



ИКИ
ИНСТИТУТ
КОСМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
РАН

XVIII КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ
**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
И ПРИКЛАДНЫЕ
КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**
14 - 16 АПРЕЛЯ 2021, ИКИ РАН, МОСКВА

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Под редакцией А.М. Садовского

НОЦ
НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР ИКИ РАН

МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА

**МОСКВА
2021**

ХVIII КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

”Фундаментальные и прикладные космические исследования”

ИКИ РАН, Москва, 14–16 апреля 2021 г.

Сборник тезисов докладов

Под ред. А.М. Садовского

Конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (<http://kmu.cosmos.ru>), посвященная Дню космонавтики, традиционно проходит в начале апреля. В связи с переносом прошлой конференции на осень возник вопрос, стоит ли проводить Конференцию в 2021 г. Решили, что стоит и не ошиблись. На Конференцию было подано более 140 докладов. В проведение Конференции внесла свои коррективы пандемия Covid-2019: за время пандемии родился так называемый гибридный формат проведения конференций — когда часть докладчиков присутствует в зале, а часть выступает заочно. Как обычно, КМУ проводится Научно-образовательным центром ИКИ РАН. В конференции принимают участие студенты, аспиранты и молодые ученые (до 35 лет), чья деятельность связана с космосом и космическими исследованиями. В 2021 г. Конференция проводится совместно с «Международным космическим форумом, посвященным 60-летию первого полета человека в космос» (МГУ им. М.В. Ломоносова), который проходит в рамках конференции «Ломоносов-2021». «Сборник тезисов Конференции молодых ученых» содержит тезисы, присланные участниками Конференции.

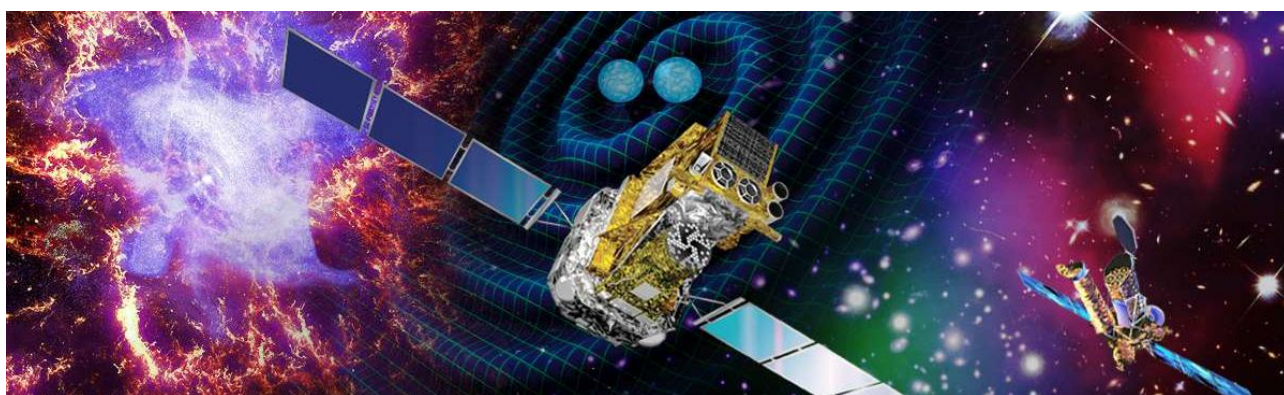
Дизайн обложки: Кораблёва Е.О.

Компьютерная вёрстка: Сапунова О.В.

Оглавление

АСТРОФИЗИКА И РАДИОАСТРОНОМИЯ	4
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ	29
ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНЕТ	66
КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ	91
ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	122
ФИЗИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ	157

АСТРОФИЗИКА И РАДИОАСТРОНОМИЯ



ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ГАММА-ВСПЛЕСКА GRB 201015A И ОБНАРУЖЕНИЕ СВЕРХНОВОЙ, АССОЦИИРОВАННОЙ С НИМ

Белкин С.О.^{1,2}, Позаненко А.С.², Вольнова А.А.²,
Панков Н.С.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"*

² *Институт космических исследований РАН*

На сегодняшний день зарегистрировано более 10000 космических гамма-всплесков (GRBs). И только лишь для примерно 25 из них было получено надежное спектроскопическое подтверждение связи источника гамма-всплеска со сверхновыми (SNe). Это составляет менее 1% от общего числа зарегистрированных GRBs и значительно меньше числа регистрируемых SNe с коллапсирующим ядром. Обнаружение и исследование каждого подобного события до сих пор вносит существенный вклад в изучение связи гамма-всплесков со сверхновыми.

Мы представляем недавние наблюдения GRB 201015A ($z = 0.42$) в оптическом диапазоне, открытие SN, ассоциированной с этим GRB, и ее феноменологическое моделирование. Результаты были получены после обработки и анализа собственных наблюдений в оптическом диапазоне, проведенных в течение полутора месяца после регистрации GRB. Наблюдения были проведены в обсерваториях, входящих в сеть IKI GRB Follow-up Network, включающую в себя телескопы с диаметром главного зеркала 0.7-2.6 м. Сверхновая была подтверждена спектроскопическими наблюдениями на двойном бинокулярном телескопе LBT 8.4 м как сверхновая типа Ic-BL. По итогам моделирования кривой блеска SN были получены некоторые параметры SN 201015A, в том числе абсолютная звездная величина в максимуме ($M_v = -19.4m \pm 0.6$), а также время от начала GRB 201015A до максимума SN (10.5 ± 1.1 дней). Мы обсуждаем дальнейшее моделирование параметров SN и сложности поиска SNe, ассоциированных с GRBs.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ РАЗРЕШЕННАЯ ФУНКЦИЯ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ АККРЕЦИОННЫХ КОЛОНОК БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

Бровкин Н.А., Семена А.Н.

Институт космических исследований РАН

Согласно современным представлениям при аккреции (падении вещества) на магнитные белые карлики и нейтронные звезды движение вещества в окрестности их поверхности происходит вдоль силовых линий магнитного поля, формируя так называемые аккреционные "колодки" или "шторки". Физические размеры этой колонки напрямую влияют на плотность и скорость движения вещества у поверхности аккретора. В свою очередь эти характеристики определяют модель излучения таких аккреторов. Прямое измерение пространственных характеристик аккреционных колонок у нейтронных звезд невозможно ввиду их малых размеров. У белых карликов подобные измерения проводились в затменных системах, но позволяют ограничить размеры основания аккреционных колонок только вдоль одного направления. В этой работе мы обсуждаем еще один модельно зависимый способ измерения плотности вещества и размера аккреционной колонки при помощи измерения временных задержек между кривыми блеска промежуточных поляров в различных энергетических диапазонах.

ОЦЕНКА КОМПАКТНОСТИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД ПО НАБЛЮДАЕМЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ СЛОЕВ РАСТЕКАНИЯ

Долгодров М.С.¹, Семена А.Н.²

¹ *Московский Физико-Технический Институт (национальный исследовательский университет)*

² *Институт космических исследований РАН*

У аккрецирующих нейтронных звезд со слабым магнитным полем аккреция вещества на поверхности происходит через слой растекания - область на поверхности нейтронной звезды, где за счет трения вещество приобретает скорость вращения нейтронной звезды. Используя метод извлечения частотно разрешенных спектров, требуется определить температуру слоя растекания. Благодаря улучшенному набору данных о расстоянии до звезд появилась возможность более точной оценки светимости аккрецирующих нейтронных звезд. В данной работе планируется рассчитать компактность нейтронной звезды, опираясь на информацию о светимости и температуре слоя растекания. Эти измерения позволят получить дополнительные независимые ограничения на уравнения состояния нейтронных звезд.

КАЛИБРОВКА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА "РАДИОАСТРОН" В ДИАПАЗОНАХ 6.2, 18 И 92 СМ В 2015-2019 ГГ.

Ермаков А.Н.¹, Ковалев Ю.А.¹, Васильков В.И.¹,
Виняйкин Е.Н.², Миронова Е.Н.¹, Попов М.В.¹,
Согласнов В.А.¹, Ларионов М.Г.¹, Николаев Н.Я.¹,
Бургин М.С.¹, Ковалев Ю.Ю.^{1,3,4}, Войцик П.А.¹,
Лисаков М.М.^{4,1}, Кутькин А.М.^{5,1}, Алакоз А.В.¹,
Шахворостова Н.Н.¹, Белоусов К.Г.¹, Коваленко А.В.⁶

¹ Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г.Москва, Россия

² Научно-исследовательский радиофизический институт, г.Нижегород, Россия

³ Московский физико-технический институт, г.Долгопрудный, Россия

⁴ Институт радиоастрономии им. Макса Планка, Бонн, Германия

⁵ Институт радиоастрономии (ASTRON), Двингелло, Нидерланды

⁶ Пулковская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, г.Москва, Россия

Представлены результаты мониторинга радиометрических измерений, выполненных в юстировочных сеансах с помощью космического радиотелескопа (КРТ) относительно первичных калибраторов по потоку – остатков Сверхновых Кассиопея-А и Крабовидная туманность. Данные обработаны новой автоматизированной системой, специально предназначенной для обработки и калибровки параметров КРТ по данным юстировочных сеансов (см. устный доклад Ермакова). Для каждого диапазона получены эквивалентные спектральные плотности потока излучения системы (SEFD) и калибровочные амплитуды восьми внутренних генераторов шумового сигнала (ГШ - основные и резервные, в единицах Янских), чтобы их использовать при калибровках наземно-космического интерферометра в каналах правой и левой круговых поляризации.

Основные результаты: 1. Относительно первичных астрономических калибраторов по потоку Кассиопея-А и Крабовидная туманность выполнена калибровка эквивалентных собственных шумов системы космического телескопа и большого количества внутренних калибровочных генераторов шумового сигнала в диапазонах 6.2, 18 и 92 см в каналах левой и правой круговых поляризации. Каждая из этих величин независимо может использоваться для дальнейшей проверки или калибровки КРТ в режимах работы одиночного телескопа или элемента наземно-космического РСДБ в 2015 - 2019 гг. 2. Показано, что собственные шумы системы телескопа, измеренные в 2015 - 2019 годах и откалиброванные относительно Кассиопеи-А, близки к значениям, измеренным в первые годы работы КРТ - в пределах 11% в диапазонах 6.2, 18 см и в пределах 17% в диапазоне 92 см. 3. Выполнено сравнение всех калибровок, проведенных относительно Кассиопеи-А и Крабовидной туманности. Обнаружено систематическое отличие одних и тех же калиброванных величин по этим объектам - в пределах 24 – 35% для собственных шумов и 15 – 55% для некоторых ГШ, в зависимости от диапазона. Возможно, это отличие связано с изменением скорости векового уменьшения потока излучения в Янских для Кассиопеи-А, на что указывают некоторые публикации. Вторая возможная причина - разный вклад фона Галактики от окрестностей этих источников. Требуется дальнейший анализ причин этих отличий.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ КАЛИБРОВОЧНЫХ РАДИОИСТОЧНИКОВ В ПРОЕКТЕ НАЗЕМНО-КОСМИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА "РАДИОАСТРОН"

Ермаков А.Н.

Физический институт им. Лебедева

РадиоАстрон – международный наземно-космический Радиointерферометр со Сверх-Длинными Базами (РСДБ). Работал с июля 2011 по январь 2019 года. Простейший интерферометр состоит из двух зеркал, сводящих лучи от источника света в одну точку, где они интерферируют. В результате замены зеркал на далеко разнесенные антенны с независимой записью сигнала получается РСДБ. Этот принцип и метод РСДБ предложен Л.И. Матвеевко, Н.С. Кардашевым, Г.Б. Шоломицким в 1965 году. Запуск одной антенны в космос приводит к наземно-космическому РСДБ. Для работы в режиме РСДБ нужна калибровка каждой антенны по спектральной плотности потока излучения - в единицах Янских. В докладе представлены результаты разработки новой автоматизированной системы обработки радиометрических данных с космического радиотелескопа (КРТ), внедрения её в АКЦ ФИАН и применения для калибровки КРТ в юстировочных и РСДБ сеансах. Измерены и обработаны собственные шумы системы, а так-же по 8 основным и резервным вторичным эталонам генератора шума (ГШ) в каждом диапазоне. Измерения проводились относительно двух известных источников – Кассиопеи-А и Крабовидной туманности - в первичной астрономической шкале потока в Янских.

Разработанная система состоит из 3 ключевых программ. Первая программа преобразует телеметрическую информацию сеанса в табличный вид (АСОВИСТ – разработана в АКЦ ранее). Вторая - обрабатывает радиометрические отклики на источник, ГШ и собственные шумы системы КРТ. Работу этой программы можно разделить на 3 этапа:

- 1) выделение и загрузка необходимых данных из таблицы, подготовленной первой программой;

- 2) «чистка» данных от коротких импульсных помех в некоторых цифровых каналах, устранение помех выполняется по результатам сравнения с данными в соответствующих аналоговых каналах (в них помехи отсутствуют);

- 3) измерение откликов на источник, ГШ и собственные шумы системы посредством модельной аппроксимации. Уровень собственных шумов аппроксимируется квадратичной функцией, отклики на источник – гауссианами. Коэффициенты функции аппроксимации рассчитываются по методу SVD. Среднее значение и их погрешности – по методике Агеяна как средневзвешенные величины. Третья программа преобразует предыдущие результаты измерений из вольт - в единицы потока в Янских или в единицы антенной температуры в градусах Кельвина по стандартной методике.

Массовая обработка наблюдений за последние 4 года полета КРТ (2015 – 2019 годы) показала, что собственные шумы системы и ГШ в калибровочных сеансах стабильны в пределах погрешности. Проведено успешное тестирование системы - сравнением результатов, полученных как с ее помощью, так и с использованием предыдущих средств экспресс-обработки в интерактивном режиме работы. Программный комплекс показал свою эффективность и высокую скорость обработки. Без всяких изменений его можно использовать при обработке наблюдений в первой половине полета КРТ (2011- 2014 годы). После до-

работки комплекс можно использовать для диапазона 1.35 см. Он может быть применен и для обработки других калибровочных источников, а также в будущих перспективных наземно-космических проектах ("Миллиметрон" и др.).

Подробные численные результаты применения разработанной системы к задаче калибровки КРТ сообщаются в стендовом докладе Ермакова и др.

РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ УТОЧНЕНИЯ ОРБИТ В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА «МИЛЛИМЕТРОН» («СПЕКТР-М»)

Запевалин П.Р., Рудницкий А.Г.

АКЦ ФИАН, г. Москва, Россия

«Миллиметрон» («Спектр-М») - космическая обсерватория миллиметрового, субмиллиметрового и дальнего инфра-красного диапазонов длин волн с охлаждаемым телескопом диаметром 10 м. Обсерватория будет работать в двух режимах – в режиме одиночного телескопа и в составе наземно-космического интерферометра (КРСДБ) совместно с крупнейшими наземными телескопами. Благодаря расположению космической обсерватории в районе точки Лагранжа L2, находящейся на расстоянии в 1.5 млн км от Земли в анти-солнечном направлении, достигается сверхвысокое угловое разрешение, вплоть до сотых долей угловой микросекунды.

С запуском проекта «Радиоастрон» стала очевидной необходимость знания положения КА на высокоапогейных орбитах с высокой точностью. По-этому для успешной работы проекта «Миллиметрон» и для корреляции наблюдений на наземно-космическом интерферометре, также необходимо с максимально высокой точностью определять орбиту КА. Для определения параметров движения «Спектр-М» планируется выполнять траекторные измерения в X-диапазоне с предельными ошибками единичного измерения 0.5 мм/с по радиальной скорости и 20 м по наклонной дальности.

В настоящее время в лаборатории баллистико-навигационного обеспечения АКЦ ФИАН в рамках создания полноценного вычислительного комплекса для решения баллистико-навигационных задач ведутся работы по созданию надежного и точного инструмента по уточнению орбиты КА. Такой инструмент предлагается разрабатывать на основе метода фильтрации Калмана и МНК.

В данном докладе отражен текущий ход работ по созданию программно-математического модуля уточнения орбит. В настоящее время в лаборатории ведется отладка модуля на моделируемых измерениях различного типа, а также его апробация на реальных траекторных измерениях, полученных в ходе работы проекта «Спектр-Р».

К ВОПРОСУ ОБ ОБРАЗОВАНИИ НЕРАВНОВЕСНОГО СЛОЯ В ОБОЛОЧКАХ НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД

Игнатовский А.Ю.^{1,2}, Бисноватый-Коган Г.С.^{1,2,3}

¹ ИКИ РАН

² МФТИ

³ МИФИ

В процессе остывания нейтронных звёзд в их оболочках образовывается слой с неравновесным химическим составом. Неравновесность заключается в избытке нейтронов, в которых запасено достаточное количество ядерной энергии, позволяющей объяснить рентгеновскую светимость этих объектов.

Рассмотрена эволюция оболочки одиночной горячей нейтронной звезды и представлена динамичная модель её эволюции. Благодаря бета-реакциям горячая нейтронная звезда с большой скоростью охлаждается, постепенно и неодновременно закрываются различные каналы ядерных реакций, например, захват протонов ядрами (вероятность туннелирования через кулоновский барьер экспоненциально падает с уменьшением температуры). Сравнительно быстро протекают ядерные реакции захвата нейтронов. При высоких плотностях электроны такого остывшего вещества сильно вырождены и для них работает принцип Паули, позитроны отсутствуют. В зависимости от соотношения между энергией Ферми свободных электронов и энергий бета-распада различного сорта ядер образованные за счёт присоединения нейтронов сверхтяжёлые ядра могут претерпеть либо бета-распад, либо бета-захват. В результате ядра аккумулируются в слое, ограниченном по Z и A .

Программа, написанная на языке Fortran, может найти своё дальнейшее применение в вопросах нуклеосинтеза и g -процесса.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 20-02-00455.

ВЛИЯНИЕ МИКРОЛИНЗИРОВАНИЯ НА КРИВЫЕ БЛЕСКА ГРАВИТАЦИОННО ЛИНЗИРОВАННЫХ СВЕРХНОВЫХ

Круглов А.А.^{1,2}, Лыскова Н.С.^{1,3}

¹ *Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия*

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), Долгопрудный, Россия*

³ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ), Москва, Россия*

В настоящее время значения основных космологических параметров известны с очень высокой точностью. Однако недавно было обнаружено расхождение на уровне значимости примерно 3σ величины постоянной Хаббла, определяющей темп расширения Вселенной в современную эпоху. Для понимания причин этого расхождения необходимо привлечение независимых подходов, способных также с высокой точностью определять фундаментальные космологические параметры. Одной из таких возможностей является использование наблюдений гравитационно линзированных систем, в частности, гравитационно линзированных сверхновых. Точность оценки постоянной Хаббла из наблюдений таких систем напрямую зависит от точности определения временных запаздываний между изображениями источника. Существующие в настоящее время методы анализа кривых блеска линзированных сверхновых не учитывают влияние эффекта гравитационного линзирования на отдельных звездах (микролинзирование), попавших в “конус” зрения, хотя звезды в галактике образуют богатую сеть каустик, что приводит к тому, что наблюдаемые кривые блеска при расширении сверхновых испытывают зависящие от времени усиления/ослабления, уникальные для каждого изображения. Данная работа посвящена изучению влияния микролинзирования на кривые блеска линзированных сверхновых на примере SN Refsdal – первой обнаруженной гравитационно линзированной сверхновой со множественными изображениями. Сверхновая рассматривается в рамках модели расширяющегося диска с профилем поверхностной яркости, заданным распределением Гаусса.

ИЗМЕРЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ФОНА ГАЛАКТИКИ ПО ДАННЫМ СКАНИРУЮЩИХ НАБЛЮДЕНИЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИНТЕГРАЛ

Кузнецова Е.А., Кривонос Р.А.

Институт космических исследований РАН

Природа фонового излучения Галактики до сих пор остается недостаточно хорошо исследованной. Благодаря наблюдениям обсерваторий ИНТЕГРАЛ и RXTE было обнаружено, что рентгеновское излучение Хребта Галактики (GRXE) на энергиях 3-100 кэВ представляет собой суммарное излучение множества слабых дискретных источников – катаклизмических переменных или коронально активных звезд, которые дают существенный вклад на энергиях до 50-100 кэВ. Но в то же время, на более высоких энергиях может стать заметным вклад от частиц космических лучей, взаимодействующих с межзвездной средой.

При изучении фонового излучения Галактики большое количество рентгеновских телескопов сталкиваются с трудностями из-за небольшого поля зрения. Однако, обсерватория ИНТЕГРАЛ обладает достаточным большим полем зрения и способностью для исключения вклада ярких точечных источников, что облегчает измерения фонового излучения Галактики. В данной работе будут представлены результаты сканирующих наблюдений обсерватории ИНТЕГРАЛ, благодаря которым были сделаны оценки рентгеновского фона Галактики.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДВОЙНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ СИСТЕМЫ 4U2206+54 ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ NUSTAR

Матвеев И.Д., Лутовинов А.А.

Институт космических исследований РАН

В работе представлен детальный спектрально-временной анализ излучения от двойной массивной системы 4U2206+54. Впервые была проведена фазовая спектроскопия пульсара в широком энергетическом диапазоне 3-78 кэВ и осуществлен поиск циклотронной особенности не только на среднем спектре, но и в спектрах на разных фазах вращения пульсара.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНА АНТИСОВПАДАТЕЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ SPI-ACS КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ INTEGRAL

Мозгунов Г.Ю.^{1,2}, Позаненко А.С.^{1,2}, Минаев П.Ю.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт (ГУ)*

Проведено исследование параметров фонового сигнала и его моделей на основе данных детектора SPI-ACS/INTEGRAL. Анализировались фоновые интервалы около 800 космических гамма-всплесков, зарегистрированных SPI-ACS. Для каждого из них проводилась аппроксимация полиномом различной степени, а также вычислялись выборочное среднее, дисперсия, длина интервала аппроксимации, а также максимальное относительное отклонение модели фона от среднего значения. Оптимальной моделью фона оказался полином 3-ей степени; Подтверждено отклонение фона от пуассоновского распределения; выборочная дисперсия систематически больше среднего значения. Обнаружена значимая корреляция между отношением дисперсии к среднему и среднемесячным числом Солнечных пятен. Обнаружена задержка между значением фона и Солнечной активностью около 0.8 лет.

Обнаружена антикорреляция между уровнем фона и среднемесячным числом солнечных пятен. Данный факт свидетельствует о том, что значительную роль в формировании фонового сигнала играют галактические космические лучи. Проведено исследование максимального отклонения значения фона от среднего на различных временных интервалах.

ВЫДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТ В ВИЗУАЛЬНО-КРАТНЫХ СИСТЕМАХ В ЗАДАЧЕ ПОТОКОВОГО ПОИСКА ОПТИЧЕСКИХ ТРАНЗИЕНТОВ В ШИРОКОУГОЛЬНЫХ ОБЗОРАХ НЕБА

Панков Н.С.^{1,2}, Позаненко А.С.^{1,2}, Куприянов В.В.^{3,4}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *НИУ "Высшая школа экономики"*

³ *University of North Carolina at Chapel Hill*

⁴ *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН*

Визуально-кратные системы составляют значительную часть объектов на снимках при проведении широкоугольных обзоров с целью поиска оптических транзиентов связанных, например, с космическими гамма-всплесками и с электромагнитными компонентами (килоновыми) гравитационно волновых источников LIGO/Virgo/KAGRA. Поиск оптических транзиентов такого типа необходимо проводить в режиме времени, наиболее приближенным к реальному. Создание автоматизированного программного конвейера поиска и классификации транзиентов включает в себя несколько задач, одной из которых является разрешение визуально-кратных систем.

Мы обсуждаем реализацию алгоритма Multithreshold Deblending (Bertinl, E. 1996), предназначенного для разрешения визуальных систем и оценки его производительности в составе автоматизированного программного конвейера для поиска и классификации транзиентов в среде с программным ядром APEX II (Kouprianov, V. 2012).

КЛАССИФИКАЦИЯ КВАЗАРОВ С БОЛЬШИМ КРАСНЫМ СМЕЩЕНИЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Писаренко А.Р.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт*

Работа посвящена поиску квазаров на $z > 5$, что соответствует возрасту Вселенной примерно до одного миллиарда лет.

Наблюдаемые на больших красных смещениях квазары обнаруживают противоречия в стандартных сценариях образования и роста черных дыр. В настоящее время открыто уже много квазаров с $z > 5$, содержащих в себе черные дыры массой более миллиарда солнечных. Существование таких квазаров, которые возникли, когда Вселенная была моложе одного миллиарда лет, поднимает вопросы об авторитетности известных способов формирования черных дыр.

Поиск квазаров на больших красных смещениях позволит больше узнать о ранних этапах формирования Вселенной и пролить свет на сценарии образования черных дыр.

В работе для обучения и тестирования моделей используются фотометрические данные из обзоров неба SDSS DR14, Pan-STARRS1 DR2 и DESI LIS DR8.

ЗАВИСИМОСТЬ АКТИВНОСТИ СВЕРХМАССИВНОЙ ЧЕРНОЙ ДЫРЫ ОТ МАССЫ ЗВЕЗДНОГО НАСЕЛЕНИЯ РОДИТЕЛЬСКОЙ ГАЛАКТИКИ В БЛИЗКОЙ ВСЕЛЕННОЙ

Прохоренко С.А.^{1,2}, Сазонов С.Ю.¹

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва*

Среди галактик нашей Вселенной можно выделить галактики с активным ядром (активные ядра галактик, АЯГ), то есть имеющие особую область в центре, где происходят процессы с выделением большого количества энергии. По современным представлениям, активность вызывается аккрецией вещества на сверхмассивную черную дыру (СМЧД) в центре галактики. Известно, что в большинстве, если не во всех, галактиках с балджем, то есть с центральным вздутием, состоящим из компактно спрессованных звезд, есть СМЧД. При этом лишь небольшой процент таких галактик можно назвать активными, и причина, почему в некоторых случаях процессы вблизи СМЧД обеспечивают высокое энерговыделение, а в других нет, остается неизвестной. Также актуальным является вопрос о связи темпа аккреции на СМЧД со звездообразованием и другими процессами в родительской галактике. Целью проведенной работы явилось изучение зависимости между массой звездного населения галактики и активностью ее СМЧД для ближней Вселенной (на красных смещениях $z < 0.2$).

Данные инфракрасных обзоров позволяют дать хорошую оценку массы звезд галактики из-за корреляции между этой величиной и светимостью галактики в ИК диапазоне. Рентгеновский и гамма диапазоны подходят для изучения процессов происходящих в АЯГ. Такое высокочастотное излучение практически не подвержено поглощению, что позволяет определять некоторые характеристики исследуемых активных ядер практически напрямую. Обзоры всего неба в инфракрасном и рентгеновском (или гамма) диапазонах позволяют отождествить большое количество ярких источников из близкой Вселенной и делать оценки для значительного объема, усредняя возможные неоднородности. Исходя из этого, было проведено исследование на основе данных наиболее полных и однородных на данный момент каталогов галактик с красными смещениями 2MRS и 2MPZ, которые составлены из галактик обзора 2MASS. В качестве рентгеновского каталога было решено взять 105-месячный обзор телескопа SWIFT-BAT. После проведения кросс-корреляции между указанными каталогами была составлена однородная подвыборка АЯГ с $z < 0.2$ для области неба, лежащей вне галактической плоскости. На основе этих данных были построены функции светимости для соответствующих диапазонов, а также распределения темпов аккреции АЯГ подвыборки в разных диапазонах массы звезд родительской галактики. В случае, когда отсутствовала точная оценка для массы черной дыры, бралась оценка по корреляции этой массы с массой балджа галактики. Изучение этих распределений позволило несколько углубить знания об активности ядер в галактиках разной массы.

ГАММА-ИСТОЧНИК НАWC J2019+368: ВОЗМОЖНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЯ НА АСТРОФИЗИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ TAIGA

Разумов А.Ю., Кузьмичёв Л.А.

Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Скобелъцына

В 2021 году планируется завершить развертывание пилотного комплекса TAIGA, состоящего из 120 широкоугольных (0.6 стер.) оптических станций TAIGA-HiSCORE на площади 1 км² и 3 атмосферных черенковских телескопов (АЧТ) с анализом изображения – TAIGA-IAST. Одним из источников, наблюдения которого на комплексе TAIGA ведутся с лета 2020 г., является источник НАWC J2019+368, входящий в наиболее интенсивную область созвездия Лебедь в диапазоне гамма-лучей с энергией $E > 20$ ТэВ. В докладе приводится описание комплекса, методов регистрации гамма-квантов высоких энергий. Приведены оценки числа событий телескопа, вызванных каскадным процессом в атмосфере энергичным гамма-квантом от источника НАWC J2019+368 за один сезон наблюдения (2020-2021).

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ПУЛЬСАРА ХТЕ J1859+083 В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ

Салганик А.¹, Цыганков С.С.^{2,3}

¹ *Санкт-Петербургский государственный университет*

² *Университет г. Турку, Финляндия*

³ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

Транзиентный рентгеновский пульсар ХТЕ J1859+083 с периодом пульсаций 9.8 секунд впервые был обнаружен в августе 1999 года с помощью прибора РСА на борту обсерватории RXTE. После этого источник не наблюдался. В феврале 2015 года произошла вспышка ХТЕ J1859+083 в рентгеновском диапазоне, которая наблюдалась обсерваторией NuSTAR. В докладе приведены результаты подробного спектрального и временного анализа свойств источника в широком диапазоне энергий. На основании полученных данных делаются выводы о физических характеристиках нейтронной звезды и двойной системы.

АНАЛИЗ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ РЕНТГЕНОВСКИХ БАРСТЕРОВ

Сатыбалдиев М.Н.^{1,2}, Мереминский И.А.²

¹ *Московский физико-технический институт*

² *Институт космических исследований РАН*

Маломассивные рентгеновские двойные системы - интересный класс объектов, изучение которых важно для множества отраслей современной физики - от звездной эволюции до ядерной физики. Однако исследовать эти системы непросто - даже для самых давно известных и ярких из них зачастую неизвестны даже самые основные характеристики, например орбитальный период.

Одним из интересных явлений, происходящих в таких системах являются рентгеновские всплески I-го типа - термоядерные взрывы происходящие на нейтронных звездах. Вещество, аккрецируемое на нейтронную звезду со звезды компаньона, накапливается на поверхности, и, при превышении некоторого критического значения плотности и температуры, происходит термоядерный взрыв. С конца 1970-х было найдено около сотни таких систем-барстеров, причем для некоторых из которых накоплены выборки из сотен вспышек.

В данной работе был выполнен поиск периодичностей во временах приходов всплесков из каталогов MINBAR (Галлоуэй и др., 2020) и каталога термоядерных вспышек, зарегистрированных обсерваторией ИНТЕГРАЛ (Человеков и др., 2017). Для поиска использовалась реализация алгоритма epoch folding ("складывание фаз"), адаптированная к данной задаче. В докладе будут представлены результаты анализа выборок вспышек для избранных систем, а также будут рассмотрены процессы которые могут приводить к появлению периодичностей в этих выборках.

ПОСТРОЕНИЕ НОМИНАЛЬНОЙ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН» В ТОЧКЕ ЛАГРАНЖА L2 И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕЛЕТА НА ОКОЛОЗЕМНУЮ ОРБИТУ

Сячина Т.А.¹, Мжельский П.В.^{1,2}, Рудницкий А.Г.¹

¹ *Астрокосмический центр Физического института им. П.Н.Лебедева РАН (АКЦ ФИАН)*

² *НПО им. С.А. Лавочкина*

Обсерватория «Миллиметрон» («Спектр-М») – 10-метровый космический телескоп, создаваемый для проведения наблюдений в широком диапазоне длин волн электромагнитного спектра – от дальнего ИК до миллиметрового. «Миллиметрон» будет способен выполнять научные наблюдения в двух режимах: режиме одиночного телескопа и режиме наземно-космического интерферометра (КРСДБ). Данный режим предоставляет возможность проведения наблюдений с высоким угловым разрешением вплоть до 10⁻⁸ угловых секунд дуги.

Выбор орбиты космического радиоинтерферометра Миллиметрон – сложная и нетривиальная задача. Основная сложность заключается в необходимости проведения наблюдений в двух режимах, которые затруднительно сочетать при выборе орбиты. Чтобы полностью реализовать возможности этих режимов, возникает необходимость рассмотреть различные орбиты для нахождения оптимальной траектории. Для учета требований по охлаждению аппаратуры телескопа, выполнения научной миссии в режиме одиночного зеркала для космического аппарата была выбрана гало-орбита, расположенная в окрестностях точки Лагранжа L2 системы "Солнце-Земля". Для выполнения научных задач режиме КРСДБ рассматривалась высокоэллиптическая орбита вокруг Земли.

В данной работе описывается методика проведения расчета номинальной траектории аппарата в точке L2 с учетом гравитационного влияния Солнца, Земли и Луны и нецентральности земного поля. Проанализирована возможность схода с орбиты в точке Лагранжа на высокоэллиптическую орбиту вокруг Земли.

АНАЛИЗ РЕНТГЕНОВСКИХ СПЕКТРОВ АЯГ ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ СРГ

Усков Г.С., Сазонов С.Ю.

Институт космических исследований РАН

Для яркой выборки АЯГ с $F_x > 1e-11$ эрг/с/см² по данным рентгеновских телескопов eROZITA и ART-XC им. М.Н.Павлинского обсерватории СРГ были определены основные спектральные параметры.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ УКАЗАНИЕ НА ВОЗМОЖНУЮ АСИММЕТРИЮ В ГАММА-ИЗЛУЧЕНИИ МЕЖДУ ПОЛУШАРИЯМИ ТЕМНОГО ГАЛО ГАЛАКТИКИ М31

Шлепкина Е.С., Белоцкий К.М.

Национальный Исследовательский Ядерный Университет "МИФИ"

Проблема скрытой массы во Вселенной, составляющей около 25%, в современной астрофизике и космологии является ключевой для понимания многих процессов как в ранней, так и в современной Вселенной. Распад или аннигиляция частиц скрытой массы может быть причиной так называемой "позитронной аномалии" (или эффекта ПАМЕЛЫ), которая характеризуется избытком высокоэнергетичных позитронов (100 ГэВ и выше) в космических лучах.

Если распад/аннигиляция частицы скрытой массы, действительно, вызывает наблюдаемый избыток позитронов, то всюду в галактическом темном гало любой галактики будут возникать e^+/e^- высоких энергий. Это приведет к появлению сигнала в виде высокоэнергетического гамма-излучения, создаваемого обратным комптоновским рассеянием (ICS). Процесс ICS на таких электронах/позитронах может указать на некоторую асимметрию в потоке гамма-излучения между полушариями галактики.

В данной работе рассматриваются теоретические указания для такого эффекта, для чего была выведена и обобщена методика расчета спектров ICS фотонов, а также приводятся первые оценки возможной асимметрии в гамма-излучении от разных полушарий от ближайшей к нам галактики М31.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ БЫСТРОВРАЩАЮЩИХСЯ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД ПО ДАННЫМ ОБСЕРВАТОРИИ NICER

Шульгин В.П.

Московский физико-технический институт (МФТИ)

Описываются основные процессы, связанные с эволюцией одиночных нейтронных звезд: охлаждение, затухание магнитного поля, эволюция периодов вращения, магнитосферные процессы, аккреция на примере данных с космической обсерватории NICER.

ВОЗМОЖНОСТИ РСДБ НАБЛЮДЕНИЙ ИСТОЧНИКА М87 В ПРОЕКТЕ «МИЛЛИМЕТРОН» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЛО-ОРБИТЫ

Щуров М.А.¹, Запевалин П.Р.¹, Мжельский П.В.^{1,2},
Рудницкий А.Г.¹, Сячина Т.А.¹

¹ Астрокосмический центр ФИАН

² НПО им. С.А. Лавочкина

В настоящее время весьма актуальным является изучение астрономических объектов различных типов при помощи методов радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Наблюдения на интерферометрах, как наземных, так и наземно-космических, позволяют получать изображения наблюдаемых объектов со сверхвысоким разрешением, восстановить их тонкую структуру и уточнить физические параметры.

Одним из самых известных проектов, работавших по принципу РСДБ, является проект "Радиоастрон". Он позволил уточнить модель рассеяния электромагнитного излучения в межзвёздной среде для длинноволнового диапазона. Логическим продолжением проекта "Радиоастрон" является обсерватория "Миллиметрон". Перечень задач его научной программы достаточно обширен и в него входят задачи, которые будут выполняться как в режиме работы одиночного зеркала, так и в режиме РСДБ. В частности, при помощи обсерватории "Миллиметрон" в режиме РСДБ планируется восстановить детальное изображение сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики М87, а также попытаться обнаружить в этом источнике фотонные кольца.

Следует отметить, что в силу ряда специфических особенностей миссии, таких, как, например, ограничения на засветку главного зеркала телескопа Солнцем, охлаждение аппаратуры телескопа и требования к орбите для выполнения научной миссии в режиме одиночного зеркала, для космического аппарата была выбрана гало-орбита, расположенная в окрестностях точки Лагранжа L2 системы "Солнце-Земля". Такая орбита удовлетворяет всем требованиям научной миссии, однако также накладывает ряд ограничений на проведение наблюдений в режиме РСДБ. Поскольку РСДБ наблюдения с космическим радиотелескопом, находящимся на орбите вокруг точки L2 будут проводиться впервые, то очевидна необходимость выполнить моделирование таких наблюдений. Таким образом можно получить информацию о возможностях миссии "Миллиметрон" (и других похожих аппаратов) в таком режиме работы.

В докладе представлены первые результаты моделирования РСДБ наблюдений источника М87 для наземно-космического интерферометра, состоящего из наземной группы телескопов сети Event Horizon Telescope (ЕНТ) и космического телескопа "Миллиметрон" находящегося на гало-орбите в окрестности точки либрации L2 системы "Солнце-Земля". Для моделирования была найдена такая орбита обсерватории, чтобы получить набор проекций баз интерферометра в диапазоне от 1 до 40 диаметров Земли. Выход аппарата на этой орбите из плоскости эклиптики составляет 400 тыс. км. При интегрировании орбиты учтены такие факторы, как центральное гравитационное поле Земли, нецентральность гравитационного поля Земли, притяжение Солнца, Луны и ряда других крупных тел Солнечной системы (Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун и Плутон). Интегрирование орбиты производилось методом Рунге-Кутты порядка 7(8). При использованных модели сил и методе интегрирования погрешность прогноза положения косми-

ческого аппарата на орбите составляет менее метра за один период, погрешность прогноза скорости - менее 1 см/сек за один период.

Для выбранной конфигурации интерферометра было построено UV-заполнение на период 16 суток, охватывающий диапазон проекций баз от 1 до 16 диаметров Земли. Время когерентности было выбрано равным 10 секунд.

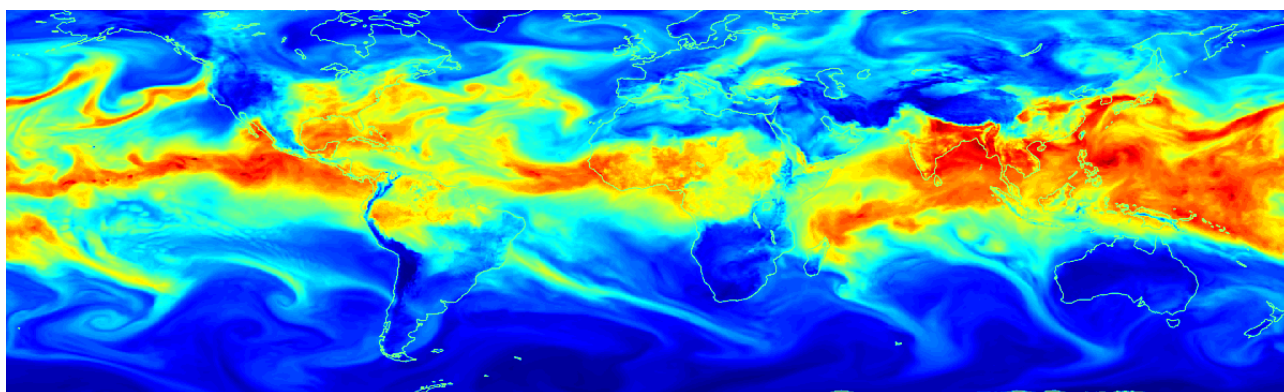
Для моделирования результатов РСДБ была использована сложная магнитогидродинамическая (МГД) модель сверхмассивной чёрной дыры, расположенной в центре галактики M87 размером 40x40 мсек на частоте 230 ГГц с хорошо согласованным потоком от аккреционного диска и фотонных колец. Рассеяние электромагнитного излучения на межзвёздной среде и переменность источника не учитывались, поскольку целью построения изображения в данной работе было только воссоздание кольцевой структуры и обнаружение осцилляций в зависимости амплитуды функции видности от проекции базы.

Для восстановления итогового изображения использовался классический метод CLEAN с Лоренцевым ядром и Лоренцевской функцией Тэйперинга. Восстановление изображения проводилось модифицированным лучом размером 6x6 мсек, чтобы избежать сверхразрешения за счёт присутствия больших проекций баз.

По результатам моделирования показано, что при заданных параметрах удаётся восстановить изображение источника, отражающее его кольцевую структуру. На графике зависимости амплитуды функции видности от проекции базы при базах более 10-ти диаметров Земли обнаруживаются осцилляции, отвечающие за присутствие фотонных колец, однако величина их потока в данном конкретном случае ниже чувствительности телескопа.

Таким образом, показано, что наблюдения в режиме РСДБ обсерватории “Миллиметр” на орбите в окрестностях точки L2 возможны и реализуемы, они позволяют выполнить поставленные перед обсерваторией научные задачи. Следует отметить, что для повышения вероятности и количества успешных измерений необходимо дополнительно проработать методику обнаружения осцилляций и варьировать ряд параметров при восстановлении изображения источника.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ



ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ LAI ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАПАСА СТВОЛОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ

Барталев С.А.^{1,2}, Ворушилов И.И.^{1,2}, Егоров В.А.^{1,2},
Шабанов Н.В.¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

² *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*

Построение взаимосвязи между яркостными характеристиками снежного покрытия лесных участков, полученными по данным Terra-MODIS, и опорными данными величин запасов стволовой древесины (Globbiomass project) позволяет оценивать запас стволовой древесины в зимний период времени на территории России при условии наличия устойчивого снежного покрова. Для территорий с нестабильным снежным покровом применимость данного метода становится ограниченной. Данное исследование представляет собой развитие предшествующих работ по построению набора опорных данных для оценки запаса стволовой древесины с использованием данных Terra-MODIS и оценке запаса стволовой древесины. Цель данной работы – оценить возможность применения величин индекса листовой поверхности LAI (Барталев и др., 2016), полученного в летний период наблюдений, в задаче оценки запаса стволовой древесины.

Исходя из поставленной цели, исследование было направлено на построение калибровочных зависимостей величин запасов для групп лесных пород на основе LAI, а также исследование полученных калибровочных кривых. Также специально был разработан алгоритм фильтрации для калибровочных кривых, полученных на основе этих данных. Использование оценки стволовой древесины на основе данных LAI, предполагается применять для бесснежных участков лесного покрытия.

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.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОЗЕР В ЗОНАХ ДОБЫЧИ НЕФТИ И ГАЗА С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Белов Я.¹, Кашницкий А.В.²

¹ Факультет Космических Исследований МГУ

² Институт Космических Исследований РАН

Исследование посвящено проблеме изменения окраса озер в районах добычи нефти и газа на территории России. Проблему можно определить следующим образом: на основе анализа спутниковых данных в регионах добычи полезных ископаемых было отмечено существенное изменение цветности многих озер. В рамках проводимого исследования необходимо решить задачу по выявлению причин таких изменений. Также необходимо разработать методику их детектирования и независимого выявления их причин на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В будущем предполагается на основе этого метода создание системы независимого дистанционного контроля и отслеживания состояния озер в указанных районах. В качестве основной информации предполагается использовать серии спутниковых данных высокого пространственного разрешения систем Landsat/Sentinel-2.

В работе был выполнен обзор и выявлены две группы факторов, которые могут повлиять на изменение цвета озер. К антропогенным факторам можно отнести выбросы нефти, образование сифонов во время разработки скважины, использования вод и озер в качестве закрытых коллекторов во время бурения скважин, слив отходов или сточных вод с территорий свалок. К природным факторам можно отнести такие явления как цветения фитопланктона, таяние вечной мерзлоты, изменения в результате естественных химических процессов, таяние льдов или вымывание горных пород в результате дождей.

В докладе рассказывается об указанных основных факторах и способах определения их по данным ДЗЗ. Приводятся примеры изменений цвета озер по спутниковым данным и обсуждаются намеченные пути решения описанной проблемы.

Получение и обработка спутниковых данных были выполнены с помощью возможностей Центра коллективного пользования ИКИ-Мониторинг [1], развиваемого при поддержке Минобрнауки (тема «Мониторинг», госрегистрация №01.20.0.2.00164).

Литература:

[1] 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.

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ВЫГОРЕВШИХ ПЛОЩАДЕЙ В ПОЙМЕННЫХ ЛАНДШАФТАХ НИЖНЕЙ ВОЛГИ

Берденгалиева А.Н.^{1,2}, Иванов Н.М.²,
Шинкаренко С.С.^{1,3}

¹ *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН*

² *Волгоградский государственный университет*

³ *Институт космических исследований РАН*

Пожары являются одним из самых опасных природных бедствий. Огонь выступает в роли экологического фактора, сильно влияющего на растительный покров. Пирогенное воздействие является разновидностью антропогенной деятельности – намеренное выжигание растительности используется в хозяйственной деятельности. Но зачастую процесс проведения сельскохозяйственных палов выходит из-под контроля, и огонь быстро захватывает окрестные территории естественных ландшафтов. Значительно ухудшает положение несоблюдение людьми правил пожарной безопасности и безответственное поведение в обращении с огнем. Несмотря на все предпринимаемые меры по недопущению и ликвидации пожаров ситуация из года в год остается напряженной. И главной причиной такого положения является несомненный рост антропогенной нагрузки.

