнены по измеренным спектрам  $R_{rs}$  и показателя поглощения, а также вертикальным профилям показателя ослабления света морской водой. В результате получены значения показателя рассеяния и индикатрисы, что позволило задать отношение спектральных величин  $bb/b$  при моделировании в HYDROLIGHT. В этом случае  $R^2=0,99$ , при относительной ошибке 5%. Сравнение результатов моделирования и спутниковых данных OLCI и MODIS демонстрирует хорошее соответствие при использовании  $a^*(\lambda)$ :  $R^2 = 0,96$  и  $0,95$  с относительными ошибками 7% и 13%.

В результате показано, что учет величин удельного показателя поглощения при моделировании спектрального коэффициента яркости моря позволяет существенно повысить точность расчетов в водах первого типа.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 21-77-10059). Грант предоставлен через ИО РАН. Авторы выражают благодарность П.А. Салюку, Е.А. Агловой, С.В. Шеберстову, А.В.Юшмановой и И.В. Салинг за предоставленные данные.

# ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЛАЧНОГО ПОКРОВА В САРАТОВЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Диянова Е.С., Червяков М.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени  
Н.Г. Чернышевского*

В настоящее время ведутся наземные метеорологические и спутниковые наблюдения за облачностью. Первые подразумевают визуальное определение форм и балловой оценки облачности. Такой метод применяется на сети метеорологических станций сети Росгидромета и имеет ряд недостатков, которые прежде всего связаны с погрешностью, вызванной субъективным взглядом техника-наблюдателя. В современных условиях представляет интерес провести качественную и количественную оценку облачности по имеющейся в свободном доступе различной спутниковой информации об облачности [1-3].

В работе рассматриваются результаты анализа пространственно-временного распределения многолетнего среднего значения облачности на основе массива данных продукта NASA Earth Observation Cloud Fraction, формируемые на основе данных с гелиосинхронных, полярно-орбитальных спутников Terra и Aqua.

В качестве исходных данных были использованы продукты NEO Cloud Fraction с месячным окном накопления и пространственным разрешением 0,25 градусов. Глобальные месячные сцены NEO Cloud Fraction представлены в виде матриц размера 1440×720. Значение пикселя отражает пространственно-временную долю покрытия общей облачностью на момент пролета спутника в выбранном месячном окне. Данные анализировались за период 2000 - 2019 гг.

На рис. 1 представлен график межгодовой изменчивости облачности для Саратова по данным среднемесячных величин. В период наблюдений минимальное значение среднемесячной облачности (0,25 долей единицы) наблюдалось в августе 2001 г., максимальное (0,98 долей единицы) в декабре 2002 г. Среднее значение облачности составило за 19-летний период 0,65.

В среднегодовом ходе общей облачности максимальное количество облаков приходится на зиму и на конец осени. Минимальное количество облачности приходится на лето (август).

Также в работе проведен анализ карт распределения многолетнего среднего значения облачности. Анализ карт обнаруживает контраст между величинами облачности. Южные районы Саратовской области можно отнести к малооблачным - значение облачности варьирует от 0,62 до 0,64. Северные районы характеризуются высокими значениями облачности- 0,67-0,69.

Литература:

1. Складов Ю.А., Червяков М.Ю., Воробьев В.А., Котума А.И., Фейгин В.М. Особенности распределения альбедо в 2010 – 2012 годах по данным с ИСЗ "Метеор – М" № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 107-117.

2. Суркова Я.В., Червяков М.Ю., Спирихина А.А., Нейштадт Я.А., Шаркова С.А. Влияния облачности на радиационный баланс Земли по данным спутниковых измерений // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". М.: ИКИ РАН, 2019. С. 220.

3. Червяков М.Ю., Суркова Я.В., Спирихина А.А., Нейштадт Я.А., Котума А.И., Шаркова С.А. Взаимосвязь облачности и альбедо на верхней границе атмосферы по данным спутниковых измерений // Сборник тезисов докладов Шестнадцатой Всероссийской Открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". М.: ИКИ РАН, 2018. С. 234.

# СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТАВЛЯЮЩИХ РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ РОССИЙСКИХ РАДИОМЕТРОВ ИКОР-М

Диянова Е.С., Червяков М.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени  
Н.Г. Чернышевского*

В сентябре 2009 г. был запущен российский метеорологический спутник нового поколения "Метеор-М" № 1 и 8 июля 2014 года - "Метеор-М" № 2, предназначенные для измерений составляющих РБЗ на верхней границе атмосферы. На борту этих спутников были установлены радиометры ИКОР-М – "Измеритель коротковолновой отраженной радиации созданный в СГУ имени Н.Г. Чернышевского группой, под руководством профессора Ю.А. Складорова [1].

Особенностью прибора ИКОР-М1 является то, что в течение всего периода наблюдений (с октября 2009 по август 2014) происходит медленный спад показаний. Это связано с тем, что на чувствительный элемент датчика постепенно оседали пыль и другие продукты собственной атмосферы космического аппарата. Результат подобного воздействия обычно называют эффектом старения аппаратуры [2].

Для первого радиометра ИКОР-М выявлен линейный тренд уменьшения чувствительности, который учтен при анализе данных. Для анализа данных шкала первого радиометра была привязана к шкале аналогичного измерителя, проработавшего на борту ИСЗ "Метеор-М" № 2 с августа 2014 г. по август 2019 г.

После учета тренда для первого радиометра и привязки шкал была рассмотрена изменчивость величин альbedo для различных регионов планеты. В качестве примера были выбраны пустынные территории Аравийского полуострова и Северной Африки. Отдельно анализировались территории Амазонской низменности и Гренландии. Для всех рассматриваемых регионов были рассчитаны среднемесячные значения альbedo с октября 2009 г. по август 2019 г.

Литература:

1) Складорова Ю.А., Воробьев В.А., Котума А.И., Червяков М.Ю., Фейгин В.М. Алгоритм обработки данных наблюдений уходящей коротковолновой радиации с ИСЗ "Метеор-М" № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №3. С. 83-90.

2) Богданов М.Б., Воробьев В.А., Котума А.И., Червяков М.Ю. Связь шкал измерителей коротковолновой отраженной радиации ИКОР-М ИСЗ "Метеор-М" № 1 и № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 252–260.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛЯ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕГО СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2021 Г.

Дмитриева М.А.

*Российский государственный гидрометеорологический университет*

Изучение термосферы, мезосферы, особенностей изменения поля С.О. и процессов ионизации на больших высотах имеют огромное практическое значение для науки настоящего и будущего. Выявление тенденций изменения микрофизических и метеорологических параметров позволяет нам увидеть более комплексную картину атмосферных процессов и их взаимосвязи с солнечной и космической погодой, как части единой глобальной космической системы. Эти знания позволяют нам по эмпирической тенденции определить предстоящие изменения атмосферы как единого физико-химического объекта, с большей уверенностью и максимальной заблаговременностью для создания эффективных прогнозов атмосферной и космической погоды.

В работе были проведены расчеты температурных показателей с помощью эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00 [1], построены температурные графики для определения высотного диапазона появления С.О. за сутки до и через сутки-двое после солнечных вспышек в летний период 2021 г. в соответствии с последующим скачкообразным разрастанием поля С.О. по данным спутниковых снимков С.О., сделанным аппаратом AIM [2]. По данным проведенного исследования за летний период 2021 г. с 20 мая по 18 августа было определено соответствие увеличения поля С.О. датам солнечных вспышек [3] примерно с суточным интервалом ( $\sim 22$  ч) около 00.00 UTC. Была локализована высота поля С.О. в летний период 2021 г. на уровне 80-95 км. Был проведен расчет по формуле Томсона [4], учитывающей обязательное наличие заряда частиц ядер конденсации для последующего присоединения к ним водяного пара на данных высотах, согласно которому размер ядер конденсации для частиц С.О. составил  $0,4 * 10^{-7}$  см. При таких размерах ядер конденсации размер частиц самих С.О. вполне может составлять от 0,1 до 1,5 мкм, что соответствует данным проводимых ранее исследований [6, 7]. Также была выявлена тенденция предполагаемого процесса накопления заряда на высотах мезосферы после солнечных вспышек, подкрепляемого постоянным притоком солнечного излучения в мезосферу в летний период. Этот вопрос необходимо будет проверить в дальнейшей научной работе с использованием анализа большего количества микроструктурных данных и данных солнечной активности, учитывая показатели протонных штормов и др.

Литература и источники:

1. Эмпирическая модель атмосферы NRLMSISE-00. – Электронный ресурс:  
<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>
2. Сайт лаборатории атмосферы и физики космоса NASA, США, Колорадо. Данные со спутника AIM. Электронный ресурс:  
<https://lasp.colorado.edu/aim/browse-images.php?dataset=pmc>
3. Сайт космической погоды. – Электронный ресурс:  
<https://www.spaceweatherlive.com/ru.html>
4. Мировой центр данных по Солнечно-Земной физике. Геофизический центр Российской Академии Наук. Электронный ресурс:  
[http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar\\_proton\\_events.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/solar/solar_proton_events.ru.html)

5. Thermospheric temperature and density variations. Hitoshi Fujiwara, Yasunobu Miyoshi, Hidekatsu Jin, Hiroyuki Shinagawa, Yuichi Otsuka, Akinori Saito and Mamoru Ishii. Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets Proceedings IAU Symposium No. 264, 2009. – p. 310-321.

6. Регулярная и нерегулярная изменчивость температуры и характеристик серебристых облаков в области среднеширотной мезопаузы. Перцев Н.Н. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29. – физика атмосферы и гидросферы. – М.: ФГБУН ИФА им. А.М. Обухова РАН, 2015.

7. Угольников О.С. Облака и аэрозоль выше тропосферы: оптические наблюдения и новейшая история. Косм. исслед., 2018 г. – 105-122 с.

8. Yuh-Lang Lin. Mesoscale dynamics. – Cambridge University Press, New York, 2007, 646.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ, ПРОЙДЕННЫХ ОГНЕМ, ПО ДАННЫМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Енина Е.А.<sup>1</sup>, Балашов И.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН*

Ежегодно на территории РФ сгорают миллионы гектар леса. Традиционно для задач мониторинга пожаров и получения оперативных оценок площадей на глобальных территориях используются спутниковые данные о термических аномалиях среднего пространственного разрешения.

Использование данных высокого пространственного разрешения позволяет получать более точные оценки площадей, пройденных огнем, чем полученные по данным о горении среднего разрешения. До настоящего времени такие оценки в сервисах, создаваемых в ИКИ РАН, проводились выборочно, в автоматизированном режиме оператором, с использованием инструмента управляемой классификации изображений и требовали значительного времени. Получение таких оценок для всех пожаров на территории РФ является длительным и ресурсоемким процессом. Применение методов машинного обучения позволило бы увеличить производительность получения первичных оценок площадей, и, в перспективе, сделать этот процесс полностью автоматическим для всех зон горения, детектированных по среднему разрешению.

В работе описывается опыт применения алгоритма автоматического уточнения контуров пожаров при помощи сверточной нейронной сети архитектуры U-Net. Нейронная сеть была реализована с помощью библиотеки TensorFlow 2.0 на языке Python. Для обучения и тестирования нейронной сети был подготовлен набор данных, состоящий из 6750 спутниковых снимков лесного пожара. Для каждого изображения была создана маска, в которой для каждого пикселя было определено, относится он к гари или нет. Для обучения на вход нейросети подавалась половина из полученных изображений. Тестирование проводилось на оставшихся снимках. Применение данного метода с настройками по умолчанию показало хороший уровень точности оценок и перспективность подхода.

В настоящем докладе представлены результаты, полученные в результате работы предложенной нейронной сети. Сформулированы проблемы, возникающие при создании обучающего и тестового набора данных и предлагаются пути их решения. Также предлагаются различные подходы к оценке точности и верификации полученных результатов. В заключении, формулируются дальнейшие этапы работ по применению методов машинного обучения для получения оценок площадей пройденных огнем, по данными высокого разрешения.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

**Клинков Н.С.**

*НИИ КС имени А.А. Максимова – филиала АО ГКНПЦ им. М.В. Хруничева*

В российской и мировой отрасли дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) присутствует устойчивая тенденция формирования на орбите группировок космических аппаратов (КА) ДЗЗ. Как следствие, это вызывает многократное увеличение количества снимков, получаемых с КА ДЗЗ. В этой связи приобретает актуальность задача придания целевой аппаратуре космических комплексов ДЗЗ статуса измерительных систем с объективным подтверждением точности получаемых результатов.

Как следствие, в общей системе получения качественной информации по материалам обработки исходных данных ДЗЗ важная роль принадлежит процессам объективного контроля и оценки характеристик качества исходных космических снимков и производной продукции.

Процесс обработки космических снимков оператором является трудоемким и требует от него большого напряжения, вследствие чего весьма актуальной является задача автоматизация процесса оценки качества данных ДЗЗ и подтверждения точности данных ДЗЗ получаемых с КА ДЗЗ. Задачи по оценке качества космических снимков решались в научной исследовательской работе (НИР) "Мониторинг-СГ с использованием программного комплекса, разработанного в составной части НИР (СЧ НИР) "Мониторинг-СГ-1.3.3.1". В настоящее время для решения задачи автоматизации оценки качества данных ДЗЗ, в СЧ НИР "Интеграция-СГ-3.2.6" проводится разработка аппаратно-программного комплекса (АПК), целью которого является автоматизация процессов оценки качества с использованием удалённого доступа на основе "облачных" технологий.

В докладе рассматривается задача создания экспериментального образца аппаратно-программного комплекса удалённой автоматизации процессов оценки качества данных ДЗЗ (ЭО АПК АПОК). Экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса разрабатывается в НИИ КС имени А.А. Максимова – филиале АО "ГКНПЦ им. М.В. Хруничева совместно с ООО "Центр инновационных технологий с целью автоматизации процессов оценки качества данных ДЗЗ.

Экспериментальный образец аппаратно-программного комплекса удалённой автоматизации процессов оценки качества данных ДЗЗ предназначен для решения следующих задач:

- настройка удалённого доступа к АПК АПОК;
- автоматическое проведение необходимых измерений на космических изображениях ДЗЗ и расчета по этим измерениям ряда характеристик, определяющих качество полученных изображений;
- хранение данных ДЗЗ и результатов оценивания качества данных ДЗЗ;
- решение ряда прикладных задач с возможностью автоматизации процессов.

Выводы:

В процессе анализа и обработки информации, получаемой с космических спутников ДЗЗ важное значение, имеет инструментальная оценка качества, как исходных изображений, так и производных продуктов, создаваемых на их основе. С учетом резко увеличивающихся объёмов входной информации разработка автоматизированных программных комплексов, предназначенных для оценки качества снимков ДЗЗ и придания целевой аппаратуре космических комплексов ДЗЗ статуса измерительных систем с объективным

подтверждением точности получаемых результатов имеет важное прикладное значение при: составлении топологических карт, инвентаризации земель, экорологической оценки территорий и др.

# СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВДОЛЬ СИРИЙСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ, ВЫЗВАННОГО АВАРИЕЙ В Г. БАНИЯС 23 АВГУСТА 2021 ГОДА

Князев Н.А., Лаврова О.Ю.

*Институт космических исследований РАН*

Представлены результаты спутникового мониторинга акватории восточной части Средиземного моря, куда 23 августа 2021 года вследствие аварии на электростанции города Банияс (Сирия) попало несколько тонн нефтепродуктов. На протяжении трех последующих дней нефтяное пятно распространялось в северном направлении вдоль Сирийского берега к провинции Латакия, а к 29 августа нефтяное загрязнение было выявлено в открытом море в 22 км от восточного берега Северного Кипра. В статье рассмотрена динамика распространения нефтяного пятна по исследуемой акватории под действием ветра и вдольберегового течения, а также представлены оценки изменчивости площадей нефтяного загрязнения с течением времени. Максимальная площадь нефтяного пятна была определена по радиолокационному изображению от 30 августа и составила около 1500 км<sup>2</sup>. Мониторинг нефтяного загрязнения проводился с использованием комплексного подхода, на основе данных оптического диапазона космических систем PlanetScope (сенсоры DOVE), Sentinel-2 (MSI), Landsat-8 (OLI-TIRS) и радиолокационных данных системы Sentinel-1 (C-SAR). Было проанализировано в общей сложности 29 спутниковых изображений за 24 августа по 9 сентября 2021г. Подготовка, анализ и обработка спутниковых данных выполнена в информационной системе спутникового мониторинга морей и океанов "See the Sea разработанной в ИКИ РАН.

# МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ОБЛАЧНОСТИ И ТЕНЕЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ КМСС НА ОСНОВЕ ОБУЧЕНИЯ ГЛУБОКИХ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Колбудаев П.А.<sup>1</sup>, Плотников Д.Е.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

Данные приборов КМСС, находящихся на борту спутников Метеор-М-2 и Метеор-М-2.2 и снимающих в зеленом, красном и ближнем ИК диапазонах длин волн, имеют пространственное разрешение 60-100 метров, частоту повторения снимков 3-5 дней и ввиду уникального в своем роде соотношения пространственного и временного разрешений представляют значительный интерес при решении многих задач, в том числе при дистанционной оценке характеристик земной поверхности, мониторинге и оценке растительного покрова. Однако задача автоматического выявления мешающих факторов на изображениях полученных с данных приборов представляется нетривиальной и не может быть решена классическими методами, в которых к примеру используются значения индексов NDVI, NDSI и других.

Характерные особенности приборов, затрудняющие классическое детектирование облачности и теней, включают наличие всего-лишь трёх спектральных каналов, значительные различия в геометрии наблюдений между зеленым, красным и ближнем ИК каналами (параллакс около 9° по данным прибора КМСС-М) и возникающую в результате разницу во времени наблюдения одного и того же участка поверхности (20 секунд между соседними каналами) [1]. После орторектификации и совмещения разноразмерных изображений на уровне земной поверхности образы объектов находящихся на разной высоте в том числе облачного покрова оказываются разнесенными на мультисканальном изображении. В результате использование таких мультиспектральных индексов для выделения облачности как к примеру NDVI по аналогии с методом Fmask оказывается затруднено.

В ИКИ РАН были разработаны методы и технология географической допривязки данных КМСС [2], детектирования облачности и теней [3], а также многофакторной коррекции включающей атмосферную коррекцию на основе данных MODIS [4]. Созданная технология позволяет в оперативном режиме обрабатывать данные, которые загружаются в интерфейсы системы семейства ВЕГА. При этом совместимость обработанных данных с данными MODIS и получаемые значения КСЯ на уровне земной поверхности, а также индекса NDVI дают возможность их использовать во многих практических задачах [5].

В настоящей работе исследуется возможность использования сверточных нейронных сетей в задаче детектирования мешающих факторов по данным КМСС. Тестировались возможности популярной сети U-Net, модификации ResNet50 и другие. При этом для обучения нейронных сетей применяются полученные на основе разработанных методов маски облачности и теней. Преимуществом использования нейросетей является высокая скорость обработки данных (порядка нескольких секунд), отсутствие необходимости использования каких-либо эталонных данных, в том числе данных MODIS, необязательность калибровки и географической привязки данных. Исследования выполнялись с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ЦКП "ИКИ-Мониторинг" для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды [6].

## Литература:

1. В. Zhukov, Т. Kondratieva, I. Polyanskiy, Interannual sensitivity trend of the cameras of the multispectral satellite imaging system KMSS-M on Meteor-M No. 2 spacecraft based on the in-flight calibration in 2015–2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, Vol. 18, No. 1, pp. 53-60 (2021)
2. Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М., Барталев С.А. Метод географической допривязки данных и выявления облачности на изображениях МСУ на основе пространственного анализа и градиента яркости объектов земной поверхности // XVII Конференция молодых учёных "Фундаментальные и прикладные космические исследования". ИКИ РАН. Москва. 30 сентября–2 октября 2020 г. Сборник тезисов/под ред. А.М.Садовского, 2020. С. 165-166.
3. Колбудаев П.А., Плотников Д.Е., Барталев С.А. Метод выявления облачности по данным прибора МСУ-100М (Метеор-М №2) на основе пространственного анализа монохромных изображений и границ объектов земной поверхности // "Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли - RORSE 2018". ИКИ РАН, 2019. С. 139-144. DOI: doi.org/10.21046/rorse2018.139.
4. Kolbudaev P.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A., Proshin A.A., Matveev A.M. The methods and automatic technology aimed at imagery georeferencing, cloud screening, atmospheric and radiometric correction of KMSS-M satellite data // *E3S Web of Conferences*, 2021. 333. P. 01006. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202133301006.
5. Плотников Д.Е., Колбудаев П.А., Жуков Б.С., Матвеев А.М., Барталев С.А., Егоров В.А., Кашницкий А.В., Прошин А.А. Публикация коллекции мультиспектральных измерений прибором КМСС-М (КА "Метеор-М"№2) для количественной оценки характеристик земной поверхности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 7. С. 276–282. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276–282.
6. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2015. Т.12. № 5. С. 247-267

# АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВЫДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСОВ ДИОКСИДА АЗОТА ПО ДАННЫМ ТРОПОМИ

Константинова А.М., Бриль А.А.

*Институт космических исследований РАН*

Загрязнения атмосферного воздуха являются одним из основных факторов, оказывающих негативное влияние на здоровье населения и окружающую среду. Повышение концентрации различных веществ в атмосфере разрушает озоновый слой Земли, приводит к возникновению кислотных дождей, к снижению плодородия почвы, воздействует на дыхательные пути и легкие человека, вызывает изменения состава крови. Поэтому, необходим комплексный мониторинг состояния атмосферы, включающий оценку концентрации определенного вещества в атмосфере.

Одним из наиболее опасных токсичных газов, входящих в состав атмосферы, является диоксид азота. На основе анализа его концентрации можно делать выводы о качестве воздуха в городах. Среди основных антропогенных источников данного газа можно выделить продукты сгорания от транспорта (автомобили, самолеты, суда), промышленную деятельность, электростанции и отопление домов.

Для мониторинга состояния воздуха в информационной системе (ИС) Vega-Science (<http://sci-vega.ru/>, семейство Созвездие-Vega), функционирующей на базе Центра Коллективного Пользования ЦКП "ИКИ-Мониторинг" (<http://ckp.geosmis.ru/>) предоставляется доступ к информационным продуктам концентрации различных газовых веществ по данным спутника Sentinel-5P (TROPOMI), среди которых диоксид азота (Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2021). На основе ежедневно поступающих сеансов TROPOMI в автоматическом режиме создаются композитные изображения, загружаемые в архивы ЦКП "ИКИ-Мониторинг" и доступные в ИС Vega-Science, в том числе композитное изображение за весь период наблюдения, начиная с апреля 2018 года по настоящее время (Константинова, Бриль, 2021). С использованием данного композитного изображения был составлен каталог выбросов диоксида азота из точечных источников по всему миру. С помощью автоматизированного алгоритма были выявлены основные источники выбросов данного газа, которыми в ходе анализа оказались мегаполисы, крупные электростанции, заводы и промышленные зоны. Такой подход к анализу позволяет сформировать независимую картину о местоположении источников выбросов диоксида азота в атмосферу, а вместе с ним потенциально и других газов. Разрабатываемый каталог может стать основной для урегулирования количества выбросов промышленными объектами по всему миру.

Все работы были проведены в рамках разработанной в ИКИ РАН ИС Vega-Science <http://sci-vega.ru/>. Функционирование системы Vega-Science ЦКП "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2019), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы "Мониторинг" (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература:

1. Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2021, TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products. Version 02. European Space Agency.

<https://doi.org/10.5270/S5P-9bnp8q8>

2. Константинова А.М., Бриль А.А. Мониторинг качества воздуха с помощью данных TROPOMI в информационной системе ВЕГА-Science // Материалы 19-й Международной конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из

космоса". Электронный сборник материалов конференции. Институт космических исследований Российской академии наук. Москва, 2021. С. 98. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.

3. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП "ИКИ-Мониторинг") // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.

# РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛЕСНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О РАДИАЦИОННОЙ МОЩНОСТИ ПОЖАРОВ

Лозин Д.В., Лупян Е.А., Балашов И.В.

*Институт космических исследований РАН*

Реализация технологии оперативной оценки повреждений лесного покрова на основе данных о радиационной мощности пожаров

Спутниковый мониторинг в настоящее время позволяет получать достоверные оценки целого ряда характеристик земной поверхности для решения различных задач. Одним из актуальных и востребованных направлений является оценка различных характеристик лесного покрова. В число таких характеристик входят оценки повреждений лесного покрова, связанные, в том числе, с действиями природных пожаров. Подобные оценки, в частности, могут выполняться на основе анализа рядов наблюдения гарей, возникающих в результате лесных пожаров. Для выполнения подобных оценок требуется получение временных рядов наблюдений, поэтому они могут быть получены со значительной задержкой после окончания действия пожаров. В то же время, представляет интерес и получение оперативных оценок возможных повреждений, которые потенциально могут быть выполнены на основе анализа интенсивности горения, наблюдаемого на конкретном пожаре. Методика оперативной оценки степени повреждения лесного покрова пожарами была представлена в работе (D V Lozin, I V Balashov and E A Loupian)

Настоящая работа посвящена особенностям предложенной методики в зависимости от сезонности и типа лесного покрова. Предлагается уточненная технология сопоставления данных об интенсивности горения с данными о постпожарных повреждениях для улучшения точности получаемых оценок. Результаты сравниваются с фактическими данными о погибшей растительности на территории РФ, полученными на основе спутниковой оценки (Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А.).

Работа выполнена в рамках темы "Мониторинг" (госрегистрация № 122012400187-6).

При выполнении работы использовались возможности Центра коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2019)

# АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОВИХРЕЙ В АКВАТОРИИ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЯ

Лопуха В.О.

*Российский государственный гидрометеорологический университет*

Данная работа посвящена анализу активности полярных мезоциклонов по данным мультиспектральных спутниковых изображений, полученных при помощи спутниковых систем Aqua, Terra, данных синоптических карт и данных радиозондирования.

В ходе данной работы рассмотрены полярные мезовихри, который наблюдались в Баренцевом море в срок 2016-2021 года. Полярные циклоны примечательны тем, что размер их варьируется от 100 до 1000 км, т.е. весьма незначителен в сравнении с внетропическими циклонами. Мезомасштабные циклоны из-за малого размера трудно обнаружить в поле давления.

Проявляемый интерес к полярным циклонам вызван в первую очередь в связи с внезапным и резким ухудшением погоды в зоне их нахождения и возможным участием этих мезовихрей в формировании глубинных водных масс в районах частого мезомасштабного циклогенеза. Осадки и облачность по горизонтали распространяются на 150-250 км, по вертикали до 3 км. Такие волнения не имеют экстремальных высот из-за малых размеров и короткого времени существования мезомасштабных циклонов. Для нижних слоев полярных циклонов характерна неустойчивая термическая стратификация, вызванная перемещением холодного воздуха на относительно теплую подстилающую поверхность.

Анализ поля температуры на высоте 500 гПа может служить подтверждением того, что наблюдаемые мезоциклоны – полярные вихри, поскольку температура на этой высоте ниже -40 градусов. Анализируя синоптические ситуации при которых наблюдаются мезовихри, стоит отметить, что полярный циклон начинается развиваться, когда есть приземная ложбина перед ложбиной изогипс на 500 гПа. Рассматривая зрелую стадию можно сделать вывод, что замкнутых круговые изобары присутствуют в большинстве случаев. Полярные циклоны сопровождаются полями сильных ветров со скоростями свыше 14 м/с, а максимальные скорости ветра находится там, где относительное движение полярного циклона совпадает с фактическим ветром. Исходя из того, что воздух на высоте 500 гПа максимально сохраняет свою первоначальную температуру, то подтверждением глубокой конвекции, вызванной холодным арктическим воздухом, проходящим над относительно теплым морем будет именно карта температуры на этой высоте, что соответствует результатам статистического анализа. Оценивать вертикальное движение лучше всего на 850 гПа, чем на 500 гПа по причине низкой тропопаузы, восходящее движение присутствует в относительно мелком слое. Что и подтверждает факт того что на стадии зрелости присутствует минимальных порог, окруженный полосой опускающегося воздуха с положительными значениями омеги. Можно отметить более ярко выраженный слой инверсии на высоте 300 гПа.

# СРАВНЕНИЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПРИБОРОВ MODIS И VIIRS

Миклашевич Т.С.<sup>1,2</sup>, Барталев С.А.<sup>1,2</sup>, Егоров В.А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

Данные спектрорадиометра MODIS используются для решения широкого спектра задач дистанционного зондирования. На текущий день архив наблюдений, полученных со спутников TERRA-MODIS и AQUA-MODIS, составляет более двадцати лет. Ежедневный однородный массив данных позволяет решать задачи, связанные с глобальными изменениями климата, оперативным мониторингом состояния растительного покрова и историческим анализом различных характеристик подстилающей поверхности. Однако срок службы спектрорадиометров MODIS подходит к концу, поэтому остро стоит вопрос преемственности данных.

При использовании различных приборов, обладающих одинаковым набором каналов со схожими спектральными диапазонами, зачастую не учитываются индивидуальные особенности формирования данных изображения земной поверхности. Совместное использование и возможность преемственности данных, полученных с разных спектрорадиометров, подразумевает однородность временного ряда с точки зрения отражательных характеристик в используемых спектральных каналах.

Данная работа посвящена исследованию различий отражательных характеристик данных AQUA-MODIS, TERRA-MODIS и NPP-VIIRS в красном, ближнем ИК и коротковолновом ИК каналах 500-метрового разрешения, а также для построенных на их основе индексов. В качестве исходных данных используются композитные ежедневные изображения, прошедшие предварительную обработку, включающую фильтрацию наблюдений от таких искажающих факторов, как облачный и снежный покров. Так же используются временные ряды, восстановленные и сглаженные интерполяционным алгоритмом для определения доли влияния шумов приборов, внутренней вариабельности значений, зависящих от времени съемки и прочих факторов, плохо поддающихся учету.

# ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ИНСТРУМЕНТА OMI ВО ВРЕМЯ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ

Митюкова Е.И., Червяков М.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского*

Температурный режим стратосферы существенным образом меняется вследствие внезапных стратосферных потеплений (ВСП) - повышения температуры "взрывного характера" в полярной и субполярной стратосфере зимой в течение нескольких суток и более. Для изучения таких случаев в работе использовался архив данных радиозондирования университета Вайоминга [1]. Наблюдения с помощью радиозондов проводятся в стандартные сроки: 00 и 12 часов по Гринвичу. Результатами запусков радиозондов являются данные о вертикальном распределении температуры и других метеопараметров на каждой стандартной изобарической поверхности вплоть до высоты 10 гПа и выше [2, 3].

В ходе работы была проанализирована температура воздуха нижней и средней стратосферы для четырех аэрологических станций с различными климатическими условиями арктического региона: аэрологических станций "Виллюйск", "Ханты-Мансийск", "Алдан", "Тикси", "Верхоянск", "Виллюйск", "Оленек", "Салехард" и "ГМО имени Федорова".

Сведения о местоположении центра ВСП были найдены по данным сайта [earth.nullschool.net](http://earth.nullschool.net), где размещена визуализация глобальных погодных условий.

Для каждого случая ВСП оценивалось общее содержание озона (ОСО) по данным спутникового прибора OMI, размещенных на сайте NASA Earth Observations [4] для регионов близких к выбранным станциям радиозондирования. Для каждого пункта была оценена синхронная изменчивость температуры на уровнях 10, 20 и 30 гПа и ОСО.

В целом корреляция между температурой и общим содержанием озона зимой на уровне 30 гПа для других выбранных станций в среднем составляла от 0,73 до 0,78. В период ВСП может наблюдаться рост ОСО в стратосфере на уровнях 30, 20 и 10 гПа. Однако, происходит это не всегда. Значительно чаще наблюдается более высокие значения ОСО после ВСП. Значения ОСО превышают значения после данного явления на 100–150 ед. Д., что можно предположительно объясняется особенностями атмосферной циркуляции.

Литература и источники:

1. University of Wyoming College of Engineering [Электронный ресурс]:  
*URL* : <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 25.02.2020).
2. Червяков М.Ю. Зондирование атмосферы: учебно-методическое пособие для студентов, обучающихся по направлению 05.03.05 Прикладная гидрометеорология / М.Ю. Червяков. Саратов: ИЦ "Наука", 2019. 62 с.
3. Червяков М.Ю., Шаркова С.А. Изменчивость характеристик тропопаузы в Арктике по данным радиозондирования атмосферы // Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т 19. № 1. С 42-48.
4. NASA Earth Observations [Электронный ресурс]:  
*URL* : <https://neo.sci.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 25.02.2020).

# МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОДУКТОВ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРЫ

Мочалина М.В.<sup>1</sup>, Бадак Л.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИУ Московский физико-технический институт

<sup>2</sup> НЦ ОМЗ АО "Российские космические системы"

Современные радиолокационные космические аппараты обладают высокой разрешающей способностью и позволяют получить информативные данные о земной поверхности вне зависимости от состояния атмосферы и времени суток. Развитие теории и техники радиолокационной интерферометрии позволило использовать для обработки не только амплитудную, но и фазовую составляющую радиолокационных изображений (РЛИ). Интерферометрическая обработка РЛИ позволяет формировать трехмерные цифровые модели местности (ЦММ), применяемые для решения широкого круга задач, связанных с картографическим, экологическим и инженерным обеспечением различных отраслей хозяйства. Ввиду наличия большого количества программного обеспечения, разнообразия технологий интерферометрической съемки и обработки РЛИ, проблема оценки качества формируемых ЦММ становится все более актуальной.

Объектом данного исследования является методика оценки точности определения высот, также в ходе данного исследования были рассмотрены основные принципы формирования РЛИ, интерферометрической съемки и обработки РЛИ с целью формирования ЦММ. Оценка качества формируемых ЦММ в данном исследовании производилась с помощью методики, основанной на анализе фазовых шумов интерферограммы. В качестве примера были использованы данные спутниковой радиолокационной системы Sentinel-1.

# СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИКИ В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Нейштадт Я.А., Червяков М.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского*

Основными показателями, которые важно учитывать при установке солнечных электростанций и панелей, являются данные о временных и пространственных вариациях потоков солнечной радиации. Анализ климатических условий расположения объектов гелиоэнергетики предполагает исследование особенностей пространственного и временного распределения солнечной энергии.

Основной задачей данной работы является оценка радиационного режима территории Саратовской области, а также выявление территорий благоприятных для развития гелиоэнергетики [1-4].

Наиболее полные архивы данных наземных актинометрических наблюдений сосредоточены в мировых радиационных центрах ВМО. Один из крупнейших центров расположен в Главной геофизической обсерватории им. Воейкова. Он аккумулирует актинометрическую информацию, которая включает характеристики потоков солнечной радиации на сети актинометрических станций, в том числе России.

В последние десятилетия на многих станциях в связи с состоянием приборной базы прекратились наблюдения за радиационным балансом. Изучение географических закономерностей распределения радиационного баланса и его климатических изменений стало невозможным по материалам непосредственных актинометрических наблюдений, требуется применение иных подходов. Существенно дополняют наблюдения наземной сети спутниковые данные, но их усвоение и обработка могут представлять проблему для пользователей.

Большие возможности оценки радиационных характеристик и их пространственной изменчивости открываются в связи с разработкой и предоставлением в открытом доступе базы данных NASA CERES ([neo.sci.gsfc.nasa.gov](http://neo.sci.gsfc.nasa.gov)). В этой базе данных приведены средние суточные и среднемесячные величины приходящей суммарной солнечной радиации у поверхности земли с пространственным разрешением  $1,25^\circ \times 1,25^\circ$  с 2007 г. по настоящее время.

Для подробного анализа приходящей солнечной радиации на территорию Саратовской области были построены карты многолетних средних значений суммарной солнечной радиации, по данным проекта NASA CERES с 2007 по 2019 года (Рис. 1). Наиболее обеспеченным суммарной солнечной радиацией районом является Алгайский район - среднегодовые значения тут достигают  $170 \text{ Вт/м}^2$ , а максимальные наблюдаются в июне-июле и достигают  $300 \text{ Вт/м}^2$ .

Литература :

1) Нейштадт Я.А., Червяков М.Ю. Изменчивость потоков солнечной радиации на территории Саратовской области // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции с международным участием "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". 16–20 ноября. 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 36. 1 Конференция "Ломоносов-2022".

2) Нейштадт Я.А., Червяков М.Ю. Пространственно-временная изменчивость суммарной солнечной радиации в Саратовской области // Сборник материалов участников XVI Большого географического фестиваля, посвященного 200-летию со дня открытия Антарктиды русской экспедицией под руководством Фаддея Беллинсгаузена и Михаила Лазарева — Санкт-Петербург: Свое издательство, 2020. С. 275–279.

3) Neyshtadt Y.A., Cherviakov M.Yu. The climatic conditions for the solar industry development in the Lower Volga region // Представляем научные достижения миру. Естественные науки: материалы X научной конференции молодых ученых "Presenting Academic Achievements to the World". – Саратов: Изд-во "Саратовский источник 2020. – Вып. 9. – 162 с. С. 77–84.

4) Червяков М.Ю., Нейштадт Я.А. Актинометрические методы измерений: учебно-методическое пособие для студентов географического факультета. – Саратов: ИЦ "Наука 2019. – 50 с.

# ПРИМЕНЕНИЕ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ MUMM К ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ СКАНЕРОВ ЦВЕТА И СРАВНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ СО СТАНДАРТНЫМ ПРОДУКТОМ И СУДОВЫМИ ДАННЫМИ

Павлова М.А.<sup>1</sup>, Глуховец Д.И.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> НИУ Московский физико-технический институт

<sup>2</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Выполнено сравнение спектров коэффициента яркости моря, полученных по данным спутниковых сканеров цвета, с данными, измеренными в 76 рейсе НИС "Академик Мстислав Келдыш" в Карском море в июле 2019 года. Спутниковые данные обрабатывались как с помощью стандартной атмосферной коррекции, так и с использованием алгоритма MUMM (1,2) в среде SeaDAS.

Перед анализом контактных и дистанционных данных были введены три критерия качества спутниковых снимков:

1. Разница во времени между судовыми и спутниковыми измерениями составляет менее 24 часов.
2. Высота Солнца над горизонтом принимает значения не меньше 20 градусов (или зенитный угол – не больше 70 градусов).
3. Зенитный угол наблюдения меньше или равен 55 градусам.

Согласно введенным условиям, было выбрано четыре спутниковых снимка для исследуемых станций 6238 (76°45'1 с.ш., 70°51'16 в.д.) и 6240 (75°20'0 с.ш., 72°34'52 в.д.) вблизи северной оконечности архипелага Новая Земля. С сайта <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> были скачаны продукты сканеров цвета MODIS Aqua и Terra уровня L1 для дальнейшей обработки с помощью алгоритма MUMM и продукты уровня L2 для анализа работы стандартной атмосферной коррекции. Натурные измерения коэффициента яркости были получены с помощью плавающего спектрорадиометра, разработанного в ИО РАН (3).

Характерной особенностью изучаемого региона является сильное влияние речного стока (4), что позволяет отнести исследуемые воды ко второму типу. Стандартные алгоритмы атмосферной коррекции разрабатывались для вод открытого океана, поэтому их применение в Карском море может приводить к значительным ошибкам.

Для настройки разработанного для вод второго типа алгоритма MUMM использовались три основных калибровочных параметра, которые зависят от значений коэффициентов яркости воды (КП1) и аэрозоля (КП2) в длинноволновых каналах, а также от свойств пропускания компонент атмосферы (КП3). В данном исследовании значение КП1 рассчитано по экстраполированным в ближний ИК диапазон натурным данным о коэффициенте яркости моря. КП3 оставался равным рекомендуемому авторами алгоритма. Величины КП2 принимали значения от 1 до 1,5 с шагом 0,125.

В результате сравнения показано, что:

1. При уменьшении разницы между спутниковым и натурным измерениями результат работы двух рассмотренных моделей атмосферной коррекции улучшается.
2. Геометрия наблюдения, погодные условия и характеристики аэрозоля оказывают сильное влияние на качество атмосферной коррекции.

3. В ряде случаев алгоритм MUMM дает более точные результаты, чем стандартный алгоритм.

Авторы выражают благодарность И.В. Салинг за подбор спутниковых данных, А.Н. Храпко за данные судовых измерений.

Литература:

1. Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // *Appl. Opt.* 39. 2000. 897-912.

2. Goyens C., Jamet C., K. G. Spectral relationships for atmospheric correction. II. Improving NASA's standard and MUMM near infra-red modeling schemes // *Opt. Express* 21. 2013. 21176-21187.

3. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 1. С. 148-155.

4. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // *Oceanologia*. 2020. № 62. № 3. P. 364-373.

# РАЗВИТИЕ МЕТОДА КАРТОГРАФИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

Сайгин И.А., Стыценко Ф.В.

*Институт космических исследований РАН*

Одним из ключевых тематических продуктов, необходимых для мониторинга окружающей среды является карты растительного покрова, отражающие пространственное распределения различных экосистем на территории страны. Карты растительности дают возможности оценки многолетних изменений лесов под воздействием природных и антропогенных факторов, процессов возобновления и сукцессионной динамики растительного покрова (Барталев и др., 2011а), используются для оценки бюджета углерода и других задачах.

Выполненные ранее работы (Проект РНФ №19-77-30015) позволили предложить метод картографирования земного покрова, основанный на динамической актуализации обучающей выборки, свободный от эффекта ее нарастающей деградации (Сайгин и др., 2020, Стыценко и др., 2020, Барталев и др., 2016). Данный подход получил дальнейшее развитие, в частности были проведены следующие работы:

- создание методики картографирования лиственных лесов с учетом наличия подроста вечнозеленых древесных пород на основе анализа отражательной способности в зимний период;
- модификация методики картографирования нелесных классов растительности, таких как болота и кустарники;
- фильтрация временной серии карт растительного покрова;
- развитие методики формирования необлесенных гарей.

На основе выполненных исследований, был получен новый временной ряд растительного покрова. Показано, что полученный ряд позволяет получать более стабильный и согласованный результат, в частности результаты картографирования необлесенных гарей лучше коррелируют с другими пожарными продуктами. Была проведена валидация карт растительного покрова на основе опорных данных на уровне таксационных выделов, показавшая общую точность классификации на уровне 82,9% для лесных классов растительного покрова, общая точность распознавания необлесенных гарей составила 79%. Полученные результаты могут быть использованы, в частности для получения более точных результатов картографирования объемов стволовой древесины и оценки бюджета углерода.

Исследования проводились с использованием инфраструктуры хранения и обработки спутниковых данных Центра коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2015).

Литература:

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011а. Т. 8. № 4. С. 285–302.

2. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208с.

3. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263-284.

4. Стыценко Ф.В., Сайгин И.А., Барталев С.А. Методика ежегодного картографирования необлесенных гарей на основе спутниковых данных // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020.

5. Сайгин И.А., Барталев С.А., Стыценко Ф.В. Методика динамической актуализации опорной выборки для классификации растительности на основе спутниковых данных // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ МИССИЙ MIDE ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Самыловский И.А., Филиппов А.А.,  
Царегородцев А.Ю., Богачева А.Е., Сазонов В.В.,  
Сазонова С.В.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Доклад посвящен применению созданного в баллистическом центре ФКИ МГУ программного комплекса MIDE в области проектирования систем ДЗЗ, планирования съемки и оперативного управления космическим аппаратом. С использованием функциональности компоновки блока полезной нагрузки и блока служебных систем КА демонстрируется моделирование полос захвата аппаратуры в ходе таких режимов съемки как кадр, стереопара, стереотриплет, полоса и т.д. Приводятся примеры моделирования вращательного движения спутника при перестроении между различными ориентациями.

# АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЛЕЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЛОС ДОНО-ЧИРСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ПО ДАНЫМ СВЕРХВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Синельникова К.П.

*ФНЦ Агроэкологии РАН*

В настоящее время преобладающим видом деградации сельскохозяйственных угодий является эрозия почв. Полезащитные лесные полосы способствуют уменьшению влияния ветровой и водной эрозии на плодородный слой почвы.

Анализ проводился на тестовом полигоне водосбора реки Цуцкан, который является левым притоком реки Чир, расположенном на территории Волгоградской области в Серафимовичском районе. Там сохранилась система полезащитных лесных полос на обрабатываемых землях.

Оценка современного состояния полезащитных лесных полос проводилась по спутниковым снимкам сверхвысокого разрешения, полученные с сервиса Google Earth Pro. Привязка снимков выполнялась по базовой карте Google в геоинформационной системе QGIS. Анализ проводился по методике, описанной в патенте "Способ определения сохранности лесных насаждений". Современное состояние ПЗЛП рассчитывалось в программе QGIS по отношению суммарного количества пикселей, отнесенных при дешифрировании существующих деревьев, к расчетному количеству пикселей проектного покрытия [1].

В результате геоинформационного анализа установлено, что система лесных насаждений в целом сохранилась на 67,2% проектной площади крон древостоя. Это свидетельствует о благополучном состоянии всей системы защитных лесных полос. Тем не менее, полезащитные лесные полосы имеют разную степень деградации. Основываясь на анализе карты сохранности лесных насаждений была рассчитана сохранность каждой лесной полосы. Средняя сохранность насаждений составила 78,2%.

По проведенному анализу сохранности полезащитных лесных полос можно сделать вывод, что современное состояние лесных насаждений находится в состоянии "Норма" и выполняет свои защитные функции.

Литература:

[1] Патент № 2437061 С1 Российская Федерация, МПК G01C 11/04 (2006.01), A01G 23/00 (2006.01). Способ определения сохранности лесных насаждений: № 2010115216/28 : заявл. 19.04.2010 : опубл. 20.12.2011 / Рулев А.С., Юферев В.Г., Михалев В.Ю., Маенко А.Н.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью БиоЭкоЛес (ООО "БиоЭкоЛес"). – 6 с. : ил. – Текст : непосредственный.

# СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ МЕЗОМАСШТАБНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Чересов А.А., Червяков М.Ю.

*Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени  
Н.Г. Чернышевского*

Данная работа посвящена изучению мезомасштабных конвективных систем (МКС) и оценка их повторяемости по данным спутникового зондирования. Отдельно анализировались мезомасштабные конвективные комплексы (МКК) и линии шквалов (ЛШ).

Согласно [4], МКК представляют собой комплекс кучево-дождевых облаков, объединённых общей наковальной почти овальной формы, инфракрасные изображения которой имеют следующие характеристики: площадь более или менее непрерывного облачного покрова с температурой верхней границы ниже  $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$  составляет не менее  $10^5\text{ км}^2$ , а площадь внутреннего района с температурой верхней границы ниже  $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$  не менее  $5 \cdot 10^4\text{ км}^2$ . Указанные размеры сохраняются в течение 6 ч и более.

МКК, имея небольшой период существования, являются трудно прогнозируемым объектом. Обнаруживается такая облачность обычно только с помощью радиолокационных наблюдений или данных метеорологических спутников Земли [1].

Поскольку МКК формируется в результате перегрева отдельных масс воздуха при неустойчивой стратификации атмосферы в её нижних слоях, то над сушей наиболее оптимальные условия для его возникновения создаются в теплую половину года в зонах пониженного давления атмосферы. Скорость восходящих потоков, вертикальная мощность и водность образующегося мезомасштабного конвективного комплекса зависят от степени неустойчивости атмосферы. На этом основаны практически все существующие в настоящее время методы прогноза опасных явлений погоды, обусловленные конвекцией [2, 3].

В качестве материалов для исследования были использованы изображения облачного покрова со спутника Meteosat 8 за теплый период с 2016 по 2020 годы на территории Саратовской области.

Для дифференцирования облачного покрова на территории Саратовской области был выбран период исследования 2016–2020 годы, выделены даты теплого периода года (170 дней в году), что составило 850 снимков облачности, рассмотрены отдельные облачные составляющие МКС, такие как ЛШ и МКК.

Наибольшая повторяемость числа дней с мезомасштабными явлениями с 2016 по 2020 годы за теплый период в Саратовской области наблюдается у МКК и скоплений кучево-дождевых облаков, наименьшую повторяемость имеют ЛШ.

При анализе общих закономерностей распределения повторяемости объектов мезомасштаба, 2016 год выделяется, как год с наибольшей повторяемостью дней с МКК на исследуемой территории. Максимум числа дней с МКК и скоплениями кучево-дождевых облаков составляет 10 дней в 2016 году. Вместе с тем, выделяется 2017 и 2018 год, где отмечается максимум повторяемости числа дней с ЛШ. Их максимальная повторяемость составляет по 2 дня. МКК достигают своего пика активности в июне, а максимум повторяемости числа дней с ЛШ приходится на май и июль.

Начало развития мезомасштабных явлений приходится в послеполуденное время. Максимальное значение случаев приходится на 15 часов дня (по местному времени UTC+4).

Чаще всего наблюдаются МКК небольших площадей до  $12500\text{ км}^2$ . Однако фронтальные МКК могут достигать и гораздо больших размеров до  $27500\text{ км}^2$ .

## Литература:

- [1] Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б. Использование спутниковых данных ДЗЗ для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Вопросы электромеханики. Труды ВНИЭМ, 2008. Т. 105. С. 6–16.
- [2] Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Золотухина О.И., Тунаев Е.Л. Термодинамические условия формирования мезомасштабной конвекции в атмосфере Западной Сибири // Известия ВУЗов. Физика. 2011. Т. 54, № 11. С. 148–155.
- [3] Червяков М.Ю. Изменчивость температуры воздуха в городских агломерациях Саратовской области по данным спутникового спектрорадиометра MODIS // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса": Электронный сборник материалов конференции, Москва, 16–20 ноября 2020 года / Институт космических исследований Российской академии наук. – Москва: Институт космических исследований Российской академии наук, 2020. С. 184.
- [4]. Maddox R.A. 1980. Mesoscale convective complexes // Bull. Am. Meteorol. Soc., 61. P. 1374-1387.

# КОНЦЕПЦИЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО ГЕТЕРОДИННОГО СПЕКТРОРАДИОМЕТРА ДЛЯ ОРБИТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В РЕЖИМЕ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

Шкарбан А.Б., Газизов И.Ш., Газизов Ш.Ф.,  
Спиридонов М.В., Чурбанов Д.В., Родин А.В.

*НИУ Московский физико-технический институт*

Проблеме глобального потепления в последнее время уделяется большое внимание. Для всестороннего и глубокого исследования этого процесса, а также прогнозирования его последствий необходимы высокоточные приборы, позволяющие измерять содержание парниковых газов в столбе атмосфере с субпроцентной точностью. На сегодняшний день данная задача успешно решается Фурье-спектрометрами высокого [1] и умеренного [2] спектрального разрешения на наземных станциях наблюдений. МФТИ разрабатывает многоканальный гетеродинный спектрорадиометр [3], который может быть использован в качестве дополнения к существующей инфраструктуре учета парниковых газов в атмосфере. Однако, наиболее ценная информация измеряется с помощью орбитальных измерительных комплексов [4,5], позволяющих получать информацию о глобальном содержании и распределении парниковых газов в атмосфере в кратчайшие сроки. Недавно, МФТИ представила концепцию многоканального лазерного гетеродинного спектрорадиометра (МЛГС) для орбитальных измерений состава, структуры и динамики атмосферы в режиме солнечных затмений [6]. Данный доклад посвящен некоторым вопросам оптимизации системы регистрации гетеродинного сигнала МЛГС для успешной работы в условиях функционирования в открытом космическом пространстве.

МЛГС функционирует на основе метода гетеродинной спектроскопии с высоким спектральным разрешением ( $>1000000$ ), обусловленным полосой гетеродинного приемника. Высокое спектральное разрешение позволяет измерять полностью разрешенные профили индивидуальных колебательно-вращательных линий поглощения парниковых газов, что в свою очередь позволяет анализировать не только химический состав атмосферы, но и её структуру и динамику. В качестве опорных источников излучения используются диодные лазеры с распределенной обратной связью. Весь оптический тракт МЛГС основан на использовании оптоволоконных компонент, благодаря чему конструкция МЛГС получается компактной, что позволяет рассматривать класс малых космических аппаратов типа CubeSat в качестве орбитальной платформы. МЛГС имеет 3 спектральных канала в диапазоне длин волн 1,2 – 1,6 мкм и позволяет проводить измерения вертикальных профилей концентрации CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O и O<sub>2</sub> в диапазоне тангенциальных высот 5-50 км с точностью не хуже 1% в режиме солнечных затмений.

В рамках доклада будет представлена постановка задачи космического эксперимента, тактико-технические характеристики МЛГС для орбитальных измерений и ожидаемые научные данные. Особое внимание будет уделено оптимизации структуры многоканального гетеродинного приемника сигнала на промежуточной частоте, который состоит из аналоговых ЭРИ, наиболее подверженных пагубному воздействию радиационному излучению.

---

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНЕТ



# ВЛИЯНИЕ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА НА НЕТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЭКЗОПЛАНЕТЫ $\pi$ MEN C

Автаева А.А.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова  
Институт астрономии РАН*

В настоящее время, активно исследуются атмосферы экзопланет. Тепловой режим и скорость теплового убегания из атмосферы горячей экзопланеты существенно зависят от состава атмосферы. Но существуют и нетепловые процессы, существенно влияющие на эволюцию атмосфер экзопланет. Процессы диссоциации, такие как фотодиссоциация, диссоциация электронным ударом, диссоциативная ионизация и др., являются основными источниками тепловых и надтепловых фрагментов молекул в состояниях электронного возбуждения в верхних атмосферах планет (Shematovich, Marov, 2018).

Расчеты проводились для переходной  $H_2 \rightarrow H$  области протяженной верхней атмосферы  $\pi$  Men c в интервале высот  $(2.0-3.9)R_p$ . Отметим, что максимум поглощения жесткого звездного XUV-излучения наблюдается на высоте  $1.8R_p$ , что ниже нижней границы, однако на этих высотах плотность окружающего атмосферного газа столь высока, и, соответственно, длина свободного пробега атомов водорода значительно меньше высоты однородной атмосферы по плотности и, в результате, происходит локальная термализация надтепловых атомов водорода в упругих столкновениях с окружающим атмосферным газом.

В нашем последнем исследовании рассматривалось влияние звездного ветра на атмосферу экзопланет и нетепловые процессы в них.

При помощи численной стохастической модели горячей планетной короны на примере горячей экзопланеты  $\pi$  Men c исследованы на молекулярном уровне кинетика и перенос надтепловых атомов водорода в верхней атмосфере, и рассчитан нетепловой поток убегания. Нетепловой поток убегания в направлении планета-звезда для умеренного уровня звездной активности при сильном звездном ветре, оценивается величиной в  $3.5 * 10^{12} \text{ см}^{-2-1}$ , что сравнимо с тепловым потоком убегания  $3.9 * 10^{12} \text{ см}^{-2-1}$ .

Поток убегания для умеренного уровня звездной активности в УФ-излучении, при отсутствии звездного ветра оценен величиной  $2.5 * 10^{12} \text{ см}^{-2-1}$ , что позволяет получить верхнюю оценку скорости потери атмосферы за счет процессов диссоциации  $H_2$ , равной  $6.7 * 10^8 \text{ г} * \text{с}^{-1}$ .

Автор является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики "БАЗИС"

# СРАВНЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КАМЧАТСКИХ ПЕПЛОВ С ЛУННЫМ РЕГОЛИТОМ

Агапкин И.А.

*Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского*

Все аналоги лунного реголита изготавливаются, как правило, для имитации одного-двух основных свойств, необходимых для исследований, моделирования и экспериментов. Практически невозможно создать полный аналог лунного реголита на основе земных пород, соответствующий всем основным свойствам – физико-механическим, теплофизическим, электромагнитным, химическим и минеральным составам [1].

Для имитаторов физико-механических свойств лунного реголита одной из важнейших характеристик является гранулометрический состав. Размер частиц лунного реголита близок к размеру частиц земных вулканических пеплов. Также некоторые вулканические пеплы могут быть сходны с лунным реголитом по химическому и минералогическому составу.

В данной работе проведен сравнительный анализ гранулометрического состава лунного реголита и вулканических пеплов Камчатки.

Для исследования взяты пробы пепла вулканов Горелый, Мутновский, Толбачик, а также песок Халактырского пляжа. Две пробы были взяты у подножия вулкана Горелый и с высоты 1390 м.

Все образцы исследовались в естественном составе, за исключением образца из вулкана Толбачик. В связи с тем, что материал из вулкана Толбачик имеет низкую прочность и подвержен легким механическим воздействиям, для измельчения материала использовались подручные средства. При подготовке пробы с вулкана Толбачик была применена следующая методика: 1) дробление материала молотком; 2) просеивание измельченного материала через сита диаметром 1 мм – 0,16 мм; 3) шлифование материала валикообразным предметом; 4) просеивание измельченного материала через сита диаметром 1 мм – 0,16 мм; 5) истирание просеянного материала фракцией

# ОБЩЕЕ СОДЕРЖАНИЕ ВОДЯНОГО ПАРА ПО ДАННЫМ НАДИРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОМЕТРА ACS TIRVIM НА БОРТУ КА EXOMARS TGO

Власов П.В.<sup>1</sup>, Игнатъев Н.И.<sup>1</sup>, Григорьев А.В.<sup>2</sup>, Шакун А.В.<sup>1</sup>, Пацаев Д.В.<sup>1</sup>, Маслов И.А.<sup>1</sup>, Лугинин М.С.<sup>1</sup>, Трохимовский А.Ю.<sup>1</sup>, Кораблёв О.И.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Australian National University, Канберра, Австралия*

Российский фурье-спектрометр TIRVIM в составе приборного комплекса ACS на борту КА ExoMars Trace Gas Orbiter предназначен для наблюдения атмосферы Марса как в надир, так и методом солнечных затмений [1]. В надирной геометрии наблюдений прибор работает в спектральном диапазоне 5–17 мкм (650–2000 см<sup>-1</sup>) со спектральным разрешением 1.17 см<sup>-1</sup>. Стратегия наблюдения ACS и конфигурация орбиты TGO предоставляют возможность изучить параметры атмосферы путём дистанционного зондирования в надирном режиме с плотным охватом местного времени и широким территориальным покрытием. Измерения в диапазоне 650–1300 см<sup>-1</sup> позволяют восстановить вертикальные профили температуры до ~ 60 км совместно с температурой поверхности и общим содержанием пыли и водяного льда. В диапазоне 1300–2000 см<sup>-1</sup> в случае горячей поверхности и низкого соотношения сигнал-шум наблюдаются линии поглощения H<sub>2</sub>O. Измерения в надир не позволяют восстановить вертикальный профиль концентрации атмосферного водяного пара, лишь уточнить множитель к априорному распределению по высоте и определить общее содержание H<sub>2</sub>O [2]. В данной работе мы сделали первую попытку получить "надирную воду" по данным ACS TIRVIM.