Для пойменных ландшафтов Нижней Волги, включая территории дельты и Ильменно-бугрового района, является весьма актуальной проблема катастрофических последствий от пожаров, произошедших как по естественным причинам, так и в результате антропогенной деятельности. Лесным пожарам посвящается достаточно много исследований, травяные пожары изучены хуже, а пожарам в интразональных ландшафтах речных долин уделяется еще меньше внимания исследователей.

Работа основана на визуальном экспертном дешифрировании спутниковых изображений Landsat 5, 7 и 8, Sentinel 2 для идентификации выгоревших площадей за 2001-2020 гг. Кроме спутниковых изображений использовались данные детектирования активного горения FIRMS, а также информационные продукты выгоревших площадей MCD64A1 и FireCCI51. Всего идентифицировано более 20 тыс. гарей, более 75% которых приходятся на март и апрель – период весенних палов тростниковой растительности в пойменных ландшафтах. В результате установлены пространственно-временные закономерности динамики выгоревших площадей в пойме и дельте Нижней Волги за 2001-2020 гг., а также повторяемость пожаров на данной территории.

Пойма Нижней Волги подразделяется на четыре гидролого-геоморфологических района: 1 – от Волгоградского г/у до р.п. Черный Яр, 2 – от р.п. Черный Яр до верховий дельты, 3- дельта Волги, 4 – Ильменно-бугровой район. В первых трех районах за период исследований выгорело всего 45 – 50% территории, на подstepных ильменах – 22, 5%. Наибольшей горимостью характеризуется дельта Волги, первый и второй гидролого-геоморфологические районы практически не отличаются по доле выгоревших площадей. Наименьшая горимость отмечена в подstepных ильменах. Это связано с худшими условиями обводнения, большой площадью зональных ландшафтов на бэровских буграх. В следствие чего, здесь менее продуктивные растительные сообщества, и требуется намного больше времени на накопления достаточного для возникновения и распространения пожаров количества мортмассы.

Полученные результаты и картографические слои локальной ГИС могут использоваться администрациями ООПТ Нижней Волги при разработке и оптимизации противопожарных мероприятий, для мониторинговых исследований растительных смен после пожаров и других природоохранных и научных работ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ОБРАБОТКИ ОПТИЧЕСКИХ И ЛИДАРНЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЗЗ ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ВЫСОТЫ ЛЕСНОГО ПОКРОВА

Богодухов М.А.^{1,2}, Барталев С.А.^{1,2}, Ворушилов И.И.^{1,2},
Жарко В.О.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН*

В последнее время становятся доступными всё больше спутниковых лидарных данных. Такие системы, как GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) на борту МКС и ICESat-2 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite 2), оснащенные лазерными альтиметрами, способны выполнять прямые измерения высоты объектов земной поверхности на больших территориях, и в частности получать информацию о вертикальной структуре растительности. В отличие от оптических спутниковых данных, спутниковые лидарные системы не обеспечивают сплошное покрытие данными. В докладе исследуется возможность совместного использования продуктов обработки спутниковых лидарных данных ICESat-2 и оптических спутниковых данных MODIS для картографирования высоты лесного покрова на территории России.

Стандартный набор данных ATL08 лазерного альтиметра ATLAS/ICESat-2 содержит информацию о вертикальной структуре растительности (Neuenschwander et al., 2020). Кроме того, каждое измерение сопровождается информацией о неопределенности оценки. В докладе представлен метод обработки указанных данных, позволивший сформировать продукт со средней высотой лесного покрова в виде растрового изображения с пространственным разрешением данных MODIS (230 м). При формировании набора данных учитывается информация о точности каждого лидарного измерения в пределах пикселей растра, а наименее достоверные измерения подвергаются фильтрации. Кроме того, в качестве сопровождающего к растру с информацией о средней высоте лесного покрова формируется растр с уровнем неопределенности оценки данной величины на уровне пикселя.

Полученный набор данных используется для исследования зависимостей между средней высотой лесного покрова по данным ICESat-2 и его отражательной способностью в красном и ближнем ИК диапазонах в условиях наличия снежного покрова на основе зимних композитных изображений по данным MODIS. Также используется карта удельных запасов стволовой древесины, полученная по данным MODIS (Ворушилов и др., 2020), для оценки зависимости между высотой леса и запасом. Для изучения указанных зависимостей в разрезе различных типов леса используются карта растительности России и карта преобладающих древесных пород, разработанные в ИКИ РАН на основе данных MODIS (Барталев и др., 2016). Полученные результаты показывают наличие выраженных зависимостей между средней высотой лесного покрова и отражательной способностью/запасом. При этом указанные зависимости значительно изменяются для различных групп пород леса и территорий произрастания.

Таким образом, сформированный набор данных имеет потенциал к использованию в качестве обучающей выборки для картографирования средней высоты лесного покрова на территории России на основе продуктов обработки оптических данных MODIS с использованием разработанного в ИКИ РАН локально-адаптивного подхода (Bartalev et al., 2014).

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ № 19-77-30015 «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». Обработка данных ДЗЗ в рамках проведенных исследований выполнялась с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019).

Литература:

[1] Bartalev S., Egorov V., Loupian E., Khvostikov S. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 5. Iss. 1. P. 55-64.

[2] Neuenschwander, A. L., K. L. Pitts, B. P. Jelley, J. Robbins, B. Klotz, S. C. Popescu, R. F. Nelson, D. Harding, D. Pederson, and R. Sheridan. 2020. ATLAS/ICESat-2 L3A Land and Vegetation Height, Version 3. Subgroup: Vegetation Parameters. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL08.003>.

[3] 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. 208 с.

[4] Ворушилов И.И., Барталев С.А., Егоров В.А. Развитие метода оценки запасов стволовой древесины с использованием данных Terra-MODIS // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН, 2020. С. 305. DOI 10.21046/18DZZconf-2020a

[5] 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., Сычуглов 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.

ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА ДАННЫХ ОБ ИСПАРЕНИИ И НАКОПЛЕННОМ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ УЩЕРБЕ В СИСТЕМЕ BEGA-SCIENCE

**Бриль А.А., Кашницкий А.В., Мазуров А.А.,
Константинова А.М.**

Институт Космических Исследований РАН, Москва, Россия

Наблюдение за состоянием растительных экосистем является одной из основных задач мониторинга окружающей среды. Различные неблагоприятные природные и антропогенные воздействия на растительный покров требуют оценки последствий их влияния на растительные экосистемы. Характеристикой состояния жизнедеятельности растительности является испарение на верхней границе растительного покрова. Для получения сравнительной количественной характеристики состояния однотипных растительных экосистем и оценки возможного ущерба от негативного воздействия внешних факторов может быть использован термодинамический подход к описанию состояния таких систем, предложенный в [1]. На основе статистического анализа эвапотранспирации по данным ДЗЗ возможно построение карт показателя экологического вреда лесных экосистем и их последующего анализа.

Доклад посвящен реализованной в ИКИ РАН технологии, позволяющей в информационной системе Vega-Science проводить анализ состояния растительных экосистем по картам скоростей испарений (эвапотранспирации) спутников TERRA и AQUA (MODIS) [2,3]. Получение и обработка спутниковых данных были выполнены с помощью возможностей Центра коллективного пользования ИКИ-Мониторинг [4], развиваемого при поддержке Минобрнауки (тема «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164). Приведены примеры анализа многолетней динамики влияния предприятий освоения недр на окружающие лесные экосистемы.

Литература:

[1] Горный В.И., Киселев А.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т.16 № 4. С 124-136

[2] Running, S., Q. Mu, M. Zhao. MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. 2017, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2.006>.

[3] Running, S., Q. Mu, M. Zhao. MYD16A2 MODIS/Aqua Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. 2017, distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, <https://doi.org/10.5067/MODIS/MYD16A2.006>.

[4] 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., Сычуглов 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.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ПРИВЯЗКИ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ, ПОСТУПАЮЩИХ С МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Волкова Е.Е.¹, Бурцев М.А.²

¹ Факультет Космических Исследований МГУ

² Институт Космических Исследований РАН

Количество информации, поставляемой спутниками дистанционного зондирования Земли, неуклонно растёт. К настоящему времени объёмы накопленных архивов достигли петабайтных масштабов. Быстрая и качественная обработка спутниковой информации невозможна без автоматизации процесса.

В работе используются данные эксперимента «Ураган», проводимого для наблюдения за подверженными стихийным бедствиям районами Земли. Эксперимент проводится на борту Международной космической станции (МКС) и позволяет более оперативно реагировать на опасные явления и их последствия.

Целью работы является подготовка снимков, полученных с МКС, к применению наравне с данными других космических аппаратов. Задача – поиск и разработка программного решения для автоматизации привязки спутниковой информации. Для этого требуется грубо привязать снимок, определив подспутниковую точку в момент съёмки, найти подходящее опорное изображение в архивах и точно привязать исходный снимок к опорному, предварительно их улучшив, а затем осуществив поиск контрольных точек и их сопоставление. Работа выполняется на языке программирования Python.

Для грубой географической привязки производится поиск координат подспутниковой точки, исходя из времени, полученного из метаданных снимка, а также TLE МКС на это время.

Опорное изображение подбирается из архивов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с учётом грубой привязки исходного изображения и полученной в ходе работы оценки её точности, вычисленной с помощью усреднения модуля разности координат точной привязки и подспутниковой точки для снимков, привязанных ранее.

Для уточнения первичной привязки используются различные алгоритмы поиска и описания контрольных точек (в том числе ORB, BRISK, FREAK и SIFT) на имеющемся опорном изображении и на исходном, полученном с МКС, а также дополнительные преобразования для лучшей корреляции этих снимков друг с другом.

Работа содержит описание разрабатываемого программного модуля, технические особенности и последовательность предполагаемых шагов, а также промежуточные результаты и дальнейшие перспективы реализации.

Работа выполняется с использованием ресурсов ЦКП "ИКИ-Мониторинг".

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПОДГОТОВКИ КОСМОНАВТОВ К ВЫПОЛНЕНИЮ ВИЗУАЛЬНО-ИНСТРУ- МЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ С БОРТА РС МКС

Дедкова Е.В., Юрченко Е.С.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина», Звездный городок

Визуально-инструментальные наблюдения (ВИН) являются особым видом деятельности космонавтов на борту пилотируемого космического аппарата. Программа визуально-инструментальных наблюдений (ВИН), осуществляемая на российском сегменте Международной космической станции (РС МКС), включает в себя целый ряд задач, связанных, прежде всего, с наблюдением природных и антропогенных объектов, явлений происходящих в космосе, атмосфере, на земной и океанической поверхностях. Процесс ВИН, в том числе и с борта пилотируемого космического корабля, включает операции поиска, обнаружения и наблюдения объектов (в данном случае подстилающей поверхности) невооруженным глазом и с помощью оптических средств, расширяющих возможности зрительного анализатора космонавта [1,2].

Как показали исследования в области опознавания объектов с борта ПКА, наибольшие трудности при выполнении задач связанных с ВИН космонавты испытывают в первом космическом полете. Поиск объекта, находящегося на земной поверхности, при высоте полета пилотируемого космического корабля 400 км, представляет достаточно сложную задачу и нередко для практического изучения особенностей местности по трассам полета, выработки навыков уверенного ориентирования требуется временной интервал до двух месяцев от начала полета. В целях минимизации сроков выработки навыков ориентирования при поиске объектов наблюдения и выполнения ВИН на высоком профессиональном уровне требовалось проведение соответствующей предполетной подготовки космонавтов.

С этой целью в ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» создан стенд «Тренажер ВИН». Его применение в подготовке позволило существенно расширить обучающие свойства ТСПК и обеспечить подготовку космонавтов к выполнению ВИН на высоком профессиональном уровне.

При разработке стенда «Тренажер ВИН» были применены современные информационные ресурсы и технические средства.

Структурно стенд представляет собой три функциональные зоны, объединенные единым информационным пространством: зона тренировки; лекционная зона; методическая зона.

Функционирование стенда обеспечивает комплекс информационных и программно-аппаратных средств, включающий в себя:

- цифровую визуальную модель Земли;
- систему хранения данных;
- систему управления тренировкой;
- информационную систему сопровождения подготовки космонавтов.

При разработке стенда «Тренажер ВИН» были максимально учтены факторы, влияющие на выполнение ВИН с борта РС МКС:

1. Влияние условий полёта на выполнение ВИН.
2. Конструктивные особенности станции.
3. Влияние атмосферы.
4. Светотеневая обстановка на орбите.

Для достижения высокого уровня обучающей эффективности стенда «Тренажер ВИН» были сформулированы и затем реализованы технические требования к цифровой визуальной модели (ЦВМ) Земли:

1) ЦВМ Земли разработана на основе цифровых космических снимков.

2) ЦВМ позволяет формировать в поле зрения бортового средства наблюдения изображения подстилающей поверхности Земли по трассе полета ПКА для любого номера суточного витка, соответствующего заданным баллистическим параметрам орбитального полета.

3) Полнота воспроизведения демаскирующих признаков объектов ВИН (в особенности, для объектов детального наблюдения и объектов – реперов) с учетом их приоритета и времени года (летние и зимние условия наблюдения).

4) Высокий уровень географического подобия формируемого изображения земной поверхности.

5) Возможность необходимых проективных преобразований формируемого изображения с учетом кривизны Земли при моделировании изменения пространственного положения оптической оси бортового средства наблюдения.

6) Возможность плавного масштабирования формируемого изображения для объектов детального наблюдения без потери качества изображения в соответствии с пределами изменения кратности увеличения моделируемого бортового средства наблюдения.

7) Формирование изображения земной поверхности с двумя уровнями информативности. Первый уровень характеризуется сравнительно низкой детализацией изображения. Он обеспечивает режим обзорного наблюдения Земли (наблюдение невооруженным глазом через иллюминатор). Вторым (более высоким) уровнем детализации изображения обладают объекты детального наблюдения, просмотр которых связан с масштабированием изображения.

8) Возможность воспроизведения факторов, обуславливающих ухудшение условий наблюдений исследуемых объектов:

- наличие яркостного стимула-помехи (блик);
- облачность любого типа;
- ухудшение частотно-контрастных и цветовых характеристик сцены в видеоискателе средств регистрации;
- резкое уменьшение угла поля зрения при переходе от наблюдения через иллюминатор к наблюдению с помощью средства ВИН-Ф;
- наличие в поле зрения элементов конструкции компоновки модулей орбитальной станции.

Результатами применения стенда «Тренажер ВИН» стало приобретение космонавтами теоретической базы и получение достаточных практических умений и навыков для выполнения задач, связанных с ВИН, что привело к значительному уменьшению времени на адаптацию в начале полета и увеличению эффективности и качества целевых работ на борту РС МКС, выполняемых с применением методов ВИН.

Космонавты Олег Артемьев, Сергей Рыжиков, Иван Вагнер, выполнившие свои полеты и Сергей Кудь-Сверчков, выполняющий полет в настоящее время, подтвердили эффективность подготовки на стенде «Тренажере ВИН» и отметили, что сроки выработки навыков

ориентирования и выполнения задач ВИН в полете со среднестатистических 2-х месяцев заметно сократились и составили 1-3 недели.

Литература:

[1] Васильев В.И., Сохин И.Г., Васильева Н.В., Бронников С.В., Гордиенко О.С. Визуально-инструментальные наблюдения с борта Международной космической станции экипажами Российского сегмента и основные принципы подготовки к их выполнению. Журнал ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» «Пилотируемые полеты в космос», Звездный городок, 4(7)2013;

[2] Падалка Г.И., Десинов Л.В., Беляев М.Ю., Караваев Д.Ю. Результаты мониторинга с борта РС МКС катастрофических наводнений Краснодарского края. Журнал ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина» «Пилотируемые полеты в космос», Звездный городок, 4(9)2013.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ САМОЛЕТА-ЛАБОРАТОРИИ Ту-134ЛК-1

Дедкова Е.В., Юрченко Е.С.

ФГБУ «НИИ ЦПК имени Ю.А. Гагарина»

Одно из ведущих направлений в общем комплексе задач, решаемых с борта РС МКС, принадлежит дистанционному изучению природных ресурсов Земли (ИПРЗ) в ходе визуально-инструментальных наблюдений (ВИН).

Специфика выполнения ВИН с борта РС МКС для решения задач ИПРЗ предъявляет особые требования к подготовке космонавтов. Прежде всего, они заключаются в необходимости специальной теоретической подготовки, а также проведении практических занятий и тренировок с использованием информационных ресурсов «Тренажера ВИН» [1] и полетов на аэровизуальные наблюдения тестовых участков суши и моря. Важным направлением повышения качества подготовки космонавтов является разработка и создание специализированных тренажеров, моделирующих визуальную обстановку в условиях полёта на РС МКС [2].

Другое направление повышения эффективности подготовки космонавтов состоит в проведении практических занятий и тренировок в полетах на специализированной летающей лаборатории Ту-134ЛК-1 [3].

В ходе летных тренировок космонавтов на летающей лаборатории Ту-134ЛК-1 решаются следующие задачи:

- изучение методики проведения ВИН при выполнении запланированных исследований;
- приобретение, совершенствование навыков и умений по поиску, обнаружению, распознаванию, идентификации и регистрации наземных, морских и воздушных объектов, процессов и явлений наблюдения в условиях, приближенных к космическому полету;
- приобретение и поддержание навыков ведения ВИН с борта самолета-лаборатории (СЛ);
- совершенствование навыков восприятия и обобщения визуальной и приборной информации;
- отработка навыков оперативного анализа и информации, получаемой в ходе выполнения ВИН.

В последние годы, кроме традиционных полетов по югу европейской части России, выполняемых в летний период в течение одного лётного дня по маршруту: «Чкаловский – Воронеж – Ростов-на-Дону – Новороссийск – Геленджик – Адлер – Ставрополь – Махачкала – Астрахань – Волгоград – Чкаловский», были организованы многодневные полеты по удаленным регионам России, с размещением тренировочной бригады на аэродромах временного базирования.

Это позволило не только совершать радиальные полеты над территориями, свободными от облачности, но и в случае нелетной погоды дало возможность проводить наземную подготовку космонавтов (посещение местных научных центров и институтов, обследование наземных объектов, которые планируются для исследования с борта СЛ и РС МКС).

В 2014г. выполнялся полет на Байкал по маршруту: «Чкаловский – Омск – Иркутск – озеро Байкал – Иркутск – Омск – Чкаловский». В полетах участвовали космонавты групп специализации и совершенствования МКС-гр. 1, 2 и 3.

В 2016г. был организован полет над территориями Республики Крым и северного Кавказа с временным базированием в аэропорту г. Симферополя. В полетах принимали участие космонавты групп специализации и совершенствования МКС-гр. 2, 3 и 4 [4].

Учебно-тренировочные полеты (УТП) с космонавтами из состава групп специализации и совершенствования МКС-гр.2 и 3 по объектам Красноярского края, Прибайкалья, горным системам Алтая и Саян состоялись в 2017г. В качестве аэродромов временного базирования были выбраны гг. Красноярск и Иркутск [5]. Кроме того, методически отработаны и организованы полеты в 2016 и 2017гг. по маршруту: «Чкаловский – Самара – Воронеж – Курск – Чкаловский» в зимний период наблюдения с целью поиска, обнаружения, опознавания и регистрации геофизических и антропогенных объектов средней части европейской территории России.

Для приобретения космонавтами навыков ВИН объектов Уральского, Сибирского, Дальневосточного федеральных округов и вулканов Курило-Камчатской островной дуги в 2018 г. выполнены УТП с временным базированием в аэропортах гг. Улан-Удэ и Петропавловск-Камчатский. В докладе будут изложены результаты учебно-тренировочных полетов по Дальневосточному федеральному округу, вулканам Курильских островов и Камчатки в 2018 г.

По завершении УТП каждый космонавт представляет отчет о выполненной работе, включающий фотоснимки объектов наблюдения и предложения по организации и планированию аналогичных полетов. Результатами применения стенда «Тренажер ВИН» и организации регулярных тренировочных полетов по регионам России стало приобретение космонавтами теоретической базы и получение достаточных практических умений и навыков для выполнения задач, связанных ВИН, что привело к значительному уменьшению времени на их адаптацию в начале полета на РС МКС и увеличению эффективности и качества работ, выполняемых с применением визуально-инструментальных наблюдений.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ ВЕРИФИКАЦИИ УТОЧНЕННЫХ КОНТУРОВ ПОЖАРОВ

Енина Е.А.¹, Балашов И.В.²

¹ МГУ им. М.В.Ломоносова

² Институт космических исследований РАН

Оценка пройденных огнем площадей является в настоящее время классической задачей, решаемой с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования Земли. Использование данных среднего пространственного разрешения позволяет получать как оперативные оценки площадей горения, так и иметь однородное многолетнее покрытие данными больших территорий. Однако, для получения интегральных оценок площади необходимо учитывать параметры ошибок ее определения, вносимых разрешением исходных данных и особенностями алгоритмов детектирования. В сервисах созвездия Вега и ИСДМ "Рослесхоз" используются специальные коэффициенты коррекции площадей, полученные на основе уточнения площадей горения, определенных на основе данных приборов MODIS и VIIRS, по спутниковым данным более высокого пространственного разрешения. Получение необходимого для расчета коэффициента набора данных обеспечивает автоматизированная схема массового уточнения контуров пожаров по данным классификации. Для использования получаемых контуров необходимо проведение экспертной оценки их качества и пригодности для задач расчета коэффициентов коррекции площадей - верификация. Существующие в настоящее время инструменты верификации не обеспечивают достаточной производительности для эффективного решения задач экспертом и увеличивают сроки подготовки необходимых наборов данных.

В настоящей работе проводится обзор особенностей существующего инструмента для верификации уточненных контуров пройденных огнем площадей. Формулируются его основные проблемы и предлагаются пути их решения. Приводится разработанная структура интерфейса создаваемого динамического инструмента верификации уточненных контуров пожаров, обеспечивающая быстрый совместный анализ необходимой для экспертной оценки информации. Кроме этого, в докладе проводится обзор применяемых при создании инструмента технологий, особенностей интеграции с существующими сервисами и возможностей использования инструмента для верификации других объектов.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЗДАНИЯ ОПОРНЫХ ВЫБОРОК ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ МЕТОДОМ ЭКСПЕРТНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Ёлкина Е.С.

ИКИ РАН

В работе описана методика создания наборов обучающих данных с известной точностью силами волонтеров. Подход, основанный на предварительной оценке точности интерпретаторов, позволяет создавать выборки с определённой точностью даже без наличия контрольных наземных данных. Выборки могут быть использованы для обучения классификатора при создании тематических карт. В докладе представлены результаты организации краудсорс-экспериментов по распознаванию а) пахотных земель, б) борщевика Сосновского на территории России с использованием сервиса Vega-science; описаны способы оценки точности интерпретаторов и результирующей выборки; показано место предлагаемого подхода в мировой практике использования краудсорсинга для создания тематических карт и выборок с известной точностью.