Литература:

1. Korablev, O., Montmessin, F., Trokhimovskiy, A. et al. (2018). The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of Three Spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter. *Space Science Reviews*, 214(1), 7. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0437-6>

2. Fouchet, T., Lellouch, E., Ignatiev, N.I., Forget, F., Titov, D.V., Tschimmel, M., Montmessin, F., Formisano, V., Giuranna, M., Maturilli, A., Encrenaz, T. (2007). Martian water vapor: Mars Express PFS/LW observations. *Icarus*, 190, 32–49. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.03.003>

# ОЦЕНКА СОСТАВА И МАССЫ ЛЕДЯНОЙ КОМПОНЕНТЫ В ПЕРВИЧНЫХ КАМЕННО-ЛЕДЯНЫХ ПЛАНЕТЕЗИМАЛЯХ ОКОЛОСОЛНЕЧНОГО ДИСКА

Генералова Е.А., Дорофеева В.А.

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского*

**Введение:** Оценка состава первичных планетезималей важна при моделировании образования, эволюции и внутренней структуры тел Солнечной системы. В этой работе мы оцениваем максимально возможную долю ледяной компоненты в планетезималиях в зависимости от их региона образования, а также ее состав. Используются методы равновесной термодинамики, распределение температур и давлений в околосолнечной небуле, а также элементный и химический состав небулы.

**Обсуждение результатов:** Для оценки распределения температур и давлений в ранней солнечной небуле мы использовали квазиэволюционную самосогласованную модель ([1], [2]). Результаты показывают, что на финальных стадиях эволюции околосолнечного газо-пылевого диска "snow line" льда воды достигала Главного Астероидного пояса. Благодаря этому в этот период возникли условия для аккумуляции льда воды в телах этого региона.

Мы оценили возможное отношение массы воды к массе тугоплавкой компоненты, которая для внутренней части околосолнечной небулы содержала только минеральную фазу. Для количественной оценки мы везде использовали значения солнечных распространенностей элементов по [3]. В наших расчётах мы также учитывали зависимость  $M_{H_2O}/M_{solid}$  от молярного отношения  $CO/CO_2$ , которое варьировалось от 0.1 до 10 моль/моль. В результате было получено, что значение  $M_{H_2O}/M_{solid}$  не превышает 0.6 г/г, то есть, вода составляет не более 0.375 от общей массы тела. Эти данные согласуются с данными о составе Цереры, полученными миссией Dawn ([4]).

Рассмотрим состав первичных планетезималей в зонах образования Юпитера и Сатурна. Поскольку температура в этом регионе не превышала 500К, то тугоплавкая органика (CHON), поступившая в диск из протосолнечной небулы, не была разрушена. Согласно оценкам, полученным на основе состава кометной пыли ([5]), в CHON содержалось от 30 до 50% углерода, присутствующего в системе, поэтому мы варьировали параметр  $C_{CHON}$  в этих пределах. Мы приняли формулу как  $C_{100}H_{70}O_{20}N_4$  согласно работе ([6]). Ледяная компонента в регионе Юпитера состояла только из  $H_2O$ , так как температуры конденсации остальных газов ниже, чем те, которые достигались в этом регионе. Согласно полученным результатам, для региона Юпитера максимальное отношение  $M_{H_2O}/M_{solid}=0.615$  г/г при  $CO/CO_2=10$  моль/моль и  $C_{CHON}=0.5$ , однако это значение понижается при уменьшении обоих параметров.

Для региона Сатурна мы учитывали что ледяная компонента помимо  $H_2O$  включала в себя  $CO_2$  и  $NH_3$ . Полученные для региона Сатурна результаты показывают, что  $M_{ice}/M_{solid}$  изменяется от 1.2 до 0.7 г/г и достигает наибольших значений при наименьших значениях  $CO/CO_2$  и  $C_{CHON}$ .

В транснептуновом регионе в минеральной фазе присутствует не только  $Fe^0$  небулярного происхождения, но и  $Fe^{+2}O$  досолнечного происхождения ([7]). Мы приняли, что мольные количества  $Fe^0$  и  $FeO$  равны и определяются как  $0.5 \times (\Sigma Fe - FeS)$ . Из-за

неопределённости состава льдов в транснептуновом регионе мы рассматривали только отношение  $M_{H_2O}/M_{solid}$ . Согласно нашей оценке,  $M_{H_2O}/M_{solid}$  не превышает 0.6 г/г.

**Выводы:** Были получены оценки сверху для ледяной компоненты в различных регионах ранней Солнечной системы.

1. Во внутреннем регионе лёд состоял только из воды, и отношение  $M_{H_2O}/M_{solid}$  не превышало 0.57 г/г.

2. В регионе образования систем Юпитера и Сатурна в твёрдой фазе помимо минеральной компоненты присутствовала также тугоплавкая органика с условной формулой  $C_{100}H_{70}O_{20}N_4$ . Максимальное значение  $M_{H_2O}/M_{solid}$  в этом регионе составляет 0.62 г/г.

3. В регионе системы Сатурна помимо льда воды присутствовал также лёд  $NH_3$  и  $CO_2$ . С вариацией  $CO/CO_2$  и  $C_{CHON}$ , отношение  $M_{ice}/M_{solid}$  может сильно меняться, от 1.2 до 0.7 г/г. Оно приближается к 1 и превышает её при низких значениях параметров.

4. Для транснептунового региона возможна оценка только отношения  $M_{H_2O}/M_{solid}$ , которое не превышает 0.59 г/г. Значение  $M_{H_2O}/M_{solid}$  крайне мало зависит от отношения  $CO/CO_2$  и сильно зависит от доли углерода в тугоплавкой компоненте.

#### Литература:

- [1] Макалкин А. Б. и Дорофеева В. А. (1995) Астр.Вестн., 29, 2, 99-122.
- [2] Макалкин А. Б. и Дорофеева В. А. (1996) Астр.Вестн., 30, 6, 496-513.
- [3] Lodders K. (2010) ASSP, 379-417.
- [4] Zolotov M. Yu. (2020) Icarus, 335, A113404.
- [5] Дорофеева В. А. (2020) Астр.Вестн., 54, 2, 96-120
- [6] Alexander C.M.O'D. et al. (2007) GeoCoA, 71, 4380-4403.
- [7] Müller et al. (2021) A&A, 652, A126.
- [8] Дорофеева В.А. (2022) Астр.Вестн. (в печати).

# ВАРИАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ И ХЛОРА В ГРУНТЕ МАРСА ВДОЛЬ ТРАССЫ МАРСОХОДА КЬЮРИОСИТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРА ДАН

Дьячкова М.В., Никифоров С.Ю., Митрофанов И.М., Лисов Д.И., Литвак М.Л., Санин А.Б.

*Институт космических исследований РАН*

Будут представлены актуальные результаты активных и пассивных измерений прибора ДАН на борту марсохода НАСА Кьюриосити.

Содержания воды и хлора в грунте Марса, полученные по результатам измерений, изучались отдельно для геологических регионов вдоль трассы движения марсохода. Были обнаружены различия в средних значениях содержания воды и хлора в грунте различных районов, обусловленные их эволюцией.

Рассмотрены возможные причины возникающих различий, а также результаты сравнения с измерениями других приборов, установленных на марсоходе.

# ГРАВИТАЦИОННЫЙ МАНЕВР В ЗАДАЧЕ РАСШИРЕНИЯ ДОСТИЖИМЫХ РАЙОНОВ ПОСАДКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ВЕНЕРЫ

Зубко В.А.<sup>1</sup>, Эйсмонт Н.А.<sup>1</sup>, Засова Л.В.<sup>1</sup>, Беляев А.А.<sup>1</sup>, Федяев К.С.<sup>1</sup>, Горинов Д.А.<sup>1</sup>, Симонов А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НПО им. С.А. Лавочкина*

В настоящее время в России разрабатывается несколько проектов по исследованию в дальнем космосе, таких как EхоMars, Luna-25 (Луна-Глоб) и Венера-Д. Последний проект нацелен на изучение поверхности и атмосферы Венеры при помощи спускаемого аппарата и орбитального модуля. Предполагается, что данная миссия к Венере будет осуществляться в несколько этапов, запуск которых планируется в период окон старта в 2029-2034 гг. Старт первого этапа намечен на осень 2029 года, и этот этап в основном должен повторить исследовательскую миссию аппаратов Вeга-1 и Вeга-2. Последующие этапы будут стартовать позднее, их основной научной целью является получение и доставка на Землю образцов венерианского грунта.

Одним из важных вопросов разработки проекта "Венера-Д" является вопрос выбора места посадки спускаемого аппарата. С одной стороны, рельеф места посадки должен удовлетворять необходимым требованиям. С другой стороны, это место должно быть достижимо для спускаемого аппарата, т.е. необходимо рассчитать траекторию аппарата таким образом, чтобы обеспечить спуск в заданный район венерианской поверхности. Расчет такой траектории ограничивается как особенностями собственного вращения Венеры, так и возможными окнами запуска аппарата с Земли, определяемыми из условия минимума необходимых затрат характеристической скорости. Также при построении траектории спускаемого аппарата необходимо учитывать особенности движения орбитального модуля и необходимость соблюдения условий его взаимной радиовидимости со спускаемым аппаратом. С учетом всех перечисленных условий возможность выбора допустимых областей посадки спускаемого аппарата может быть весьма ограниченной.

Основной целью настоящей работы является построение траектории спускаемого аппарата, позволяющей осуществлять его посадку практически в любой заданной точке поверхности Венеры за исключением, возможно, лишь небольших регионов. Предлагаемый метод основан на использовании гравитационного поля Венеры и перевода аппарата после облета Венеры на гелиоцентрическую орбиту с периодом, равным периоду обращения Венеры вокруг Солнца (т.е. на орбиту, резонансную с орбитой Венеры, см. рис.1). В результате после полного оборота по такой орбите при следующем сближении с Венерой аппарат окажется уже над другой частью ее поверхности, что позволит осуществить посадку в ранее недоступную область. Поскольку направление облета Венеры при первом сближении может быть выбрано произвольно, существует множество возможных резонансных орбит, и выбор одной из них позволит обеспечить посадку аппарата спустя один венерианский год практически в любую точку поверхности планеты.

Результаты исследования показывают, что предлагаемая стратегия позволяет существенно расширить достижимые для посадки области поверхности и, более того, обеспечить посадку в любую точку поверхности при небольшом увеличении стартового импульса и продолжительности полета. Результаты моделирования при использовании предлагаемого метода приводятся на рис. 2. На этом рисунке ясно видны преимущества, обеспечиваемые гравитационным маневром у Венеры, по сравнению с традиционно используемым

подходом. Следует также отметить, что такое расширение достижимых областей посадки связано с увеличением общей сложности миссии и увеличением времени перелета аппарата. Но это может быть единственным способом обеспечить посадку аппарата в ранее недостижимые области, поэтому важность предлагаемого подхода представляется несомненной.

# КОРРЕКЦИЯ ТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В СПЕКТРАХ ЗВЕЗД ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ МЕТОДОМ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Иванова А.Е.<sup>1,2</sup>, Jean-Loup Bertaux<sup>2</sup>, Rosine Lallement<sup>3</sup>, Тавров А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *LATMOS / UVSQ - IPSL - CNRS, Guyancourt, France*

<sup>3</sup> *Observatoire de Paris Meudon, Meudon, France*

Одним из классических методов обнаружения экзопланет является метод лучевых скоростей (RV). Изменения лучевой скорости измеряются по эффекту Доплера, влияющему на звездные линии звездного спектра. Спектры, полученные наземными средствами, содержат также линии теллурического поглощения, и из-за вращения Земли и ее годового движения две системы линий (звездная и теллурическая) движутся со временем по-разному. Классический подход к решению этой проблемы состоит в исключении из рассмотрения частей спектра, затронутых непренебрежимо малыми теллурическими линиями, что приводит к потере значительной части звездного спектра с соответствующим снижением точности.

Мы разработали процедуру коррекции звездных спектров за счет теллурического поглощения (в основном H<sub>2</sub>O и O<sub>2</sub>) с использованием онлайн-сервиса TAPAS (<http://cds-espri.ipsl.fr/tapas/>), который учитывает данные метеорологических наблюдений, давления, температуры и влажности. Мы тестируем метод на серии спектров, полученных Espresso/VLT. Использование большего диапазона длин волн должно повысить точность измерения лучевой скорости звезды.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРОВ ПОГЛОЩЕНИЯ И ОБРАБОТКА ЛАБОРАТОРНЫХ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЛЕТУЧИХ ГРУНТА ЛУНЫ

**Копосов А.А.**

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Фундаментальная научная проблема летучих компонент Луны наиболее тесно связана с её полярными областями, так как в этих регионах могут накапливаться летучие компоненты, в частности вода в виде льдов в постоянно затенённых областях. В рамках миссии "Луна-Ресурс" предполагается отправка космического аппарата "Луна-27" к южному полюсу Луны для изучения летучих компонент грунта при помощи диодно-лазерного спектрометра ДЛС-Л, встроенного в газовый хроматограф ГХ-Л.

В данной работе проводится обработка экспериментальных данных лазерного спектрометра и численное моделирование спектров поглощения газовой смеси воды и углекислого газа, имитирующей летучие компоненты лунного грунта, с целью проверки точности измерения прибором изотопных отношений.

# 3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЛУННОГО РЕЛЬЕФА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ПРИЛУНЕНИЯ ПОСАДОЧНОГО МОДУЛЯ

Кулешова К.А., Фазлетдинова Р.Ю., Шпекин М.И.

*Казанский федеральный университет*

Рассмотрены возможности применения трехмерных моделей лунного рельефа, построенных по орбитальным снимкам высокого разрешения для задачи подготовки прилунения посадочного модуля. Изложение представлено на примере 3D-моделей, созданных авторами для двух перспективных посадочных площадок. Первая площадка расположена вблизи ледниково-подобного языка юго-западного склона центральной горки кратера Эйткен [1, 2]. Вторая – в районе топографического кольца с центром к северо-востоку от центральной горки кратера Циолковский в окрестности материала вулканических выбросов из вулкана, обнаруженного в 2009 году [3,4]. Оба кратера расположены на обратной стороне Луны недалеко от экватора в областях отснятых экипажами КК "Аполлон-15,-17". В нашей работе использованы снимки метрической и панорамной камер, каталог опорных кратеров, созданный по материалам съемки с борта КК "Зонд-8" на предприятии ЦНИИГАиК [5], карта Lunar QuickMap [6], разработанная NASA, университетом Аризоны и корпорацией "АСТ" а также программный продукт "Agisoft Metashape" российской компании "Геоскан".

Технологии машинного зрения, положенные в основу "Agisoft Metashape" позволили авторам построить текстурные 3D-модели двух вышеназванных площадок по орбитальным снимкам. Высокое разрешение исходных снимков показало хорошее качество построенных моделей, что в свою очередь обеспечило детальное изучение строения площадок и их окрестностей. Построенные модели позволяют рассматривать отображенную на них местность с разных сторон, в разных ракурсах, при различных масштабах, включая изменение высоты точки наблюдения над посадочной площадкой. Такой подход открывает возможность использовать модель для имитации самого процесса прилунения в значительном диапазоне высот.

Литература:

Shpekin M. I., Salimov R. R., Semenov A.A. Orbital photogrammetry of selected relief elements with evidences of geological activity in Aitken crater on the far side of the Moon // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 666 062020. 12 p. – doi 10.1088/1755-1315/666/6/062020.

Mukhametshin Ch. R., Semenov A. A., Shpekin M. I. Experience of modeling relief of impact lunar crater Aitken based on high-resolution orbital images // Journal of Physics: Conf. Series 1015 (2018) 032131 doi :10.1088/1742-6596/1015/3/032131.

Shpekin M.I. The Last "Apollo" Orbit Pass over the Tsiolkovsky Crater // Intern Conf. "Astronomy and World Heritage: Across Time and Continents", August 19-22, 2009, Kazan, Russia (ASTROKAZAN-2009), p. 219-221.

Shpekin M.I., Varenbaum A.A. On the nature of endogenous activity in the Tsiolkovsky crater on the Moon // Materials of the 17th All-Russian Scientific Conference of Physics Students and Young Scientists (VNKSF-17). – Yekaterinburg 2011. pp. 476-477.

Алексашин Е.П., Тимофеев Ю.С., Ширенин А.М. Селеноцентрическая система координат "Зонд-8". Методы построения и каталог координат опорных точек // Сборник научных трудов ЦНИИГАиК, – М., ЦНИИГАиК ГУГК СССР, 1989. - 216 с.

АСТ Lunar QuickMap <https://quickmap.lroc.asu.edu>

# СИТУАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ: ПОСАДОЧНАЯ ПЛАТФОРМА НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАНЕТЫ И ОРБИТАЛЬНЫЕ АППАРАТЫ ВОКРУГ МАРСА

Куликов С.<sup>1</sup>, Климов С.<sup>1</sup>, Савин С.<sup>1</sup>, Скальский А.<sup>1</sup>,  
Стяжкин В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *ИЗМИРАН*

Для исследования динамики магнитосферных/ионосферных процессов, влияния условий межпланетной среды важным является использование возможности многоточечных измерений около Марса и анализ взаимного расположения различных аппаратов в окрестностях Марса и на его поверхности. На основе интерфейса SPICE и имеющихся моделей характерных границ околомарсианского пространства был разработан программный пакет для ситуационного анализа, включающий орбитальные аппараты, находящиеся в настоящее время на орбитах вокруг Марса, а также посадочные аппараты, уже находящиеся на поверхности планеты, и планируемые в ближайшее время.

На основе разработанного пакета, обнаружены интересные для последующего анализа периоды времени одновременных измерений на посадочных и орбитальных аппаратах.

В работе обсуждаются возможность влияния возмущений в солнечном ветре, возмущений, генерируемых в форшоке и на ударной волне на ионосферу/атмосферу Марса.

# КОРРЕКТИРОВКА СТАТИСТИКИ НАБЛЮДЕНИЙ ЭКЗОПЛАНЕТ, ОТКРЫТЫХ МЕТОДОМ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ, С УЧЁТОМ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕЛЕКЦИИ

Литосова И. Р.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Для учёта наблюдательной селекции при построении статистики экзопланет используется метод "Окон видимости" результатом которого является "Окно видимости" - область на плоскости масса-орбитальный период, разделённая на ячейки, в каждой из которых показана вероятность обнаружения экзопланеты данной массы и периода. Для построения таких окон используются периодограммы Ломба-Скаргла: для каждой звезды строится такая периодограмма, показывающая сигнал, полученный от звезды, затем к уже имеющемуся сигналу добавляется сигнал, имитирующий сигнал от планеты определенной массы и периода. По высоте пика, соответствующего данному периоду определяется, может ли у этой звезды существовать такая планета. Полученные таким образом данные для каждой звезды суммируются, и получается общее для всех звезд "Окно видимости" с помощью которого проводится корректировка статистики экзопланет.

# ТОЛЩИНА КОРЫ МАРСА И ВЕНЕРЫ МЕТОДОМ ЧИСЕЛ ЛЯВА

Менщикова Т.И.<sup>1</sup>, Батов А.В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта*

<sup>2</sup> *Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова*

На основе данных топографии и гравитационного поля рассчитаны модельные вариации толщины коры Марса и Венеры методом чисел Лява. Метод учитывает подстройку планетных недр к нагрузкам на поверхности и в недрах. Строгая самосогласованная техника для учета подстройки недр планеты к аномальным массам в недрах планеты при интерпретации внешнего гравитационного поля (техника нагрузочных коэффициентов) была разработана в работах (Марченков и др., 1984; Жарков и др., 1986). Численное моделирование проводится, используя разложение по сферическим гармоникам данных топографии и гравитационного поля до 90-ой степени и порядка для Марса и до 70-ой для Венеры (Smith и др., 2001; Konopliv и др., 2016; Rappaport и др., 1999; Konopliv и др., 1999). Данные гравитационного поля и топографии планеты доступны на сайте Системы Планетных данных (<http://pds-geosciences.wustl.edu>). Рельеф границы кора-мантия предполагает изостатическую компенсацию по Эйри. Карта толщины коры Марса контролируется значением (39 км) под областью установки станции миссии InSight в юго-западной части равнины Элизий, полученным по результатам сейсмического эксперимента (Knapmeyer-Endrun и др., 2021). Сравнение с глобальной картой коры Марса, полученной по методу, изложенному в работе (Wieczorek и др., 2019), используя программное обеспечение ctplanet (Wieczorek и др. 2021), показало расхождение под вулканическими структурами. Поскольку для Венеры нет возможности нормировать толщину коры по референсной точке, принимаем, что рельеф границы кора-мантия не должен приводить к отрицательному значению толщины коры. Проведено сравнение вариаций коры Венеры с имеющимися глобальными картами коры планеты.

Литература:

Жарков В.Н., Марченков К.И., Любимов В.М. Астрон. вестн. 1986. Т.20. №3. С.202-211.

Марченков К.И., Любимов В.М., Жарков В.Н. Докл. АН СССР. 1984. Т.15. № 2. С.583-586.

Konopliv A.S., Banerdt W.B., Sjogren W.L. Icarus. 1999. V. 139. P. 3–18.

Konopliv A.S., Park R.S., Folkner W.M. Icarus. 2016. V. 274. P. 253-260.

Rappaport N. J., Konopliv A. S., Kucinskas A. B. Icarus. 1999. V.139. P. 19–31.

Smith D.E., Zuber M.T., Frey H.V., и др. J. Geophys. Res. 2001. V.106 (E10). P.23689-23722.

Knapmeyer-Endrun B., Panning M. P., Bissig F., и др. Science. 2021. V. 373. P. 438–443.

Wieczorek M. (ctplanet). 2021. doi:10.5281/zenodo.4439426

Wieczorek M. A., Beuthe M., Rivoldini A., Van Hoolst T. J. Geophys. Res. Planets. 2019. V. 124. P. 1410–1432.

# НОВЫЙ АНАЛОГ МАРСИАНСКОГО ГРУНТА VI-M2

Миронов Д.Д.

*Институт геохимии и аналитической химии РАН*

*Институт экологии РУДН*

На основе данных, полученных с миссий MER и Curiosity, в лаборатории геохимии Луны и планет был разработан новый имитатор марсианского грунта VI-M2. При создании данного аналога главной целью было повторить химико-минералогический состав породы Марса. Одним из основных компонентов данного аналога является песок с халактырского пляжа, который по своему минералогическому составу близок к базальтовым пескам из района Meridiani planum [1]. Также в качестве компонента был добавлен материал обработанной породы, который был назван "вулканическим дренажом". Данный компонент представляется коммерческой фирмой. Для вулканического дренажа характерен кислый состав минералов, содержащих серу, что идентично минералогии поверхности Марса. Общая минералогия имитатора VI-M2 включает в себя, в основном, орто- и клинопироксен, плагиоклаз, встречаются минералы крайние члены изоморфных рядов альбит-анортит и хромшпинелида, а именно анортит и хромит, рудные – титаномагнетит и магнетит, в качестве включений также часто встречается пентлантит, пирротин и халькопирит, которые являются результатом окисления в условиях полупустынного климата, также присутствуют минералы ряда пирротин-пирит в качестве включений, что идентично образцам из плато Меридиани.

Химический состав аналога близок к результатам из кратера Игл [2]. В большей степени он повторяет состав невыветренных пород и камней из того же кратера, что наблюдается в корреляции по  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SO}_3(\text{т})$ ,  $\text{FeO}(\text{т})$ . Значения пересчитаны в предполагаемые формы нахождения веществ.

В первую очередь, данный аналог разрабатывался для проведения биологических исследований, однако сфера его применения достаточно широка. Так, опираясь на тот факт, что VI-M2 больше похож на невыветренные породы, его можно использовать для изучения процессов выветривания в условиях Марса. Уникальность данного аналога заключается в близости по свойствам к грунту и породам из кратера Игл [2], в то время как большинство аналогов повторяют свойства грунта из кратера Гейл или представляют из себя аналог "глобального" грунта Марса, а также в его доступности по сравнению с конкурентами.

Литература:

1) B.C. Clark, R.V. Morris, S.M. McLennan, R. Gellert, B. Jolliff, A.H. Knoll, S.W. Squyres, T.K. Lowenstein, D.W. Ming, N.J. Tosca, A. Yen, P.R. Christensen, S. Gorevan, J. Brückner, W. Calvin, G. Dreibus, W. Farrand, G. Klingelhofer, H. Waenke, J. Zipfel, J.F. Bell, J. Grotzinger, H.Y. McSween, R. Rieder, Chemistry and mineralogy of outcrops at Meridiani Planum, Earth and Planetary Science Letters, Volume 240, Issue 1, 2005, Pages 73-94, ISSN 0012-821X, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.09.040>.

2) Rieder, R., Gellert, R., Anderson, R.C., Brückner, J., Clark, B.C., Dreibus, G., Squyres, S.W., 2004. Chemistry of rocks and soils at Meridiani Planum from the Alpha Particle X-ray Spectrometer. Science 306 (5702), 1746–1749.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПАССИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРА ДАН НА БОРТУ МАРСОХОДА КЮРИОСИТИ

Никифоров С.Ю., Митрофанов И.Г., Дьячкова М.В.,  
Литвак М.Л., Лисов Д.И., Санин А.Б.

*Институт космических исследований РАН*

ДАН / DAN ("Динамическое альbedo нейтронов" / Dynamic Albedo of Neutrons) — российский эксперимент в программе научных исследований с борта автоматического марсохода "Кюриосити" / Curiosity проекта НАСА "Марсианская научная лаборатория" (Mars Science Laboratory).

Анализ измерений, проведенных посредством пассивных измерений прибора ДАН, позволил получить значения вариации нейтронного потока вдоль пути движения марсохода. Вариация нейтронной компоненты непосредственно связана с наличием водородосодержащих элементов в грунте поверхности. Используя метод обработки пассивных данных были получены оценки водородной компоненты грунта. В данной работе представлены актуальные результаты измерения прибора ДАН.

# МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЭКЗОЛУН - ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ

Сенаторова М.В.<sup>1</sup>, Дерри С.Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГБОУ Школа № 956

<sup>2</sup> Институт астрономии РАН

Обнаружение и подтверждение наличия экзолун у планет вне Солнечной системы является недостающим пазлом в понимании происхождения и формирования внесолнечных планетных систем. С одной стороны методы обнаружения и подтверждения кандидатов в экзопланеты отработаны и показали свою эффективность, с другой стороны стопроцентного метода подтверждения наличия лун у данных планет не существует, в частности из-за технических ограничений наблюдательных инструментов.

В работе рассмотрена попытка косвенно обнаружить экзолуну у планеты-гиганта (горячего Юпитера) через тайминг транзита, анализ спектров высокого разрешения (HIRES) и наблюдение систематического изменения глубины транзита. Подтверждение экзолуны через наблюдения осложнены аккрецией верхних слоев горячего юпитера WASP-12b на поверхность звезды, и, как следствие, наличие вспышек и аномалий в спектрах. Также наблюдения транзитов и его неравномерность может быть вызвана наличием звездных пятен крупного размера, присутствующих на поверхности звезд этого класса.

# ПОЛУЧЕНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КРИВЫХ БЛЕСКА ЭКЗОПЛАНЕТЫ WASP-12B

Сенаторова М.В.<sup>1</sup>, Дерри С.Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГБОУ Школа № 956

<sup>2</sup> Институт астрономии РАН

Транзитный метод — один из самых простых и доступных методов обнаружения и изучения экзопланет. Заключается он в наблюдении транзита — процесса, во время которого планета скрывает часть своей родительской звезды от наблюдателя, — и засечения изменения яркости звезды. Планета WASP-12b интересна как объект изучения, так как её материнская звезда WASP-12 постепенно разрушает планету, поглощая её, что влияет на оба тела. Именно поэтому постоянное наблюдение за этими объектами очень важно.

В данной работе представлены наблюдения транзита экзопланеты, а также сравнительный анализ кривых блеска транзита.

# ОБ ОСОБЕННОСТЯХ КОРЕГИСТРАЦИИ ЦМР ЛУНЫ РАЗНОЙ ДЕТАЛЬНОСТИ

Слодарж Н.А.

*Московский Государственный Университет Геодезии и Картографии*

Поверхность небесных тел хранит в себе информацию об истории формирования и эволюции, внутренней структуре, геологических процессах. Одним из основных источников в их изучении являются данные, полученные на основе изображений небесных объектов, в частности - цифровые модели рельефа и производные геоинформационные продукты.

Самым близким к нам и изученным из небесных тел является Луна. Первые карты Луны появились еще в XVIII в, а в 1959 г. "Луна-3" впервые сфотографировала обратную сторону земного спутника.

На сегодняшний день наиболее полные и обширные данные о рельефе представлены несколькими глобальными моделями: LRO WAC DTM GLD100, SLDEM, LRO LOLA DEM и множеством локальных. Глобальные цифровые модели рельефа (ЦМР) находятся в открытом доступе. Помимо научно-исследовательских задач, особый интерес эти данные представляют при планировании новых миссий к Луне. Все модели различаются пространственным разрешением и планово-высотной точностью. Точность определения положения космических аппаратов на орбите, использование различных гравитационных моделей, реализация различных методик в обработке информации разных сенсоров, а также наличие систематических погрешностей в результатах измерений приводят к ошибкам в определении положения точек на поверхности Луны и, как следствие, вызывают рассогласованность моделей между собой. Это становится наиболее заметным при необходимости интеграции локальной высокодетальной ЦМР в глобальную модель рельефа на исследуемый регион при решении различных научных задач, в которых должны быть учтены как ближние так и дальние зоны.

В данной работе рассматриваются особенности совместного использования данных высокодетальных ЦМР при формировании геоинформационных продуктов для анализа морфометрических особенностей рельефа Луны. В ходе исследования была выполнена корегистрация ЦМР GLD100 WAC с разрешением 100 м/пикс, SELENE Kaguya TC-5 DEM и SELENE Kaguya SLDEM 2013 с разрешением 10 м/пикс, а также созданной в КЛИВТ МИИГАиК ЦМР по снимкам NAC LROC с разрешением 0,9 м/пикс в южной полярной области Луны. Были определены относительные планово-высотные сдвиги доступных моделей ЦМР; проведены тесты освещенности поверхностей на основе моделей разного пространственного разрешения.