Работа осуществлялась на основе созданных в ИКИ РАН технологий построения информационно-систем дистанционного мониторинга с использованием ЦКП "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2019). Ключевые слова: crowdsource, Vega, выборка, оценка точности, дешифрирование.

Литература:

[1] Плотников Д.Е., De Abellegra D., Veron S.R., Zhang M., Толпин В.А., Барталев С.А., Lavreniuk M., Waldner F., Ziad A. Картографирование пахотных земель в различных регионах глобальной сети JECAM на основе спутниковых данных Landsat и полученной методом краудсорсинга опорной информации // "Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли - RORSE 2018". ИКИ РАН, 2019. С.177-184.

[2] Плотников Д.Е., de Abellegra D., Veron S., Zhang M., Толпин В.А., Ёлкина Е.С. и др. Сравнение разных источников обучающей информации для регионального картографирования пашни в различных регионах мира // Материалы Шестнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 12-16 ноября 2018. ИКИ РАН, 2018. DOI: DOI 10.21046/2070-16DZZconf-2018a.

[3] Прошин А.А., Лупян Е.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Бурцев М.А. Текущие возможности Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» // Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов (SDM-2019) (Электронный ресурс): Сборник трудов всероссийской конференции (26-30 августа 2019 г., г. Бердск). Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2019. С. 39-44.

[4] Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 7 (306). С. 581-586.

[5] Waldner, F.; Schucknecht, A.; Lesiv, M.; Gallego, J.; See, L.; Pérez-Hoyos, A.; d'Andrimont, R.; de Maet, T.; Bayas, J.C.L.; Fritz, S.; et al. Conflation of expert and crowd reference data to validate global binary thematic maps. Remote Sens. Environ. 2019, 221, 235-246.

[6] Система спутникового мониторинга Vega-science (<http://sci-vega.ru/>).

ВЕБ-СЕРВИС ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПОДСПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Князев Н.А.¹, Елизаров Д.А.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

В рамках проекта разработан веб-сервис для хранения и обработки данных спутниковых наблюдений, поступающих с экспедиций, проводимых ежегодно в ИКИ РАН. Предметной областью системы являются океанологические данные, загружаемые с приборов: акустического доплеровского измерителя течений (ADCP), гидрологического STD-зонда, метеостанции Airmax. Архитектурная часть системы написана на PHP фреймворке Laravel, построена интеграция (API) с внешними сервисами. Таким сервисом выступает система спутникового мониторинга «See the Sea», разработанная в ИКИ РАН в рамках программы ЦКП «ИКИ-Мониторинг». Пользовательский интерфейс системы написан на JavaScript фреймворке Vue JS, встроенного в Laravel. С учетом особенностей типов данных, получаемых с океанологических приборов, под каждый был написан скрипт на языке Python, который импортирует первичные значения в базу данных системы.

В веб-сервисе пользователь может работать с сохраненными данными благодаря разработанным инструментам визуализации данных. Для этого в системе был создан блок «Визуализация», который позволяет строить графики-зависимости между измеряемыми показаниями с приборов, например, уровень температуры моря на различной глубине, концентрацию хлорофилла-а, значения солености, мутности в водной толще. Также в веб-сервис добавлен картографический интерфейс Mapbox для детализации местности проводимых исследований, сравнения текущих значений с физическими параметрами, не представленных приборами, например, с показаниями силы и направления ветра.

Для привязки экспедиционных исследований с изображениями, получаемых с космических систем, был создан программный интерфейс для интеграции данных в систему спутникового мониторинга «See the Sea». Для этого в STS были интегрированы данные экспедицией с восстановленными маршрутами исследований и сохранением физических характеристик в конкретной точке. Таким образом, пользователь получает полную картину проводимых исследований, позволяя накладывать измерения на оптические и радиолокационные данные спутникового наблюдения. Подобная работа также позволяет верифицировать данные спутниковых измерений на основе сравнения результатов с данными in-situ.

На сегодняшний день ведется разработка второй версии системы, где будут учтены технические особенности и недоработки предыдущей версии.

АНАЛИЗ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА АЗОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ КАК ИНДИКАТОРА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В РАЗРЕЗЕ КРУПНЫХ ГОРОДОВ РОССИИ И МИРА

Константинова А.М., Лупян Е.А., Бриль А.А.

Институт космических исследований РАН

Диоксид азота (NO_2) – одна из газовых составляющих атмосферы Земли, присутствующая как и в тропосфере, так и в стратосфере. Этот газ является токсичным и попадает в атмосферу в результате антропогенной деятельности, в частности в результате сжигания топлива и биомассы, а также природных процессов, таких как лесные пожары, молнии и т.п. В крупных городах основным источником диоксида азота является автотранспорт, по его концентрации можно в целом судить о качестве городского воздуха, который напрямую влияет на здоровье и продолжительность жизни населения городов.

В данной работе представлены подходы к анализу концентрации диоксида азота с использованием спутниковых данных, а именно продукта TROPOMI Sentinel 5P (Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2018). Благодаря разработанному в ИКИ РАН автоматизированному инструменту мониторинга состояния объектов ObjectsSurveysSMIS (Константинова А.М. и др., 2020), были посчитаны годовые средние концентрации данного газа вокруг крупных городов России и мира, в том числе внутри секторов и концентрических колец вокруг этих городов. В результате анализа был составлен рейтинг городов по загрязнению воздуха диоксидом азота, выявлены наиболее загрязненные районы крупных городов. Также на основе еженедельных и ежемесячных данных были проведены исследования, как ограничительные меры на передвижение и антропогенную деятельность во время распространения Covid-19 повлияли на выбросы диоксида азота в масштабах крупных городов.

Описанные подходы показывают, что спутниковые данные в первом приближении могут стать основой для мониторинга загрязнения атмосферы в пределах крупных городов и могут быть полезны для сравнения уровня диоксида азота в атмосфере со существующими нормами и тем самым помочь в урегулировании деятельности человека властями и улучшении качества городского воздуха.

Все работы были проведены в рамках разработанной в ИКИ РАН информационной системы Вега-Science <http://sci-vega.ru/> (семейство Созвездие-Вега). Функционирование системы Вега-Science осуществляется на основе ресурсов Центра коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2015, 2019), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература:

[1] Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2018, TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products. Version 01. European Space Agency. <https://doi.org/10.5270/S5P-s4ljg54>

[2] Константинова А.М., Балашов И.В., Кашницкий А.В., Лупян Е.А., Прошин А.А., Сенько К.С., Сычугов И.Г. Организация подсистем работы с наблюдениями объектов в сервисах, работающих по технологии GEOSMIS // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 82. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020aXenarios S. et al. Climate change and adaptation of mountain societies in Central Asia: uncertainties, knowledge gaps, and data constraints // Regional Environmental Change. – 2018. – С. 1-14.

[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.

НАЗВАНИЕ: ВОЗМОЖНОСТИ ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛЕСНОГО ПОКРОВА НА ОСНОВЕ ДАННЫХ О РАДИАЦИОННОЙ МОЩНОСТИ ПОЖАРОВ

Лозин Д.В., Балашов И.В., Лупян Е.А.

ИКИ РАН

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. Настоящая работа посвящена возможности использования информации об интенсивности горения (FRP, Fire Radiative Power, (Kaufman et al, 1998)) для проведения таких оценок. В работе исследуется зависимость между FRP и степенью повреждения различных типов лесов и предлагается вариант методики оперативной оценки степени повреждения лесного покрова пожарами.

АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ ПОЛЯРНЫХ МЕЗОВИХРЕЙ НАД ЗАПАДНОЙ АКВАТОРИЕЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Лопуха В.О.

Российский государственный гидрометеорологический университет

Циклон – атмосферное возмущение с относительно низким давлением в центре вихревого движения воздуха. Полярный мезовихрь – внетропическое барическое образование в Северном полушарии, которое в основном формируется в холодный период года. Для обозначения полярного мезовихрей употребляются следующие термины, polar lows, arctic low, polar hurricane, arctic hurricane, sub-cyclonic eddy, intensive mesocyclone и polar mesoscale vortices. В качестве классического термина выступает polar lows – небольшой, но очень интенсивный морской циклон, формирующийся севернее бароклининой зоны (зона расположения полярного фронта, обширных бароклининых систем).

Акватория Северо-Европейского бассейна наиболее активная и изученная область появления мезомасштабных полярных циклонов в Северном полушарии. Эта область благоприятна для формирования полярных циклонов ввиду значительной разницы температур в приводном слое. Такая разница усилена теплым атлантическим течением на севере и массивом дрейфовых льдов. Полярные циклоны над морями восточной части Арктики менее изучены, чем над западной её частью.

Арктический климат играет главную роль в частоте появлений и интенсивности полярных циклонов. Новые области, потенциально пригодные для зарождения и развития мезомасштабных циклонов, вызваны потеплением и вследствие сокращением льда над морями Северного Ледовитого океана. Благоприятные районы формирования полярных циклонов – Восточно-Сибирское, Чукотское море и море Лаптевых. Это вызвано тем, что ранее вышеперечисленные моря в течение всего года были покрыты льдом, сейчас же летом и осенью они полностью освобождаются ото льда.

В связи с активным освоением арктического региона, особенно её российской части, встает вопрос регистрации, рассмотрения эволюции и предупреждения полярных мезовихрей, поскольку резкое ухудшение условий погоды и опасные явления, вызванные циклонической деятельностью, могут нанести существенный урон исследовательским станциям, нефти и газодобывающим платформам, находящимся в акватории морей и т.д.

При определении полярных циклонов были решены следующие задачи: невозможность использования синоптических карт погоды, ввиду малого количества станций и как в следствии отсутствия замкнутых изобар в районе нахождения полярного циклона; невозможность использования спутниковых изображений первого уровня обработки для дешифрирования облачной системы полярного мезовихря; трудности, связанные с определением полярных циклонов на спутниковых изображениях в условиях недостаточной освещенности, в т.ч. полярной ночи.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИСКАЖЕННЫХ И ПРОПУЩЕННЫХ ДАННЫХ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В РЕЖИМЕ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА

Миклашевич Т.С.^{1,2}, Барталев С.А.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

² *Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*

Средства ДЗЗ позволяют исследовать состояние динамически меняющихся систем в режиме, близком к реальному времени. Данные спутниковых наблюдений, используемые для анализа растительного покрова, содержат искажения, вызванные мешающими факторами, такими как облачный и снежный покров, шумы приборов и т.д. В рамках предварительной обработки основной объем искаженных данных фильтруется, и в наборе исходных данных образуются пропуски.

В ИКИ РАН разработан алгоритм реконструкции данных, основанный на обработке временных рядов. Алгоритм существует в двух модификациях: обработка полного набора данных, полученных за вегетационный цикл, и восстановление данных в режиме оперативного мониторинга.

Восстановление данных в оперативном режиме подразумевает построение экстраполяционного прогноза на основе предыстории динамики исследуемой физической величины. Высокая облачность может приводить к длительному отсутствию данных, при этом достоверность восстановления зависит от дальности прогноза и объема используемых полезных данных.

В работе представлена зависимость точности восстановления искаженных и пропущенных данных спутниковых наблюдений растительного покрова от дальности прогноза. Мониторинг осуществляется с использованием ежедневных данных спутникового наблюдения AQUA и TERRA MODIS пространственного разрешения 250м в красном и ближнем инфракрасном каналах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-77-30015) с использованием инфраструктуры хранения и обработки спутниковых данных Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [Лупян и др., 2019]. Оценка точности восстановления спутниковых данных проведено в рамках темы государственного задания ЦЭПЛ РАН № АААА-А18-118052590019-7.

Литература:

[1] 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., Сычуглов 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.

АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С РАДИОЛОКАТОРОМ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Михайлова К.С.

Московский Авиационный Институт

Проводится анализ состояния и тенденций развития существующих отечественных и зарубежных космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с радиолокатором с синтезированной апертурой. Сформулированы возможные причины появления рассмотренных тенденций.

В ходе работы над диссертацией по теме «методика моделирования модификаций космических аппаратов с радиолокатором синтезированной апертуры» были собраны статистические данные космических аппаратов с радиолокатором с синтезированной апертурой за период 1988-2021 год.

Данный период был выбран, так как радиолокация изначально была использована военными в разведывательных целях и первым известным (раскрытым) КА с РСА стал американский проект Lacross, запущенный в 1988 году.

За этот период произошли несколько крупных технических скачков:

1. 2000 год - скачек в значениях разрешающей способности радиолокатора, снижение потребляемой мощности;
2. 2007 год - устойчивое снижение процентной массы РСА;
3. 2008 год - начало стремления образовать из КА группировку с синтезированной апертурой разнесенной по пространству орбит группировки;
4. 2014 год - «замирание» тенденций, удовлетворение получаемой информацией, отсутствие спроса на технический скачок.

Также, на всем рассматриваемом периоде наблюдалось неизменность выбора диапазона орбит (300-700 км, среднее значение 500 км). Подобный выбор может быть обоснован тем, что орбитальное пространство распределено между аппаратами разного назначения, а так же военными объектами. Параметр разрешения зависит от высоты орбиты. Одинаковая структура бортовых служебных систем, отсутствие технологического скачка конструктивных элементов, срок активного гарантийного существования, ограничение массы полезной нагрузки выводимой РН, ограничение размеров аппаратов — все это также осталось неизменным.

Стремление к созданию группировки обосновывается простыми зависимостями: чем больше расстояние - больше апертура, меньше требуемая масса; меньше масса - быстрее производство, пониженная стоимость, подходит для малых коммерческих организаций. Удешевление конструктивных материалов повсеместно по отрасли и ей соседствующих способствовало к медленному снижению стоимости проектов в отношении к массе РСА.

Разрешение (в том числе угловое) ключевая характеристика радиолокатора, достигнув своего максимума на значении 0,3 метра, дальнейшего улучшения этого параметра не наблюдается[1]. Так как разрешение зависит от высоты и длины волны [1] то при неизменной орбите разрешение может меняться только за счет технологического совершенствования.

Как результат: на данный момент наблюдается отсутствие новых проектов космических аппаратов с радиолокатором с синтезированной апертурой предназначенных для целей и задач кардинально отличающихся от картографии и военной разведки. Соответственно инновационных прорывов также не наблюдается. Упрощение этапа проектирова-

ния и подбора материальной базы подобных КА поможет упростить научное исследование и опытно конструкторские работы при создании проекта инновационного проекта воплощающим новых технологические границы.

Литература:

[1] Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития / М. И. Нониашвили, И. В. Крючков, Г. А. Лесников [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – № 8. – С. 10.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАБОТЫ СЕТЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ГИДРОПОСТОВ НА РЕКЕ АМУДАРЬЕ

Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М.

Институт космических исследований РАН

Оценка водности и состояния водных объектов Центральной Азии - одна из важнейших задач для региона. Поскольку некоторые крупные реки в регионе являются трансграничными, использование вод таких рек происходит со стороны нескольких стран. Технологии спутникового мониторинга позволяют своевременно и оперативно оценить состояние русла рек, водохранилищ, а также проанализировать влияние различных факторов на их динамику.

В работе рассматривается вопрос эффективности использования последовательностей связанных виртуальных объектов, устанавливаемых на русле рек для анализа динамики их водности. Такие объекты представляют собой произвольные полигоны и получили название космических гидропостов (КГП) (Мухамеджанов и др., 2020). В пределах полигона по спутниковому изображению на основе индекса MNDWI (modified normalized difference water index) (Погорелов и др., 2017) рассчитывается площадь (га), занимаемая водой (пиксели с положительным значением индекса). При этом используются данные оптического диапазона сканирующей аппаратуры MSI (Sentinel-2A, -2B), OLI, TIRS (Landsat-8). Космический гидропост по сравнению с физической станцией, обладает рядом очевидных преимуществ, такими как отсутствие затрат на техническое обслуживание, предоставление оперативной информации, получаемой на основе открытых источников, а также возможность использования данных с неограниченного количества полигонов. Кроме того, КГП также не накладывает ограничений на место установки. Таким образом, можно организовать систему (сеть) объектов, выбрав одну из физических станций и некоторое множество связанных между собой КГП. Для создания такой сети при исследовании в качестве физической станции был выбран наземный гидропост Керки (Туркменистан) и набор полигонов, расположенных на разном расстоянии друг от друга выше от станции. Анализ данных на временных рядах суточных стоков на Керки и площади водного зеркала на КГП за 2014, 2016 и 2018 гг. Вблизи станции наблюдается линейная зависимость стока от площади водной поверхности (Mukhamedjanov et al., 2020), поэтому ближайший к Керки полигон связывается с наземным гидропостом. Каждый следующий полигон устанавливается по эмпирически определённым правилам (Mukhamedjanov et al., 2020) и связывается с предыдущим. Для оценки работы сетей космических гидропостов на каждом шаге строится диаграмма разброса нормированных на площадь полигона показателей площади водной поверхности и модель полиномиальной регрессии 3-го порядка. Метрикой качества при таком подходе является F-значение (Dünki et al., 2011), рассчитываемое как отношение дисперсий временных рядов площади на текущем и предыдущем гидропостах. По результатам такого анализа сеть может быть продолжена до тех пор, пока F-значение не превышает 2.0. Проведённые эксперименты показали, что превышение данного порога влечёт неустойчивость работы отдельных полигонов и сети в целом. Кроме того, образование размывов берега и смещение русла Амударьи в межгодовом аспекте усложняют работу оператора при установке полигонов. В связи с этим, необходимо включать в модель дополнительные параметры, влияющие на качество сети и повышающие устойчивость КГП к естественной изменчивости морфологии русла реки.

При расширении географии экспериментов на другие реки центральноазиатского региона и адаптации методики к особенностям морфологии русла технология использования сетей КГП может стать актуальным рабочим инструментом для построения водных прогнозов и оценки водохозяйственной обстановки на выбранной местности.

Результаты, представленные в работе, получены с использованием развиваемого в ИКИ РАН сервиса спутникового мониторинга EcoSatMS (<http://suvo.geosmis.ru>). Функционирование сервиса осуществляется с использованием ресурсов Центра коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг" (<http://ckp.geosmis.ru>) (Лупян и др., 2019), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Обработка и анализ данных проводились при поддержке РФФИ № 19-37-90114.

Литература:

- [1] Мухамеджанов И.Д., Константинова А.М., Лупян Е.А. Построение сетей космических гидропостов для организации спутникового мониторинга Амударьи // Материалы Восемнадцатой Всероссийской Открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 16-20 ноября 2020. ИКИ РАН, 2020. С. 94. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
- [2] Mukhamedjanov I.D., Konstantinova A.M., Loupian E.A. The use of satellite data for monitoring rivers in the Amu Darya basin // E3S Web of Conferences. Regional Problems of Earth Remote Sensing (RPERS 2020), 2020. Vol. 223. P. 03008. DOI: doi.org/10.1051/e3sconf/202022303008.
- [3] Погорелов А.В., Липилин Д.А., Курносова А.С. Спутниковый мониторинг Краснодарского водохранилища // Географический. 2017. №1(40). С. 130–137. DOI: 10.17072/2079-7877-2017-1-130-137.
- [4] R. M. Dünki, M. Dressel, «F-Ratio Test and Hypothesis Weighting: A Methodology to Optimize Feature Vector Size». Journal of Biophysics, Vol. 2011. Article ID 290617. 11 pages. DOI: 10.1155/2011/290617.
- [5] 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.

АДАПТАЦИЯ К ГИС ПАНОРАМА СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ИЗ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ В СФЕРЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ, ТЕХНОСФЕРНОЙ И ПРОДОВОЛЬСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЯМИ ДОНБАССА

Несова А.В., Хархордин Е.В., Фролов Н.Д., Мигунов
Б.М., Пасечник Д.Д.

Донецкий национальный университет

Решение научно-технических задач цифровизации государственного управления Донецкой Народной Республики (ДНР) посредством использования спутникового мониторинга в сфере экологической, техносферной и продовольственной безопасности в настоящее время обуславливается ограниченностью финансовых ресурсов у ДНР для восстановления и развития системы аналитического контроля природных и антропогенных процессов и явлений, а также экономической и информационной блокадой со стороны Украины и других западных стран. А Россия в лице Института космических исследований Российской академии наук предоставляет Донецкому национальному университету (ДонНУ) свободный доступ к своим архивным и текущим спутниковым данным по территории Донбасса.

Студенты ДонНУ организовали «Студенческое цифровое космическое бюро» (СЦКБ), которое сформировало студенческий коллектив для поиска зарубежных открытых источников спутниковых данных по территории Донбасса, накопления таких данных и создание средств их обработки на основе российского программного обеспечения географических информационных систем (ГИС), которое разработано в КБ «Панорама».

Целью деятельности студенческого коллектива СЦКБ будет исследование и разработка, наполнение и обслуживание цифровой платформы на основе ГИС КБ «Панорама» для органов государственного управления ДНР на основе спутниковых данных по оперативному мониторингу состояния окружающей среды, последствий чрезвычайных ситуаций и продуктивности сельскохозяйственных культур.

Студенческий коллектив СЦКБ планирует выполнить следующие задачи:

- исследовать российский и зарубежный опыт создания и эксплуатации цифровых платформ в сфере спутникового мониторинга;
- определить потребности участников платформы в спутниковых данных и возможности их получения из открытых источников;
- разработать инфраструктуру и программное обеспечение цифровой платформы на основе ГИС КБ «Панорама» с ориентацией на первоначальное участие в ней трех министерств и ведомств ДНР (Государственного комитета по экологической политике и природным ресурсам при Главе ДНР; Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР; Министерства агропромышленной политики и продовольствия) с возможностью последующего расширения сети участников платформы;

- разработать программное обеспечение процессов конвертации спутниковых данных из зарубежных открытых источников в форматы обработки ГИС «Панорама» с учетом возможностей ГИС КБ «Панорама» и требований участников платформы;
- организовать и осуществить процессы скачивания и хранения на компьютерных ресурсах студентов ДонНУ (с привлечение бесплатных российских облачных ресурсов) спутниковых данных по объектам на территории Донбасса.

ПРИЛОЖЕНИЯ АЛГОРИТМОВ НА ГРАФАХ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Сазонова С.В.^{1,2}, Яганов Р.Т.¹

¹ Факультет Космических Исследований МГУ

² Центр фундаментальной и прикладной математики МГУ

Управление системой дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с большим количеством наземных станций и космических аппаратов (КА) является очень ресурсоемкой задачей. При планировании работы системы необходимо учитывать не только требования к качеству изображения, что влечет за собой ограничение на время и угол съемки, погодные условия и т.д., но и технические ограничения аппарата: объем памяти на борту КА, запас электроэнергии, орбитальные маневры КА и многое другое.

Рассмотрим систему с $N \geq 1$ спутниками ДЗЗ, движущимися по заранее известным на рассматриваемый период времени траекториям. Ожидают исполнения M заявок на съемку, для которых указаны область наблюдения и требования к качеству и характеристикам изображения. Заявка считается выполненной, если наземная станция получила требуемые видео- и/или фото данные. Необходимо сформировать полетные задания для каждого КА, обеспечивающие исполнение заявок наилучшим возможным способом. Выполнение полетного задания можно разделить на три этапа: передача задания с наземной станции на один из аппаратов, непосредственно съемка и передача информации с аппарата на наземную станцию.