# ХАРАКТЕРИСТИКА И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В МАРСИАНСКОЙ АТМОСФЕРЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО СОЛНЕЧНОМУ ПРОСВЕЧИВАНИЮ АППАРАТА ACS/TGO

Стариченко Е.Д.<sup>1</sup>, Беляев Д.А.<sup>1</sup>, Медведев А.С.<sup>2</sup>,  
Фёдорова А.А.<sup>1</sup>, Кораблев О.И.<sup>1</sup>, Montmessin F.<sup>3</sup>,  
Трохимовский А.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия,*

<sup>2</sup> *Max Planck Institute for Solar System Research, Göttingen, Germany*

<sup>3</sup> *LATMOS/IPSL, UVSQ Université Paris-Saclay, UPMC Univ. Paris 06, CNRS, Guyancourt, France*

Гравитационные волны (ГВ) в атмосфере планеты являются повсеместным явлением и представляют собой распространение колебаний воздушных масс вследствие вертикального смещения одного объема воздуха относительно другого, которое возникает с изменением плотности атмосферы. ГВ переносят энергию и импульс, что оказывает значительное влияние на общую динамику планетной атмосферы. В нашей работе мы рассматриваем параметры ГВ [1], а также их распределения. ГВ восстанавливаются из высотных профилей температуры и плотности [2], полученных в результате обработки данных по эксперименту солнечного просвечивания российского комплекса спектрометров Atmospheric Chemistry Suite (ACS) [3] на борту аппарата Trace Gas Orbiter (TGO). Нами найдены такие характеристики ГВ, как вертикальный поток горизонтального импульса, потенциальная энергия, ускорение и частота Брента-Вяйсяля, характеризующая стабильность распространения ГВ, а также их пространственно-временные распределения.

ACS находится на орбитальном аппарате TGO, который является частью европейско-русской миссии ExoMars 2016. Он состоит из трех спектрометров ближнего – NIR (0.73-1.6 мкм) [4], среднего – MIR (2.3-4.2 мкм) и теплового – TIRVIM (1.7-17 мкм) инфракрасного диапазона. В данной работе используются данные прибора MIR – спектрометра со скрещенной дисперсией с высокой разрешающей способностью  $\sim 25000$ , отношением сигнал шум больше 1000 и вертикальным разрешением  $\sim 0.5 - 2.5$  км, что позволяет получать вертикальные профили температуры и плотности с мелкой сеткой по высоте от 10 до 180 км из спектров углекислого газа CO<sub>2</sub> по сильной полосе поглощения 2.7 мкм. Представленный объем данных представляет собой около 500 высотных профилей ГВ и их характеристик с начала работы ACS-MIR (апрель 2018, Ls  $-165^\circ$  M $\Upsilon$ 34) и по конец 35 марсианского года (январь 2021).

Анализ данных спонсируется грантом РФФ № 20-42-09035.

## Литература:

- [1] Starichenko E. et al., 2021. Gravity wave activity in the Martian atmosphere at altitudes 20–160 km from ACS/TGO occultation measurements. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 126, e2021JE006899. DOI: 10.1029/2021JE006899
- [2] Belyaev D. et al., 2021. Revealing a high water abundance in the upper mesosphere of Mars with ACS onboard TGO. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093411. DOI: 10.1029/2021GL093411
- [3] Korablev O., Montmessin F., and ACS Team, 2018. The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of three spectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter. *Space Sci. Rev.*, 214:7. DOI 10.1007/s11214-017-0437-6.
- [4] Fedorova A. et al., 2020. Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season. *Science*, eaay9522. DOI: 10.1126/science.aay9522.

# ОПИСАНИЕ ВЕРОЯТНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПОСЕЩАЕМОЙ ЛУННОЙ БАЗЫ НА ВАЛУ КРАТЕРА ДЕ ЖЕРЛАШ

Турчинская О.И.<sup>1</sup>, Гришакина Е.А.<sup>1</sup>, Третьюхина О.С.<sup>1</sup>,  
Феоктистова Е.А.<sup>2</sup>, Слюта Е.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского*

<sup>2</sup> *Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга*

Одной из ключевых стратегических задач нынешнего столетия является детальное изучение Луны, опирающееся на автоматические космические аппараты, и начало ее освоения, включая пилотируемые экспедиции и создание обитаемой Лунной базы с целью последующего широкомасштабного создания лунной инфраструктуры.

Целью работы являлся выбор потенциальных мест для размещения лунной базы на основе требований, определяемых конкретными научными и практическими задачами, и на основе общих требований к району размещения обитаемой лунной базы [1].

В полярных регионах Луны наблюдаются необычные условия освещенности, которые делают их привлекательными местами для будущих исследований. Такие условия являются результатом того, что ось вращения Луны почти перпендикулярна плоскости эклиптики, она наклонена на  $1.5^\circ$  [2]. Известно, что днища ударных кратеров вблизи полюсов являются постоянно затененными и до них никогда не доходит солнечный свет. Такие области были смоделированы [3] и измерены [4]. Они оказались чрезвычайно холодными и являются своего рода холодными ловушками для любых летучих молекул, которые попадают в них. В то же время, топографически высокие участки на полюсах, в отличие от экваториальных регионов, имеют возможность быть освещенными более 50% времени. Возможность того, что места, получающие длительные порции непрерывного освещения, в непосредственной близости от областей, которые могут содержать водяной лед [5], делает полярные регионы Луны потенциально идеальными местами для будущих аванпостов.

С учетом всего вышеперечисленного, была выбрана площадка в южной полярной области Луны на валу кратера де Жерлаш.

Площадка представляет собой пологую возвышенность на валу кратера, с абсолютной высотой около 2000 метров, высшая точка которого возвышается над окружающими депрессиями (днищами кратеров) на 4000 метров. На дне кратера Де Жерлаш в юго-восточной части расположен внутренний (вложенный) кратер диаметром 15 км.

В пределах площадки наблюдаются несколько пологих участков, однако, наиболее приоритетной для нас является территория на вершине холма, представляющая собой субгоризонтальную поверхность размером  $1 \times 10$  км с относительно небольшим количеством кратеров. В ее пределах можно выделить около 5 участков с наименьшими уклонами, которые вполне могут выступать в роли кандидатов для размещения обитаемой базы.

Поскольку Солнце в полярных районах светит практически по касательной к поверхности, то освещенность в лунных полярных широтах также в значительной степени зависит и от локального рельефа местности, и проходя за краями кратеров и вершинами холмов, местность покрывается сложной сетью теней, которые постоянно меняются. Освещенность на вершине этого холма достигает 65%, а отдельных точках от 80 до 85.5%.

Из-за более высокого диапазона высот вблизи южного полюса некоторые высокоширотные регионы имеют хорошую видимость Земли (например, горы Малаперт, где видимость

с Земли около 100%) по сравнению с северным полюсом. Однако Малаперт не подходит для размещения лунной базы, но он может служить ретрансляционной станцией для большого числа объектов с высокой освещенностью, таких как вал Де Жерлаш.

Литература:

[1] Слюта Е.Н., Галимов Э.М., Маров М.Я. Тематическая геологическая съемка и предварительная геологическая разведка (на Луне). В кн.: Фундаментальные космические исследования. Т. 2. Небесные тела Солнечной системы. Под ред. Райкунова Г.Г. М.: Физматлит. 2014. С. 103-128.

[2] Ward W.R. Past orientation of the lunar spin axis. *Science*. 1975. 189. 377-379.

[3] Vasavada A.R., Paige D.A., Wood S.E. 1999. Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits. *Icarus*. 141. 179-193.

[4] Paige D. A., Foote M. C., Greenhagen B. T., Schofield J. T., Calcutt S., Vasavada A. R. et al.(2010). The Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Space Science Reviews*, 150(1-4), 125-160. <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9529-2>.

[5] Nozette S., Spudis P.D., Robinson M., Bussey D.B.J., Lichtenberg C., Bonner R. Integration of lunar polar remote-sensing data sets: Evidence for ice at the lunar south pole. *J. Geophys. Res.* 2001.106 (E19), 23253-23266.

# СРАВНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПЕПЛОВ С ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА СО СВОЙСТВАМИ ЛУННОГО РЕГОЛИТА

Уварова А.В.

*Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского*

Лабораторией геохимии Луны и планет ГЕОХИ РАН разработан лунный грунт аналог VI-75, который имитирует физико-механические свойства, но он не моделирует минеральный состав. В настоящее время наша лаборатория занимается разработкой полномерного грунта-аналога, который будет приближен не только по физическим свойствам, но и по химическому и минеральному составу к лунному реголиту. Основной целью данного исследования является рассмотрение нескольких пеплов с вулканов Толбачик, Горелый и Мутновский, а также Халактырского пляжа как потенциальных лунных грунтов аналогов. В качестве критериев подобия выступают значения плотности, угла внутреннего трения и сцепления. Для их определения выполнены испытания срезом для рыхлого и плотного сложений. Нормальное напряжение задавалось в зависимости от плотности образцов в пределах от 10 кПа до 50 кПа для рыхлых и от 50 до 200 кПа для плотных образцов. Касательная нагрузка определялась как максимальное касательное напряжение, при котором разрушался образец. Скорость разрушения составляла 2 мм/мин.

Согласно оценкам исследований, лунный реголит имеет диапазон плотности в пределах 1,3 – 1,9 г/см<sup>3</sup>, угол внутреннего трения в зависимости от плотности изменяется от 13° до 56° и сцепление 0 до 3 кПа.

Результаты экспериментов показали, что диапазон плотности у всех образцов вулканических пеплов полностью не соответствует лунному, однако образцы вулканов Мутновский (1,17 – 1,46 г/см<sup>3</sup>), и Горелый с высоты 1305 м (1,05 – 1,37 г/см<sup>3</sup>) близки по свойствам к приповерхностному слою лунного реголита. Образцы вулкана Мутновский имеют диапазон угла внутреннего трения 42 – 51,5° и сцепления 2,2 – 19,5 кПа, а пеплы с в. Горелый 33,3 – 39,2° и 1,3 – 16,2 кПа. Образцы с вулкана Толбачик имеют слишком маленькую плотность из-за более грубозернистого состава (0,89 – 1,04 г/см<sup>3</sup>), а грунт с Халактырского пляжа наоборот имеет большую плотность (1,60 – 1,81 г/см<sup>3</sup>).

Таким образом, рассмотрение камчатских пеплов как потенциальных аналогов лунного грунта показало, что в полной мере они не смогут имитировать лунный грунт. Однако, образцы с вулканов Мутновский и Горелый могут быть использованы для имитации верхнего слоя (до глубины 15 см) реголита, с минимальной плотностью.

# ВАРИАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ РАВНИНЫ УТОПИЯ НА МАРСЕ ПО ДАННЫМ ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРОВ

Фабер Е.Д.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

На сегодняшний день существуют убедительные доказательства существования различных видов водоемов на раннем Марсе, но окончательные доказательства существования океана в северной части полушария остаются недостижимыми.

Данное исследование ставит своей целью охарактеризовать композиционные вариации состава отложений в районе равнины Утопия. В работе используются данные, полученные Кампс и др. (2020) [1], а именно глобальные типы марсианской поверхности, которые классифицируются на основе мультиспектральных продуктов выбора Вивьяно-Бэк [2] по данным CRISM с пониженной дискретизацией. Поскольку тонкие вариации состава неуловимы в усредненном разрешении, то в дополнение к ним в работе рассматривается набор областей интереса в исходном разрешении данных CRISM. Данные с усредненными значениями сравниваются с использованием набора данных OMEGA для перекрестной проверки.

С помощью статистического метода главных компонент для полученных мультиспектральных данных CRISM идентифицируются продукты, вносящие существенный вклад в дисперсию в области исследования, после чего разграничиваются области, демонстрирующие закономерности. Затем анализируются средние спектры разграниченных областей, где мы обращаем внимание на отрицательный спектральный наклон, который определяется как повсеместная характеристика северной низменности Марса. Средний спектральный наклон полос отражения CRISM показывает увеличение абсолютного значения по мере продвижения на север. [2] У наклона спектра также возможна минералогическая интерпретация, которая заключается в том, что он способен указывать на кору выветривания на базальте, позволяя отдать предпочтение сценарию с выветриванием, а не с андезитом.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО СООТНОШЕНИЯ HDO/H<sub>2</sub>O В МЕЗОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ SOIR ЗА 2006-2014 ГОДЫ

Федорова Е.С., Беляев Д.А., Федорова А.А.

*Институт космических исследований РАН*

Аэрозольные частицы в атмосфере Венеры содержатся не только в облачном слое (высоты 50-70 км), но и в так называемой надоблачной дымке, в мезосфере на высотах 70-100 км. Как и облака, эти частицы состоят из капель водного раствора серной кислоты (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) с процентным содержанием 75 – 80%. Недавние исследования в рамках миссии "Венера-Экспресс" (VEx) показали, что эти частицы имеют субмикронные (~ 0.2 мкм) и микронные (~ 1 мкм) размеры и могут образовывать отдельные плотные слои на высотах от 70 до 90 км [1, 2]. Механизм образования таких слоёв до конца не изучен; их формирование зависит от фотохимического взаимодействия водяного пара (H<sub>2</sub>O) с двуокисью серы (SO<sub>2</sub>), изотопного соотношения HDO/H<sub>2</sub>O, а также от условий конденсации воды в мезосфере.

В данной работе приведены результаты обработки спектров пропускания H<sub>2</sub>O, HDO и CO<sub>2</sub>, полученных в эксперименте SOIR/VEx (Solar Occultation in the InfraRed) в режиме солнечного просвечивания, а также получено соотношение HDO/H<sub>2</sub>O в мезосфере Венеры, важное для понимания эволюции планеты. Настоящая работа является продолжением анализа данных, опубликованных в 2008 году [3], и охватывает наблюдения за весь период эксперимента SOIR, с 2006 по 2014 гг. Акустооптический эшелле спектрометр SOIR миссии "Венера-Экспресс" проводил измерения в спектральном диапазоне 2.3–4.3 мкм с разрешающей способностью около 25000, что позволяло регистрировать тонкие линии поглощения таких молекул, как CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HDO, SO<sub>2</sub>. Диапазон доступных высот при работе в режиме солнечного просвечивания начинается выше 65 км (прямо над облаками), что делает данные SOIR идеально подходящими для исследования надоблачной дымки [3]. В дальнейшем планируется использовать результаты работы для исследования механизмов образования плотных аэрозольных слоёв над облаками, что позволит усовершенствовать существующие химические и микрофизические модели атмосферы Венеры и поможет в подготовке и реализации будущих экспериментов на планете.

Литература:

[1] Luginin et al., 2016. Aerosol properties in the upper haze of Venus from SPICAV IR data. *Icarus*, Volume 277. doi:10.1016/j.icarus.2016.05.008.

[2] Luginin et al., 2018. Scale heights and detached haze layers in the mesosphere of Venus from SPICAV IR data. *Icarus*, Volume 311. doi:10.1016/j.icarus.2018.03.018.

[3] Fedorova et al., 2008. HDO and H<sub>2</sub>O vertical distributions and isotopic ratio in the Venus mesosphere by Solar Occultation at Infrared spectrometer on board Venus Express. *J. Geophys. Res.*, 113, E00B22, doi:10.1029/2008JE003146.

# ОРБИТАЛЬНАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ ЛУННОГО КРАТЕРА БЮРГИ А

Шайхиев Л.А., Шпекин М.И.

*Казанский федеральный университет*

Среди кратеров видимого полушария Луны кратер Бюрги А (Byrgius A (24S, 67W, D=19 km) выделяется повышенным альбедо, что делает его легко доступным для наблюдений в наземные телескопы. Этот кратер вошел в большинство каталогов лунных кратеров, построенных по наземным астрометрическим наблюдениям.

Другие важные характеристики кратера также представляют несомненный интерес. Несмотря на свои скромные размеры сателлитный кратер Бюрги А включён в список кратеров с яркой системой лучей, которые простираются в восточном направлении более чем на 400 км. Это почти в 20 раз превышает диаметр самого кратера. Наличие двухсотметровой центральной горки позволяет включить его в группу сложных кратеров.

Перечисленные свойства кратера Бюрги А послужили основанием для его детального обследования. Авторы привлекли для этого орбитальные снимки высокого разрешения, полученные камерами с борта станции Lunar Reconnaissance Orbiter, результаты лазерной альтиметрии, а также собственную цифровую модель кратера.

В докладе рассмотрены топографические особенности строения кратера, состояние вещества на склонах и днище кратера, а также вероятные оценки возраста.

# ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НА ГЛОБАЛЬНЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ЦИКЛ В СЕЗОН ПЫЛЕВЫХ БУРЬ НА МАРСЕ

Шапошников Д.С.<sup>1</sup>, Медведев А.С.<sup>2</sup>, Родин А.В.<sup>1,3</sup>,  
Хартог П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИУ Московский физико-технический институт, Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт исследований солнечной системы им. Макса Планка, Гёттинген,  
Германия

<sup>3</sup> Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Впервые с использованием модели общей циркуляции изучено влияние атмосферных гравитационных волн (ГВ) на глобальный круговорот воды в средней и верхней атмосфере Марса во время глобальных пылевых бурь (марсианские года 28 и 34). Моделирование пылевых бурь сравнивалось с моделированием, использующим климатологическое распределение пыли в отсутствие параметризации ГВ. Сценарии пылевых бурь основаны на наблюдениях оптической толщины пыли с помощью прибора Mars Climate Sounder на борту Mars Reconnaissance Orbiter. Моделирование показывает, что учет влияния ГВ приводит к изменению концентрации водяного пара в термосфере. Наиболее значительный эффект ГВ двоякий. Во-первых, охлаждение термосферы на полюсах приводит к уменьшению содержания водяного пара в определенные периоды. Во-вторых, нагрев в районах, представляющих основные каналы поступления воды в верхние слои атмосферы (так называемый механизм водяного "насоса"), наоборот, увеличивает ее концентрацию. Так как повышение температуры обеспечивает более интенсивное атмосферное перемешивание, а также расширяет подводящий канал за счет увеличения давления насыщения. Динамический баланс этих основных механизмов приводит к изменениям в распределении водяного пара в верхних слоях атмосферы. Пылевые бури усиливают выброс водяного пара в верхние слои атмосферы. Сезонные различия в повторяемости штормов в разные годы позволяют проследить пути переноса водяного пара в верхние слои атмосферы. Работа частично поддержана грантом Российского научного фонда № 20-72-00110.

# ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ТРАНЗИТНЫХ ЭКЗОПЛАНЕТ ПО ДАННЫМ 50-СМ ТЕЛЕСКОПА САО РАН

Яковлев О.Я.<sup>1,2</sup>, Валеев А.Ф.<sup>2</sup>, Тавров А.В.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *Специальная астрофизическая обсерватория РАН*

<sup>3</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

Большинство подтвержденных экзопланет в настоящее время обнаружены методом транзитной фотометрии (3773 из 4920 [1]). Наличие экзопланеты у звезды этим методом определяется по характерному периодическому падению блеска звезды вследствие видимого прохождения экзопланеты по ее диску (транзит экзопланеты).

В САО РАН на 50-см роботизированном телескопе с начала 2020 года проводятся наблюдения с целью детектирования и исследования экзопланет методом транзитной фотометрии. С августа 2020 г. по январь 2021 г. телескоп снимал одно поле размером 2.5x1.5 градусов. В нем находится около 40000 звезд звездной величины 13.5-19.5m, которые являются объектами проводимого исследования. Всего получено 24390 снимков за 84 ночи, медианной значение за ночь – 364 снимка.

Цель работы – изучить имеющиеся данные на предмет возможности детектирования новых экзопланет. На основании точности фотометрии, условий и длительности наблюдений, а также статистики экзопланет предполагается, что по этим данным возможно детектировать короткопериодические экзопланеты (с орбитальным периодом до нескольких суток) типа Юпитера.

Процесс обработки данных для детектирования экзопланет транзитным методом состоит из двух частей: проведение фотометрии (т.е. получение кривых блеска звезд из исходных изображений) и анализ кривых блеска для поиска транзитных явлений. В ходе проведенной работы программная реализация фотометрии была адаптирована для применения к имеющимся данным (на основе разработанной ранее в САО РАН). Кроме того, реализованы основные этапы анализа кривых блеска, к которым относятся калибровка и непосредственно поиск транзитных явлений.

В результате проведенной обработки исследуемых снимков обнаружен 5 звезд, которые интересны для дальнейшего изучения с целью подтверждения или опровержения наличия у них экзопланет. У этих звезд зарегистрированы падения блеска с характерной для транзита экзопланеты формой с периодами 26, 25, 46, 63, 198 суток.

Литература и источники:

[1] NASA Exoplanet Archive, 2022. Access: 2021-03-01. doi.org/10.26133/NEA1

# DUST PARTICLE DYNAMICS AND ELECTROMAGNETIC PHENOMENA

Abdelaal M.E.<sup>1,2</sup>, Zakharov A.V.<sup>2</sup>, Dolnikov G.G.<sup>2</sup>,  
Kuznetsov I.A.<sup>2</sup>, Shekhovtsova A.<sup>2</sup>, Lyash A.N.<sup>2</sup>,  
Shashkova I.A.<sup>2</sup>, Poroykov A.Y.<sup>3</sup>, Dubo A.E.<sup>2</sup>,  
Kartasheva A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Moscow Institute of Physics and Technology*

<sup>2</sup> *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences*

<sup>3</sup> *Moscow Power Engineering Institute*

Electrical activity on the surfaces of Mars and the moon originates from vastly diverse sources, posing a barrier to human and robotic planetary exploration missions. Global dust storms have re-distributed a cover of dust throughout Mars. Because of the many grain collisions in the dust-laden atmosphere, dust levitated by these storms and regular dust devils is predicted to be electrostatically charged. On the other hand, dust on the moon's surface is projected to be electrostatically charged as a result of the solar wind, cosmic rays, and the photoelectric effect of solar radiation. Dust that is electrostatically charged has a strong ability to stick to surfaces. Atmospheric dust falling on solar panels on NASA's Mars exploration rovers has proven that it may reduce their performance to the point where the rover becomes useless. As the Apollo missions to the moon shown, lunar dust adhesion may obstruct both manned and robotic lunar exploration efforts.

# МОДЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ ВЕНЕРЫ НА ОСНОВЕ PREM

Amorim O. Dargilan

*МФТИ*

В настоящее время актуальной является задача построения моделей внутреннего строения планет земной группы. Условия в недрах таких планет многое говорят об их эволюции. Венера является особенно интересным случаем так как она мало отличается от Земли по размерам, но при этом у неё отсутствует собственное магнитное поле и её геологическая история заметно отличается от земной (1,2).

В данной работе построены модели внутреннего строения Венеры. Для этого была решена система дифференциальных уравнений на массу, давление и момент инерции. Использован метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Уравнение состояния вещества и распределение упругих параметров основаны на земной модели PREM (3).

Модели построены для различных значений радиуса ядра (от 2800 км до 3500 км) и толщины коры (от 30 км до 70 км). Предполагается что ядро целиком расплавлено. Получены распределения давления, плотности, ускорения силы тяжести и упругих модулей. Рассчитанные значения безразмерного момента инерции варьируются от 0.324 до 0.347, что согласуется с измерениями (4).

Далее для каждой модели рассчитано приливное число Лява  $k_2$ . Получены значения в диапазоне от 0.2 до 0.31. Сравнение модельных значений с экспериментально полученными (5) позволяет отдать предпочтение моделям с большим ядром.

Литература:

1. Гудкова Т. В., Жарков В.Н. Модели внутреннего строения Землеподобной Венеры, 2020
2. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику - М.: ООО
3. Dziewonski, A.M. & Anderson, D.L., 1981
4. Margot, J. L., Campbell, D. B., Giorgini, J. D., et al. 2021, NatAs, 5, 676
5. Konopliv, A. S., & Yoder, C. F. 1996, GeoRL, 23, 1857

---

# КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ



# ФИБРИЛЛЯРНЫЕ И СЕТЕВЫЕ АКТУАТОРЫ И МИКРОМАНИПУЛЯТОРЫ НА БАЗЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ И ПИКОСПУТНИКОВ: ВЫСОКОВАКУУМНОЕ И КРИОВАКУУМНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ПОД ПУЧКАМИ ЧАСТИЦ В FIB-SEM И CRYO-FIB-SEM

Адамович Е.Д., Бурьянская Е.Л., Градов О.В.

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова*

Возможность создания управляемых микропучком фибриллярных вакуумных микроактуаторов явно следует из истории развития их силовых прототипов в космической робототехнике. Говоря о развитии робототехники в космических технологиях, необходим учёт длительной истории её существования – с конца 1960-х гг. - середины 1970-х гг. Основные принципиальные современные требования к "interstellar robotics" сформулированы на отраслевых ведомственных международных совещаниях конца XX – начала XXI века. Расширенная трактовка космической робототехники (*sensu lato*) отлична от узкой её трактовки (*sensu stricto*) причислением к первой как механически-активных систем зондирования внешней среды, так и пассивных картирующих систем, в то время как вторая подразумевает наличие активных мехатронных элементов типа *robotic arms / manipulators*. В нашем докладе превалирует узкая трактовка, так как динамика микрофибрилл и кантиллеров под потоком частиц имеет смысл только при наличии движущихся элементов – сегнетоэлектрических структур-актуаторов в составе аппарата. Аналогичная трактовка характерна также и для *environment-robot interactions for planetary or terrestrial subsurface explorers / robots based on earthworm locomotion and hopping robots for planetary or asteroid surface exploration*. В случае моделирования поведения систем микроактуаторов в вакуумных камерах, наподобие SEM/STEM, можно применять топологию с многоугловым позиционированием электронного микропучка. Фибриллярный манипулятор не может заменить макроманипулятор, но для *nanosatellites* (наноспутников) и *picosatellites* (пикоспутников, типа "CANSAT") наборы кооперативных фибриллярных манипуляторов с управлением электронным пучком могут явиться почти единственным возможным средством достижения эффективности во многих механических приложениях – как при импульсном, разовом (типа раскрытия зеркала либо солнечной батареи) действии, так и при адаптивной реакции, которая позволяет стабилизировать поведение системы. Вывод "CANSAT" с полимерными актуаторами на орбиту представляет собой отдельную техническую проблему, так как суборбитальные траектории не соответствуют требованиям достаточного вакуумирования и невесомости (если речь уже идёт о целевой применимости в открытом Космосе за границей Кармана (>100 км), а не за физиологической линией Армстронга 19 км). Но вакуумные и криовакуумные исследования потенциально применимых полимеров пока не проводились достаточно широко, судя по литературе, на необходимых градациях высот и характеристик среды (от атмосферных до высоко разряженных и вакуумных). Таким образом, пока можно только констатировать наличие кинематического эффекта под электронным пучком (что показывается в наших докладах) и постулировать, по подо-

бию, применение его в космических целях, в частности, при параметрах вакуумирования, достижимых на СЭМ (от сверхвысоковакуумных до ASEM / ESEM) и CryoSEM (также с изменением вакуума в широком диапазоне по программе, задаваемой ЭВМ). Возможно также воспроизведение эффектов тяжелых ионов открытого космического пространства при использовании FIB-SEM или Cryo-FIB-SEM.

# ПРИБОР КОДИЗ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Антонюк Г.И.<sup>1</sup>, Оседло В.И.<sup>1</sup>, Нечаев О.Ю.<sup>1</sup>, Бенгин В.В.<sup>1,2</sup>, Золотарев И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

<sup>2</sup> *Государственный научный центр Российской Федерации институт медико-биологических проблем РАН*

В настоящее время в НИИЯФ МГУ в рамках научно-образовательного проекта "Монитор" разрабатывается прибор нового класса – Комбинированный Детектор Излучений (КОДИЗ). Первостепенной задачей прибора является обнаружение и исследование потоков частиц СКЛ, способных создать дополнительную радиационную нагрузку на борту самолётов во время трансполярных перелетов. Для выполнения данной задачи прибор будет установлен на микро-спутнике типа CubeSat.

В состав прибора КОДИЗ входят несколько детекторов различных типов: черенковский детектор частиц с радиатором из оргстекла площадью  $\sim 11$  см<sup>2</sup>, полупроводниковый телескоп из двух слоёв кремния по 300 мкм и два детектора нейтронов с литиевыми стёклами площадью  $\sim 11$  см<sup>2</sup> различной толщины. Прибор будет регистрировать потоки протонов и ядер с  $Z > 1$  с энергией больше 330 МэВ/нуклон в диапазоне от  $10^1$  до  $10^3$  частиц•см<sup>-2</sup>•с<sup>-1</sup>, потоки протонов и ядер с  $Z > 1$  с энергией больше 30–50 МэВ/нуклон в диапазоне от  $10^1$  до  $10^4$  частиц•см<sup>-2</sup>•с<sup>-1</sup>, потоки тепловых и эпитепловых нейтронов в диапазоне от  $10^1$  до  $10^3$  нейтронов•см<sup>-2</sup>•с<sup>-1</sup>. На основе показаний детекторов прибора будет определяться мощность поглощённой дозы заряженных частиц космического излучения в диапазоне от  $10^{-8}$  до  $10^{25}$  Гр/с.

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ОБЩЕЙ ДОЗЫ

**Виноградова Е.В.**

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых*

Существует ряд методов квалификационных испытаний, которые описывают испытания на стойкость микроэлектроники к воздействию общей дозы. К ним относятся: MIL-STD-883, метод испытаний (ТМ) 1019, используемый в США, и его европейский аналог – базовая спецификация ESA / SCC (BS) № 22900. Не смотря на существующие различия между этими двумя методами испытаний, оба необходимы для обеспечения оценки влияния общей дозы на микроэлектронику. Метод испытаний (ТМ) 1019 версии 7 (MIL-STD-883) разделен на два этапа. Первый этап метода испытаний представляет собой тест на сбой из-за вызванного излучением накопления заряда в оксидной ловушке в *p*- и *r*-канальных транзисторах с оксидным затвором или транзисторах с паразитной оксидной областью. Захваченный положительный заряд в этих оксидах приводит к смещению порогового напряжения *p*-канального затвора и оксидных транзисторов с паразитной областью в сторону режима истощения. Большие сдвиги порогового напряжения приводят к чрезмерному протеканию тока утечки от стока к истоку *p*-канальных транзисторов с оксидным затвором, а также могут вызвать утечку между транзисторами. Этот этап испытания требует облучения при температуре  $24 \pm 6^\circ \text{C}$  до требуемого уровня общей дозы при мощности дозы от 50 до 300 рад (Си)/с с использованием источника гамма-излучения кобальт-60 с последующим электрическим испытанием при комнатной температуре ( $24 \pm 6^\circ \text{C}$ ). Облучение и электрические испытания проводятся при температуре ( $24 \pm 6^\circ \text{C}$ ). Время от окончания облучения до начала электрических испытаний не должно превышать 1 часа, а начало следующего уровня облучения должно происходить в течение 2 часов после окончания предыдущего облучения.

В некоторых случаях требуется второй этап (испытание на отклик) ТМ 1019. Второй этап состоит из дополнительного облучения, равного 50% от требуемой дозы, с последующим 168-часовым отжигом при  $100^\circ \text{C}$  при наихудшем режиме смещения. Дополнительное облучение требуется из-за неопределенности в выявлении наихудшего режима смещения для использования во время облучения и отжига. После 1-недельного отжига устройства следует снова испытать при комнатной температуре. В настоящее время это испытание применяется только к МОП-подобным технологиям, которые могут демонстрировать зависящие от времени эффекты (TDE), например, отжиг захваченных дырок и накопление межфазных ловушек в течение длительного периода времени. Устройство, предназначенное для космического применения, должно проходить оба этапа испытаний метода ТМ 1019.

BS 22900 имеет такую же схему испытаний, что и ТМ 1019. Однако есть несколько важных отличий. Во время первого этапа процедуры испытания облучения, указанные в BS 22900, выполняются в диапазоне окон мощности дозы, то есть либо от 1 до 10 рад (SiO) / с, либо от 0,01 до 0,1 рад (SiO) / с при температуре  $20 \pm 10^\circ \text{C}$ . Оба метода испытаний позволяют проводить испытания при значении мощности дозы, характерном для условий эксплуатации, если это согласовано заказчиком. Во время второго этапа процедуры испытаний дополнительное облучение не требуется, только смещенные отжиги. За 24-часовым отжигом при комнатной температуре, следует 168-часовой отжиг при  $100^\circ \text{C}$ . Причина, по

которой дополнительная доза не требуется в рамках второго этапа BS 22900, заключается в том, что BS 22900 стремится точно установить наихудший режим во время испытания. Электрические испытания проводятся до и после облучения при комнатной/повышенной температуре и после отжига при комнатной температуре.

Схемы испытаний ТМ 1019 и BS 22900 определяют процедуры испытаний для МОП устройств, которые обеспечивают существенное понимание поведения устройства в космических средах с низкой мощностью дозы.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПРОХОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ КЮВЕТЫ ИК СПЕКТРОМЕТРА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ИСКРА-В ДЛЯ ПОСАДОЧНОГО АППАРАТА МИССИИ ВЕНЕРА-Д

Волков П.А., Виноградов И.И., Спиридонов М.В.

*Институт космических исследований РАН*

Проект Венера-Д имеет целью исследование Венеры с использованием как орбитального, так и посадочного аппарата. Исследование каких-либо глобальных климатических явлений и верхней атмосферы разумно делать с орбитера, изучение же нижних слоёв и поверхности невозможно без посадочного аппарата ввиду плотной атмосферы и облачного слоя.

На посадочном аппарате планируется установка инфракрасного спектрометра высокого разрешения ИСКРА-В (Измеритель Сернистых Компонентов Разрежаемой Атмосферы Венеры) для исследования средней и нижней атмосферы, в том числе облачного слоя и приповерхностной атмосферы. В задачи прибора будет входить измерение концентраций углекислого газа, воды, сернистых соединений, хлороводорода и различных изотопных соотношений.

Предполагаемое устройство прибора ИСКРА-В основано на принципах лазерной абсорбционной спектроскопии. Монохроматическое излучение перестраиваемого лазера проходит через исследуемый газ, закачанный в аналитическую кювету и регистрируется фотодетектором. Путём перестройки частоты лазера осуществляется сканирование спектра в узком диапазоне и измерение интенсивности характерных линий молекулярного поглощения.

Для регистрации ряда спектральных линий целевых молекул необходима длина оптического пути через изучаемый газ более 15 метров, в то время как размеры прибора на космическом аппарате сильно ограничены, что приводит к необходимости использования многопроходной оптической схемы, в качестве таковой была избрана схема Эрриотта.

В данной работе проведено моделирование многопроходной оптической кюветы по схеме Эрриотта, вычислены характеристики для нескольких её вариантов. Проведён анализ устойчивости многоходовой конфигурации оптических лучей в кювете в зависимости от температурных изменений, механических воздействий, допусков на точность при производстве. Сформулированы критерии выбора оптимальной многопроходной оптической схемы.

# ВОПРОСЫ ПИТАНИЯ СВЕТОДИОДОВ И УПРАВЛЕНИЯ ИМИ В КОСМИЧЕСКОЙ ОРАНЖЕРЕЕ

Ганичева А.А., Горшков Н.Н., Госсе Д.Д., Гросс А.А.,  
Егоров М.В., Морозов О.В., Николадзе Г.М.,  
Сазонов В.В., Самыловский И.А., Харабадзе Д.Э.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Большинство разрабатываемых устройств для вегетации имеют хотя бы один светодиод. Светодиоды используются для отображения режимов работы устройств и подсветки индикаторов на основе жидких кристаллов. В отличие от ламп накаливания светодиоды имеют высокий КПД и, как следствие, выделяют гораздо меньше тепла при работе. Но, в отличие от ламп накаливания, они имеют характерную вольт-амперную характеристику, которая имеет резкий подъём в рабочей области светодиода. Это приводит к невозможности питания светодиодов фиксированным напряжением, так как небольшое отклонение питающего напряжения (или разброс параметров светодиодов, неизбежный при массовом производстве). Кроме того, изменения условий работы устройства неизбежно приводит к разбросу яркости.

Для решения этой проблемы применяют токоограничивающий резистор. Однако при использовании мощных светодиодов такое решение приводит к снижению экономичности, так как на резисторе выделяется тепловая мощность. Для снижения выделяемой мощности можно снизить напряжение питания с одновременным уменьшением номинала токоограничивающего резистора. Однако при существенном снижении напряжения питания повышается эффект зависимости яркости свечения от колебаний приложенного напряжения.

В устройствах индикации на основе светодиодов часто применяется динамическая индикация, состоящая в том, что светодиоды не светятся одновременно, а свечение разных групп светодиодов происходит в разное время. Это "мерцание" яркости не заметно глазу из-за инерционности зрения, но такая схема индикации приводит к удешевлению схемы управления индикатором за счёт уменьшения количества элементов, управляющих индикатором (например, транзисторных ключей).

Также важной задачей является управление яркостью светодиода. Стандартным решением является подача на управляющие ключи импульсного напряжения с заданной скважностью (например, сигнала с ШИМ).

В данной работе предлагается схема с высоким КПД за счёт отказа от элементов, на которых будет происходить существенное тепловыделение.

# ВЫРАБОТКА МЕТОДОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ АНАЛИЗА ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ КОСМОНАВТА С ПОМОЩЬЮ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОРАНЖЕРЕИ

Ганичева А.А., Горшков Н.Н., Госсе Д.Д., Гросс А.А.,  
Егоров М.В., Морозов О.В., Николадзе Г.М.,  
Сазонов В.В., Самыловский И.А., Харабадзе Д.Э.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Оранжерея является важнейшей составной частью биорегенеративных (биотехнических) систем жизнеобеспечения в условиях ограниченного объема герметичных модулей [1]. Уже более 50 лет в космосе функционировали оранжереи разных конструкций, однако, многие ранние эксперименты оканчивались гибелью растений на различных стадиях развития, отмечалось значительное отставание темпов прохождения стадий онтогенеза в условиях космического полета [2], что приводило к пересмотру конструкторской документации на оранжерею. Усложнение конструкции оранжереи, высокая трудоемкость в её обслуживании сказываются на психологическом состоянии космонавта. Поэтому особый интерес представляет комплексный анализ влияния оранжереи на психологическое состояние космонавта с целью профилактики и возможной коррекции стрессового психологического состояния экипажа (связанного с отсутствием привычной обстановки, светового режима и привычной картины в поле зрения):

- разработке режима взаимодействия космонавта с оранжереей с периодическим заполнением тестов, посредством которых можно судить о состоянии человека по времени;
- определение оптимального освещения оранжереи, с учётом физиологических реакций растений и возможного желаемого влияния на психологическое состояние членов экипажа;
- определение возможного музыкального сопровождения во время пребывания в оранжерее;
- определение познавательного контента, доступного в оранжерее (возможно, с VR-приложением: при наведении на оранжерею описание её элементов, игровая визуализация процесса выращивания).

Литература:

1. Газенко О.Г., «Ф.А. Цандер и современное состояние разработок биологических систем жизнеобеспечения (БСЖО)». Из истории ракетно-космической науки и техники : [Сб.ст.] . : Вып.2. / Рос.акад.наук.Нац.комитет по истории и философии науки и техники. - М. : ИИЕТ РАН, 1998. - 199с.; 20см.
2. Левинских М.А. Онтогенез, репродукция и метаболизм высших растений в условиях космического полета : диссертация ... доктора биологических наук : 14.00.32. - Москва, 2002. - 231 с.

# МИКРОПУЧКОВЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БИОМИМЕТИЧЕСКИМИ КОМПОЗИТНЫМИ МИКРОАКТУАТОРАМИ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ВАКУУМА

Градов О.В., Бурьянская Е.Л., Ратновская А.В.

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова*

Вакуумная, сверхвысоковакуумная и криовакуумная микроробототехника находится на острие развития современной космической мехатроники. Сбои управляемости чреваты потерей аппаратов. Соответственно, управляемость роботов в вакуумных условиях приобретает высокое значение. В ряде случаев управлением магнитным полем (наподобие magnetic transmission technology или coaxial twin-shaft magnetic fluid seals applied in vacuum wafer-handling robots) достигается стабильность действия для макромасштабов, так как магнитное переключение для микроробототехники представляет собой намного более сложную задачу. В то же время, проблематика позиционно-чувствительного управления в вакуумной микроробототехнике до сих пор мало развита. Вместе с тем, для микроробототехнических задач целесообразно создать условия для бесконтактной подачи сигнала на масштабах порядка сотен нанометров – единиц микрон. Нами предлагается совмещение вакуумного приемника и протяженного микроманипулятора в единой структуре; но при этом вопрос о подаче сигнала на входное звено всё ещё остаётся открытым. В таком случае, можно предложить использование антенных свойств кабеля для принятия входного сигнала, причём логично избрать передачу сигнала на кабель с использованием микропучка – соответствующего по размерам (в точке проекции) размерам антенны и, эквивалентно, актулируемой структуры. Использование радиочастотных сигналов для актуации на данных масштабах не представляется возможным, так как размеры антенн намного меньше длины волны (исключая терагерцовый диапазон, где работает физика метаматериалов). Поэтому предлагается использовать возбуждение антенн, интегрированных с микрокабелями проведения сигнала и фибриллярными или гибкими балочными актуаторами (питаемыми энергией сигнала, который подаётся на антенну), сфокусированным микропучком (средней энергии, которая не разрушает структуру, но обеспечивает кинематику для её движения). Использование чисто металлических проволочных конструкций в данных целях не оправдывает себя – как в силу металлографических причин / их фрактографических последствий, так и в силу больших плотностей потока энергии пучка, которые должны вкладываться в материал, чтобы обеспечить деформацию и движение металла (это – задача, более близкая к электронно-лучевой плавке, чем к задаче о деформации под пучком). Поэтому, возможно, единственным рациональным подходом является использование полимерных / фибриллярно-композитных материалов, протяженные компоненты которых могут выполнять функцию антенны и актуатора, а также обладают простыми кабельными свойствами или мембраномиметическими свойствами, которыми обеспечивается проведение сигнала по поверхности/мембране актуаторов. Нами описываются эксперименты в вакуумных камерах, иллюстрирующие зарядку, приём сигнала и управляемую деформацию как одиночных волокон, так и их микросетей (для космической адаптивной оптики). Указывается на особенности поведения сегнетоэлектрических композитных материалов под пучком в вакуумных космических условиях.

# КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЙ ЧЕЛОВЕКА В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Кручинина А.П., Сухочев П.Ю., Каспранский Р.Р.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

В докладе рассмотрены результаты космического эксперимента "Вектор-МБИ-1". В ходе эксперимента проводилась регистрация угловых скоростей и линейных ускорений при повседневной деятельности. Проводится анализ полученных данных и их сравнение с повседневной деятельностью на Земле посредством частотного и корреляционного анализа.

Сначала проводится построение спектра сигнала и вычисление взвешенных вкладов диапазонов частот. Таким образом формируются числовые ряды. К ним уже применимы методы корреляционного анализа.

Корреляционный анализ – статистический метод изучения взаимосвязи между двумя и более случайными величинами. Его суть заключается в расчёте коэффициентов корреляции и на их основе оценить взаимосвязь переменных. Остановимся на следующем определении корреляции:

$$\text{COV}(X, Y) = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n - 1}.$$

В работе оценивается взаимосвязь между энергией сигнала акселерометров и ДУС в каждом из частотных диапазонов.

Большая положительная ковариация говорит о прямой взаимосвязи между переменными. Обратная взаимосвязь дает отрицательную ковариацию. Если количество совпадающих по знаку отклонений примерно равно количеству не совпадающих, то ковариация стремится к нулю, что говорит об отсутствии линейной взаимосвязи. Окончательная формула для вычисления коэффициента корреляции Пирсона получается путем деления ковариации на произведение стандартных отклонений обеих переменных.

Подобный анализ позволит определить влияние изменения частот и, потенциально, выявить связь с болезнью движения.

# ЗОНД ДЛЯ СБОРА ДАННЫХ О ЯВЛЕНИИ ПРОБОЯ НА УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНАХ

Курмашева Т.А.<sup>1</sup>, Архангельская И.В.<sup>2</sup>,  
Архангельский А.И.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИУ Высшая школа экономики

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ

В данной работе рассматриваются процесс создания и результаты калибровки сцинтилляционного детектора, который используется в качестве полезной нагрузки прототипа зонда формата CubeSat для сбора данных об электродинамических процессах в грозовой атмосфере. Особый интерес представляет явление пробоя на убегающих электронах, следствием которого, предположительно, является возникновение TGF (Terrestrial Gamma-ray Flashes) [1-3]. Суть эксперимента заключается в наблюдении за изменением потоков электронов.

Для сбора данных был разработан детектор, состоящий из сцинтилляционного счетчика из полистирола толщиной 3 мм с размерами 15×15 мм<sup>2</sup>, обернутого майларом и соединенного силиконовой смазкой BC-630 с двумя кремниевыми фотоумножителями (SiPM) каждый площадью 3×3 мм<sup>2</sup> (SensL MicroSB-30035-X13 [4]) аналогично детекторам заряженных частиц, используемым в мониторе пучка при калибровках гамма-телескопа ГАММА 400 [5-7]. Сигналы от каждой пары SiPM усиливаются четырьмя двухступенчатыми быстродействующими формирователями-предусилителями на основе Analog Devices AD8000 [8], генерирующими выходные сигналы с временем нарастания порядка нескольких наносекунд. Для оцифровки данных используется АЦП AD-7768-1 [9]. Имеется возможность варьировать размеры использованного в конструкции сцинтилляционного детектора без какого-либо изменения электронных компонентов, что позволяет эффективно использовать его в различных конфигурациях аппарата — как в условиях стратосферы, так и на низких орбитах.

Временное разрешение детектора составляет порядка 200 пс, время нарастания же составляет 1–2 нс. Таким образом результаты калибровки детекторов монитора пучка на синхротроне СР 25 "ПАХРА" показывают, что такие детекторы пригодны для регистрации временных профилей потоков электронов, вызывающих TGF. В качестве базового теста проводилась регистрация вторичных электронов, мюонов и позитронов при помощи разработанного сцинтилляционного детектора, подключенного к осциллографу RIGOL MSO4054. Таким образом, детектор, аналогичный монитору пучка, используемому при калибровках гамма-телескопа ГАММА 400 [5-7], может применяться для регистрации электронов, как вторичных космических лучей, так и возникающих во время пробоя.

В ходе работы был определен и выбран состав аппаратной платформы устройства, начат этап прототипирования, разработана модель корпуса зонда, подготовлен макет детектора, используемого в качестве полезной нагрузки и показана возможность регистрации временных профилей потоков электронов, возникающих во время пробоя, с помощью детектора, аналогичного детекторам монитора пучка [5,6], используемых при калибровках гамма-телескопа ГАММА 400. Также рассматривается возможность добавления в конструкцию детектора на основе кристалла CsI(Tl) или BGO, что позволит регистрировать всплески рентгеновского и  $\gamma$  излучения непосредственно от TGF [10].

## Литература:

1. Cramer E S and Dwyer J R 2017 Lunar and Planetary Science XLVIII (Texas: Lunar and Planetary Institute) p 2847
2. Гуревич А.В., Зыбин К.П. УФН. Т.171. №11. С. 1177 (2001).
3. Sarria D et al. Proc. of the SF2A 2015
4. B-Series Fast, Blue-Sensitive Silicon Photomultiplier Sensors DATASHEET
5. Arkhangel'skiy A I et al. 2019 Bull. of RAS: Physics, V. 83, No. 5, P. 625.
6. Arkhangel'skiy A I et al. 2019 J. Phys.: Conf. Ser. 1390 012130
7. Topchiev N. P., Galper A. M., Bonvicini V., et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2015. V. 79(3). P. 417.
8. AD8000 1.5 GHz, Ultrahigh Speed Op Amp. Data Sheet Rev. C
9. AD7768-1 (Rev. A). DC to 204 kHz, Dynamic Signal Analysis, Precision 24-Bit ADC with Power Scaling. Data Sheet.
10. T A Kurmasheva et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1690 012074

# ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАЗЕМНОЙ КАЛИБРОВКИ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА ФАСТ

Машалов Н.Е.

*Институт космических исследований РАН*

- 1) Знакомство зрителя с задачей и принципами радиометрических калибровок
- 2) Общие сведения о проведенных экспериментах
- 3) Основное соотношение радиометрической калибровки интерферометра
- 4) DPC (dual-phase calibration)
- 5) PDPC (precise dual-phase calibration)
- 6) DPDPC (double precision dual-phase calibration)
- 7) Обсуждение результатов, применимость разработанных методов в условиях реального эксперимента

# НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ПЛАТФОРМА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ И РЕЖИМОВ ОРИЕНТАЦИИ СМКА

Николаев А.О., Семенович С.Н., Стецко И.П.

*Белорусский государственный университет*

Наноспутник BSUSat-2 стандарта CubeSat 3U был разработан как орбитальная часть научно-образовательной лаборатории. В данной работе рассматривается реализация системы ориентации (СО) с точки зрения соответствия образовательным целям и возможности проведения экспериментов на орбите.

СО спутника включает в себя исполнительные органы и датчики обратной связи. Алгоритмы управления ориентацией определяют разницу между желаемым и текущим направлениями спутника и задают требуемый управляющий момент. Для выполнения образовательной части миссии СО спроектирована с возможностью выбора и конфигурирования с Земли любого из имеющихся на борту алгоритмов управления.

В случае задачи наведения на один ориентир достаточно использовать в качестве входных параметров алгоритма управления ориентации только вектор направления на заданный ориентир в связанной системе координат и угловую скорость вращения наноспутника. Определив величину отклонения ориентира от желаемого направления можно задать управляющий механический момент с помощью PD-регулятора.

В данной работе проведена проверка предложенных алгоритмов ориентации на инженерной модели наноспутника. Исполнительными органами служат три электромагнитные катушки с взаимно перпендикулярными создаваемыми магнитными моментами. В качестве ориентиров использовались имитатор Солнца и внешнее магнитное поле. Тестирование проводилось в одноосном приближении на струнном подвесе.

В результате проведенных экспериментов было выявлено наличие остаточного магнитного момента наноспутника. Устранение влияния остаточного магнитного момента было обеспечено за счёт расширения PD-регулятора до PID-регулятора и размагничивания элементов наноспутника в переменном магнитном поле.

# ТЕХНОЛОГИЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ЖИВУЧЕСТИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПУТЁМ РЕКОНФИГУРИРОВАНИЯ ИХ БОРТОВЫХ СИСТЕМ

Поспелов В.Г.

*НИИ КС им. А.А. Максимова - филиал АО ГКНПЦ им. М.В. Хруничева*

В настоящее время в области разработки и создания космических аппаратов (КА) наблюдается тенденция к миниатюризации с сохранением, а в некоторых случаях и улучшением функциональных характеристик, из-за чего размеры и масса космических аппаратов постепенно снижаются. Сформировался отдельный класс – малые космические аппараты или МКА – и спектр задач, которые они способны решать, постепенно расширяется.

Вместе с тем наблюдается и тенденция к увеличению срока активного существования КА, из-за чего проблема обеспечения непрерывности выполнения целевых задач ставит вопрос о поддержании живучести КА. В случае МКА реализовать способы поддержания живучести, используемые на более крупных КА, сложно из-за ограничений по массе и размерам. Наиболее перспективным является использование бортовых ресурсов МКА для поддержания его живучести за счёт интеллектуального управления восстановлением его работоспособности при аномальной полётной ситуации (АПС). Суть его заключается в целенаправленном изменении структур и режимов функционирования МКА с учётом возможностей бортовых ресурсов.

Постоянное совершенствование целевой аппаратуры КА, в том числе и малых, ведёт к лавинообразному увеличению информационного ресурса, создаваемого ими, что потребует значительных вычислительных мощностей для его обработки и передачи на наземные станции. Бортовой комплекс управления МКА (БКУ) будет функционировать в условиях высоких нагрузок, поэтому вместо наделения БКУ функциями управления живучестью данную задачу целесообразно передать специализированному бортовому функциональному модулю (БФМ).

Задачи БФМ – непрерывный интеллектуальный мониторинг состояния бортовых систем МКА и выполняемых им целевых задач с целью установления факта возникновения АПС и оперативное их парирование. Парирование АПС заключается в изменении рабочей конфигурации бортовых систем МКА, обеспечивающем купирование источника или причины возникновения АПС за счёт создания новой технологической цепочки выполнения целевой задачи.

Из-за ограничения возможностей БФМ управление живучестью в ряде ситуаций будет передаваться на наземные средства выработки решения о реконфигурировании (НСВРР): вместе с телеметрией с борта будет передаваться информация о принятых БФМ решениях по парированию АПС. В таких ситуациях НСВРР по полученной информации, а также с использованием дополнительной информации, будут самостоятельно решать задачу выбора варианта реконфигурирования бортовых систем МКА с целью парирования АПС. Кроме того, НСВРР будут самостоятельно осуществлять мониторинг состояния бортовых систем МКА и оценивать эффективность проведённого на борту парирования АПС, при необходимости передавая на борт управляющие команды, корректирующие работу БФМ.

Помимо парирования расчётных АПС – тех, статистика по которым уже достаточно велика, и для которых в бортовой базе знаний уже заложены варианты парирования – БФМ также будет, пусть и в ограниченной степени, но способен парировать нерасчётные АПС путём поиска допустимых состояний МКА с учётом его текущего состояния. В случае реализуемости одного из этих состояний БФМ проведёт реконfigurирование БС МКА, а алгоритм парирования данной АПС будет внесён в бортовую базу знаний. Таким образом БФМ будет обеспечивать непрерывность решения МКА целевых задач на протяжении всего срока его активного существования.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ПАРАМЕТРОВ ГРУППИРОВКИ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Самыловский И.А., Филиппов А.А., Абрамова В.В.,  
Сазонов В.В.

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Доклад посвящен моделированию группировки спутников, осуществляющих мониторинг поверхности планеты и в ходе работы поддерживающих связь друг с другом. При наличии различных возмущающих факторов исследуется эволюцию орбитальных элементов, межспутникового расстояния, видимого созвездия и т.д. Отдельно рассматривается эволюция покрытия группировки при различных вариантах расположения аппаратов.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МИССИИ ПО ДИСТАНЦИОННОМУ ЗОНДИРОВАНИЮ ЛУНЫ

Самыловский И.А., Филиппов А.А., Абрамова В.В.,  
Царегородцев А.Ю., Богачева А.Е., Сазонов В.В.

*Факультет космических исследований, Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова*

В ходе проектного анализа научных миссий к телам Солнечной системы приходится принимать во внимание разнородные факторы, связанные со стабильностью рабочих орбит под действием возмущающих факторов, разрешающей способностью аппаратуры, запасом энергии и рабочего тела, необходимых для осуществления маневров, выбором самих орбит с точки зрения достижимости с Земли, бюджетом радиолинии и т.д. Целью настоящей работы является исследование возможностей развиваемой баллистическим центром ФКИ среды разработки космических миссий MIDE в комплексном расчете таких систем. Настоящая работа является продолжением работы по расчету перелета космического аппарата с околоземной на окололунную орбиту и вводит в рассмотрение такие инструменты как полосы захвата аппаратуры, измерения бортовых приборов и модели гравитационных полей планет. Как и прежде, космическая система состоит из наземных и космических объектов, оснащенных сенсорами.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СЛОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ МАССИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ХОДЕ ОРБИТАЛЬНОГО ПОЛЕТА

Самыловский И.А., Филиппов А.А., Бирюков Д.А.,  
Беляков Н.В., Саакян М.Н.

*Факультет космических исследований, Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова*

Доклад посвящен задаче моделирования сложного движения космического аппарата в ходе маневров закрутки. Подобная задача возникла перед коллективом в ходе расчета прогнозной выработки электроэнергии солнечными батареями модуля "Наука" в ходе автономного полета с учетом коррекции движения вокруг центра масс. Типовой циклограммой работы аппарата при этом являлось выставление нормали к плоскости солнечных панелей на Солнце и выдача импульса угловой скорости, обеспечивавшего устойчивое поведение угла между нормалью и направлением на источник излучения, в течение некоторого времени. Мы приводим результаты моделирования движения космического аппарата как для обеспечения ориентации на Солнце, так и для сохранения направления оптического прибора на реперный объект.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН РАДИОВИДИМОСТИ БОРТОВЫХ АНТЕНН РАЗГОННОГО БЛОКА В ХОДЕ ВЫВЕДЕНИЯ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ

Самыловский И.А., Саакян М.Н., Жаворонков И.Л.,  
Сазонов В.В.

*Факультет космических исследований, Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова*

Доклад посвящен исследованию задач, возникающих в ходе взаимодействия антенных комплексов наземного контура управления и бортовых антенн космического аппарата / разгонного блока. Такие разнородные факторы как положение и ориентация аппарата, его геометрия, подведённая к бортовому передатчику мощность, параметры шумовой температуры на Земле и т. д. определяют значение мощности на входе приёмника, шумы и прочие параметры радиолинии. Наша цель заключается в моделировании работы системы, включающий разгонный блок и набор полезных нагрузок, в исследовании зон затенения бортовых антенн элементами конструкции с учетом циклограммы выведения.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ БОРТОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПАССИВНОЙ НАВИГАЦИИ

Самыловский И.А., Морозов С.С., Беляков Н.В.,  
Сазонов В.В.

*Факультет космических исследований, Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова*

Доклад является продолжением серии работ сотрудников ФКИ МГУ, посвященных применению методов оптимизации для определения пространственного положения космического аппарата по результатам обработки измерений угловых координат реперных объектов. Рассматривается модельный аппарат, оснащенный конфигурируемым набором оптических приборов, каждый из которых характеризуется параметрами ошибок измерений. В рамках идеологии среды разработки космических миссий MIDE генерируются источники данных, связанные с приборами, и по результатам обработки их измерений строится траектория космического аппарата, наилучшим образом приближающая соответствующие наборы угловых координат. Приводятся результаты работы метода на различных типах орбит.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ МОДУЛЯ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Самыловский И.А., Сазонов В.В., Беляков Н.В.

*Факультет космических исследований, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Доклад посвящен моделированию работы солнечных и аккумуляторных батарей массивного космического аппарата (модуля "Наука" Международной космической станции) в ходе автономного полета, в том числе в ходе режимов неуправляемого вращательного движения (закрутки на Солнце), а также в ходе полета в составе МКС.

Задача является комплексной, и включает как минимум следующие аспекты:

- Моделирование возмущенного поступательного и вращательного движения космического аппарата;
- Моделирование затенения поверхности солнечных батарей и выработки электроэнергии;
- Моделирование ёмкости аккумуляторных батарей на интервале расчета.

Инструментом моделирования является разрабатываемая на факультете космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова интерактивная среда моделирования космических миссий MIDE, предоставляющая функциональность по компоновке виртуального мира из объектов, движущихся в выбранных системах координат в соответствии с заданными моделями, а также по формированию и анализу отчетов об эволюции свойств объектов с течением времени.