Начнем с построения последовательности команд для КА, реализующей наилучшее выполнение заявок. Формирование соответствующих критериев качества заслуживает отдельного исследования. В нашей работе мы предполагали, что определен набор характеристик съемки, которые влияют на качество выполнения заявки. Обозначим этот набор $\bar{\omega} \in \Omega$, где Ω – пространство допустимых значений выбранных характеристик. Определим некоторую функцию $P : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$. В таком случае задача сводится к определению последовательности съемок S , дающей наибольшую сумму $\sum_{\omega \in \Omega_S} P(\omega_i)$, где $\Omega_S \in \Omega$ – множество характеристик реализованных съемок.

Рассмотрим работу одного КА (случай $N = 1$). Пусть для заявки $k = \overline{1, M}$ возможно L_k наборов параметров съемки: ω_{ik} , $i = \overline{1, L_k}$, – каждый из которых может быть реализован на отрезке времени $(t_{\omega_{ik}1}, t_{\omega_{ik}2})$. Определим $d(\omega_{mn}, \omega_{kl})$ – время, необходимое для настройки аппаратуры спутника для съемки с параметрами ω_{kl} после съемки с параметрами ω_{mn} . Рассмотрим все ω_{ik} как вершины графа G с весами $P(\omega_{ik})$. Для любой пары вершин $(\omega_{mn}, \omega_{kl})$ существует ребро, если $\Delta t = t_{\omega_{kl}1} - t_{\omega_{mn}2} > 0$ и $d(\omega_{mn}, \omega_{kl}) < \Delta t$.

Добавим в граф G вершины A и B с нулевыми весами, такие что $t_{A2} < \min_{\omega \in G} t_{\omega1}$, $t_{B1} > \max_{\omega \in G} t_{\omega2}$.

С использованием этих обозначений, задачу поиска оптимальной последовательности съемок для одного КА можно переформулировать как задачу поиска такого пути по графу из вершины A в вершину B , что сумма весов входящих в него вершин максимальна. Возможно наложить дополнительные условия на переходы по дугам, соответствующие техническим ограничениям аппарата, например, запретить переход по дугам, если суммарная длительность съемок в соответствующих вершинах превышает некоторую величину T .

Данный подход был реализован нами для оптимизации работы полезной нагрузки аппарата EgyptSat-A ([1],[2]). В настоящее время мы работаем над развитием алгоритма для применения к системе из нескольких спутников.

Перейдем к задаче оптимизации связи между КА и наземными станциями. Как правило, каждый КА осуществляет лишь несколько сеансов связи в день, а необходимость в передаче команд может возникнуть в любое время. Предположим, что КА в рамках одной системы могут обмениваться информацией, когда находятся в пределах радиовидимости. Таким образом можно передавать команды с наземной станции на любой КА системы.

Рассмотрим мультиграф $G = \{V, E\}$, где $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ — множество вершин графа, соответствующих КА или наземным станциям, $E = \{e_1, \dots, e_m\}$ — множество рёбер графа — сеансов связи между элементами системы. Каждое ребро e_j может быть охарактеризовано временем сеанса связи $(t_{j,0}, t_{j,1})$ и пропускной способностью D . Предположим, что данные передаются пакетами объема d .

Каждый элемент системы можно рассматривать как действующий самостоятельно агент, который, зная топологию сети, стремиться оптимальным образом передать хранящиеся у него пакеты данных ([3],[4],[5]). Необходимо найти стратегию маршрутизации для каждого аппарата, которая обеспечивала бы максимальную эффективность передачи данных внутри системы.

Для описанных задач нами была построена модель спутниковой системы, реализован алгоритм планирования полезной нагрузки с возможностью ввода дополнительных ограничений. Были рассмотрены несколько примеров низкоорбитальных группировок спутников с различными наклонениями орбит и проведен ряд численных экспериментов для сравнения различных стратегий маршрутизации пакетов.

Литература:

- [1] Сазонова С. В., Строченкин А. В., Самыловский И. А. Дистанционное зондирование Земли: планирование и рациональный выбор маршрутов космических съемок // Тезисы XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. — Т. 2. — г.Королёв, 2017. — С. 309–310.
- [2] Scalable real-time planning and optimization software complex for the purposes of earth remote sensing / V. Sazonov, S. a. Sazonova, I. Samylovskiy et al. // IFAC PapersOnLine. — 51-32. — Elsevier, 2018. — P. 451–455.
- [3] Fraire, J. A., P. Madoery, S. Burleigh, M. Feldmann, J. Finochietto, A. Charif, N. Zergainoh, и R. Velazco. «Assessing Contact Graph Routing Performance and Reliability in Distributed Satellite Constellations». Journal of Computer Networks and Communications 2017 (2017 г.): 1–18.
- [4] Merugu, Shashidhar, и Ellen Zegura. «Routing in space and time in networks with predictable mobility», январь 2004 г.
- [5] Xuan, B. Bui, A. Ferreira, и A. Jarry. «Computing shortest, fastest, and foremost journeys in dynamic networks». International Journal of Foundations of Computer Science 14, вып. 02 (апрель 2003 г.): 267–85. <https://doi.org/10.1142/S0129054103001728>.

МЕТОДИКА ДИНАМИЧЕСКОЙ АКТУАЛИЗАЦИИ ОПОРНОЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Сайгин И.А., Стыценко Ф.В., Барталев С.А.

Институт космических исследований РАН

К настоящему времени создана технология получения ежегодно обновляемых карт растительности, основанная на классификации композитных изображений (Барталев и др., 2016). Поскольку классификация, используемая при создании данных карт, требует в качестве одного из входных параметров опорную выборку, важным аспектом является методика её ежегодной актуализации. Существует ряд значительных изменений при переносе тематических данных, полученных по результатам наблюдений одного года, на данные спутниковых наблюдений другого года. Данные изменения можно условно разделить на сложные подпиксельные и фатальные, занимающие обширные территории (грубые) изменения. Сложные подпиксельные эффекты связаны обусловлены следующими факторами: старение растительности, смена питания, естественное замещение одних пород другими и др. Фатальные эффекты связаны с резким изменением типа растительности или типа земного покрова, как правило, возникают из-за массовых вырубок, ветровалов, и в гораздо большей степени, от пожаров.

До настоящего времени перенос опорной выборки производился с применением статистической фильтрации, которая исключала часть пикселей, имеющих сильное отклонения яркостей, а также исключения пройденных огнем территорий, детектированных по спутниковым данным. Такой подход приводил к постепенному уменьшению объема обучающей выборки, что могло приводить к постепенному уменьшению репрезентативности выборки и увеличению радиуса сбора локальных сигнатур классов, используемым алгоритмом классификации LAGMA (Local Adaptive Global Mapping Algorithm) (Bartalev et al., 2014). В рамках работы предложен новый метод ежегодного создания опорной выборки, при котором в качестве опорных данных использовалась карта, полученная по спутниковым данным предыдущего года. В основе метода лежит статистическая фильтрация опорных данных с использованием информации об отражательной способности текущего года и привлечении дополнительных тематических продуктов об изменении лесного покрова. При таком подходе, опорная выборка может обновляться ежегодно без тенденции к постепенному уменьшению.

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

[2] Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, Remote Sensing Letters, 2014, Vol. 5, Issue 1, pp. 55–64.

[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., Сычуглов 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.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕСНЫХ ГАРЕЙ ПО ВРЕМЕНИ ЛЕСОВОЗОБНОВЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ MODIS

Самофал Е.В., Стыценко Ф.В., Барталев С.А.,
Егоров В.А.

Институт космических исследований РАН

В рамках исследования проведён анализ постпожарной динамики лесной растительности за период 2002-2019 гг. в разных субъектах Российской Федерации. Анализ выполнялся на основе использования зимних композитных изображений (Егоров, Барталёв, 2006), полученных спектрорадиометром MODIS в красном канале. Выбор зимнего периода съёмки обусловлен маскирующим эффектом снежного покрова (Стыценко и др., 2013), и возможностью наблюдения динамики состояния древесной растительности. Расчёт постпожарного максимума коэффициента спектральной яркости (КСЯ) позволил определить точку, в которой процесс лесовозобновления начинает преобладать над деградацией леса. Результаты исследования позволяют высказать предположение о периоде вывала разных пород леса. Так, хвойные породы могут иметь интервал вывала 9-13 и более лет. Вываливание лиственных пород может быть как ранним (1-3 года), так и более поздним (9-10 лет).

На основании полученных кривых КСЯ при помощи алгоритма LAGMA (Хвостиков и др. 2012) были также построены карты постпожарного состояния, включающие 2 класса:

1. преимущественная деградация древесной растительности (максимум КСЯ не достигнут);
2. преимущественное лесовозобновление (максимум КСЯ достигнут).

Работа выполнялась в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164) с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (Лупян и др., 2015, 2019).

Ключевые слова: дистанционное зондирование, постпожарная динамика, лесовозобновление, композитные изображения, MODIS.

Литература:

[1] Егоров В.А., Барталев С.А. Построение временных серий улучшенных композитных изображений по данным MODIS для мониторинга растительности // Четвертая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва. ИКИ РАН. 13-17 ноября 2006. Сборник тезисов конференции., 2006. С. 210.

[2] 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., Сычуглов 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.

[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., Сычуглов 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.

[4] Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. Метод оценки степени повреждения лесов пожарами на основе спутниковых данных MODIS. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2013. Т.10. № 1. С. 254-266.

[5] Хвостиков С.А., Барталев С.А., Уваров И.А. Развитие алгоритмического и программного обеспечения метода локально-адаптивной классификации LAGMA для решения задач спутникового картографирования земного покрова // Десятая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва. ИКИ РАН, 12-16 ноября 2012. Сборник тезисов конференции, 2012. С. 424.

ПЫЛЬНЫЕ БУРИ НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ И СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Шинкаренко С.С.

Институт космических исследований РАН

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН

Нерациональное природопользование на территориях России, расположенных в полупустынной и пустынной зонах, привело к снижению природно-ресурсного потенциала земель, связанное с истощением почв и снижением качества пастбищной растительности. На фоне преобладания почв, подверженных дефляции и больших по площади песчаных массивов активно проявляются процессы деградации, в том числе и в результате воздействия неблагоприятных природных факторов. Одним из катастрофических проявлений дефляции являются пыльные бури.

В 2020 г. в результате неблагоприятных гидротермических условий (атмосферная и почвенная засуха), обусловивших низкую продуктивность растительности на пастбищах, чрезмерных пастбищных нагрузок в Северном Прикаспии к осени практически не осталось естественной растительности. В связи с этим сильные и устойчивые ветры восточного и юго-восточного направлений в период с 26 сентября по 2 октября и с 9 по 11 октября, достигавшие скорости более 20 м/с привели к образованию пыльных бурь, интенсификации эоловых процессов и переносу песчано-пылевых масс. Использование данных ДЗЗ (приборы MODIS (Terra/Aqua), VIIRS Suomi NPP, JPSS1 (NOAA 20)) позволило оценить площадь песчано-пылевого облака. Максимумы площади пыльного шлейфа отмечены 30 сентября (11,5 млн га) и 1 октября (11,8 млн га), когда порывы ветра превышали 20-22 м/с, максимальная покрытая пыльной бурей площадь отмечена в эти же дни – 13,2 и 13,4 млн га соответственно, а протяженность пылевого шлейфа превысила 700 км. В реальности площадь должна быть еще больше, т.к. из-за облачности на юго-западе и западе исследуемой территории было невозможно определить распространение пыльной бури.

Также по данным MODIS определена динамика площадей открытых песков и дефлированных территорий. В результате пыльных бурь в конце сентября – октябре 2020 г. площадь открытых песков и дефлированных территорий увеличилась в 2,4 раза – с 600 тыс. га на 21 сентября до 1,4 млн га к середине октября. Необходим постоянный мониторинг площади опустынивания в регионе, поскольку при неблагоприятных погодных условиях и нерациональных пастбищных нагрузках возникает угроза экологического бедствия. При сохранении текущих тенденций опустынивания требуются незамедлительные меры по регулированию поголовья овец и коз, а также реализация фитомелиоративных мероприятий на песчаных массивах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 19-35-60007.

МОНИТОРИНГ ПЛОЩАДЕЙ КРЫМСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Шинкаренко С.С.^{1,2}, Васильченко А.А.^{1,3},
Выприцкий А.А.^{1,3}

¹ *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН*

² *Институт космических исследований РАН*

³ *Волгоградский государственный университет*

В 2020 г. на юге европейской части России в результате засухи и маловодья на реках сложилась критическая ситуация с наполнением водохранилищ. Наиболее сложная обстановка наблюдалась на полуострове Крым. После перекрытия подачи днепровской воды по Северо-Крымскому каналу на полуострове возник острый дефицит воды. В то же время в Крыму плохо развита сеть государственного гидрологического мониторинга водохранилищ. Из 34 пунктов гидрологических наблюдений ФГБУ «Крымское УГМС» только один расположен на водохранилище, в Государственном водном реестре отсутствуют характеристики остальных 22 водохранилищ. В работе показаны возможности использования спутниковых изображений Landsat, Sentinel 2 для мониторинга площадей водохранилищ полуострова. Проанализирована динамика площадей, установлена связь площадей и величин годовых сумм осадков. Самым маловодным годом был 1994, когда водохранилища естественного стока были наполнены на 20%, в 1984 и 2020 гг. площадь водохранилищ составляла около 40% от проектной. Наливные водохранилища стали уменьшаться сразу после прекращения подачи воды из канала в 2014 г. и в настоящее время наполнены на 20% проектной площади.

Определена частота разных площадей водного зеркала, для определения частоты появления осушек достаточно вычесть соответствующую частоту из 100%, т.е. менее 5% лет с водным зеркалом соответствует более 95% лет в осушенном состоянии. Изучение различных геоморфологических и других процессов в зоне осушек является актуальной задачей, для решения которой важно представлять длительность и периодичность осушенного состояния. В половине случаев общая площадь водохранилищ естественного стока превышала 1213 га, что составляет 2/3 от проектной площади при НПУ. Таким образом, в половине случаев треть проектной площади водохранилищ была представлена осушками. Наиболее часто наполняемым является Загорское водохранилище: проектная площадь здесь отмечена в 16% случаев.

В результате сопоставления объемов и соответствующих площадей водохранилищ получены уравнения связи этих величин, на основе которых можно оценить запас воды по результатам спутниковых наблюдений.

ОПЫТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОНЫ МЕЛИОРАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ПОЛЕЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ

Шинкаренко С.С.^{1,2}, Васильченко А.А.^{1,3}, Силова В.А.¹

¹ *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН*

² *Институт космических исследований РАН*

³ *Волгоградский государственный университет*

Полезавитные лесные полосы (ПЗЛП) играют огромную роль в функционировании агроландшафтов. ПЗЛП создаются с целью борьбы с водной эрозией и дефляцией, а также для более равномерного распределения снежного покрова на посевных площадях. Многочисленные исследования ФНЦ агроэкологии РАН (бывший ВНИАЛМИ) показали, что запасы почвенной влаги, скорость ветра, мощность снежного покрова на междолосной клетке распределены неравномерно и зависят от расстояния до ПЗЛП. Наибольший запас продуктивной влаги отмечен в зоне от пяти до пятнадцати высот лесной полосы. Мелиоративное влияние ПЗЛП доказано для большинства возделываемых культур. Полезавитные лесные полосы в комплексе с почвозащитными технологиями способствуют повышению урожайности озимой пшеницы на 10~15%. Тем не менее, методы дистанционного зондирования Земли из космоса для определения мелиоративной роли защитных лесных насаждений еще не разработаны. Целью данного исследования является разработка методов оценки мелиоративного влияния лесных полос на посевы озимой пшеницы в условиях светло-каштановых почв в Волгоградской области.

В работе использованы данные Sentinel 2 за 2017-2019 годы, на основе которых определены значения NDVI посевов озимой пшеницы на территории Ильевского сельского поселения Калачевского района Волгоградской области. Поскольку NDVI связан с фитомассой вегетирующей растительности, то может использоваться для анализа динамики продуктивности растительности в зависимости от удаления от ПЗЛП. Для каждого пикселя Sentinel 2 было определено расстояние до ближайшей ПЗЛП, после чего произведено определение среднего значения NDVI для каждого поля на разном удалении от окружающих его ПЗЛП.

В результате исследований установлены закономерности формирования зоны мелиоративного влияния ПЗЛП на посевах озимой пшеницы: её протяженность зависит от состояния лесной полосы (сомкнутость или сохранность), её конструкции и общей схемы агролесомелиоративного обустройства. Максимальная протяженность зоны мелиоративного влияния лесной полосы составила 300-350 м или 25-30 её высот. На основе полученных данных разработаны карты защищенности посевных площадей лесными насаждениями, которые могут послужить основой для разработки проектов агролесомелиоративного обустройства территории.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАНЕТ



STUDY THE TRAJECTORY OF DUST PARTICLES BY SIMULATING THE PLASMA ENVIRONMENT ON THE MOON'S SURFACE

Abdelaal M.E., Shekhovtsova A., Dolnikov G.G.,
Kuznetsov I.A., Kartasheva A.A., Bychkova A.S.,
Shashkova I.A., Lyash A.N., Dubov A.E., Zakharov A.V.

Институт космических исследований РАН

The Moon is one of the important airless bodies in our solar system, as it represents the nearest natural plasma environment to the Earth. Because of the effect of micrometeorites, solar radiation, and solar wind, the lunar surface is always rich with interactions between plasma and regolith. According to these activities, a near-surface double layer is being created from the photoelectrons and the charged regolith surface. This study demonstrates the dynamic of charged micro-particles under the effect of an external electric field, which will help to demonstrate the plasma-dust process on the lunar surface.

НЕТЕПЛОВЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ПОТЕРИ ДЛЯ МАЛЫХ ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ

Автаева А.А.^{1,2} Шематович В.И.¹

¹ *Институт астрономии Российской академии наук*

² *Государственный Астрономический Институт имени П.К. Штернберга МГУ,
Москва, Россия*

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 горячих экзопланет (Shematovich, Marov, 2018). Из лабораторных исследований известно, что избыточные кинетические энергии атомов водорода, образующихся при фото- и ударной электронной диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода, характеризуются двумя пиками по энергии фрагментов - в области низких энергий 0 - 1 эВ (медленные продукты диссоциации) и в области относительно высоких энергий 4 - 6 эВ (быстрые продукты диссоциации). Соответственно атомы водорода образуются в процессах диссоциации с избытком кинетической энергии, то их распределение в переходной $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}$ области верхней атмосферы горячей экзопланеты определяется из решения кинетического уравнения Больцмана с фотохимическим источником (Автаева, Шематович, 2020).

При помощи численной стохастической модели горячей планетной короны на примере горячего непуна GJ 436b исследованы на молекулярном уровне кинетика и перенос надтепловых атомов водорода в протяженной верхней атмосфере, и рассчитан нетепловой поток убегания. Поток убегания оценен величиной $3.0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для умеренного уровня звездной активности в УФ излучении, что позволяет получить верхнюю оценку скорости потери массы атмосферы за счет процессов диссоциации H_2 равной $7.8 \times 10^8 \text{ г/с}$. Расчетная величина входит в интервал полученных из наблюдений оценок возможной скорости потери атмосферы экзопланеты GJ 436b в диапазоне $\sim (3.7 \times 10^6 - 1.1 \times 10^9) \text{ г/с}$. Данный источник надтепловых атомов водорода рекомендуется включить в современные аэрономические модели физических и химических процессов в верхних атмосферах горячих экзопланет. Также исследование проводилось и для горячей супер-земли $\pi \text{ Men}$.

Авторы благодарны проекту №075-15-2020-780 «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет» Министерства науки и высшего образования РФ.

ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ МАРСОТЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ РАВНИНЫ ЭЛИЗИЙ

Батов А.В.^{1,2}, Менщикова Т.И.¹, Гудкова Т.В.¹

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН*

² *Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

Космический аппарат миссии InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) совершил успешную посадку на поверхность Марса 26 ноября 2018 года, в феврале 2019 года установленный на поверхность планеты широкополосный сейсмометр стал передавать на Землю высокоточные сейсмические данные. Сотни зафиксированных сейсмических событий легли в основу каталога марсотрясений (Clinton et al. 2021).

В работе (Brinkman et al., 2021) представлены результаты определения механизмов очагов трёх наиболее сильных марсотрясений, два из которых локализованы в районе Cerberus Fossae (Giardini et al., 2020).

Ранее в работах (Гудкова и др., 2017; Батов и др., 2019) были получены модельные оценки напряженного состояния недр Марса по данным топографии и гравитационного поля. При этом рассматривались различные модели внутреннего строения планеты и неоднородной упругости. Используя полученные в них результаты, а именно, тензор напряжений в каждой точке, мы определили теоретические характеристики возможных сдвиговых разрывов в районе равнины Элизий на различных глубинах, а также провели сравнение с результатами, полученными для зарегистрированных сильных марсотрясений.

Углы простираания, уклона и падения, характеризующие сдвиговый разрыв (Аки, Ричардс, 1983), определялись методом перебора, с шагом 0.5 градуса, для получения заданных компонент тензора напряжений.

Литература:

- [1] Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Москва: изд. Мир, 1983, 520 с.
- [2] Батов А.В., Гудкова Т.В., Жарков В.Н. Негидростатические напряжения в недрах Марса для различных моделей неоднородной упругости // Физика Земли. 2019. № 4. С. 166-180.
- [3] Гудкова Т.В., Батов А.В., Жарков В.Н. Модельные оценки негидростатических напряжений в коре и мантии Марса: 1. Двухуровневая модель // Астрон. вестн. 2017. Т.51. №6. С. 490-511.
- [4] Brinkman, N. et al. First focal mechanisms of marsquakes // JGR: Planets, in press, 2021.
- [5] Clinton, J. F. et al. The Marsquake catalogue from InSight, sols 0–478 // Physics of the Earth and Planetary Interiors, Volume 310, 2021.
- [6] Giardini, D., Lognonné, P., Banerdt, W.B. et al. The seismicity of Mars // Nature Geoscience. 13, 205–212, 2020.

СУТОЧНАЯ И СЕЗОННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ТЕПЛОВОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ МАРСА ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРА ACS-TIRVIM НА БОРТУ КА TGO EXOMARS В РЕГИОНАЛЬНУЮ ПЫЛЕВУЮ БУРЮ MҮ34

Власов П.В.¹, Игнатьев Н.И.¹, Григорьев А.В.^{1,2},
Шакун А.В.¹, Пацаев Д.В.¹, Маслов И.А.¹,
Лугинин М.С.¹, Трохимовский А.Ю.¹, Кораблёв О.И.¹

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

² *Australian National University, Канберра, Австралия*

Российский фурье-спектрометр TIRVIM в составе приборного комплекса ACS на борту КА TGO российско-европейской миссии ЭкзоМарс предназначен для наблюдения атмосферы Марса в надир и в режиме солнечных затмений. При измерениях в надир он работает в спектральном диапазоне 5-17 мкм со спектральным разрешением в ~ 1 см⁻¹. Стратегия наблюдения ACS и конфигурация орбиты TGO предоставляют уникальную возможность изучить суточные вариации температурного поля путём зондирования в надирном режиме с более плотным охватом местного времени по сравнению с предыдущими экспериментами (TES/MGS, PFS/Mars Express, MCS/MRO).

Мы представляем основные результаты измерений ACS-TIRVIM в надирном режиме наблюдений в период с 22-го декабря 2018 г. ($L_s = 311^\circ$, MҮ 34) по 18-е марта 2019 г. ($L_s = 358^\circ$) с наиболее свежей калибровкой данных TIRVIM. Исследуемый период включает в себя региональную пылевую бурю в сезон поздней зимы, что представляет особый интерес для изучения. Самосогласованное восстановление вертикальных профилей температуры вместе с общим содержанием аэрозолей (пыли и водяного льда) производилось путём решения обратной задачи переноса излучения и реализовано методом статистической регуляризации. Восстановленные данные представляют собой тепловую структуру атмосферы Марса от поверхности до высоты ~ 70 км и карты распределения пыли и водяного льда (в виде оптической толщины на 1075 см⁻¹ и 825 см⁻¹ соответственно). Данный обзор включает в себя исследование суточного цикла температуры и эволюцию температурного поля с развитием региональной пылевой бури, а также сравнение структур температурных полей во время региональной пылевой бури, глобальной пылевой бури ($L_s = 182^\circ$ – 212°) и в спокойной атмосфере ($L_s = 147^\circ$ – 166°).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №20-42-09035.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРОДОЛЖЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ МАРСА В РАМКАХ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Гокарев В.Н.^{3,4}, Сальников А.М.^{1,2}, Батов А.В.^{1,2,4}

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН*

² *Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*

³ *МГТУ им. Н.Э. Баумана*

⁴ *Научно-технологический университет «Сириус»*

На Марсе, в отсутствие главного поля ядра, наблюдается остаточная намагниченность, в некоторых местах достигающая нескольких тысяч нТл. Измеренные значения магнитного потенциала в месте посадки миссии InSight оказались существенно больше значений, предсказанных моделями, построенными по данным спутниковых миссий MGS и Maven (Johnson et al., 2020).

Для получения аналитических продолжений магнитного поля в области посадки миссии InSight мы использовали данные глобальной модели магнитного поля Марса (Langlais et al., 2004; Langlais et al., 2019), построенной по измерениям спутниковых миссий MGS и MAVEN методом эквивалентных источников диполей и преобразованной в непрерывную модель сферических гармоник на высоте 150 км.

Для аналитических продолжений магнитного поля вниз мы использовали структурно-параметрический подход (Степанова и др., 2020), представляющий собой формальное обобщение основных приближенных представлений функций распределения плотностей эквивалентных носителей магнитных масс, возникающих в рамках вариационного подхода в методе линейных интегральных представлений.

Используя структурно-параметрический подход, частью которого является трехмерный метод S-аппроксимаций (Страхов, Степанова, 2002; Stepanova et al., 2019), мы провели серию экспериментов, где аппроксимировали известные компоненты магнитного поля суммой простого и двойного слоев, распределенных на двух симметричных сферах различного диаметра, и построили аналитические продолжения магнитного поля Марса на различных высотах ниже 150 км.

Исследование выполнено по госзаданию Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, а также при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 19-35-51014.

Литература:

[1] Johnson, C.L., Mittelholz, A., Langlais, B. et al. Crustal and time-varying magnetic fields at the InSight landing site on Mars // *Nature Geoscience*, 13, 199-204, 2020.

[2] Langlais B., Purucker M.E., Manda M. Crustal magnetic field of Mars // *Journal of Geophysical Research: Planets*, 109(E2), E02008, 2004.

[3] Langlais B., Thébault E., Houliez A., Purucker M.E., Lillis R.J. A new model of the crustal magnetic field of Mars using MGS and MAVEN // *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124, 1542-1569, 2019.

[4] Степанова И.Э., Щепетилев А.В., Погорелов В.В., Михайлов П.С. Структурно-параметрический подход при построении цифровых моделей рельефа и гравитационного поля Земли с использованием аналитических S-аппроксимаций // *Геофизические процессы и биосфера*, 19(2), 107-116, 2020.

[5] Страхов В.Н., Степанова И.Э. Метод S-аппроксимаций и его использование при решении задач гравиметрии (региональный вариант) // Физика Земли, 7, 3-12, 2002.

[6] Stepanova, I.E., Gudkova, T.V., Batov, A.V. Method of S-, and R-approximations in solving the problems of geophysics: application for Mars // The Tenth Moscow Solar System Symposium, 307-309, 2019.

ВОЗМОЖНЫЕ ЗАПАСЫ ВОДЯНОГО ЛЬДА В ЛУННЫХ ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

Гришакина Е.А.

Институт геохимии и аналитической химии РАН

Исследования Луны, проведенные в самое последнее время космическими аппаратами, показали, что в полярных областях могут содержаться значительные запасы водородсодержащих соединений, к которым относится водяной лед, а также ряд других замороженных и захороненных летучих соединений. Источником воды (водного льда), присутствующего в лунном реголите, могли быть кометы, астероиды, метеориты, межпланетная пыль, космическое выветривание минералов реголита под воздействием ионов солнечного ветра, в результате которого образуется протонная вода, и наконец, дегазация лунных недр.

Для оценки прогнозных запасов водяного льда в лунном реголите в месторождениях, расположенных в Южной и Северной полярных областях, были выделены и оконтурены аномалии с содержанием водяного эквивалента водорода (ВЭВ) 0.33 вес % и более. Если предположить, что весь этот водород содержится в водяном льде, то это соответствует содержанию водяного льда в лунном реголите 2.97 вес % и более. Максимальное содержание ВЭВ в пределах выделенных аномалий достигает 0.54 вес %, что соответствует 4.86 вес % водяного льда. Таким образом, в пределах Южной полярной области было выделено 10 месторождений с максимальным содержанием водного льда в лунном реголите, представляющих наибольший практический интерес, и 7 месторождений в Северной полярной области.

Для оценки прогнозных запасов использовалось минимальное значение содержания водяного льда в пределах выделенных месторождений, равное 2.97 вес %, глубина залегания в лунном реголите до 3 метров, средняя плотность реголита 1.9 г см⁻³ [Slyuta, 2014]. В Южной полярной области площадь выделенных месторождений колеблется от 8.8 до 1939.9 км² с прогнозными запасами от 1 490 000 до 328 405 000 тонн водяного льда.

Суммарные запасы в месторождениях Южной полярной области, представляющие наибольший практический интерес, оцениваются в 734 869 000 тонн, или 7.3×10^8 тонн, и почти в два раза превышают минимальную оценку в 3.9×10^8 тонн, сделанную с учетом минимальной площади ловушек в южном полярном регионе. Суммарные прогнозные запасы в Северной полярной области оцениваются в 341 356 000 тонн, или в 3.4×10^8 тонн, что немного меньше минимальной оценки в 4.5×10^8 тонн по данным [Bussey и др., 2003] и почти в два раза меньше оценки по данным [Spudis и др., 2010]. Таким образом, в целом оцененные прогнозные запасы в Южной и Северной полярных областях достаточно хорошо согласуются с минимальной предварительной оценкой, рассчитанной с учетом минимальной площади постоянно затененных холодных ловушек (кратеров) по данным [Bussey и др., 2003], а также рассчитанных по данным радарной съемки КА «Чандраян-1» на дне 40 кратеров в северной полярной области [Spudis и др., 2010]. Следует отметить, что в данной работе представлена оценка прогнозных запасов в определенных выделенных месторождениях с известными координатами и площадью, и с максимальной концентрацией водяного льда, т.е. представляющие наибольший практический интерес для разведки и добычи воды, и других замороженных газовых компонентов.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНОГО И ЗАПАСНОГО РАЙОНОВ ПОСАДКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА "ЛУНА-25"

Дьячкова М.В., Митрофанов И.Г., Санин А.Б.,
Литвак М.Л., Третьяков В.И.

ИКИ РАН

Для выбора места посадки для космического аппарата "Луна-25" в южном полярном регионе Луны был использован разработанный в ИКИ РАН метод, основанный на технологиях пространственного анализа и позволяющий на основе имеющихся данных о поверхности Луны найти наиболее пригодные для посадки территории. На основе характеристик лунной поверхности внутри предполагаемых эллипсов посадки, а также особенностей нахождения космического аппарата на орбите перед посадкой, были выбраны основной и запасной районы посадки.

Целью данной работы являлось обеспечение мест посадки космического аппарата "Луна-25" геоинформационными материалами, моделирующими инженерные условия на поверхности в месте посадки, в том числе особенности рельефа территории, которые в значительной степени определяют периоды освещенности поверхности Солнцем и длительность сеансов радиосвязи со станциями на Земле. Основой созданной инженерной модели на выбранные районы посадки стали цифровые модели рельефа различного пространственного разрешения, как существующие, так и созданные на основе первичных данных лазерного альтиметра LOLA.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ НОВОГО ГЛОБАЛЬНОГО КАТАЛОГА КРАТЕРОВ МЕРКУРИЯ

Завьялов И.Ю.¹, Жаркова А.Ю.^{1,2}, Козлова Н.А.¹,
Коленкина М.М.¹, Ротару В.А.¹, Коханов А.А.¹

¹ МИИГАиК, Комплексная лаборатория исследования внеземных территорий
(КЛИВТ), Москва, Россия

² Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга МГУ им. М.В.
Ломоносова (ГАИШ МГУ), Москва, Россия

Целью нашей работы является формирование нового глобального каталога ударных кратеров Меркурия, который будет включать как морфометрические (числовые), так и морфологические (качественные) характеристики [1].

Дешифрирование кратеров осуществлялось вручную в ПО ArcGIS с помощью специального инструментария CraterTools [2] на основе анализа и обработки цифровых моделей рельефа (ЦМР), сформированных по данным космического аппарата MESSENGER.

В частности:

1. глобальной ЦМР Меркурия с разрешением 665 м/пиксель, сформированная на основе стереоизображений камеры MDIS NAC и WAC KA MESSENGER [3];
2. четырёх ЦМР на участки Меркурия с разрешением 222 м/пиксель, созданные по данным фотограмметрической обработки [4];
3. ЦМР, полученная по данным лазерной альтиметрии с разрешением 250 м/пиксель, покрывающая широты от 90° с.ш. до 45° с.ш.

Для каждого кратера, внесённого в каталог, была рассчитана его относительная глубина, отношение глубины к диаметру (d/D), а также максимальные, минимальные и средние значения наклонов его внутренних стенок. Все расчёты осуществлялись автоматизированными методами с помощью геоинформационных систем (ГИС) и с использованием исключительно ЦМР, поскольку измерения, осуществлённые по космическим изображениям, отличаются невысокой точностью и не могут быть выполнены для многих кратеров.

В ходе работы нами был доработан метод автоматизации расчёта глубин кратеров [5], реализованный в виде программы на языке программирования Python с использованием библиотеки GDAL (Geospatial Data Abstraction Library). Метод, в том числе, учитывает различные условия, влияющие на точность определения глубины, а именно: угол наклона подстилающей поверхности, характер местоположения кратера, что обеспечивает лучшую точность определения глубины. Весьма вероятно, что это будет не последняя версия метода и он ещё будет улучшаться и дорабатываться, повышая точность расчетов.

Кроме того, нами планируется автоматизированный расчёт других – более комплексных – морфометрических параметров рельефа.

В их числе:

1. числовые характеристики внутренних элементов кратера (диаметр плоского дна, центральной горки или внутреннего кольца при наличии);
2. относительная топографическая позиция вокруг и внутри кратера;
3. межквартильный размах второй производной высот вокруг и внутри кратера;
4. наклон подстилающей поверхности;
5. отношение объёма вала кратера к объёму его чаши.

Итогом выполненной работы станет глобальный каталог кратеров Меркурия, содержащий морфометрические и морфологические характеристики для каждого кратера. Готовый каталог ускорит процесс создания различных карт, в том числе и тематических, а также исследования отложений летучих соединений в постоянно затенённых кратерах. Кроме того, благодаря проведённой работе, появится возможность провести сравнительно-планетологический анализ Меркурия и Луны, с использованием существующих морфометрических и морфологических каталогов Луны [6].

Завьялов И.Ю., Жаркова А.Ю., Козлова Н.А., Коленкина М.М., Коханов А.А. выполнили исследование при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-70019 Стабильность "Создание глобального каталога кратеров Меркурия для фундаментальных исследований планеты".

Литература:

[1] Feoktistova E.A., Zharkova A.Yu., Kokhanov A.A., Rodionova Zh.F., Rotaru V.A. Compilation of a new global catalog of Mercury's craters // The 11th Moscow Solar System symposium (11MS-3), Space Research Institute, Moscow, Russia, October 5-9, 2020

[2] Kneissl T., Gasselt S., Neukum G. Map-projection-independent crater size-frequency determination in GIS environments – New software tool for ArcGIS. Planetary and Space Science, 2011, 59. 1243-1254. 10.1016/j.pss.2010.03.015.

[3] Becker K.J., Robinson M.S., Becker T.L., Weller L.A., Edmundson K.L. Neumann G.A., Perry M.E., Solomon S.C. First Global Digital Elevation Model of Mercury // 47th Lunar and Planetary conference, The Woodlands, Texas, March 21-25, 2016, Abstract#1903.

[4] Preusker F. Oberst, J., Stark A., Matz K-D., Gwinner K., Roatsch T. High-Resolution Topography from MESSENGER Orbital Stereo Imaging – The Southern hemisphere // EPSC Abstracts, 2017, Vol. 11, EPSC2017-591.

[5] Коханов А.А., Креславский М.А., Матвеев Е.В., Козлова Н.А., Карачевцева И.П., 2015. Автоматизация морфометрических измерений в ГИС для оценки локальных характеристик рельефа Луны. Экология, экономика, информатика. Сборник статей: в 3 т. Ростов-на-Дону, Издательство Южного федерального университета. Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг, 2015, с. 166-171. (http://conf-durso.ru/docs/gis_1_2015.pdf)

[6] Козлова Н.А., Завьялов И.Ю. Разработка электронного каталога лунных кратеров с использованием автоматизированных методов ГИС // Сборник тезисов Всероссийской научной конференции «Международный год карт в России: объединяя пространство и время», Москва, Российская государственная библиотека, 25-28 октября 2016 г. — М.: Географический факультет МГУ, стр. 140, 2016. — 325 с. 90 рис. DOI: 10.15356/MapyearRU2016

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОРОНОГРАФА С МАЛЫМ УГЛОМ ВРАЩАТЕЛЬНОГО СДВИГА ДЛЯ ЗАДАЧИ ПРЯМОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ

Заскалько Г.О.^{1,2}, Тавров А.В.¹

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт*

В наши дни бурно развивается новое направление в астрономии - исследование экзопланет. В наши дни уже известно о существовании более пяти тысяч экзопланет, многие из которых являются подтверждёнными, однако многие из них нам ещё предстоит найти и исследовать. Для этого важно суметь "отделить" излучение звезды в системе данной планеты, которое мешает нам, от излучения самой планеты. В связи с этим возникла необходимость в исследовании интерференционного коронографа с малым углом вращательного сдвига в нашей задаче наблюдения экзопланет. Данная работа позволит нам сделать шаг вперёд в решении описанной выше проблемы.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ ТРАНСНЕПТУНОВОГО ОБЪЕКТА 2012 VP113 С ПРОЛЕТНОЙ ТРАЕКТОРИИ В 2026 ГОДУ

Зубко В.А.^{1,2}, Беляев А.А.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *МГТУ им. Н.Э.Баумана*

Объектом нашего исследования является транснептуновый объект 2012 VP113, открытый в 2012 году Скоттом Шеппардом и Чедвиком Трухилио [1]. Из-за схожести орбитальных характеристик небесного тела с объектом (90377) Седна, относится к классу седноидов. Афелий и перигелий орбиты этого седноида превышают 440 и 80 а.е. соответственно. Объект представляет интерес из-за возможной принадлежности к рассеянному диску, либо к внутренней части Облака Оорта [1], а также в рамках гипотезы о существовании девятой планеты [2].

В данной работе рассматривается перелет к объекту 2012 VP113 с помощью гравитационных маневров у Земли, Венеры, Юпитера и Нептуна. В качестве даты запуска выбран 2026 год, поскольку как показали наши исследования, рассматривать даты старта раньше не имеет никакого практического смысла. Даты старта позднее 2026 года, также не подходят, из-за того, что объект практически 50 лет движется от перигелия, то сдвиг дат старта после 2026 года, приводит к увеличению затрат на достижение объекта для времени перелета пределах от 25 до 50 лет.

Проведенный анализ показывает, что схема гравитационных маневров Венера-Земля-Земля-Юпитер при запуске в 2026 году минимальное значение ΔV достигается только при времени перелета больше 35 лет. Однако включение в эту схему пролета Нептуна дает ощутимое преимущество, так как при времени перелета в этом случае минимальное значение ΔV достигается при времени перелета 27 лет и составляет порядка 4 км/с. Также авторами проанализированы схемы гравитационных маневров, реализованные ранее в миссиях «Pioneer 10, 11» и «New Horizons», а именно гравитационный маневр только у Юпитера. Показано, что включение пролета Нептуна и в этом случае приводит к значительному снижению требуемого ΔV . В результате проведенной работы показано, что наименьшие затраты ΔV , среди всех рассмотренных, обеспечивает схема Земля-Венера-Земля-Земля-Юпитер-Нептун-2012 VP113 при старте в 2026 году для времени.

Литература:

[1] Trujillo C. A., Sheppard S. S. A Sedna-like body with a perihelion of 80 astronomical units //Nature. – 2014. – Т. 507. – №. 7493. – С. 471-474.

[2] Batygin K., Brown M. E. Generation of highly inclined trans-Neptunian objects by planet nine //The Astrophysical Journal Letters. – 2016. – Т. 833. – №. 1. – С. L3.

ИССЛЕДОВАНИЕ RV ЭКЗОПЛАНЕТ. ВОЗМОЖНОСТЬ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФАЗОВЫХ КРИВЫХ УЧЕТОМ ТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЛИНИЙ.

Иванова А.Е.^{1,2}, Тавров А.В.¹, Lallement R.³,
Bertaux J.-L.², Marcq E.², Валявин Г.Г.⁴

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales)*

³ *GEPI, observatoire de Paris*

⁴ *Специальная астрофизическая обсерватория РАН*

Существует два наиболее плодотворных метода обнаружения экзопланет: метод фотометрии транзита и метод измерения лучевых скоростей. Метод измерения лучевых скоростей основывается на наблюдении родительской звезды при помощи наземных наблюдательных средств и измерении переменности лучевой скорости, вызванной эффектом Доплера. Статистика экзопланет искажена наблюдательной селекцией вследствие разных чувствительностей спектрографов, разных уровней активности звезд, разных продолжительностей наблюдений и разных методов обработки наблюдений, скорректированная статистика показывает хорошее согласие с теоретическими моделями [1]. В то же время спектры, получаемые наземными средствами наблюдений, подвержены воздействию атмосферы Земли, и начаты работы по исследованию возможности повышения точности фазовых кривых учетом теллурических линий.

В текущий момент, в Специальной астрофизической обсерватории РАН начаты работы по эксплуатации спектрографа высоко разрешения на 6-ти метровом телескопе БТА, позволяющий обнаруживать экзопланеты [2]. Для повышения точности измерений лучевых скоростей необходима точная калибровка спектрографа, максимальная статичность прибора, а также существует возможность повышения точности измерения лучевых скоростей при помощи коррекции спектров от атмосферы Земли (теллурических линий). Алгоритмы коррекции спектров от теллурического поглощения различаются в зависимости от температуры звезды (холодные/горячие), а также в зависимости от участка спектра, поскольку важны глубина и частота линий.

В рамках данного исследования была проведена коррекция спектров горячих звезд в области А-линии Фраунгофера [3]. Данная коррекция была выбрана как начальный этап по двум причинам:

1. Спектры горячих звезд проще корректировать по причине отсутствия звездных линий, в отличие от спектров холодных звезд.

2. Данная коррекция была задействована в исследовании облаков межзвездного вещества, а именно в исследовании линий нейтрального калия на длинах волн 7665 и 7699, и дальнейшем составлении карт облаков межзвездного вещества.

Данная коррекция была выполнена при помощи модели земной атмосферы TAPAS[4].

Данное исследование частично финансируется правительством Российской Федерации и Министерством высшего образования и науки РФ по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

Литература:

[1] А.Е. Иванова, О.Я. Яковлев, В.И. Ананьева, И.А. Шашкова, А.В. Тавров, Ж.-Л. Берто, 2021, Письма в астрономический журнал, том 47, №1, с.46-52

- [2] Valyavin G.G. et al., 2020, Astrophysical Bulletin, Vol. 75 Issue 2, p191-197.
- [3] A. Ivanova, R. Lallement, J.L. Vergely, C.Hottier, “Kinetic tomography of Taurus” submitted A&A
- [4] Bertaux, J. L., Lallement, R., Ferron, S., Boonne, C., & Bodichon, R. 2014, A&A, 564, A46

ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ЛИТОСФЕРЫ ЭКЗОПЛАНЕТЫ ПО СПЕКТРУ ФОНОВЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Караджич А., Филатов В., Ядрихинская Д.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Гравитационные волны – периодические колебания метрики пространства-времени, предсказываемые теорией относительности и надежно зарегистрированные в наземных условиях на высокоточных лазерных интерферометрах. Целью настоящей работы является анализ возможности использования фоновых гравитационных волн для определения состава твердой оболочки космических тел.

Как показывают результаты моделирования [1], электромагнитные волны (в том числе и видимого диапазона), распространяясь в межзвездной среде, вследствие фотон-парафотонных осцилляций порождают высокочастотные гравитационные волны (оптического диапазона частот), пригодные для колебательно-спектроскопического зондирования непрозрачных объектов, например, твердых оболочек экзопланет.

В работе [2] нами было установлено, что распространяющаяся в кристаллической среде гравитационная волна, взаимодействуя с колебаниями решетки, теряет энергию на фонон-гравитонное взаимодействие, что должно приводить к поглощению определенных частот гравитационного спектра, причем величина поглощения зависит от атомной массы вещества, образующего материальную среду. Таким образом, регистрация спектра гравитационных волн, просвечивающих экзопланету, позволяет получить информацию о составе последней. Заметим при этом, что вследствие обратных парафотон-фотонных превращений обсуждаемая гравитационная волна порождает электромагнитную волну того же спектрального состава, что открывает возможности регистрации эффекта при помощи стандартного астроспектрометра.

Литература:

[1] Д.Р. Ядрихинская, В.В. Филатов. Численное моделирование фотон-парафотонных осцилляций в межзвездной среде в присутствии электромагнитного поля // VI Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики» (ФАРМ-2020).