В докладе приводятся примеры расчетов, проводившихся в ходе выведения модуля "Наука". Предполагается, что полученный опыт может быть применен в задачах комплексного моделирования работы систем космических аппаратов и орбитальных станций в ходе различных режимов работы и при наличии воздействия различных факторов космического пространства.

# ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ОРБИТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСЛОВИЙ В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ, ПРИВОДЯЩИХ К СЦИНТИЛЛЯЦИЯМ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Соколов А.Д.

*Институт космических исследований РАН*

Условия в полярной ионосфере, возникающие в области аврорального овала и полярной шапки, приводящие к сцинтилляциям и кратковременным потерям захвата частоты сигналов орбитальных навигационных систем, в последнее десятилетие привлекают все большее внимание исследователей. Структурированные высыпания заряженных частиц, и, как следствие, градиенты электронной концентрации разных масштабов в E- и F-слое полярной ионосферы, отражающиеся в структурах авроральных эмиссий в области аврорального овала и полярной шапки, - главные источники искажений распространяющихся трансполярных сигналов. До сих пор нет ясного понимания: почему сцинтилляции сигналов в конкретных условиях моментно возникают в одних секторах MLT и не возникают в других? Развитие комплексной методики орбитальной диагностики характеристик плазмы в полярной ионосфере и дистанционных измерений конкретных эмиссий в авроральных структурах позволит получать новые данные о механизмах генерации сцинтилляций.

# ПРОВЕДЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НАВЕДЕНИЮ ЛУННОГО МАНИПУЛЯТОРНОГО КОМПЛЕКСА НА РАЗЛИЧНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ЕГО РАБОЧЕЙ ЗОНЕ

Яковлев В.А., Литвак М.Л.

*Институт космических исследований РАН*

Луна-25 – российская автоматическая лунная станция, место посадки которой впервые выбрано в южных приполярных широтах. Запуск миссии запланирован на июль 2022 г. В ее научные задачи входит изучение минералогического, химического, изотопного состава лунного реголита, а также поиск летучих соединений (в том числе водяного льда и органических соединений) в приповерхностном слое реголита высокоширотных областей Луны.

В состав комплекса научной аппаратуры Луна – 25 входит лунный манипуляторный комплекс (ЛМК), состоящий из двухзвенного манипулятора, оснащенного ковшом и грунтозаборным устройством, ИК-спектрометра и стереокамеры (ЛИС-ТВ-РПМ), которые установлены на манипуляторе и могут им наводиться на различные объекты (камни, обломки породы, вырытая траншея, выкопанный лунный грунт и т.д.) на поверхности Луны. Кроме этого, наверху посадочного аппарата установлена стационарная телевизионная система (СТС-Л), часть камер которой отвечают за панорамную съемку, а часть (две стереокамеры) за наведение манипулятора в заданную точку копания и за наведение в аналитический прибор ЛАЗМА (лазерный масс спектрометр), в которой манипулятор должен доставить образцы лунного грунта.

Во время работ на поверхности Луны очень важно иметь возможность выбирать наиболее интересные участки лунного грунта в окрестности посадочного аппарата, а в те из них, которые лежат в пределах рабочей зоны ЛМК, уметь наводить манипулятор, забирать там пробы грунта (с разной глубины) и затем быстро и безопасно доставлять их в аналитический прибор ЛАЗМА. Чтобы добиться этого необходимо использовать и координировать работу всех четырех приборов (ЛМК, СТС-Л, ЛИС-ТВРПМ, ЛАЗМА).

Исследование лунного реголита манипулятором заключается в отборе пробы и транспортировке его в прибор ЛАЗМА для дальнейшего изучения. Для определения места, откуда будет браться проба, используются снимки, полученные стереокамерами СТС-Л. При анализе снимков научная команда ЛМК получает от научной команды СТС-Л точные координаты (азимут, радиус и высота) места уже в системе координат ЛМК, и по этим координатам манипуляторный комплекс наводится в интересующую точку на поверхности Луны. Для более точного наведения могут использоваться снимки, полученные с ТВ-РПМ. При доставке образцов грунта в прибор ЛАЗМА необходимо проконтролировать, что траектория движения манипулятора обеспечивает точечную доставку образца грунта в приемное окно ЛАЗМА, для чего будут использоваться снимки СТС-Л и ТВ-РПМ.

Чтобы обеспечить эту комплексную работу в 2021-2022 гг., были выполнены наземные отработки, в ходе которых проводилось обучение ЛМК и решались следующие задачи, необходимые для успешной реализации научной миссии Луна – 25:

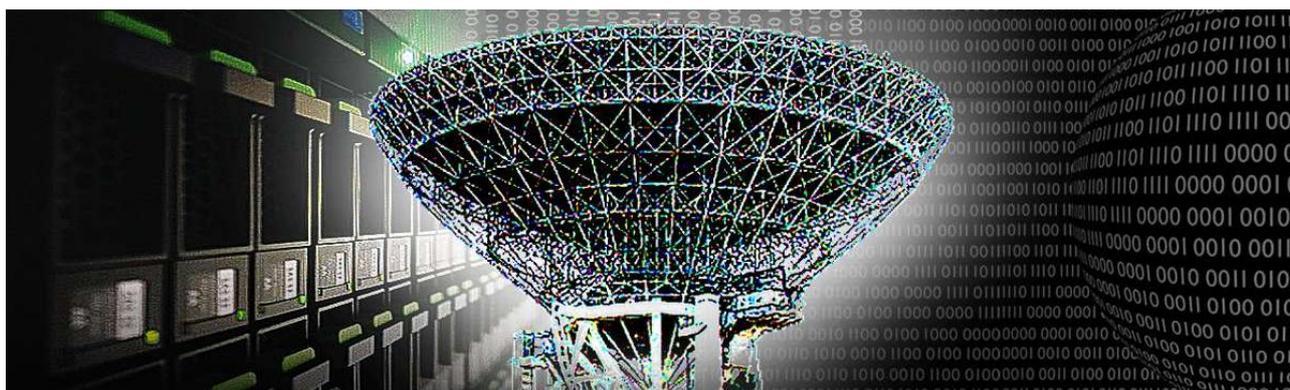
- 1) Наведение ЛМК с помощью СТС-Л на различные участки рабочей зоны ЛМК
- 2) Раскопка траншеи и забор образцов грунта с разной глубины
- 3) Доставка образцов грунта: наведение ЛМК на приемное окно ЛАЗМА с помощью СТС-Л и ТВ-РПМ
- 4) Наведение ЛИС-ТВРПМ с помощью ЛМК на различные объекты внутри и вне рабочей зоны ЛМК
- 5) Отработка различных нештатных ситуаций на поверхности Луны

Наземные наладочные отработки приходили сначала в ИКИ РАН с использованием стенда СТИС-ЛМК, имитирующего космический аппарат, и квалификационно-догодочного образца ЛМК. Затем все было верифицировано и продемонстрировано в НПО им. Лавочкина на летном образце ЛМК, установленном на КА.

В нашем исследовании представлены результаты этой работы.

---

# ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



# ТУРБУЛЕНТНОЕ МГД-ДИНАМО В РАМКАХ КАСКАДНОГО ПОДХОДА

Абушзаде И.З.<sup>1</sup>, Юшков Е.В.<sup>2,3</sup>, Соколов Д.Д.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> *Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова в г. Баку*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>3</sup> *Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

<sup>4</sup> *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова*

Взаимодействие между турбулентными вихрями можно описать с помощью каскадных моделей МГД- турбулентности [1]. Полученные преобразованием Фурье из уравнения движения плазмы и магнитного уравнения индукции на конечном числе спектральных оболочек, они позволяют проанализировать каскад гидродинамической и магнитной энергии по спектру, накопление энергии и ее диссипацию со временем. При этом, при малом магнитном поле, может наблюдаться перекачка энергии поля скорости в энергию магнитного поля, таким образом, что сама магнитная энергия будет расти экспоненциально и локализуется на малых масштабах. Это может быть связано с тем, что такая генерация может являться отображением хорошо известного мелкомасштабного динамо-процесса Казанцева, который описывает рост магнитной энергии в петлях с характерным масштабом соответствующим корреляционной длине поля скорости [2]. В данной работе, мы проверяем это утверждение, запуская модель Казанцева, полученную для турбулентной плазмы с короткими временами корреляции. Применяя гидродинамический спектр, полученный из каскадных процессов, определяем корреляционную функцию и варьируем корреляционное время, чтобы проверить, когда модели лучше всего совпадают. Сравнивая скорости генерации и области локализации обеих моделей, мы предполагаем о том, какая часть спектра отвечает за мелкомасштабное динамо и что при этом происходит с корреляционными временами, играющими важнейшую роль в подходе Казанцева. Работа выполнена при поддержке гранта фонда БАЗИС номер 21-1-3-63-1.

Литература:

1. Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.–Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2010. — 332 с.

2. Kazantsev A.P., SOVIET PHYSICS JETP Zh. Eksp. Tear. Fiz. 53, 1806-1813 (November, 1967)

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕКТОРНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИ ВЫВОДЕ ОСНОВНЫХ МОДЕЛЕЙ МГД-ДИНАМО

Аллахвердиев Р.Р.<sup>1</sup>, Юшков Е.В.<sup>2,3</sup>,  
Соколов Д.Д.<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова в г. Баку

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН

<sup>3</sup> Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

<sup>4</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Пушкова

Усреднение уравнения магнитной индукции по случайному полю скорости лежит в основе теории динамо, описывающей формирование крупномасштабных астрофизических магнитных полей. Стандартным подходом к такому усреднению является метод, предложенный Краузе и Рэдлером для двухмасштабной турбулентности. В настоящем докладе мы оперируем иным методом усреднения, впервые используемым Молчановым, Рузмайкинским и Соколовым в 1985 году, методом мультипликативных интегралов. Для получения уравнения динамо среднего поля этот метод не предполагает разделения случайных полей на крупномасштабное (медленно меняющееся) и мелкомасштабное (быстро флуктуирующее). Однако он базируется на двух других допущениях: во-первых, рассматривается поле скорости с короткими временными корреляциями, одинаковым на всех масштабах, что позволяет развязать усреднение по магнитному полю и по скорости, во-вторых, детерминированные траектории жидких частиц заменяются на пучки виннеровских траекторий, усреднение по которым позволяет учесть диссипативные эффекты.

Достоинства данного подхода связаны с тем, что им можно вывести не только уравнение среднего поля, но и так называемую модель Казанцева, определяющую эволюцию вторых моментов магнитного поля. В частности, эта модель используется для описания мелкомасштабного динамо-процесса, при котором экспоненциально нарастает энергия магнитного поля, в то время как среднее поле остается нулевым. Как и в случае с уравнением Штеенбека-Краузе-Рэдлера для среднего поля, для вторых моментов мультипликативный подход позволяет получить анизотропный аналог модели Казанцева. Заметим, что традиционно в таком подходе используется уравнение магнитной индукции, записанное для магнитного поля, мы же в докладе используем уравнение для векторного потенциала. При этом основная цель в этом не столько доказать применимость мультипликативного подхода для потенциала, сколько продемонстрировать преимущества данной модификации метода для анизотропной постановки.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПРИБЛИЖЕНИИ ТОНКОГО СЛОЯ

Воробьев О.П.<sup>1,2</sup>, Петросян А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

Моделирование устойчиво стратифицированных турбулентных течений играет существенную роль в понимании различных астрофизических и геофизических процессов. Такие течения существуют в атмосферах экзопланет или внутренних слоях звезд – например, в солнечном тахоклине. Динамика течения в условиях устойчивой стратификации описывается с использованием уравнений гидродинамики в приближении Буссинеска. Рассматривается тонкий сферический слой жидкости в трехмерной системе с вращением. Для численного моделирования турбулентности используется спектральный метод, в основе которого лежит разложение поля по сферическим функциям. Производные по радиусу получены с помощью разложения по полиномам Чебышева. Дискретизация по времени достигается с помощью смешанной полунеявной схемы: для линейных членов применяется неявная схема Кранка-Николсона, для нелинейных используется явный метод Адамса-Башфорта. Для реализации метода разработан оригинальный код в программной среде MATLAB. Все расчеты выполнены на сетке с разрешением 256x128x90 по широте, долготе и радиусу соответственно. Обсуждаются результаты моделирования трехмерной затухающей турбулентности, исследовано влияние вращения на устойчиво стратифицированные турбулентные течения.

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ОКРЕСТНОСТИ ЗВЕЗДЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЦЕНТРАЛЬНЫХ СИЛ И СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАЗМЫ

Грановский А.А.<sup>1</sup>, Измоденов В.В.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>3</sup> *Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН*

Рассматривается задача о движении межзвёздной пыли в окрестности звезды под действием давления излучения и сопротивления межзвёздной плазмы. В предположении о слабости звёздного ветра поток плазмы считается однородным, и известно аналитическое решение задачи без сил сопротивления: параболическая полость, ограниченная областью повышенной концентрации пыли. Инфракрасное излучение пыли в такой “волне” позволяет непосредственно наблюдать взаимодействие звезды с окружающей межзвёздной средой.

В случае с сопротивлением среды область влияния сил светового давления на поток межзвёздной пыли оказывается ограничена в сечении; даны оценки на размер “трубки”, “выдуваемой” звездой в потоке, и области влияния звезды. Аналитически и численно исследована структура “пылевой волны” в зависимости от параметров, связанных со свойствами частиц пыли, межзвёздной плазмы и звезды. В качестве примера рассмотрена звезда  $\sigma$  Ori AB, возле которой впервые была обнаружена подобная структура. Для сравнения с данными наблюдений построены карты плотности пыли и инфракрасного излучения.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТЕЙШЕГО РЕАКТОРА В ГРОЗОВОМ ОБЛАКЕ

Землянская Д.И.<sup>1,2</sup>, Стадничук Е.М.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> НИУ Московский физико-технический институт

<sup>2</sup> Институт ядерных исследований РАН

<sup>3</sup> НИУ Высшая школа экономики

Большой интерес для физики атмосферы представляет исследование физического явления, предложенного Гуревичем [1], лавинообразного размножения в веществе быстрых электронов, которое называют пробоем на убегающих электронах (ПУЭ). В процессе распространения в атмосфере они могут вызвать рождение гамма-квантов.

При определенных условиях системы возможно зарождение обратной связи в ячейке. Электроны за счёт наличия в системе поля будут ускоряться, а попадая в поле противоположного направления - поворачивать. По всему пути они будут испускать гамма-кванты, на которых поле не действует, тем самым играя ключевую роль в формировании безостановочного процесса.

Целью данной работы было исследование модели простейшего реактора, изучение его критических характеристик путем моделирования на GEANT4. Исследования проводились для гамма-кванта с энергией 4 МэВ в полях в диапазоне 100 - 260 кВ/м на высоте 10 км от поверхности Земли.

# РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ ФЛУКТУАЦИЯМИ НА ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

Камалетдинов С.Р.<sup>1,2</sup>, Васько И.Ю.<sup>1</sup>, Артемьев А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *Факультет Физики, НИУ Высшая школа экономики*

Бесстолкновительные ударные волны являются естественными источниками высокоэнергичных частиц, однако конкретный механизм ускорения тепловых электронов до сверхтепловых энергий до сих пор остается неясным. Проблема, в частности, заключается в том, что классический диффузионный механизм ускорения частиц (Diffusive Shock Acceleration) становится эффективным лишь на энергиях существенно превышающих характерные тепловые энергии частиц в невозмущенном потоке плазмы, в области перед ударной волной. Недавние исследования показали, однако, что механизм стохастического ускорения (Stochastic Shock Drift Acceleration; SSDA) потенциально может решить эту проблему, так как позволяет “предускорять” тепловые частицы до необходимых надтепловых энергий [1]. В рамках данного механизма, электроны временно удерживаются вблизи фронта ударной волны за счет отражения от градинета магнитного поля на рампе ударной волны и последующего рассеяния мелкомасштабной волновой турбулентностью в области перед ударной волной.

Спутниковые наблюдения последних десятилетий надежно установили, что электростатические флуктуации вносят доминирующий вклад в высокочастотную ( $>100$  Гц) волновую активность на околоземной ударной волне [2]. Однако, вопрос эффективности рассеяния тепловых и сверхтепловых электронов данными флуктуациями до настоящего времени не рассматривался количественно.

В рамках данной работы, был проведен количественный анализ рассеяния тепловых и сверхтепловых электронов уединенными электростатическими волнами, так называемыми ионными дырами, которые, согласно последним спутниковым наблюдениям [3], составляют значительную часть электростатических флуктуаций на головной ударной волне магнитосферы Земли. Используя детально разработанные методы квазилинейной теории, мы получили оценки квазилинейных коэффициентов питч-угловой диффузии и провели их сравнение с результатами численных расчетов методом тестовых частиц (test-particle simulations). Установлено, что квазилинейные оценки питч-угловой диффузии тепловых и сверхтепловых электронов хорошо согласуются с результатами численных расчетов в широком диапазоне параметров электростатической турбулентности, характерном для околоземной ударной волны. Используя полученные оценки квазилинейных коэффициентов диффузии получены оценки максимальной энергии, до которой могут быть ускорены электроны по механизму SSDA. Показано, что электростатические флуктуации могут приводить к ускорению электронов от тепловых энергий порядка 10 эВ до сверхтепловых энергий порядка нескольких сотен эВ. Обсуждаются приложения данного результата для астрофизических ударных волн.

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕЛЁТА В МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ПРИТЯГИВАЮЩИХ ЦЕНТРОВ

Канищев Р.А., Самыловский И.А.

*Факультет космических исследований, Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова*

Важным классом задач, связанных с планированием и баллистическим обеспечением миссий в дальний космос, является расчет и оптимизация перелетов космических аппаратов (КА) в системе притягивающих центров. Такие задачи возникают как при проектировании перелетов к внешним планетам, так и в ходе работы в системах планет-гигантов.

В рамках данной работы ставится задача построения фазового портрета динамической системы, описывающей перелет КА в гравитационном поле, создаваемом набором подвижных притягивающих масс. Исследуются свойства устойчивости таких траекторий, достижимости целевых орбит и чувствительности портрета к изменению параметров системы.

Проведено исследование фазовых портретов траекторий перелёта в системе притягивающих центров. Применены численные методы построения траектории КА в системе подвижных притягивающих центров. Дальнейшее исследование предполагает решение экстремальных задач оптимизации траекторий перелётов КА с учётом эфемерид реальных космических объектов.

# НАИБОЛЕЕ ВЕРОЯТНАЯ ВЫСОТА РАЗВИТИЯ TGF

Ким Э.С.<sup>1,2</sup>, Седельников А.С.<sup>1,3</sup>, Землянская Д.И.<sup>1,2</sup>,  
Стадничук Е.М.<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> НИУ Московский физико-технический институт

<sup>2</sup> Институт ядерных исследований РАН

<sup>3</sup> Физический институт имени П.Н.Лебедева

<sup>4</sup> НИУ Высшая школа экономики

Последние результаты в физике атмосферы высоких энергий связывают лавины релятивистских убегающих электронов (ЛРУЭ), ускоряемых электрическим полем в грозовых облаках, с грозовыми явлениями, например, таким уникальным природным явлением, как наземные гамма-вспышки (TGF, Terrestrial Gamma-ray Flashes). Исследования показывают, что для образования TGF недостаточно одного лишь существования лавины убегающих электронов. Необходимо выполнение следующих условий: 1) механизм образования новых лавин релятивистских электронов в облаке; 2) критерии применимости такого механизма должны быть сопоставимы с параметрами реальных грозовых облаков. Возможный механизм дополнительной генерации предложил Джозеф Двайер, т.н. механизм обратной связи.

Динамика развития ЛРУЭ зависит от высоты на которой происходят электромагнитные процессы, размера ячейки задачи, а также от величины электрического поля в ячейке.

С увеличением высоты уменьшается концентрация частиц воздуха:

- слабеет ионизация электронами;
- слабеет фотоионизация;
- тормозное излучение усиливается;
- рождается больше электрон-позитронных пар.

Из вышеописанного следует, что предположительно, для грозовых ячеек различных размеров существует оптимальный набор значений высоты и поля, осуществляющих образование бесконечной обратной связи.

Данная работа посвящена исследованию позитронной- и гамма-обратной связям, а также поиску наиболее вероятной высоты рождения TGF для различных ячеек облака.

# АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТОКОВОГО СЛОЯ С НЕСКОЛЬКИМИ ПОПУЛЯЦИЯМИ ЧАСТИЦ В ОДНОРОДНОМ ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ ЭКЗОПЛАНЕТЫ

**Кислов Р.А.**

*Институт космических исследований РАН*

Построена одномерная кинетическая модель плоского токового слоя, находящегося в однородном гравитационном поле экзопланеты. Предполагается, что помимо электронов и протонов в плазме содержатся тяжёлые многозарядные ионы. Учитывается возможное различие температур электронов, протонов и тяжёлых ионов. Получены аналитические решения для магнитного поля, суммарных плотности тока и концентрации, а также для вкладов в плотность тока и в концентрацию от каждой популяции частиц. Помимо этого, модель обобщает решение для однородного электрического поля Паннекука-Росселанда, вызванного наличием гравитационного поля, на случай нескольких разнотемпературных популяций частиц. Гравитационное поле приводит к асимметрии токового слоя относительно нейтральной поверхности. Также, в силу одномерности модели и гравитационного дрейфа, возможен перенос вещества вдоль одного из направлений вдоль нейтральной поверхности, вдоль которого равна нулю плотность тока. Параметры токового слоя (такие как толщина, максимальное магнитное поле и плотность тока) могут немонотонно зависеть от концентрации и температур электронов, протонов, тяжёлых ионов. Эффекты, обнаруженные в модели, могут быть существенны в условиях сильного гравитационного и магнитного поля и низкой плотности плазмы при отсутствии течений поперёк токового слоя. Такие условия могут наблюдаться вблизи крупных каменных или ледяных планет, а также вблизи спутников газовых гигантов.

Работа выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ № 2020-1902-01-133

# РЕЗОНАНСНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН ПУАНКАРЕ В ПРИБЛИЖЕНИИ МЕЛКОЙ ВОДЫ. НЕЛИНЕЙНОЕ НАСЫЩЕНИЕ ВОЛН ПУАНКАРЕ

Климачков Д.А.<sup>1</sup>, Петросян А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

Волны Пуанкаре традиционно изучаются при исследовании крупномасштабных течений вращающейся плазмы на плоской поверхности. Волны Пуанкаре — это медленные крупномасштабные волны во вращающейся тяжелой жидкости. Поскольку такие волны относятся к медленным планетарным гидродинамическим процессам, в которых выполняется условие малости числа Россби (отношения адвективного ускорения к ускорению Кориолиса), следовательно, в геофизическом потоке гидродинамика определяется слагаемым Кориолиса, влиянием силы инерции пренебрегают. Волны Пуанкаре формируют динамику атмосферы Земли и планетных атмосфер, а также определяют процессы в океане.

Приближение мелкой воды широко используется для описания крупномасштабных течений в геофизической гидродинамике. В этом приближении предполагается, что характерные длины исследуемых волн много больше высоты слоя жидкости. Классические уравнения мелкой воды получаются из полной трехмерной системы уравнений гидродинамики, записанной для тонкого слоя несжимаемой жидкости со свободной границей в поле силы тяжести. Полная система интегрируется вдоль вертикальной оси с учетом гидростатического распределения давления и малой высоты слоя по сравнению с характерным горизонтальным масштабом течения. В результате получается гиперболическая система уравнений в частных производных, описывающая горизонтальные течения в тонком слое вращающейся жидкости.

Работа посвящена развитию слабонелинейной теории волн Пуанкаре. Закон дисперсии для исследуемых волн отличается от закона дисперсии гравитационных волн в невращающейся жидкости. При отсутствии вращения закон дисперсии является вырожденным, поэтому приближение слабой нелинейности не допускает резонансных взаимодействий гравитационных волн. Тем не менее в этом случае в приближении слабой нелинейности существуют эффекты следующего порядка теории возмущений, описывающие модуляцию пучка гравитационных волн. Закон дисперсии для волн Пуанкаре является невырожденным, что позволяет ожидать резонансных взаимодействий в приближении слабой нелинейности. Тем не менее, качественный анализ формы дисперсионных поверхностей волн Пуанкаре показывает невозможность трехволновых резонансов в первом порядке по малой амплитуде. Показано, что дисперсионное соотношение волн Пуанкаре допускает существование четырехволновых резонансных взаимодействий в более высоком порядке возмущения. В работе методом асимптотических разложений развита слабонелинейная теория резонансных взаимодействий волн Пуанкаре. Во втором порядке возмущений получено уравнение медленно меняющейся огибающей взаимодействующих волн. В третьем порядке возмущений получена система амплитудных уравнений, описывающая четырехволновые взаимодействия взаимодействующих волн Пуанкаре. В простейших случаях волны накачки описана нелинейная динамика взаимодействующих волн. Найдены инкременты неустойчивостей. Получено уравнение сохранения энергии. В полученной системе для четырех

взаимодействующих волн найдены точные решения для амплитуд при некотором начальном распределении энергии.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики "Базис".

# ДВУЖИДКОСТНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ ДЛЯ СЛАБО ИОНИЗИРОВАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ. ЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ

Клименко Ю.Т.<sup>1</sup>, Федотова М.А.<sup>2</sup>, Сафонов С.И.<sup>2</sup>,  
Петросян А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН*

Слабо ионизированной плазмой называется плазма, степень ионизации которой много меньше единицы. Важными примерами слабо ионизированной плазмы в космической физике является межзвездная среда, солнечная хромосфера, магнитосферы планет. Также слабо ионизированная плазма имеет место в тлеющем разряде, в технологических установках.

В слабо ионизированной плазме важную роль играют взаимодействия ионизированной компоненты с нейтральной. В данной работе предметом исследования являются крупномасштабные процессы в слабо ионизированной плазме при наличии таких взаимодействий. Для описания явлений, происходящих в слабо ионизированной плазме, используются уравнения многожидкостной магнитной гидродинамики. Ранее нами была предложена система уравнений многожидкостной гидродинамики с учетом вращения и наличия только внешнего электромагнитного поля. Были получены дисперсионные уравнения волн в линейном приближении и проведен анализ дисперсионных соотношений в различных частных случаях: в случае поперечных волн, двумерных волн и вертикальных течений.

В настоящей работе предложена система уравнений магнитной гидродинамики для двухжидкостной модели слабо ионизированной вращающейся плазмы с учетом собственного электромагнитного поля. Развита линейная теория волновых процессов в рамках предложенных уравнений и проведен сравнительный анализ с результатами, полученными в предыдущей модели.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики "Базис".

# МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Левашов Н.Н.<sup>1</sup>, Попов В.Ю.<sup>1,2,3</sup>, Малова Х.В.<sup>2,4</sup>,  
Зеленый Л.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>3</sup> *НИУ Высшая школа экономики*

<sup>4</sup> *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Турбулентное электромагнитное поле в хвосте магнитосферы Земли, является нестационарным и склонно к появлению структур таких как токовые слои, вихри, жгуты, плазмиды. Из-за наличия подобных локальных особенностей, поле неоднородно и имеет мультифрактальный, перемежаемый характер [3]. Моделировать такое поле можно при помощи вейвлетов. Вейвлеты позволяют довольно гибко управлять амплитудой моделируемого поля в любой точке пространства и потому хорошо подходят для описания процессов с различными локальными особенностями.

В качестве базового вейвлета выбирается Гауссов вейвлет. Итоговое магнитное поле представляется в виде суперпозиции вейвлетов, равномерно распределенных по вычислительной области. Электрическое поле можно рассчитать при помощи уравнений Максвелла.

Для того, чтобы полученное таким образом поле было самоподобным, соотношение между размерами соседних классов вейвлетов должно быть одинаковым между всеми классами вейвлетов. Обозначим через  $l$  величину, равную отношению между соседними классами вейвлетов. Объем пространства, занимаемый каждым классом вейвлетов, в силу самоподобия будет иметь степенную зависимость от  $l$ . Аналогично, отношение между амплитудами у соседних классов вейвлетов - также имеет степенную зависимость от  $l$ .

Для того, чтобы полученное поле было мультифрактальным, предположим, что нормировочные коэффициенты определенного класса вейвлетов распределены не равномерно по всему пространству: пусть вычислительная область разбита на квадратные ячейки, в каждой из которых свой нормировочный множитель у вейвлет-коэффициентов. Например, для самого крупного класса вейвлетов область будет разбита на 4 ячейки с нормировочными множителями  $p_1, p_2, p_3, p_4$  соответственно. Для класса вейвлетов, с масштабом вдвое меньше - разобьем каждую клеточку более крупного класса еще на 4 части, для класса вейвлетов с еще вдвое меньшим масштабом - снова разбиваем каждую клеточку на 4 части итд.

При таком разбиении, функция мультифрактального спектра,  $f(h)$ , где  $h$  - показатель Гельдера, будет выпуклая, и вблизи своего максимума может быть аппроксимирована параболой [1]. Все сигналы лабораторной и космической плазмы имеют подобный уширенный мультифрактальный спектр [2]. Ширина мультифрактального спектра зависит от выбора параметров  $p_1, p_2, p_3, p_4$ .

Литература:

1. Божокин С.В., Паршин Д.А., Фракталы и мультифракталы. Ижевск, 2001.
2. В. П. Будаев, С. П. Савин, Л. М. Зелёный // УФН, 2011, Т. 181, № 9, С. 905–952
3. Lui, Anthony T. Y. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2001, P. 1379-1385.
4. Frisch U. Turbulence: The Legacy of A.N. Kolmogorov. U.K.: Cambridge Press, 1995.

# УСКОРЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НАЗЕМНОГО ОНЧ ПЕРЕДАТЧИКА: САМОСОГЛАСОВАННЫЙ ПОДХОД

Лужковский А.А., Шкляр Д.Р.

*Институт космических исследований РАН*

В работе исследуется резонансное взаимодействие электронов радиационных поясов Земли с монохроматическими сигналами наземного ОНЧ передатчика. Предполагается, что в магнитосфере Земли сигнал распространяется в дактированном режиме в виде правополяризованной свистовой волны. Продольное распространение волны позволяет исследовать резонансное взаимодействие только на первом циклотронном резонансе, когда продольная скорость частицы  $v_{\parallel}$  близка к значению резонансной скорости  $v_R = (\omega - \omega_c)/k$ . Здесь  $\omega$  - частота сигнала,  $\omega_c$  - электронная циклотронная частота, а  $k$  - модуль волнового вектора. Во многих работах исследование этой нелинейной задачи проводится в приближении заданного поля волны. В этом случае при решении кинетического уравнения Больцмана-Власова профиль амплитуды волны предполагается заданным и поиск резонансной функции распределения электронов сводится к решению системы уравнений движения резонансных электронов. Такой подход, очевидно, не является самосогласованным, поскольку заданный из общих соображений профиль амплитуды волны зависит от функции распределения резонансных электронов в соответствии с законом сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial s}(\sigma v_g U) = 2\Gamma\sigma U,$$

где  $s$  - координата вдоль лучевой траектории,  $U$  - плотность энергии волны, пропорциональная квадрату ее амплитуды,  $v_g$  - групповая скорость,  $\sigma$  - сечение лучевой трубки, а  $\Gamma$  - инкремент волны. В нашей работе совместное решение системы, состоящей из кинетического уравнения и закона сохранения энергии, производится с помощью сходящегося итерационного процесса, основанного на методе последовательных приближений. Процесс организуется так, что вычисление профиля амплитуды волны на  $n + 1$ -ом шаге осуществляется с помощью профиля амплитуды на  $n$ -ом шаге итерации. В предположении неустойчивой плазмы получающийся в результате итерационного процесса профиль амплитуды волны оказывается асимметричным относительно экватора, причем амплитуда волны в противоположном к передатчику полушарии получается больше, чем в полушарии передатчика. Эта асимметрия может приводить к существенному увеличению кинетической энергии захваченных по фазе электронов.

Конечной целью работы является исследование роли сигналов ОНЧ передатчиков в нагреве электронов радиационных поясов. Для этого в полученном самосогласованном поле на времени одного баунс-периода исследуется динамика высокоэнергичных частиц с помощью уравнений движения релятивистских электронов. В результате показано, что малая доля резонансных частиц, а именно захваченные по фазе, в условиях неустойчивой плазмы могут существенно увеличить свою энергию - вплоть до 6%. Тем временем пролетные частицы, которых подавляющее большинство, могут как увеличить, так и уменьшить свою энергию, причем максимально это отклонение немногим превышает 1%.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №22-22-00135.

# КИНЕТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ СТРУКТУРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ ВТОРОГО ЭКРАНА ЩИТА УИПЛА ОБЛАКОМ МЕЛКИХ ОСКОЛКОВ

Мещеряков Ю.И.<sup>1</sup>, Коновалов Г.В.<sup>1</sup>, Жигачева Н.И.<sup>1</sup>,  
Нечунаев А.Ф.<sup>2</sup>, Диваков А.К.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский государственный университет*

С развитием освоения человечеством околоземного космического пространства быстро прогрессирует и объем техногенного космического мусора на орбитах различной высоты. На 2021 г. известно более 130 млн объектов размером 0,1–1 см на тех или иных орбитах, вместе взятых. Это отработанные ступени ракет, осколки от столкновения спутников, частицы краски и покрытия космических аппаратов, частицы ракетного топлива, прочий мусор. Ударившая на большой скорости такая частица в космический аппарат может вызвать необратимые разрушения обшивки, разгерметизацию, повреждение дорогостоящих приборов. Для защиты космических аппаратов, как правило, применяют двойной экран – так называемый щит Уиппла. После столкновения опасной частицы с первым тонким экраном щита Уиппла, как рассматривалось в [1], образуется облако осколков сферо- или грушевидной формы, которое практически с такой же скоростью движется ко второму экрану. Воздействие облака осколков на второй экран гораздо менее опасно, чем воздействие компактного ударника. Но в отдельных случаях, при достаточно малом диаметре облака, может вызывать во втором экране откол или даже сквозное разрушение. Исследования этапов эволюции разрушения во втором экране щита Уиппла, т.е. возникновения структурной неустойчивости в материале требует глубокого изучения физики процесса. Зачастую, такой материал – это высокопрочный алюминиевый сплав. Развитие неустойчивости на масштабном уровне мезо-2 (50-500 мкм) происходит при достижении критического соотношения между скоростью изменения дисперсии скорости частиц мезоуровня-1 (1-10 мкм) в пределах структурного элемента мезоуровня-2 и дефектом массовой скорости на макроуровне. В проведенных авторами доклада натуральных экспериментах [2] сценарий развития неустойчивости регистрировался с помощью высокоразрешающей интерферометрической диагностики ударно-деформируемых образцов различных материалов (временное разрешение 1нс). Предпосылки возникновения неустойчивости были подтверждены авторами численно методом сглаженных частиц. Это проявилось широким спектром скоростей частиц во всех направлениях после инициирования ударного взаимодействия рассматриваемых материалов (в модельном варианте рассматривался сплав Al 2024).

Таким образом, при проведении натуральных экспериментов, а также при проверке вычислительным моделированием физических основ эволюции разрушения при ударном нагружении толстого алюминиевого экрана было установлено, что критерием перехода материала в структурно-неустойчивое состояние является лавинообразный рост дисперсии скоростей на мезоуровне-1.

Литература:

- [1] Silnikov, M.V., Guk, I.V., Mikhaylin, A.I., Nechunaev, A.F., Rumyantsev, B.V. Numerical simulation of hypervelocity impacts of variously shaped projectiles with thin bumpers. *Materials Physics and Mechanics*, 42(1), p. 20–29 (2019) [https : //mpm.spbstu.ru/article/2019.69.3/](https://mpm.spbstu.ru/article/2019.69.3/)
- [2] Ю.И.Мещеряков. Многомасштабные ударно-волновые процессы в твёрдых телах. – СПб., Нестор-История, 2018, 476 с.

# ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В АККРЕЦИОННЫХ ДИСКАХ ОКОЛО РАЗЛИЧНЫХ КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Пашенцева М.В.<sup>1</sup>, Михайлов Е.А.<sup>1,2</sup>, Пахилина Д.Д.<sup>1</sup>,  
Комлева А. Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

<sup>2</sup> *Физический институт имени П.Н. Лебедева*

Различные астрофизические объекты, такие как Солнце, галактики, звезды, планеты и т.д. обладают крупномасштабными магнитными полями. Их существование подтверждается с помощью различных наблюдательных методов – таких как исследование спектра синхротронного излучения, измерение меры фарадеевского вращения плоскости поляризации радиоволн и др [1]. С теоретической точки зрения генерация магнитного поля объясняется с помощью механизма динамо, который основан на совместном действии альфа-эффекта и дифференциального вращения. Им противодействует турбулентная диффузия, стремящаяся разрушить структуры магнитного поля. Если совокупная интенсивность первых двух эффектов оказывается сильнее – поле растет, в противном случае можно говорить о его затухании.

Особый интерес представляют аккреционные диски, расположенные около компактных астрофизических объектов, таких как белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры [2]. Существуют различные подходы к моделированию магнитных полей в них, однако опыт показывает, что наиболее продуктивным является использование аналогий с галактическими дисками. В таком случае можно воспользоваться так называемым планарным приближением, которое было разработано для тонких дисков [3].

Ранее в рамках подобных моделей был исследован процесс роста магнитного поля в ряде аккреционных дисков [4]. Важно отметить, что в них рассматривались модельные объекты, а параметры рассчитывались с использованием безразмерных величин. Тем не менее, представляет большой интерес оценка типичных времен роста магнитного поля, его напряженности и т.д. для аккреционных дисков около различных наблюдаемых объектов. Также имеет смысл сравнить, какие особенности имеет эволюция магнитного поля в дисках, окружающих черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды. В настоящей работе приведены оценки показателей роста магнитного поля в различных случаях.

Список литературы:

1. Zeldovich, I.B.; Ruzmaikin, A.A.; Sokolov, D.D. *Magnetic fields in astrophysics*. Gordon and Breach Science Publishers: New York, USA, 1983
2. Shakura, N.I., Sunyaev, R.A. 1973, AA, 24, 337
3. Moss, D., Sokoloff, D., Suleimanov, V. 2016, AA, 588, A18.
4. Mikhailov E., Boneva D., Pashentseva M. No-z model for magnetic fields of different astrophysical objects and stability of the solutions // *Data*. — 2021. — Vol. 6, no. 1. — P. 4

# К ВОПРОСУ ОБ ЭВОЛЮЦИИ ЧАСТИЦ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ИОНОСФЕРЕ МАРСА

Резниченко Ю.С.<sup>1,2</sup>, Дубинский А.Ю.<sup>1</sup>, Попель С.И.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

<sup>3</sup> *НИУ Высшая школа экономики*

В работе исследуется эволюция частиц диоксида углерода в ионосфере Марса. Рассматриваются механизм роста пылевых частиц за счет нуклеации пересыщенного углекислого газа, в т.ч. на границах раздела пересыщенных и ненасыщенных паров, а также временные изменения электронной и ионной концентраций ионосферной плазмы, обусловленные формированием слоистых пылевых структур. Рассчитываются характерные значения размеров и зарядов частиц диоксида углерода, а также характерное время седиментации пылевого облака зародышей. Обсуждается возможность распространения пылевых электростатических волн в марсианской ионосфере.

Работа выполнена при поддержке Фонда развития теоретической физики и математики "БАЗИС".

# ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЕКТРАЛЬНОГО ТЕНЗОРА ТУРБУЛЕНТНОГО СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ

Сафонов С.И.<sup>1</sup>, Петросян А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

Исследованы спектральные и топологические характеристики турбулентного течения космической плазмы в приближении магнитной гидродинамики с помощью метода быстрых искажений. Теория быстрых искажений является методом линеаризации усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса для турбулентных течений, изменяющихся под действием разнообразных искажений, таких как крупномасштабный градиент скорости течения, магнитное поле, эффекты граничных поверхностей и массовых сил. Теория быстрых искажений обобщена для однородных турбулентных течений несжимаемой космической плазмы в приближении магнитной гидродинамики и сформулированы условия ее применения.

Основное предположение метода состоит в том, что турбулентное поле скорости и магнитное поле реагируют на некоторый внешний эффект настолько быстро, что нелинейные эффекты оказывают пренебрежимо малое влияние на статистические характеристики течения. Получены трехмерные динамические уравнения для флуктуаций скорости и магнитного поля для однородного турбулентного магнитогидродинамического течения в линейном приближении быстрых искажений. Найдены аналитические решения для флуктуаций скорости и магнитного поля в приближении квазиизотропной двумерно-трехкомпонентной турбулентности. Получены аналитические выражения для эволюции спектров кинетической и магнитной энергии для произвольной двумерно-трехкомпонентной начальной топологии турбулентности. Получен общий вид разложения спектрального тензора корреляций скорости, магнитного поля и перекрестных корреляций на изотропную, анизотропную составляющие. Показано, что для каждого спектрального тензора есть три скалярных комплекснозначных параметра, которые полностью определяют статистику турбулентности до моментов второго порядка – энергия, поляризация и спиральность. Выделены энергетические и топологические параметры в спектральных тензорах перекрестных корреляций, корреляций скорости и магнитного поля и приведен их физический смысл. Получена замкнутая система уравнений для энергии, спиральности и поляризации турбулентных флуктуаций скорости течения и магнитного поля.

Практическую сложность работы с полученными разложениями представляет нетривиальная зависимость от волнового вектора. В приближении слабой анизотропии возможно описать полученную структуру спектральных тензоров через сферически усредненные спектры энергии, поляризации и спиральности, в то же время сохраняя часть информации об анизотропной структуре спектральных тензоров. Получены общие модельные выражения для спектральных тензоров перекрестных корреляций, корреляций скорости и магнитного поля в приближении слабой анизотропии. Получены модельные уравнения для гидродинамической, перекрестной и токовой спиральностей.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ЧАСТИЦ В ДИСКОВЫХ СИСТЕМАХ

Семенюк Е.А., Петросян А.С.

*Институт космических исследований РАН*

Планеты формируются в протопланетных дисках путем парных столкновений частиц межзвездной пыли. Характер данных столкновений во многом определяется параметрами твердых частиц и их взаимодействием с турбулентным газовым течением в диске. В данной работе исследуется динамика межзвездной пыли в турбулентном потоке газа. Для достижения поставленной цели проведено численное моделирование движения пыли в ограниченной области протопланетного диска. Пренебрежение влиянием частиц на динамику газового потока позволяет разделить решение поставленной задачи на два этапа: на первом этапе осуществлено локальное моделирование турбулентного течения газа, на втором - моделирование движения частиц в потоке газа.

Динамика сжимаемого газового течения рассматривается в трехмерном случае и описывается уравнением Навье-Стокса, уравнением непрерывности и уравнением состояния. Глобальная постановка задачи не позволяет исследовать парные столкновения частиц, поскольку они носят локальный характер. В связи с этим осуществлён переход к локальной области протопланетного диска. Локальное приближение заключается в том, что получающиеся уравнения для возмущений на устойчивом основном потоке совпадают с исходными глобальными уравнениями в небольшой области вокруг фиксированной точки в диске. Обезразмеривание локальных уравнений осуществлено с помощью эффективного давления, эффективной плотности и двух малых безразмерных параметров, связанных с характерным размером вычислительной области. Скорость и давление газа представлены в виде сумм стационарных величин и возмущений. Для протопланетного диска зафиксирована удалённая ячейка, высота которой гораздо меньше толщины протопланетного диска. В этом случае безразмерная система уравнений для возмущений при отсутствии флуктуаций плотности в начальный момент времени является несжимаемой, что сильно упрощает процесс вычислений и приводит к уравнениям модели Small Shearing Box.

Начальное условие для возмущений скорости и давления получено с помощью метода синтетической турбулентности, в котором поле скоростей представлено в виде суммы статистически независимых мод Фурье со случайными коэффициентами, которые подбираются таким образом, что результирующее поле скоростей удовлетворяет уравнению непрерывности, имеет форму заданного для уравнения Эйлера энергетического спектра изотропной трехмерной турбулентности. Данный подход позволяет сгенерировать однородную изотропную турбулентность, оптимальную с точки зрения процесса рандомизации.

Движение пыли в турбулентном газовом потоке в простейшем случае определяется трением между газом и твердыми частицами. Режим трения зависит от размера частиц, в данной задаче рассматриваются только малые частицы. Для отслеживания скоплений пылевых агрегатов движение пыли рассматривается в эйлеровом представлении. На результирующем распределении изменения плотности пыли отчетливо наблюдаются устойчивые области сжатия межзвездной пыли, что свидетельствует о кластеризации межзвездной пыли. Таким образом, полученные результаты приближенно описывают механизм роста планетезималей в протопланетных дисках путем парных столкновений частиц пыли в турбулентном течении.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-02-00016.

# ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС ДЛЯ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО ПАРКЕРА

Серенкова А.Ю., Соколов Д.Д., Юшков Е.В.

*Физический факультет, Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова*

Одной из первых моделей, описывающих генерацию крупномасштабного магнитного поля Солнца и одиннадцатилетнего солнечного цикла, является модель Паркера [1]. Эта модель была получена из уравнения магнитной индукции, усреднённого по зеркально-несимметричному (спиральному) турбулентному потоку плазмы при наличии дифференциального вращения. Ключевым упрощением данной модели являлось разделение магнитного поля на полоидальную и тороидальную компоненты, позволяющее записать это уравнение в виде системы двух уравнений в частных производных (по времени и по широтному углу). Следующим часто используемым упрощением данной системы является так называемая маломодовая модель, в которой обе компоненты магнитного поля раскладываются в ряд Фурье по широтному углу с учетом их симметрии относительно экватора, что сводит задачу к системе из четырёх обыкновенных дифференциальных уравнений. В такой системе присутствуют два параметра, отвечающие за спиральность потока и за дифференциальное вращение конвективной оболочки. В работе исследуется поведение системы в предположении, что её параметры слабо осциллируют со временем. Данное предположение выглядит разумным в силу периодичности самого динамо процесса (одиннадцатилетнего солнечного цикла). Подробный анализ полученной динамо-системы может помочь установить возможность влияния параметрического резонанса в системах двойных звёзд (звёзд-планет) на звёздные вспышки повышенной интенсивности.

Особый интерес при этом возникает к явлению параметрического резонанса [2]. Для лучшего понимания поведения систем с параметрическим резонансом в работе, кроме того, рассмотрены две упрощённые системы из двух дифференциальных уравнений. На их примере анализируются различные режимы (генерация, затухание, развязывание, стационар), изменение высоты и ширины резонансных пиков, а также их положение. Критерием составления упрощённых систем стало наличие в них самовозбуждения и нелинейного подавления, которые присутствуют в выведенной динамо-системе. Сравнивая результаты численного моделирования с аналитическими, полученными асимптотическим методом, можно удостовериться в корректности численного анализа.

В рамках доклада мы стараемся ответить на следующие вопросы: возможен ли в маломодовой модели параметрический резонанс, на каких частотах он происходит и как при этом повышается энергия осцилляций магнитного поля. Работа выполнена при поддержке гранта фонда БАЗИС номер 21-1-3-63-1.

Литература:

1. Parker, E. N. Hydromagnetic Dynamo Models // *Astrophys. J.* V. 122. P. 293. 1955.
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Курс теоретической физики I. Механика. // Москва. Наука. С. 103—109. 1973.

# ЭФФЕКТ УШИРЕНИЯ РЕЗОНАНСА В ЗАДАЧЕ О РАССЕЯНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫМИ ВОЛНАМИ

Тоноян Д.С.<sup>1,2</sup>, Шевелёв М.М.<sup>1</sup>, Артемьев А.В.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Факультет физики, НИУ Высшая школа экономики, Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Institute of Geophysics and Planetary Physics (IGPP) at University of California, Los Angeles*

Резонансное взаимодействие релятивистских электронов с электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами является одной из основных причин их рассеивания по питч-углу, приводящего к высыпанию электронов из радиационных поясов Земли в ионосферу.

Большинство существующих моделей радиационных поясов Земли рассматривает такие взаимодействия в рамках квазилинейной теории. Однако при резонансе с волнами больших амплитуд (более 1нТл) существенный вклад в динамику электронов начинают вносить нелинейные резонансные эффекты, что приводит к эффективному уширению диапазона резонансных энергий и питч-углов электронов.

Данный доклад посвящен исследованию эффекта конечной ширины резонанса в рассеянии релятивистских электронов ЭМИЦ волнами. В работе представлена оценка ширины резонанса для реалистичного диапазона параметров ЭМИЦ волн, распространяющихся в магнитном поле Земли. Ширина резонанса включена в расчёт коэффициентов диффузии электронов по питч-углу. Проведено сравнение коэффициентов диффузии с учетом ширины резонанса с классическими коэффициентами квазилинейной теории.

# ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГИДРАТИРОВАННЫХ МИНЕРАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МАРСА С ПОМОЩЬЮ OMEGA/MARS EXPRESS

Трунина А.А.<sup>1</sup>, Ломакин А.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ГБОУ Лицей №1501

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН

Минералогия дает нам, в контексте изучения Марса, данные о геологии, изучая химический состав горных пород планеты с помощью методов спектроскопии. С помощью минералогии люди получили данные о наличии пород, которые могли образоваться только в присутствии жидкой воды. Химическое превращение марсианских пород в карбонатные и филлосиликатные минералы происходило раньше в истории Марса, когда вода присутствовала в больших количествах. Таким образом, минералогия вносит вклад в понимание эволюции Марса. Информацию о минералах на поверхности Марса можно получить с помощью спектроскопии. Использовались данные, получаемые с прибора OMEGA/Mars-Express - спектрометра, заточенного под исследование геологии поверхности Марса. Он делает снимки Марса в разных спектральных каналах, что позволяет картировать разные вещества на поверхности Марса. Использовалась открытая библиотека для обработки данных OMEGA (<https://github.com/AStcherbinine/omegapu>). Данные были взяты с архива Planetary Space Archive (<https://archives.esac.esa.int/psa/>). Были сделаны атмосферная и термальная коррекции. Объектом исследования был выбран Nili Fossae - регион с разнообразным минералогическим составом, где могла быть вода в жидкой форме в прошлом. Для обнаружения гидратированных минералов мы использовали спектральные индексы полосы поглощения 1.9 микрон из литературы. В этой работе будут представлены спектры гидратированных минералов на поверхности Марса и карты распределения таких минералов для нескольких наблюдений.

# ЛИНЕЙНЫЕ ВОЛНЫ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Федотова М.А.<sup>1</sup>, Климачков Д.А.<sup>1</sup>, Петросян А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

Обсуждаются теоретические исследования эффектов стратификации и сжимаемости в течениях вращающейся астрофизической плазмы. Исследования эффектов стратификации и сжимаемости в магнитогидродинамических моделях вращающейся астрофизической плазмы важны для анализа процессов в солнечном тахоклине, устойчиво-стратифицированных областях в недрах звезд (излучающей зоны) и планет (внешний жидкий слой ядра), осцилляций вращающихся звезд и Солнца, астрофизических дисков, экзопланет. Свойство сжимаемости является принципиальным отличием течений астрофизической плазмы и характеризует большинство наблюдаемых объектов в астрофизике. Кроме того, учет стратификации позволяет существенно расширить возможности для интерпретации имеющихся данных наблюдений крупномасштабных волн Россби на Солнце.

Представлены результаты развития аналитической теории, описывающей линейные и нелинейные волны в плазменной астрофизике: обоснования и разработка различных приближений для магнитогидродинамических уравнений, описывающих эффекты стратификации и сжимаемости в течениях вращающейся астрофизической плазмы; поиск новых типов волн, вызванных непосредственно изучаемыми эффектами; исследование влияния изучаемых эффектов, а также учета горизонтальной составляющей силы Кориолиса на магнитострофические волны, магнитные инерционно-гравитационные волны и волны магнито-Россби; качественный анализ потенциальных нелинейных взаимодействий для всех исследуемых типов волн и вывод уравнений трехволновых взаимодействий; исследование влияния стратификации и сжимаемости на инкременты параметрических неустойчивостей, а также новые механизмы параметрических неустойчивостей с учетом новых типов волн. Решаемая задача описывает качественное поведение и общие свойства течений в плазменной астрофизике и является основой для развития численных моделей пространственно-временной изменчивости различных астрофизических объектов.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики "Базис".

# СВЕРХКОРОТКИЙ РАДИОИМПУЛЬС С ЧАСТОТНОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ НА МЕЖПЛАНЕТНОЙ ТРАССЕ

Худышев Ю.С.

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова*

Новым направлением развития систем связи различного назначения является применение сверхкоротких импульсных сигналов. Такие сигналы обладают широкими частотными спектрами, что позволяет, в том числе, увеличивать скрытность и помехозащищенность работы систем связи. Одной из реализаций сверхкоротких сигналов являются синусоидальные цуги с ограниченным числом полных колебаний поля и временными скачками несущей частоты колебаний в течение их длительности. При распространении в холодной плазме влияние среды может приводить к значительным различиям временного хода напряженности поля излучаемого сигнала и напряженности поля, регистрируемой на приемном конце трассы.

В докладе описаны результаты начального этапа теоретического анализа характера и возможных особенностей процесса распространения в бесстолкновительной плазме гигагерцевого радиоимпульса, сформированного как последовательность синусоидальных цугов с различающимися несущими. Применительно к трассам с интегральными электронными концентрациями, характерными для межпланетных расстояний, рассмотрены случаи формирования импульса с двумя или четырьмя цугами равной амплитуды при двух несущих частотах. Полученные результаты показали, что независимо от конкретной структуры излучаемого импульса в процессе его распространения происходит постепенное разделение формирующих его подимпульсов во времени. При этом временной ход мгновенной частоты колебаний поля в принимаемом сигнале характеризуется его убыванием, близким к монотонному. Выполнен анализ корреляционных функций регистрируемого излучения.

# АТМОСФЕРНЫЕ ПОТЕРИ N<sub>2</sub> И O<sub>2</sub> ВО ВРЕМЯ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ИНВЕРСИЙ

Царева О.О.<sup>1</sup>, Левашов Н.Н.<sup>1,2</sup>, Попов В.Ю.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *Физический факультет, Московский государственный университет имени  
М.В.Ломоносова*

<sup>3</sup> *НИУ Высшая школа экономики*

Магнитосфера защищает атмосферу планеты от эрозии солнечным ветром. Ранее мы показали, что во время геомагнитной инверсии, когда дипольная составляющая поля ослабевает, магнитное экранирование по-прежнему эффективно. Это справедливо для спокойных периодов солнечной активности. Однако поскольку продолжительность геомагнитной инверсии охватывает в среднем несколько тысяч лет, в течение которых происходит множество экстремальных событий, мы развили наше исследование с учетом влияния солнечных параметров, таких как давление солнечного ветра и EUV-излучение (источник образования ионов), на атмосферные потери. Палеоданные указывают на увеличение отношений изотопов  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  с увеличением скорости инверсии в течение фанерозоя, что, согласно нашим оценкам эффективности фракционирования изотопов, также может быть связано с диссипацией атмосферы солнечным ветром.

# ЭФФЕКТЫ КРУПНОМАСШТАБНОЙ СЖИМАЕМОСТИ В НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКЕ ВОЛН ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ТЕЧЕНИЯХ МЕЛКОЙ ВОДЫ

Юденкова М.А.<sup>1,2</sup>, Климачков Д.А.<sup>2</sup>, Петросян А.С.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> НИУ Московский физико-технический институт

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН

В работе исследуется влияние сжимаемости и вращения на нелинейную динамику волн в приближении мелкой воды. Приближение мелкой воды обобщается для описания крупномасштабных течений тяжелой жидкости со свободной поверхностью, рассматриваются линейные волны для различных приближений вращения, исследуются слабонелинейные взаимодействия полученных волн.

В работе получена система квазилинейных дифференциальных уравнений движения вращающейся сжимаемой жидкости в поле силы тяжести со свободной границей в приближении мелкой воды. Полученная система уравнений нетривиально зависит от характерного вертикального масштаба течения и масштаба высот, на котором изменение плотности становится существенным. В отличие от классических уравнений мелкой воды для несжимаемых течений, высота свободной поверхности не может считаться аналогом массы столба жидкости и закон сохранения массы записывается для новой переменной  $l = h\bar{\rho}$ , являющейся произведением высоты свободной поверхности на среднюю плотность жидкости. Высота столба жидкости нелинейно зависит от переменной  $l$ . Характерным масштабом сжимаемости является плотностная высота  $H_\rho = c_p T/g$ . Если высота столба жидкости много меньше характерной плотностной высоты, то эффекты сжимаемости становятся несущественными, а полученная система уравнений в пределе переходит в классическую систему уравнений мелкой воды.

Рассматриваются два типа вращения – приближение  $f$ -плоскости и бета-плоскости. В первом случае параметр Кориолиса считается постоянным  $f = f_0$ . В приближении бета-плоскости параметр Кориолиса линейно зависит от широты  $f = f_0 + \beta y$ . Характерной величиной для исследования вращения является радиус деформации Россби  $L = \sqrt{g}/f_0$ . В длинноволновом пределе, то есть, когда длина волны много больше радиуса деформации  $L$  на  $f$ -плоскости возникают инерционные колебания, а на бета-плоскости – волны Россби. В коротковолновом пределе на  $f$ - и бета-плоскостях возникают волны Пуанкаре.

Качественный анализ дисперсионных соотношений показал, что на бета-плоскости возможны трехволновые взаимодействия для трех волн Россби, а также двух волн Россби и одной волны Пуанкаре. На бета-плоскости асимптотическим методом многомасштабных разложений получена система уравнений, описывающая динамику волн с учетом квадратичной поправки: уравнения трехволнового синхронизма и нелинейные уравнения на амплитуды взаимодействующих волн. Исследованы частные случаи взаимодействий волн – параметрический распад и параметрическое усиление, найдены коэффициенты параметрических неустойчивостей.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики "Базис".

Литература:

1. Юденкова М.А., Климачков Д.А., Петросян А.С. Волны Пуанкаре и волны Россби в сжимаемых течениях мелкой воды // ЖЭТФ 2022 Т. 161(3), с. 388

---

# ФИЗИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ



# ИССЛЕДОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СТРУКТУР ГЕЛИОСФЕРЫ, ИСПОЛЬЗУЯ ДАННЫЕ PARKER SOLAR PROBE, HELIOS, IMP8 И VOYAGER 1

Анциферова У.П.<sup>1</sup>, Хабарова О.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИЯУ МИФИ

<sup>2</sup> *Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова*

Построение современных моделей солнечного ветра требует знания радиальной зависимости основных параметров солнечного ветра. Задачу усложняет тот факт, что лишь у немногих космических миссий орбиты были вытянутыми. Этот аспект обсуждался в ограниченном числе работ, касающихся анализа радиальных зависимостей разных характеристик солнечного ветра на обширных пространственных интервалах. Примерами аппаратов с такими орбитами могут служить Helios 1 и 2, Voyagers. Эти аппараты позволили получить данные для вывода требуемых зависимостей. Между тем, только Helios 2 приближался к Солнцу на расстояние 0,29 а.е. Parker Solar Probe (PSP), запущенный в 2018 г., дает возможность изучения ключевых параметров солнечного в три раза ближе к Солнцу. Для вышеописанного анализа были выбраны Helios, PSP, Voyager 1, IMP8. Сравнение данных PSP с измерениями более ранних миссий позволяет подтвердить или опровергнуть гипотезы о пространственных изменениях плазменных параметров и магнитного поля в гелиосфере, а также оценить влияние солнечной активности на ход этих параметров.