[2] В.С. Горелик, А. Караджич, В.В. Филатов, Д.Р. Ядрихинская. Эффекты при распространении гравитационных волн в кристаллической среде // Одиннадцатая всероссийская конференция «Необратимые процессы в природе и технике» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021 г.).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЯ ДЛЯ ДВУХ ГЛОБАЛЬНЫХ ПЫЛЕВЫХ БУРЬ (2007 И 2018 ГОДА) НА МАРСЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА СПИКАМ ИК НА МАРС ЭКСПРЕСС

Корса С.Я.¹, Федорова А.А.¹, Кораблев О.И.¹,
Монтмессин Ф.²

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *LATMOS/CNRS, Guyancourt, France*

Одной из характерных особенностей климата Марса является наличие пылевых бурь, возникающих во вторую половину марсианского года в период прохождения Марсом перигелия. В некоторых случаях пылевая буря может охватывать всю планету, переходя в глобальную (Global Dust Storm - GDS) [1]. Подобные события случаются крайне редко, раз в несколько марсианских лет. Последний раз это произошло летом 2018 года в марсианский год (MY) 34 Ls=190-240.

Эксперимент СПИКАМ на борту КА «Марс-Экспресс» работает на орбите Марса с 2003 года и состоит из двух спектральных каналов (ультрафиолетового и инфракрасного). Инфракрасный акусто-оптический спектрометр СПИКАМ ИК работает в диапазоне 1 – 1.7 мкм. со спектральным разрешением от 0.5 до 1.2 нм. [2], проводя надирные и лимбовые наблюдения и наблюдения в режиме солнечных затмений. Обширные данные, полученные этим экспериментом, охватывают диапазон, включающий предыдущую глобальную пылевую бурю, произошедшую в 2007 году MY28 [3]. В данной работе будут представлены наблюдения вертикального распределения аэрозоля для двух глобальных пылевых бурь (2007 и 2018 года), проведен сравнительный анализ размеров частиц и плотностей на основе данных солнечных затмений эксперимента СПИКАМ ИК.

Литература:

[1] Huiqun Wang, Mark I. Richardson, The origin, evolution, and trajectory of large dust storms on Mars during Mars years 24–30 (1999–2011), *Icarus* (251), 2015, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.10.033>.

[2] Korablev, O., et al. SPICAM IR acousto-optic spectrometer experiment on Mars Express, *J. Geophys. Res.*, 111, E09S03 <https://doi.org/10.1029/2006JE002696>, 2006.

[3] Fedorova A., et al. Water vapor in the middle atmosphere of Mars during the 2007 global dust storm, *Icarus* (300), 2018, <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.09.025>.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭВОЛЮЦИИ ЯДЕР ЛЕДЯНЫХ СПУТНИКОВ-ГИГАНТОВ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ ДЕГИДРАТАЦИИ

Кронрод Е.В.

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН)

Основные существующие модели спутников включают водно-ледяную оболочку ($\pm$ недифференцированная каменно-ледяная мантия), железосиликатное ядро ($\pm$ внутреннее Fe–FeS₂ ядро). Вопросы о составе, агрегатном состоянии, размерах и физических свойствах ядер спутников, их тепловой эволюции, а также механизмах его формирования до сих пор остаются предметом многочисленных дискуссий. Модели внутренней структуры крупных ледяных спутников накладывают ограничения на состав их ядер в соответствии с веществом обычных (L / LL) или углеродистых (CI) хондритов или их смеси. Распределения температуры в ядрах спутников в значительной степени определяют степень гидратации их силикатной компоненты, наличие или отсутствие внутренних металлических ядер. В настоящей работе представлены результаты по оценкам нестационарных температурных режимов в ядрах с учетом процессов конвективного переноса и фазового перехода гидросиликаты–силикаты при различных начальных составах и размерах ядер. По результатам расчетов можно сделать вывод, что при наличии конвекции состав существенно влияет на тепловую эволюцию ядер. При начальном содержании гидросиликатов $\geq 0,9$ процессы дегидратации не происходят ни при каких размерах ядер.

ПОИСК ФИЛЛОСИЛИКАТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ МАРСА ПО ДАННЫМ SPICAM-IR

Ломакин А.А.^{1,2}, Федорова А.А.¹, Кораблев О.И.¹,
Монтмессан Ф.⁴

¹ ИКИ РАН

² НИУ ВШЭ

³ *Astronomy Department, New Mexico State University, New Mexico, USA*

⁴ *LATMOS CNRS, Guyancourt, France*

SPICAM-IR на КА Марс-Экспресс проводит наблюдения поверхности Марса в ближнем ИК диапазоне уже на протяжении 17 лет (с 2004 года), однако массив этих данных до сих пор не был полностью обработан. В спектральный диапазон SPICAM-IR (1-1.7 микрометров) попадают полосы поглощения CO₂ и водяного льда, позволяя ему картировать распределение этих льдов на протяжении нескольких марсианских лет. Еще одна группа веществ, спектр отражения которых имеет полосы поглощения в спектральном диапазоне SPICAM-IR - это филлосиликаты, группа минералов, которая образовывалась в контакте с водой на раннем Марсе. Они имеют характерную полосу поглощения на длине волны 1.4 микрометра. Изучение пространственного распределения и спектральных особенностей этих минералов может быть ключом для понимания климата Марса в Нойский период.

Поиск гидратированных минералов на Марсе был одной из основных задач инфракрасных спектрометров, начиная с ранних миссий (Erard and Calvin, 1997). Но уверенное детектирование этих минералов началось лишь в 2004 году, когда, картирующий ИК спектрометр OMEGA на Mars Express и позднее CRISM на Mars Reconnaissance Orbiter смогли уверенно отождествить и построить карты их распределения на поверхности Марса (Bibring et al., 2005; Poulet et al., 2005; Mustard et al., 2008). Обнаружение таких минералов с помощью SPICAM-IR могло бы дать больше информации о их пространственном распределении на поверхности Марса. В этом докладе мы представляем результаты поиска филлосиликатов по полосе 1.4 мкм, по массиву спектров поверхности, полученных из данных SPICAM-IR.

Литература:

[1]Bibring, J. (2005). Mars surface diversity as revealed by The OMEGA/MARS Express Observations. *Science*, 307(5715), 1576-1581. doi:10.1126/science.1108806

[2]Erard, S., & Calvin, W. (1997). New composite spectra of mars, 0.4–5.7 μ m. *Icarus*, 130(2), 449-460. doi:10.1006/icar.1997.5830

[3]Mustard, J. F., Murchie, S. L., Pelkey, S. M., Ehlmann, B. L., Milliken, R. E., Grant, J. A., ... Wolff, M. (2008). Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM INSTRUMENT. *Nature*, 454(7202), 305-309. doi:10.1038/nature07097

[4]Poulet, F., Bibring, J., Mustard, J. F., Gendrin, A., Mangold, N., Langevin, Y., ... Gomez, C. (2005). Phyllosilicates on Mars and implications for EARLY Martian climate. *Nature*, 438(7068), 623-627. doi:10.1038/nature04274

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА НОЧНОЙ СТОРОНЫ ВЕНЕРЫ В ОКНЕ ПРОЗРАЧНОСТИ 2.3 МКМ С УЧЕТОМ ПОГЛОЩЕНИЯ SO₂, H₂O, HDO И ДРУГИХ ГАЗОВ

Махамбет А.К.^{1,2}, Федорова А.А.²,
Краснопольский В.А.^{3,1}

¹ *Московский физико-технический институт (Национально исследовательский университет)*

² *Институт космических исследований РАН*

³ *Католический университет Америки*

Соотношения H₂O и HDO являются основным критерием, по которому можно говорить об эволюции атмосферы. В атмосфере Венеры отношение H₂O/HDO более чем в 100 раз больше земного. Это указывает на присутствие на древней Венере довольно большого количества воды, сравнимого с земными океанами, которая, возможно, была потеряна в результате взрывного парникового эффекта. Между тем, измерения изотопного отношения на Венере единичны и дают большой разброс значений от 100 до 240 относительно земного стандарта. Нагретая до огромных температур поверхность Венеры испускает сильное тепловое излучение, поглощаемое CO₂ в нижних слоя атмосферы и достигающее ее верхней границы в узких окнах прозрачности. Целью работы было решение прямой задачи моделирования спектра атмосферы ночной стороны Венеры в окне прозрачности 2.3 мкм в зависимости от различных входных данных. Входными данными являются вертикальные профили малых газовых составляющих, таких как H₂O, CO, SO₂, OCS, HF. Также необходимо было изучить чувствительность спектра окна прозрачности 2.3 мкм в зависимости от соотношения изотопов H₂O и HDO. Для выполнения цели работы был модифицирован программный код на языке Fortran, созданный для расчета переноса излучения в атмосфере Венеры. В дальнейшем планируется использование результатов работы для обработки измерений ночной стороны Венеры спектрографом высокого разрешения SCHELL на телескопе NASA IRTM и получения соотношения изотопов H₂O и HDO в нижних слоях атмосферы.

НАГРУЗОЧНЫЕ ЧИСЛА ЛЯВА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ НЕОДНОРОДНОЙ УПРУГОСТИ ВЕНЕРЫ

Менщикова Т.И., Гудкова Т.В.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

В преддверии сейсмического эксперимента на Венере (Kremis и др., 2020) возрастает интерес к исследованию напряженного состояния недр планеты.

Распределение негидростатических напряжений в недрах планеты можно получить рассматривая планету как упругое сферически-симметричное тело, находящееся под воздействием как поверхностной (рельеф на поверхности планеты), так и внутренних (заглубленные аномалии плотности) нагрузок, Амплитуды нагрузок, которые служат граничными условиями при решении системы уравнений упругого равновесия гравитирующей планеты, определяются по данным топографии и гравитационного поля и нагрузочным числам Лява. Нагрузочные числа Лява (нагрузочные коэффициенты) представляют собой функции отклика планеты на нагрузки, являющиеся аномалиями плотности как на поверхности планеты, так и в недрах планеты.

Нагрузочные числа $kn(r)$ и $ln(r)$ для аномалии плотности, расположенной на заданной глубине r , находятся из решения системы уравнений упругого равновесия гравитирующей планеты (уравнение движения деформированного тела, уравнение Пуассона, закон Гука для изотропной среды), которая может быть представлена в виде шести дифференциальных уравнений первого порядка (Марченков и др., 1984, Марченков, 1987) и решена методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Эти величины зависят от глубины расположения нагрузки, степени гармоник n и выбранной модели. Нагрузочные числа Лява (или нагрузочные коэффициенты) рассчитываются для заданной модели планетных недр.

Реакция планеты в ответ на приложенную нагрузку зависит от модели поведения недр. Реологические свойства Венеры, в настоящее время, точно не установлены. В работе рассмотрены несколько вариантов моделей неоднородной упругости Венеры: наличие упругой литосферы и области под литосферой, претерпевшей вязкую релаксацию (моделируются как ослабленный слой под литосферой варьируемой толщины). Варьируемые параметры модели: толщина коры 30-100 км, толщина литосферы 100-300 км, и глубина нагрузки в мантии.

Считается, что литосферная «крышка» граничит с мантией высокой вязкости, которая находится в состоянии конвекции (Solomatov, Moresi, 1996). Длинноволновая топография Венеры в большей степени поддерживается динамически в подлитосферной мантии (Steinberger et al., 2010). Выбор глубины нагрузки в мантии (задание аномальной массы в мантии, которая движет конвективный поток) – это упрощение физического механизма и является некоторым приближением довольно сложного распределения аномальных масс в мантии. В данной работе используется модель топографии (модель SHTJV360u, Rappaport и др., 1999) и модель гравитационного поля (модель SHGJ180u, Konopliv и др., 1999) до 70 –й степени и порядка. За референсную поверхность принимается поверхность эффективно равновесной Венеры, которая сохранилось от более ранней эпохи (Жарков, Гудкова, 2019; Менщикова и др., 2021).

Литература:

- [1] Гудкова Т.В., Жарков В.Н. Модели внутреннего строения землеподобной Венеры // Астрон. Вестн. 2020. Т.54. № 1 С. 24 – 32.
- [2] Жарков В.Н., Гудкова Т.В. О параметрах землеподобной модели Венеры // Астрон. Вестн. 2019. Т.53. № 1 С. 3– 6.

- [3] Марченков К.И., Любимов В.М., Жарков В.Н. Расчет нагрузочных коэффициентов для заглубленных аномалий плотности // Докл. АН СССР. 1984. Т.15. № 2. С.583-586.
- [4] Марченков К.И. Расчет нагрузочных коэффициентов и их применение для интерпретации неравновесного поля Венеры и Земли. Канд. Дисс. М., ИФЗ РАН. 1987.
- [5] Менщикова Т.И., Гудкова Т. В., Жарков В. Н. Анализ данных топографии и гравитационного поля землеподобной Венеры // Астрон. Вестн. 2021. Т.55. № 1 С. 13– 21.
- [6] Konopliv A. S., Banerdt W. B., Sjogren W. L. Venus gravity:180th degree and order model // Icarus. 1999. V. 139. P. 3–18.
- [7] Kremic T., Ghail R, Gilmore M., Hunter G., Kiefer W., Limaye S., Pauken M., Tolbert C., Wilson C. Long-duration Venus lander for seismic and atmospheric science // Planetary and Space Science. 2020. V. 190. P.104961
- [8] Rappaport N. J., Konopliv A. S., Kucinskas A. B. An improved 360 degree and order model of Venus topography // Icarus. 1999. V.139. P. 19–31.
- [9] Solomatov V.S., Moresi L.N. Stagnant lid convection on Venus // J. Geophys. Res. Planets, 1996. V.101, P.4737-4753.
- [10] Steinberger B., Werner S., Torsvik T. Deep versus shallow origin of gravity anomalies, topography and volcanism on Earth, Venus and Mars // Icarus. 2010. V.207.P.564-577

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ В МАРСИАНСКОМ ГРУНТЕ ВДОЛЬ ТРАССЫ ДВИЖЕНИЕ МАРСОХОДА «КЬЮРИОСИТИ» ПО ДАННЫМ ПАССИВНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИБОРА ДАН

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

Институт космических исследований РАН

Содержание воды в веществе современного Марса характеризует особенности геологической эволюции планеты, а также процессы взаимодействия грунта и атмосферы. Локальные районы Марса с повышенным содержанием воды в грунте представляют особый интерес для проведения детальных измерений химического и элементного состава вещества, так как это вещество могло образоваться в эпоху «влажного Марса» и содержать сложные соединения. Районом научных исследований марсохода НАСА «Кьюриосити» является кратер Гейл, поверхность которого в прошлом была дном марсианского озера.

С целью измерения содержания воды в грунте этого кратера в отделе ядерной планетологии ИКИ РАН был разработан комплекс научных приборов ДАН. ДАН состоит из двух отдельных блоков: блок детекторов и электроники ДАН-ДЭ и импульсный нейтронный генератор ДАН-ИНГ.

В данной работе представлены оценки измерения распределения воды в приповерхностном слое грунта кратера прибором ДАН в пассивном режиме работы. Приведено сравнение среднего содержания воды на пути следования марсохода с вариациями содержания воды в локальных областях поверхности.

ДИНАМИКА ВЕРХНЕГО ОБЛАЧНОГО СЛОЯ ВЕНЕРЫ ПО УФ (283 НМ) ИЗОБРАЖЕНИЯМ ДНЕВНОЙ СТОРОНЫ ПЛАНЕТЫ, ПОЛУЧЕННЫМ КАМЕРОЙ UVI С БОРТА АКАТСУКИ

Солодовникова А.Р., Павлов А.В.

МГУ

С декабря 2015 г. на высокоэллиптической экваториальной орбите Венеры работает аппарат Akatsuki (JAXA - Японское агентство аэрокосмических исследований). На борту аппарата установлена камера UVI для получения изображений облачного покрова планеты в ультрафиолетовом диапазоне: 283 и 365 нм. Канал 283 нм предназначен для наблюдения надоблачной дымки, содержащей диоксид серы (SO₂).

В данной работе мы обсуждаем результаты отслеживания скорости смещения деталей облачного покрова за один венерианский год наблюдений (224.7 сут), выполненных в 2018 г. (орбиты номер: 0071-0083). Получены более 50 тысяч векторов смещения. Построены средний широтный профиль скорости горизонтального потока. На экваторе средняя зональная скорость составляет -93 ± 3 м/с (знак “-“ означает направление зонального потока с востока на запад), меридиональная скорость – около 0. Средний широтный профиль зональной компоненты имеет асимметрию относительно экватора. В северном полушарии максимум скорости (среднеширотный джет) располагается на широте 32.5° с.ш. и имеет скорость -103.3 ± 7.7 м/с. В южном полушарии зональная скорость в джете по абсолютной величине меньше - -98.3 ± 5.0 м/с, а максимум сильнее смещен от экватора в сторону Южного полюса - 37.5° ю.ш. Знак меридиональной компоненты скорости свидетельствует о наличии переноса от экватора к полюсам, характерному для верхней границы ячейки Хедли. Наблюдается зависимость средней скорости горизонтального потока от местного времени. Максимальные скорости в низких и средних широтах наблюдаются после полудня, в 15:30 часов местного солнечного времени.

АКТИВНОСТЬ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В МАРСИАНСКОЙ АТМОСФЕРЕ НА ВЫСОТАХ 20 - 160 КМ ПО ДАННЫМ СОЛНЕЧНОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ АППАРАТА ACS/TGO

Стариченко Е.Д.^{1,2}, Беляев Д.А.^{1,2}, Медведев А.С.³,
Yigit E.⁴, Фёдорова А.А.¹, Alday J.⁵, Кораблев О.И.¹,
Montmessin F.⁶, Hartogh P.³, Трохимовский А.¹

¹ *Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия*

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный, Россия*

³ *Max Planck Institute for Solar System Research, Göttingen, Germany*

⁴ *Department of Physics and Astronomy, George Mason University, Fairfax, Virginia, USA*

⁵ *Department of Physics, University of Oxford, Oxford, UK*

⁶ *LATMOS/IPSL, UVSQ Université Paris-Saclay, UPMC Univ. Paris 06, CNRS, Guyancourt, France*

Гравитационные волны (ГВ) представляют собой периодические колебания воздушных масс, которые проявляются в флуктуациях плотности, температуры, давления и других атмосферных параметров. ГВ являются важнейшим механизмом, связывающим различные вертикальные слои атмосферы. Изучая высотные распределения плотности и температуры, мы характеризуем вертикальное распространение ГВ и оцениваем их влияние на динамику верхней атмосферы. Также мы восстанавливаем такие параметры волнового поля, как частоту Брента – Вайсяля, вертикальные потоки горизонтального импульса, ускорения и потенциальную энергию, и с помощью них характеризуем волновую активность в атмосфере Марса.

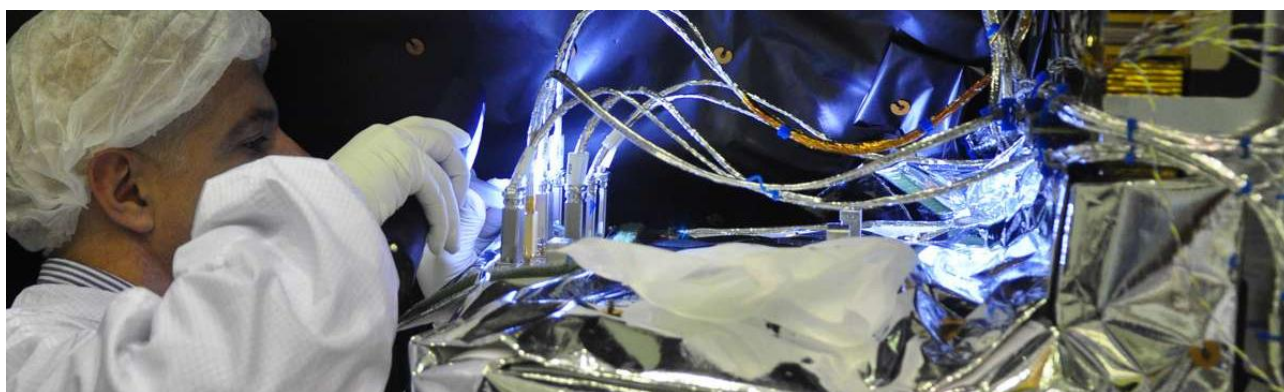
В работе представлены первые результаты восстановления ГВ по данным эксперимента по солнечному просвечиванию, выполняемому российским комплексом спектрометров Atmospheric Chemistry Suite (ACS) с борта орбитального аппарата Trace Gas Orbiter [1] миссии ЭкзоМарс. Канал среднего ИК диапазона (2.3-4.3 мкм) ACS-MIR представляет собой спектрометр со скрещенной дисперсией с разрешающей способностью достигающей ~ 30000 . В режиме солнечного просвечивания спектрометр может наблюдать разреженные слои марсианской термосферы а также нижней атмосферы в сильных (2.7 и 4.3 мкм) и слабых (около 3 мкм) полосах поглощения CO₂ с вертикальным разрешением ~ 1 км. Канал ближнего ИК диапазона ACS-NIR – эшелле-спектрометр работающий в спектральном диапазоне 0.73-1.6 мкм с разрешающей способностью ~ 25000 [2]. Благодаря высокому разрешению, оба инструмента (работающие одновременно) позволяют восстанавливать колебания температуры, давления и плотности в широком диапазоне высот от 20 до 160 км. Представленные данные включают в себя более 100 высотных профилей, полученных со второй половины 34 марсианского года по начало 35 года в обоих полушариях. Анализ данных в ИКИ поддерживается грантом РФФИ #20-42-09035.

Литература:

[1] Korabiev O., Montmessin F., and ACS Team. “The Atmospheric Chemistry Suite (ACS) of threetpectrometers for the ExoMars 2016 Trace Gas Orbiter”, SpaceSci. Rev., 214:7, 2018.

[2] 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.

КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ



СТЕНД ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ НАНОСПУТНИКОВ

Аксельрод Д.Г.¹, Егоров М.В.¹, Мерзляков К.С.¹,
Морозов О.В.¹, Недогарок А.А.², Николадзе Г.М.¹,
Сазонов В.В.¹, Харабадзе Д.Э.¹

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Созданный стенд для испытаний наноспутников состоит из лабораторных моделей наноспутников (формата CubeSat 2U), наземной диагностической оснастки, системы подвеса программно-аппаратного комплекса имитации орбитального полёта, комплекта заземления и антистатика. Кроме того, в состав стенда входят средства измерения из государственного реестра средств измерений.

Сами наноспутники снабжены трёхосевыми гироскопами, акселерометрами и магнитометрами, датчиками освещённости, GPS-ГЛОНАСС приёмником, устройством хранения телеметрических данных (сделано на основе двух независимых microSD карт памяти), инерционным устройством ориентации, а также системой контроля бортового электропитания.

Стенд позволяет обрабатывать действия по управлению ориентацией, обработке телеметрической информации, которая может передаваться как через кабельное соединение (если наноспутник подключён к диагностической оснастке), так и по радиоканалу 430 МГц. В частности, на этом стенде возможно выполнение различных учебных лабораторных работ.