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАХВАЧЕННЫХ ПРОТОНОВ ЗА ГЕЛИОСФЕРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КА IBEX

Балюкин И.И., Измоденов В.В., Алексашов Д.Б.

*Институт космических исследований РАН*

Захваченные протоны рождаются в результате ионизации атомов водорода в области сверхзвукового солнечного ветра и формируют надтепловую компоненту протонов в гелиосфере. Будучи захваченными гелиосферным магнитным полем и перенесенными в область внутреннего ударного слоя, на своем пути протоны могут испытывать стохастическое ускорение, обусловленное турбулентностью солнечного ветра. В области ударного фронта частицы могут быть также подвержены дрейфовому ускорению или зеркальному отражению (ударному серфингу). Эти процессы образуют высокоэнергетический хвост в распределении по скоростям. Свойства энергичной популяции протонов до сих пор недостаточно хорошо изучены, несмотря на то, что количественные оценки этих свойств являются необходимыми для моделирования потоков энергичных нейтральных атомов, которые рождаются при перезарядке захваченных протонов с межзвездными атомами водорода.

Были рассмотрены два вида функции распределения захваченных протонов по скоростям за гелиосферной ударной волной: (1) заполненная оболочка (filled shell distribution) с энергетическим хвостом, который моделировался при помощи степенного закона, и (2) би-Максвелловское распределение. Проведено параметрическое исследование распределения популяции энергичных захваченных протонов с использованием данных наблюдений прибора IBEX-Hi (на борту КА Interstellar Boundary Explorer) потоков энергичных нейтральных атомов из внутреннего ударного слоя и на основе численных моделей: (а) глобальной кинетико-МГД модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой (Izmodenov & Alexashov, 2020), и (б) нестационарной кинетической модели распределения захваченных протонов (Baliukin et al., 2020). В результате исследования впервые были получены количественные оценки на параметры энергичной популяции захваченных протонов, характеризующие эффективность ускорения протонов на ударном фронте, для различных положений за гелиосферной ударной волной.

# АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ТОРНАДО МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Воробьев Д.Л.<sup>1</sup>, Блуменау М.И.<sup>1</sup>, Фридман М.Л.<sup>1,2</sup>,  
Хабарова О.В.<sup>2</sup>, Обридко В.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> НИУ Высшая школа экономики

<sup>2</sup> ИЗМИРАН

Показана возможность автоматического обнаружения солнечных магнитных торнадо с использованием классического компьютерного зрения и методов глубинного обучения. Мы определяем магнитные торнадо, независимо от их происхождения, как магнитоплазменные объекты в солнечной короне с закрученным магнитным полем. Как правило, всё магнитное торнадо вращается, аналогично торнадо в земной атмосфере. Между тем, существуют также торнадо, в которых только плазма течет вверх по спирали магнитного поля, но вся структура просто колеблется. Недостаток идентифицированных структур является одной из многих проблем, мешающих изучению физики магнитных торнадо и процессов, связанных с ними. В частности, нитевидные вращающиеся структуры хорошо заметны только на лимбе, в то время как об их присутствии на солнечном диске можно только строить предположения. Наш метод основан на анализе изображений SDO/AIA на длинах волн  $171\text{\AA}$ ,  $193\text{\AA}$ ,  $211\text{\AA}$ ,  $304\text{\AA}$ , к которым применяется несколько различных алгоритмов, а именно сверточные и рекуррентные нейронные сети и вычисление оптического потока. Новая методика сочетает в себе несколько подходов, которые зарекомендовали себя в различных областях анализа данных. Такой подход позволяет обнаруживать структуры с достаточной точностью и полнотой. Для обучающих объектов мы использовали магнитные торнадо, ранее описанные в литературе [Wedemeyer et al. 2013, ApJ; Mgebrishvili et al. 2015 ApJ] так же, как и новонайденные. Наш метод позволил обнаружить эти структуры, а также выявить ранее неизвестные магнитные торнадо.

# ВЛИЯНИЕ ЗАРЯДА МЕЖЗВЕЗДНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ НА ИХ ПРОНИКНОВЕНИЕ В ГЕЛИОСФЕРУ

Годенко Е.А.

*Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлунского*

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

*Институт космических исследований РАН*

При взаимодействии сверхзвуковой плазмы солнечного ветра и сверхзвуковой плазмы межзвездной среды образуется структура из двух ударных волн и тангенциального разрыва между ними. Область, ограниченная тангенциальным разрывом, т.е. область распространения солнечного ветра, называется гелиосферой. Межзвездная среда состоит из плазменной, нейтральной и пылевой компонент. Из-за относительного движения Солнца в межзвездной среде, нейтральные атомы и пылевые частицы могут проникать в гелиосферу, проходя через гелиосферный ударный слой (протоны не могут из-за их относительно малой длины свободного пробега). Параметры плазмы (плотность, скорость, температура, магнитное поле) в гелиосферном ударном слое существенно отличаются от параметров плазмы в невозмущенной межзвездной среде и солнечном ветре, что сильно влияет на их заряд и траектории при прохождении данной области. В частности, некоторые частицы пыли могут испытывать фильтрацию на границе гелиосферы. Цель данной работы - исследовать процесс формирования заряда пылевых частиц, а также понять, частицы каких размеров могут проникать в гелиосферу.

На заряд частиц межзвездной пыли оказывают влияние множество физических процессов: 1) фотоэлектронная эмиссия; 2) прилипание заряженных частиц из окружающей плазмы на поверхность пылинки; 3) вторичная электронная эмиссия за счет соударений с высокоэнергичными частицами плазмы; 4) эффекты, связанные с космическими лучами. Потоки ионов и электронов, соответствующие упомянутым процессам, зависят от условий среды, которая окружает пылинки, а также от геометрических и химических свойств самих частиц пыли. Для вычисления заряда используется приближение равновесного заряда, которое в случае гелиосферы дает достаточно точные результаты (равновесный заряд - заряд, при котором положительные и отрицательные токи взаимно компенсируются). Помимо вычисления равновесного заряда, на основе предположения о статистическом равновесии, проведены расчеты вероятностного распределения заряда и показано, что среднее по такому распределению близко к равновесному заряду при относительно небольшом среднеквадратическом отклонении. Для вычисления токов, связанных с прилипанием частиц плазмы, а также вторичной электронной эмиссией, используются распределения плазмы из трехмерной кинетико-магнитогидродинамической глобальной модели гелиосферы, а для вычисления фотоэмиссионных токов используются осредненные по времени данные по потокам солнечных фотонов (TIMED/SEE). Потоки космических лучей вычислены на основе данных, полученных на КА Вояджер 1.

# ПЕРЕНОС АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ ПЛАЗМЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ГРАНИЦЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ

Колпак В.И.<sup>1,2</sup>, Могилевский М.М.<sup>1</sup>, Чугунин Д.В.<sup>1</sup>,  
Чернышов А.А.<sup>1,2</sup>, Котова Г.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Высшая школа экономики*

В ходе анализа измерений электрической компоненты поля в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц, выполненных на спутнике ERG (ARASE), получены условия захвата Аврорального Километрового Радиоизлучения (АКР) плазменными неоднородностями, вытянутыми вдоль магнитного поля, а так же перенос данного излучения в приэкваториальную область и в противоположное полушарие. Из данного анализа следует, что захват АКР может происходить в плазменные каналы только с пониженной плотностью, при условии, что угол входа в канал должен быть не более 10-15 градусов. Эти ограничения по углу входа в канал связаны с тем, что при больших углах произойдёт многократное отражение, что приведет к существенному подавлению сигнала. За время измерений (~ 2 часов) наблюдалось значительное смещение границы канала вверх. Такое смещение может быть связано с постепенным замыыванием каналов с пониженной плотностью потоками восходящей ионосферной плазмы.

# НЕАДИАБАТИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА КАК РЕЗУЛЬТАТ УДАРНОГО НАГРЕВА: ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ ВОЯДЖЕРА 2

Корольков С.Д.<sup>1,2,3</sup>, Измоденов В.В.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

<sup>3</sup> *НИУ Высшая школа экономики*

Мы запускаем простую 1-мерную газодинамическую модель сверхзвукового солнечного ветра за пределами 1 а.е. Сравнение этой модели с наблюдениями Voyager 2 показывает отличное совпадение температур протонов вдоль траектории. Важно подчеркнуть, что, в отличие от предыдущих работ других авторов, в нашей модели нет каких-либо исходных членов в уравнениях энергии, которые можно было бы связать с турбулентным нагревом или переносом энергии от пикап-протонов. Причиной наблюдаемого эффекта является чрезвычайно высокая зашумленность минутных данных солнечного ветра. Шум приводит многочисленным ударным волнам и другим разрывам в солнечном ветре, которые затем перемещаются, взаимодействуя друг с другом. Эффективный нагрев солнечным ветром возникает при формировании ударных волн. Аналитически также легко показать, что температура за ударной волной остается практически постоянной и сохраняется при перемещении ударной волны на большие расстояния. Этот эффект более выражен для сферической геометрии, которую мы имеем, потому что в стационарных решениях температура падает адиабатически. Поэтому радиальный профиль температуры солнечного ветра, измеренный Voyager 2, объясняется в рамках простой нестационарной модели. Нет необходимости в дополнительных источниках тепла. Что касается скорости, известно, что пикап-протоны нагружают солнечный ветер, замедляя его. Мы также расширили модель, включив пикап-протоны для объяснения распределения скорости в данных. Подчеркнем, что мы предполагаем мгновенную диссипацию импульса и выравнивание скорости плазменной компоненты и пикап-протонов, что хорошо подтверждается в наблюдении. Однако диссипация энергии происходит на гораздо больших временах поэтому мы пренебрегаем нагревом плазменной компоненты протонов в результате перезарядки, оставляя только эффект ударного нагрева.

# НАБЛЮДЕНИЕ СВЕРХТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ СПУТНИКАМИ MMS В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Леоненко М.В.<sup>1,2</sup>, Григоренко Е.Е.<sup>1</sup>, Зелёный Л.М.<sup>1</sup>,  
Малова Х.В.<sup>1</sup>, Малыхин А.Ю.<sup>1</sup>, Попов, В.Ю.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

Флэппинг токового слоя (ТС), связанный с распространением высокоскоростных потоков плазмы, позволил впервые наблюдать сверхтонкие токовые слои (СТС) в плазменном слое геомагнитного хвоста Земли. В течение рассматриваемого интервала было обнаружено 111 пересечений нейтральной плоскости токового слоя. В 95 пересечениях наблюдались СТС с плотность тока выше  $20 \text{ нА/м}^2$ . Полутолщина СТС ( $L_{\text{СТС}}$ ) составляет порядка нескольких гирорадиусов тепловых электронов. В ряде СТС параметр адиабатичности ( $\kappa_e$ ) оказался ниже 1 для сверхтепловой популяции электронов ( $> 1 \text{ кэВ}$ ). Впервые показано, что электрический ток в подобных СТС переносится размагниченными электронами ( $\kappa_e$ ).

# РАЗНОМАСШТАБНЫЕ ВАРИАЦИИ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА ИОНОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ТЕЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Москалева А.В., Рязанцева М.О., Ермолаев Ю.И.,  
Лодкина И.Г.

*Институт космических исследований РАН*

Работа посвящена статистическому анализу величин и вариаций углов направления потока солнечного ветра (соответственно долготного  $\varphi$  и широтного  $\theta$  углов) в различных крупномасштабных типах течения солнечного ветра. Углы направления потока определяются из компонент скорости солнечного ветра по данным космического аппарата WIND (прибор 3DP) за период 1995-2019 гг. Вариации направления вектора потока рассматриваются на различных пространственных масштабах, для этого используются усреднения на нескольких длинах интервалов: 30, 90, 300, 900, 1800 и 3600 секунд. Каждый выделенный интервал привязывается к каталогу крупномасштабных явлений солнечного ветра <http://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/> [Ермолаев и др., 2009].

Рассмотренные длины интервалов позволяют охватить широкий диапазон пространственных масштабов. Известно, что на масштабах  $> 1$  ч могут происходить сильные отклонения вектора скорости при столкновении крупномасштабных потоков солнечного ветра, на масштабах  $\sim 0.5 - -1$  ч резкие изменения направления могут быть связаны с пересечением границ потоковых трубок [Borovsky, JGR, 2008], а на масштабах минут могут возникать кратковременные отклонения вектора потока за счет локальных процессов в плазме солнечного ветра [Застенкер и др., КИ, 2015]. В работе показано, что амплитуда вариаций существенно зависит от длины интервалов: с увеличением временного масштаба, увеличивается вероятность появления больших значений. Выявлено, что значения модуля долготного ( $\varphi$ ) и широтного ( $\theta$ ) углов, их вариаций, а также вероятность значительных отклонений от радиального направления (более  $5^\circ$ ) достигают максимальных значений в областях взаимодействия потоков SHEATH и CIR (области между медленным квазистационарным солнечным ветром и высокоскоростными потоками, ассоциированными с корональными выбросами массы или быстрым ветром из корональных дыр соответственно), при этом зависимость уровня вариаций от типа солнечного ветра ослабевает при уменьшении их амплитуды.

Литература:

1. Москалева А.В., Рязанцева М.О., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Вариации направления потока в различного типа течениях солнечного ветра. Солнечно-земная физика, 2021, 7 (4), <https://doi.org/10.12737/szf-74202102>
2. Застенкер Г.Н., Храпченков В.В., Колоскова И.В. и др. Быстрые вариации величины и направления потока ионов солнечного ветра, Космические исследования, 2015, т. 53, № 1, с. 63-74, DOI:10.1134/S0010952515010098
3. Borovsky J. E. The flux-tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU?, Journal of Geophysical Research, 2008, 113, A08110, DOI:10.1029/2007JA012684
4. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000, Космические исследования, 2009, т. 47, № 2, с. 81–94.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В ТЕЧЕНИЕ ЖИЗНИ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Нечаева А., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н.

*Институт космических исследований РАН*

Вопрос изучения электрических токов в активных областях (АО) Солнца является важным в контексте понимания физики явлений солнечной активности, в том числе солнечных вспышек. Считается, что вспышки черпают энергию из свободной энергии магнитного поля, которая, в свою очередь, связана с электрическими токами.

На данный момент нам доступны векторные магнитограммы всего видимого диска Солнца (по данным инструмента HMI/SDO). Из информации о трех компонентах вектора магнитного поля на одном уровне (в данном случае на фотосфере) возможно рассчитать вертикальную компоненту электрического тока на основе закона Ампера-Максвелла,  $j_z$ .

Для количественного описания характера поведения электрического тока в АО были построены функции распределения вертикального электрического тока  $PDF(|j_z|)$ , которые также исследовались в работах [1, 2]. Для этого исследования были отобраны несколько вспышечно-активных областей, развитие которых мы можем отследить от зарождения на восточном лимбе и до захода за западный лимб. Получены предварительные результаты о характере изменения  $PDF(|j_z|)$  и некоторых интегральных характеристик  $j_z$  в АО от её зарождения до появления в ней вспышечной активности

Литература:

[1] Нечаева А., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н. Сравнение функций распределения плотности вертикального электрического тока в активных областях Солнца по данным инструментов SDO/HMI и Hinode/SOT. Солнечно-земная физика. 2022. in prep.

[2] Zimovets I.V., Nechaeva A.B., Sharykin I.N., Gan W.Q. Density Distribution of Photospheric Vertical Electric Currents in Flare-Active Regions of the Sun. *Astrophysics*. 2020a, vol. 63, pp. 408–420. <https://doi.org/10.1007/s10511-020-09645-0>

# ОБЗОР И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ КРИВЫХ ЭРУПТИВНОГО ПРОТУБЕРАНЦА

Радивон А.В.<sup>1,2</sup>, Зимовец И.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

Надежное количественное определение кинематических характеристик эруптивных протуберанцев на Солнце важно для понимания их физики, их связи со вспышками и корональными выбросами массы (КВМ), что необходимо для изучения и прогнозирования космической погоды. В предыдущих работах на основе анализа ультрафиолетовых изображений Солнца по данным SDO/AIA нами были получены зависимости расстояния, скорости и ускорения от времени для нескольких эруптивных событий, но ошибки используемого метода были неудовлетворительно большими. В данном исследовании были построены несколько методов для устранения этой проблемы, в том числе метод сплайнов, метод скользящего среднего и метод регуляризации. Последний позволяет получить аппроксимацию данных нужной гладкости, а также минимизировать ошибки расчетных кинематических кривых. Также был оптимизирован метод построения диаграммы время-расстояние по данным SDO/AIA до полу-автоматического метода областей и применен к нескольким эруптивным событиям.

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЛЬНОГО ПОТОКА СКОРОСТИ ВЕЩЕСТВА И МАГНИТНОГО ПОТОКА В ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА

Садыков А.М., Красоткин С.А.

*Кафедра физики космоса, Физический факультет, Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова*

Всплывание магнитного потока является важной проблемой для понимания процессов, происходящих в конвективном слое и фотосфере Солнца. Для решения этой проблемы необходимо изучать динамику усиления магнитного поля и радиальной скорости вещества. По гипотезе о всплывании магнитного потока, оба явления должны быть взаимосвязаны.

Целью нашей работы является изучение взаимодействия магнитного потока и потока радиальной скорости вещества в зарождающихся активных областях. Для этого были рассмотрены данные глобальной сети телескопов GONG (Global Oscillations Network Group). В работе используются данные магнитограмм и доплерограмм, отобранных согласно следующему критерию: (1) в начальный момент времени на магнитограмме должна появиться зарождающаяся активная область (АО); (2) начальное положение зарождающейся АО должно быть близко к восточному лимбу, не ближе чем 45 градусов от центрального меридиана; (3) АО должна развиваться в четко выраженную конфигурацию АО с двумя или четырьмя пятнами. Для работы отобраны 9 АО (2011–2021 гг.), удовлетворяющие критерию. Для каждой АО данные рассматриваются с временным шагом в 4 часа на протяжении 6 дней, вплоть до сближения пятен с западным лимбом.

Анализ данных проходит в 2 этапа: распознавание области, занимаемой АО, и анализ этой области. Распознавание области АО происходит при помощи нахождения центра тяжести карты модуля измеряемого магнитного поля. Анализ области состоит в (1) выделении пятен и области вне пятна, (2) нахождении средней положительной (направленной по радиусу от центра Солнца) и отрицательной (направленной по радиусу в центр Солнца) скорости вещества вне пятна, (3) нахождении потока магнитного поля и потока положительной и отрицательной скорости в пятне, полученной вследствие вычета из данных средней скорости вне пятна. При этом пятном считается область с магнитным полем больше 15 Гаусс. Данные из выборки уравниваются по моменту времени, соответствующему резкому усилению магнитного потока, и находится среднее значение как магнитного потока, так и потоков поля скоростей. После рассматривается бинарное отношение магнитного потока и потока скоростей.

Предварительные результаты показывают, что существует статистически значимая корреляция между магнитным полем и положительным потоком скорости вещества. При этом корреляция для потока отрицательной скорости слабо выражена. Результаты подтверждают существование взаимосвязи магнитного потока и поля скоростей. Однако, полученный результат нельзя считать подтверждением гипотезы всплывания магнитного потока: по полученным данным нельзя однозначно ответить на вопрос, имеет ли место всплывание магнитного потока; для изучения этого вопроса требуется дальнейший анализ.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЗЕМНЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Синевич А.А.<sup>1,2</sup>, Чернышов А.А.<sup>1,2</sup>, Чугунин Д.В.<sup>1</sup>,  
Могилевский М.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН*

<sup>2</sup> *НИУ Высшая школа экономики*

Поляризационный джет (ПД), также известный как субавроральный ионный дрейф (SAID), представляет собой быстрый узкий по широте дрейф плазмы на запад в субавроральных широтах в ионосфере Земли. Уменьшение плотности ионосферной плазмы внутри ПД/SAID существенно влияет на условия распространения коротковолновых радиоволн, что свидетельствует о практической важности изучения этого явления. Несмотря на важность использования различных наземных средств наблюдения для изучения и анализа свойств ПД/SAID, а также разработки аналитических моделей и численного моделирования, наиболее ценными являются наблюдения in-situ. Такие наблюдения можно получить только со спутниками, летящими через развивающийся ПД/SAID. Крупномасштабные особенности PJ/SAID в настоящее время хорошо изучены, но мелкомасштабные процессы внутри PJ/SAID практически не изучены, и остается много открытых вопросов. В данной работе мы изучаем мелкомасштабные структуры в PJ/SAID во время геомагнитной бури 20 апреля 2018 г. с использованием мультиинструментального подхода с привлечением низкоорбитальных спутников.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДВЕСТНИКОВ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО СПЕКТРОМЕТРА IRIS

Терентьев С.В.<sup>1</sup>, Шарыкин И.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *НИУ Московский физико-технический институт*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН*

Вспышки — самые мощные извержения в солнечной атмосфере. При самых крупных вспышках может быть высвобождено около  $10^{32}$  эрг, при этом электромагнитное излучение простирается от гамма-лучей до длинноволновых радиоволн. Большая часть энергии проявляется в виде мягкого и жесткого рентгеновского излучения. Вспышки происходят в областях магнитной сложности на Солнце и неизменно связаны с активными областями. Развитие вспышек характеризуется очень быстрой импульсной фазой вблизи начала, связанной со вспышками жесткого рентгеновского излучения, некоторых линий ультрафиолетового излучения и микроволнового радиоизлучения.

В нашем исследовании мы работаем с ультрафиолетовым спектрометром IRIS. Исследуемое событие у нас вспышка 2014-06-11 18:19:27-03:48:36 +1d отличается хорошо захватываемой областью вспышечной фазы. Нами производится калибровка в окне Si IV по длине волны с учетом доплеровского сдвига относительно окна O I. На этапе исследования данных было замечено, что предоставляемые данные level-2 являются ошибочными в окне O I. В следствие этого, нам приходится обращаться к более низкоуровневым данным level-1 и производить дальнейшую калибровку.

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА В ГЕЛИОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯННОГО СОЛНЕЧНОГО ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЯ

Титова А.В.<sup>1</sup>, Измоденов В.В.<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> НИУ Высшая школа экономики

<sup>2</sup> Институт космических исследований РАН

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

Солнечная система движется сквозь локальную межзвездную среду (ЛМС), заполненную частично-ионизованной водородной плазмой. В результате взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой образуется сложная газодинамическая структура, называемая гелиосферой. Нейтральные атомы водорода, являющиеся основной компонентой ЛМС, имеют длину свободного пробега, сравнимую с характерным размером гелиосферного ударного слоя, и поэтому могут проникать внутрь гелиосферы. Прямые измерения межзвездных атомов водорода в гелиосфере затруднены вследствие их небольшой энергии, однако определить распределения атомов можно косвенно. Исходящие из Солнца Лайман-альфа фотоны (длина волны 121.6 нм) рассеиваются на заполняющих межпланетное пространство межзвездных атомах водорода. При этом спектр рассеянного Лайман-альфа излучения будет зависеть от проекции функции распределения атомов на луч зрения. Таким образом, с помощью анализа спектра излучения можно получить информацию о свойствах межзвездных атомов водорода внутри гелиосферы. Целью работы являлось моделирование распределения межзвездных атомов водорода и последующее исследование влияния параметров солнечного ветра и эффектов ударного слоя на спектр рассеянного Лайман-альфа излучения.

Для достижения поставленной цели решалось стационарное кинетическое уравнение Больцмана. Граничное условие задается на сфере радиуса  $R$  – поверхности, моделирующей гелиосферную ударную волну. При построении граничного условия нужно учитывать глобальные эффекты, связанные с изменением функции распределения межзвездных атомов при их прохождении через область гелиосферного ударного слоя, поэтому было рассмотрено несколько вариантов граничной функции распределения. Далее для вычисления спектров решается задача о переносе излучения в приближении оптически тонкой среды.

Было исследовано влияние параметров солнечного ветра на моменты спектра. Изменение данных параметров существенно сказывалось на характеристиках излучения, из чего следует, что нестационарные эффекты, связанные с 11-летним солнечным циклом, необходимо учитывать. Также было показано, что при изменении функции распределения вдали от Солнца моменты спектра, полученные для наблюдателя, находящегося на 1 а.е., существенно меняются, то есть свойства границы гелиосферы значительно влияют на спектр рассеянного Лайман-альфа излучения.

# ВОЗМОЖНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОГО ПОДХОДА К СПЕЦИАЛЬНЫМ МЕТОДАМ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ РАДИОСИГНАЛОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЕРИОДЫ КРУПНЕЙШИХ СЕЙСМОСОБЫТИЙ

Титова М.А.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова*

Проведен комплексный региональный анализ данных спутниковый наблюдений станциях приема спутниковых радиосигналов наземного базирования, объединенных в глобальную IGS и региональную UNAVCO сети, для крупнейших сейсмособытий, произошедших в первой декаде 2010 г. Обработана обширная статистика пространственно-временных измерений, а именно, более 5 миллионов отсчетов фазы радиосигналов.

Дифференцированные программно-алгоритмические методы обработки данных спутниковых радиосигналов позволили выделить и рассмотреть характеристики пространственных и временных масштабов ионосферных неоднородностей. При помощи геофизического анализа осуществлено топографическое соответствие выделенных кластерным анализом неоднородных ионосферных структур. Иными словами, с помощью анализа траекторий радиосигналов выяснялось, где расположен источник регистрируемых на ионосферных высотах возмущений плотности электронной концентрации в проекции на поверхность Земли. Рассчитана статистика отклонений и распределений подионосферных точек от границ литосферных плит. Сейсмособытия развивались в спокойных геомагнитных условиях, абсолютная величина Dst-индекса не превышала 20 нТл, что позволило рассмотреть ионосферные проявления атмосферно-литосферных связей в исследуемый период. Для достоверного геофизического анализа были использованы данные обновленной цифровой модели границ литосферных плит.

# ЧИСЛО ТОКОВЫХ СЛОЕВ ЗАПОЛНЯЮЩИХ МАГНИТНЫЕ ПОЛОСТИ ПЕРЕД ГЕОЭФФЕКТИВНЫМИ ПОТОКАМИ КАК ПРЕДВЕСТНИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Фридман М.Л.<sup>1,2</sup>, Хабарова О.В.<sup>1</sup>, Сагитов Т.М.<sup>1,2</sup>,  
Кислов Р.А.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> ИЗМИРАН

<sup>2</sup> НИУ Высшая школа экономики

<sup>3</sup> Институт космических исследований РАН

Токовые слои в солнечном ветре распределены в пространстве неоднородно. Было показано, что частота обнаружения токовых слоев в L1 максимальна при пересечении турбулентных горячих потоков типа областей перемешивания corotating interaction regions (CIRs) и областей за ударной волной корональных выбросов масс (coronal mass ejection (CME) sheath) (Khabarova et al. JGR, 2021, <https://doi.org/10.1029/2020JA029099>).

Кроме того, рост числа токовых слоев в час наблюдается за долго прихода потенциально геоэффективных потоков, что объясняется пересечением магнитных островов и токовых слоев, заполняющих магнитные полости (Khabarova et al. SSRv, 2021).

Проведен статистический анализ частоты обнаружения токовых слоев перед приходом магнитных бурь. Использована открытая база данных токовых слоев, обнаруженных на 1 а.е. за 1998–2010 гг. База данных имеет секундное разрешение (<https://csdb.izmiran.ru>). За этот период было зарегистрировано 699 геомагнитных бурь с Dst-индексом ниже -30 нТ. Также был проведен анализ в зависимости от периода солнечной активности.

Согласно полученным результатам, наблюдается прирост на 80% числа токовых слоев перед началом магнитной бури со временем опережения в десятки часов, говорит о потенциальной возможности использования токовых слоев как предвестников магнитных бурь.

# ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСАХ МАССЫ НА СРЕДНИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ МАСШТАБАХ

Хохлачев А.А., Ермолаев Ю.И., Рязанцева М.О.,  
Рахманова Л.С., Лодкина И.Г.

*Институт космических исследований РАН*

Дважды ионизированные ионы гелия - наиболее распространенная после протонов ионная компонента солнечного ветра. Относительное содержание гелия является важной характеристикой состояния плазмы солнечного ветра и может значительно различаться в разных крупномасштабных типах течения, в частности, достигая максимальных значений  $> 10\%$  в межпланетных корональных выбросах массы (КВМ), а также динамически изменяться в результате локальных процессов в плазме.

Данная работа посвящена исследованию связи изменений относительного содержания гелия и некоторых параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на средних пространственных масштабах  $10^5 - 10^6$  км. Для анализа использовались данные приборов ZDP и MFI с космического аппарата WIND с временным разрешением 3 секунды. Отбор подходящих событий проводился на основе каталога крупномасштабных явлений ИКИ РАН: <http://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/> [1].

Результаты анализа показали, что на исследуемых масштабах отсутствует однозначная антикорреляция относительного содержания гелия и плазменного параметра  $\beta$  как в МС, так и в ЕЖЕСТА, которая была обнаружена ранее на масштабах  $> 10^6$  км [2, 3]. Локальный рост содержания гелия может наблюдаться как при увеличении величины межпланетного магнитного поля, так и при ее уменьшении. В  $\sim 3\%$  случаев наблюдаются области с коэффициентом корреляции  $R > 0.7$  между содержанием гелия и величиной магнитного поля, а в  $\sim 6\%$  - области с антикорреляцией данных параметров  $R$