Также данный стенд может использоваться совместно со стендом создания магнитного поля, что имитирует изменение условий окружающей среды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПЕРСПЕКТИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА С МЕЧЕННЫМИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ВЕЩЕСТВА ЛУНЫ, МАРСА И ДРУГИХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ БЕЗ АТМОСФЕРЫ ИЛИ С ТОНКОЙ АТМОСФЕРОЙ

Аникин А.А., Митрофанов И.Г., Литвак М.Л.,
Санин А.Б., Мокроусов М.И., Никифоров С.Ю.

Институт космических исследований Российской академии наук

Один из методов, которые используются для изучения распространённости элементов в районах посадки на Луну или другое небесное тело с тонкой атмосферой или без атмосферы, является гамма-спектрометрия. Как развитие этого метода предлагается перспективный прибор космический гамма-спектрометра с меченными заряженными частицами КГС-МЗЧ, который использует метки времени от протонного телескопа, как способ существенного снижения фоновых гамма-квантов от космического аппарата или дальних участков поверхности.

Для наземной отработки и калибровки КГС-МЗЧ была создана экспериментальная установка (ЭУ), которая может имитировать движение мобильной исследовательской станции (ровера) по поверхности небесного тела. Причем в данном случае из-за стационарности пучка протонов (ионов водорода) требовалось организовать безопасное перемещение тяжелой мишени вдоль него. Мишень должна быть массивной – её толщина (размер вдоль направления пучка протонов) должна быть больше длины свободного пробега протонов, высота должна быть не меньше поперечного сечения пучка протонов, а длина позволять устанавливать внутрь основной мишени несколько мишеней-вставок, имитирующих неоднородности поверхности небесного тела, окруженные с четырех сторон однородным веществом.

Особенностью ЭУ является возможность дистанционного позиционирования мишени относительно пучка протонов и контроль этого положения с помощью ПО, системы видеонаблюдения и лазерной разметки экспериментальной комнаты. Это позволяет, во-первых, экономить время на само позиционирование. Во-вторых, уменьшает случайные погрешности позиционирования. В-третьих, существенно уменьшает время нахождения персонала внутри экспериментального объема с наведенным излучением после ионизирующего воздействия высокой интенсивности, а значит снижает полученную персоналом суммарную дозу облучения. В данном докладе будет представлено описание созданной установки и процесса ее применения.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ В РАМКАХ ЦЕЛЕВЫХ РАБОТ «ПИЧ» НА РС МКС

Анохин М.В., Галкин В.И., Егоров М.В., Морозов О.В., Сазонов В.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

В рамках целевых работ на РС МКС «ПИЧ» (поле ионизирующих частиц), разрабатывается система мониторинга радиационной опасности с помощью метода спектров плотностей энерговыделений; осуществляется разработка методов измерения чувствительности электронных компонентов к одиночным событиям, опирающихся на лабораторный и натурный эксперимент и детальное статистическое моделирование. Определен основной состав научной аппаратуры «ПИЧ», включающий в себя разнесенные в трехмерном пространстве микродозиметрические мониторы, блоки питания и вычисления.

Новый подход, являющийся альтернативой традиционному дозовому подходу к оценке радиационной стойкости электронной аппаратуры космических аппаратов, представляет собой не только метод испытания электроники на радиационную стойкость, он позволяет выстроить цельную систему мониторинга радиационной опасности, исследования стойкости электронных компонентов и оптимизации компоновки создаваемой электронной аппаратуры, опирающуюся на лабораторный и натурный эксперименты и детальное статистическое моделирование. Использование такой системы позволит существенно улучшить прогноз радиационной опасности за счет использования более адекватных физических моделей радиационных эффектов и данных оперативного радиационного мониторинга *in situ* и при этом даст возможность разработчикам и пользователям аппаратуры участвовать в испытаниях или даже проводить их самостоятельно. Переход на предлагаемую систему позволит существенно расширить перечень электронной компонентной базы, разрешенной для применения в космической технике.

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОГО ДЕТЕКТОРА ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Антонюк Г.И.¹, Оседло В.И.¹, Нечаев О.Ю.¹,
Бенгин В.В.^{1,2}, Золотарев И.А.¹

¹ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова

² Государственный научный центр Российской Федерации институт
медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ-ИМБП РАН)

В качестве детекторов космических излучений длительное время использовались такие типы детекторов, как полупроводниковые детекторы, черенковские детекторы и SiPM-детекторы. Приборы, в состав которых входили подобные детекторы, успешно применялись в условиях космического пространства для выполнения различных задач.

В данный момент в НИИЯФ МГУ ведется разработка прибора КОДИЗ (КОмбинированного Детектора ИЗлучения). Он предназначен для регистрации мощности дозы космической радиации, потоков высокоэнергичных ядер, а также потоков нейтронов на микро-спутниках типа CubeSat. Предполагается использование данного прибора для обнаружения появления потока частиц СКЛ, которые могут создавать дополнительную радиационную нагрузку на борту самолетов.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПЛАНЕТНЫХ МИССИЯХ

Бычкова А.С., Ляш А.Н., Захаров А.В., Дольников Г.Г.,
Кузнецов И.А., Карташева А.А., Дубов А.Е.,
Шеховцова А.В., Шашкова И.А., Бедняков С.А.

Институт космических исследований РАН

В космическом пространстве существует три вида пылевых частиц: межзвездные, межпланетные и околопланетные. Каждый вид имеет свои характеристики и примерный диапазон импульсов (mv). Многие космические аппараты имели в своем составе приборы, направленные на регистрацию частиц на пролетных траекториях, однако малая апертура подобных приборов обеспечивала ограниченную статистику регистрируемых данных. В предлагаемом методе регистрации пылевых частиц используются пьезодатчики, установленные на панелях солнечных батарей. В этом случае в качестве апертуры используется солнечная батарея, которая имеется в составе практически любого космического аппарата. Для регистрации пылевых частиц, попадающих в солнечные батареи, и грубой оценке их характеристик, желательно использовать несколько пьезодатчиков. А для корректного определения места попадания пылевой частицы необходимо иметь минимум 3 пьезодатчика на солнечной панели. В общем случае ударная волна достигает датчиков в разные моменты времени и по задержкам сигнала, используя метод трилетерации, возможно достаточно точно определить положение попадания частицы на панели. Зная функцию уменьшения амплитуды сигнала в зависимости от расстояния при распространении волнового возмущения вдоль панели, можно определить реальную амплитуду сигнала, которая, в свою очередь, пропорциональна импульсу частицы.

В докладе приведено описание лабораторного эксперимента, в котором моделировалось механическое воздействие на образец солнечной панели с закрепленными на ней пьезоэлементами. Приводится математическое обоснование, подтверждающее работоспособность предложенной идеи.

СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ОГРАНИЧЕННЫМ УГЛОМ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Городецкий Р.С.

АО "Корпорация "ВНИИЭМ"

Электрические машины космических аппаратов с ограниченным углом вращения ротора применяются там, где невозможно или нецелесообразно получать непрерывное вращение, например, в исполнительных органах управления и руления, датчиках, сканерах, устройствах развертки изображения.

В докладе рассматриваются следующие проблемы создания таких устройств:

- проблемы расчета ресурса подшипниковых опор
- проблемы достижения длительного ресурса подшипников

В докладе рассматриваются результаты научной работы, направленные на решение этих проблем:

1. Результаты теоретического анализа действующих в электрических машинах нагрузок на подшипниковые опоры;
2. Результаты теоретического анализа контактной усталости дорожек качения подшипников;
3. Результаты экспериментального исследования работы смазки и режима смазывания подшипников в вакууме;
4. Озвучивается созданная методика расчета ресурса подшипников;
5. Озвучиваются основные положения созданного руководства по проектированию подшипниковых опор (оптимальный подбор подшипников и вакуумных смазок);
6. Озвучиваются разработанные технические решения, направленные на продление ресурса подшипниковых опор электрических машин космических аппаратов.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ЗАДЕРЖЕК ПРИ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛА БОРТОВЫМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Егоров М.В., Морозов О.В., Николадзе Г.М.,
Сазонов В.В., Самыловский И.А., Харабадзе Д.Э.

МГУ им. М.В. Ломоносова

В 2020 году при решении задачи по изготовлению стенда отработки средств управления космическим аппаратом коллектив авторов разработал методику для измерения временных задержек при обработке сигнала бортовым вычислительным комплексом. Измерения проводились на макете системы, представляющем две вычислительные машины со специальным программным обеспечением, соединёнными через USB порты по схеме «USB порт — Преобразователь USB-RS232 — Преобразователь RS232-RS485 — Преобразователь RS485-RS232 — Преобразователь RS232-USB — USB порт» (преобразователи снабжены гальванической развязкой). Для удобства визуального наблюдения за сигналами была изготовлена плата формирования временных меток. Также в комплекте имелся осциллограф, включенный в Государственный реестр средств измерений. Таким образом, задержки можно измерять непосредственно подключаясь к входам (выходам) тех или иных преобразователей, а также к формирователю временных меток, что избавляет оператора от необходимости расшифровки сигналов.

Характеристики оборудования:

- добавление временной метки внутрь поступившего пакета телеметрии – менее 0,1 мс;
- частота анализируемых сигналов до 12 МГц (в случае использования преобразователя USB-RS232 на базе микросхемы PL2303).

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕР ПЛАНЕТНОЙ ГРУППЫ

Зеневич С.Г.^{1,2}, Газизов И.Ш.^{1,2}, Спиридонов М.В.^{1,2},
Пляшков Е.В.^{1,3,4}, Чурбанов Д.В.¹, Виноградов И.И.²,
Родин. А.В.^{1,2}

¹ *Московский физико-технический институт*

² *Институт космических исследований РАН*

³ *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

⁴ *Государственный научный центр им. М.В. Келдыша*

С появления первых полупроводниковых диодных лазеров на основе солей свинца в начале 70-х годов прошлого столетия область диодно-лазерной спектроскопии (ДЛС) совершила огромный скачок в развитии. На сегодняшний день ДЛС - один из наиболее востребованных и активно развивающихся методов газоанализа. Развитие полупроводниковой отрасли сыграло в этом немаловажную роль, так как сегодня рынок позволяет приобрести необходимый диодный лазер на любую интересующую длину волны в ближнем и среднем инфракрасном (ИК) диапазонах. А компактность, стабильность, высокая квантовая эффективность и низкое энергопотребление, как лазерных, так и детектирующих систем, позволяют разработать компактные технические решения для анализа малых составляющих атмосферы с высокой чувствительностью (единицы млрд⁻¹). Подобная чувствительность может достигаться, в частности, путем использованием многопроходных оптических кювет. А дополнительное использование высокодобротных оптических резонаторов позволяет расширить возможности ДЛС и детектировать уровень поглощения $10^{-7} - 10^{-10}$.

Как показала практика, методы ДЛС можно адаптировать для исследования атмосфер планет земной группы. Первый диодно-лазерный спектрометр для исследований неземной атмосферы был установлен на борт марсохода Curiosity для анализа изотопологического состава атмосферы Марса, который работает до сих пор. Московский физико-технический институт (МФТИ) совместно с институтом космических исследований (ИКИ) в рамках международной космической миссии ЭкзоМарс2022 разработали марсианский многоканальный диодно-лазерный спектрометр (М-ДЛС), работающий на основе метода внутрирезонаторного поглощения [1], для детектирования сезонных вариаций изотопологического состава атмосферы Марса. Технические характеристики и предварительные данные испытаний МДЛС будут представлены в первой части доклада.

Несмотря на все преимущества методов ДЛС, данный метод сугубо локальный и не позволяет анализировать атмосферу планеты на масштабах её толщины. Значительный задел МФТИ в области разработок многоканального лазерного гетеродинного спектрометра ближнего ИК диапазона для задач экологического мониторинга [2-4] позволил разработать техническое решение для анализа состава, структуры и динамики атмосфер планет земной группы с орбитальных космических аппаратов [5,6]. Мотивация и научные задачи для анализа атмосферы каждой отдельной планеты различны, однако, высокое спектральное разрешение гетеродинной спектроскопии порядка $\lambda/\delta\lambda = 10^7$ позволяет одинаково эффективно их решать.

В 2019 году МФТИ и ИКИ совместно выиграли конкурс на разработку спектрометров для орбитальной станции индийского космического агентства, которая отправится к Венере в 2024 году. МФТИ представил концепт многоканального лазерного гетеродинного спектрометра (Иволга), разработка которого сейчас активно ведется. Описанию свойств и возможностям гетеродинной спектроскопии ближнего ИК в приложении исследований атмосфер планет земной группы посвящена вторая часть доклада.

Литература:

[1] Martian Multichannel Diode Laser Spectrometer (M-DLS) for In-Situ Atmospheric Composition Measurements on Mars Onboard ExoMars-2022 Landing Platform / A.Rodin, I.Vinogradov, S.Zenevich, // Appl. Sci. – 2020. – Vol. 10. – P. 8805.

[2] Measurements of a fully resolved contour of the carbon dioxide absorption line in a band at $\lambda = 1.605$ mm in the atmospheric column using high-resolution heterodyne spectroradiometry / S.G.Zenevich, A.Yu.Klimchuk, V.M.Semenov et al. // Quantum Electronics. – 2019. – Vol, 49. - № 6. – P. 604 – 611.

[3] Vertical wind profiling from the troposphere to the lower mesosphere based on high-resolution heterodyne near-infrared spectroradiometry / A.V.Rodin, D.V.Churbanov, S.G.Zenevich et al. // Atmos. Meas. Tech. – 2020. – Vol. 13. – P. 2299–2308.

[4] Improvement of dark signal evaluation and signal-to-noise ratio of multichannel receivers in NIR heterodyne spectroscopy application for simultaneous CO₂ and CH₄ atmospheric measurements / S.G.Zenevich, I.Gazizov, D.Churbanov et al. // OSA Continuum. – 2020. – Vol. 3. - № 7. – P. 1801–1810.

[5] CubeSat project for sounding the atmosphere of Mars / I.Sh.Gazizov, S.G.Zenevich, D.S.Shaposhnikov et al. // 5th IAA Conference on University Satellite Missions and CubeSat Workshop. - Rome, 2020. – P. IAA-AAS-CU-20-05-06.

[6] A concept of lightweight spaceborne multichannel heterodyne NIR spectroradiometer for greenhouse gases remote sensing with the ground validation of expected results / S.G.Zenevich, I.Gazizov, D.Churbanov et al. // Rem. Sens. – 2021. Under review.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОХРАННОСТИ ЮСТИРОВКИ ДВУХЗЕРКАЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА

Ивлев О.А., Сергеева А.Д.

Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения» (АО «НПК «СПП»)

Одной из тенденций развития современного телескопостроения является совершенствование встроенных в телескоп вспомогательных измерительных систем, контролирующих и корректирующих оптическое качество телескопа при воздействии на него дестабилизирующих факторов - температурных и механических (сжатие и гнущие трубы, ветровые нагрузки) деформаций. Это особенно важно для космических телескопов с большой динамикой изменения наблюдаемой картины. Работа контрольно-измерительных систем должна проходить одновременно с работой приемных каналов телескопа и без участия оператора.

В состав лазерного и инфракрасного комплекса наземной оптико-лазерной системы Алтайского оптико-лазерного центра для наблюдения низкоорбитальных космических аппаратов входят два зеркальных телескопа – инфракрасный телескоп (ИКТ), выполненный по схеме Ричи-Кретьена, и телескоп лазерной подсветки (ТЛП), выполненный по схеме Кассегрена. Обеспечение стабильности качества изображения в процессе сеанса, обусловили необходимость создания встроенного датчика контроля и коррекции качества изображения, работающего непрерывно. При этом использование естественных звезд в качестве опорных источников невозможно при больших угловых скоростях слежения, поэтому в составе датчика имеется «искусственная звезда». При установке датчика в ИК-телескоп (рабочий спектральный диапазон 1-5 мкм) необходимо обеспечить минимальные тепловые деления датчика для снижения яркостных помех. Датчик должен обеспечивать коррекцию качества изображения путем стабилизации положения вторичного зеркала по пяти степеням свободы: фокусировка с чувствительностью 2 мкм, линейные смещения поперечные оптической оси - 4 мкм, угловые смещения – 2 угл.сек.

Известна система контроля сохранности юстировки (СКСЮ) для телескопа ТИ-3,12, построенная по схеме Кассегрена. Недостатком данной СКСЮ является малая чувствительность. Известна также СКСЮ для афокального двухзеркального телескопа [1]. Недостатком данной системы является значительные габариты и вес элементов конструкции. Известны система автоматической юстировки (САЮ) и система автоматической фокусировки (САФ), встраиваемые в телескоп космического базирования [2]. Элементы конструкции САЮ и САФ невозможно разместить в узлах телескопов ЛИК без потери одной из ключевых функций датчика - одновременной работы с приемными каналами телескопа.

Отсутствие близких аналогов по совокупности предъявленных требований привело к необходимости создания принципиально нового устройства. Принципы, заложенные в работу данного устройства, а также само устройство запатентованы [3]. Датчики волнового фронта изготовлены и испытаны. В ходе экспериментальных исследований подтверждены теоретические положения и требования к конструкции. Следующим шагом станет проверка датчиков волнового фронта на телескопах ИКТ и ТЛП.

Литература:

[1] Мейтин В.А. Устройство автоматической юстировки двухзеркальной телескопической системы с заданным направлением выходного излучения, патент RU 2 611 604 C1, 21.09.2015.

[2] Савицкий А.М. Влияние теплового режима на конструктивные характеристики космического телескопа // Оптический журнал. 2009. № 76. С. 89–93.

[3] Гришин Е.А., Ивлев О.А., Полунадеждин В.В., Сергеева А.Д., Фенин Р.А. Способ и устройство автоматической юстировки зеркальных телескопов, патент RU 2 690 723, 19.12.2017

КОНСТРУКЦИЯ НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОТРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СОЛНЦЕМ

Карденас Д.В.А.¹, Ромеро А.В.Н.²

¹ *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»*

В настоящей работе описывается конструкция научно-образовательного стенда для исследования и отработки технологии слежения за Солнцем. Предполагается использовать стенд для обучения студентов программированию микроконтроллеров электронных систем космических аппаратов с применением реальных данных. Также стенд может быть применён для решения экспериментальных задач по анализу эффективности алгоритмов ориентации солнечных батарей космического аппарата. В основные задачи солнечного трекера входят:

1. Поддержание ориентации солнечной батареи на Солнце
2. Автономное управление поиском ориентации солнечной батареи на Солнце с диапазоном поворота от 0 до 360° по отношению к горизонту и диапазоном наклона на 180° по отношению к вертикали.
3. Создание и автоматическое пополнение базы данных измерительной информации, поступающей с датчиков стенда (фоторезисторы, гироскоп, акселерометр) .
4. Наглядное отображение данных, полученных с датчиков, а также процесса переориентации солнечной батареи..

Общая цель этого исследования - реализовать технологию слежения солнечной батареи за Солнцем для оценки энергосъёма фотоэлектрических панелей. Для достижения поставленной цели будут решены следующие задачи:

1. Разработка устройства для слежения за Солнцем
2. Использование цифровых датчиков для определения угла падения солнечных лучей.
3. Проведение анализа генерации энергии солнечной панели для различных вариантов ориентации относительно Солнца.
4. Написание программного обеспечения для обработки данных, полученных с датчиков, и создание системы автоматической регистрации данных.

Создание универсального интерфейса, позволяющего исследовать и проводить сравнение алгоритмов ориентации солнечных батарей на Солнце.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВИДЕОСИСТЕМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ИЗДЕЛИЯХ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

**Климов Д.И., Мамедов Т.Т., Орешко В.В., Гусева А.Ю.,
Губайдуллин И.Р.**

Акционерное общество "Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем" (АО "Российские космические системы")

Предлагается включение в телеметрические системы изделий ракетно-космической техники видеосистем, что значительно повысит достоверность информации от существующих средств телеметрирования объектов для отслеживания их штатного функционирования, а также для оперативного и однозначного выявления причин нештатных и аварийных ситуаций.

Предлагается система видеоконтроля, предназначенную для наблюдения правильности протекания технологических процессов на борту изделий ракетно-космической техники. Также предлагается осуществлять измерения физических величин удалённым бесконтактным методом посредством сигналов, получаемых с видеокамер, в частности температуры. В изделиях ракетно-космической техники существуют области или объекты, средняя температура которых в рабочем режиме превышает 1200-1500 К с одновременным наличием повышенной радиации.

Для таких областей контактный метод измерения температуры посредством температурных датчиков не применим ввиду значительного выделения энергии в том или ином виде (тепловой, кинетической, радиационной, и пр.). При этом обозначенные объекты наиболее предрасположены к возникновению нештатных и аварийных ситуаций. Следовательно необходима система, контролирующая бесконтактным методом температуру проблемной области и правильность протекания технологических процессов (разделение составных частей космического объекта, раскрытие конструкций (солнечных батарей, антенн), маневрирование космических объектов) на борту изделий ракетно-космической техники. Причиной выбора данного направления исследований является необходимость визуального контроля наиболее важных процессов, сопровождающих движение космических аппаратов и ракет-носителей, с выдачей разовых команд и измерением температуры термонагруженных элементов перспективных изделий ракетно-космической техники посредством видеосистем.

При научно-исследовательских работах выбранного направления исследований ставится задача применения способов цветовой и яркостной пирометрии в системах видеоконтроля, методов сжатия и обработки информации, элементов теории теплового излучения, математического анализа и теории информации в бесконтактных измерительных системах при создании средств измерений температурных параметров термонагруженных элементов и контроля правильности выполнения технологических процессов изделий ракетно-космической техники.

О КОСМИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЕСТИБУЛЯРНОЙ СТИМУЛЯЦИИ В НЕВЕСОМОСТИ»

Кручинина А.П.¹, Тихонова К.В.¹, Томиловская Е.С.²,
Каспранский Р.Р.³, Лемак С.С.¹, Александров В.В.¹

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

² *ФГБУН ГНЦ РФ ИНСТИТУТ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ РАН*

³ *ФГБУ "Научно-исследовательский испытательный центр подготовки космонавтов имени Ю.А.Гагарина"*

В докладе пойдет речь о космическом эксперименте «Изучение особенностей вестибулярной стимуляции в невесомости». Данный эксперимент – первый этап на пути разработки возможности коррекции вестибулярной информации и имитации влияния силы тяжести для отдельной вестибулярной системы в космосе. В ходе него при помощи трехосевого акселерометра и трехосевого гироскопа регистрируются значения линейных ускорений и угловых скоростей головы при различных типах деятельности в условиях орбитального полета.

Вестибулярная система человека состоит из полукружных каналов, чувствительных к угловым ускорениям, и отолитам, фиксирующим линейные ускорения. В условиях орбитального полета информация для вестибулярных органов меняется, в силу компенсации силы тяжести инерциальной силой, возникающей при движении по орбите. Таким образом в ответ на стандартные стимулы, например поворот головы, вестибулярные органы регистрируют необычное сочетание информации. Учеными Козловской И.Б. и Корниловой Л.Н. показано, что происходит значимые изменения в движениях глаз, которые усложняют выполнение задач космонавтами. В частности, нарушается противовращение глаза, служащее для стабилизации изображения на сетчатке при поворотах головы. Данное явление называется вестибуло-окулярным рефлексом. Для нормализации работы данного механизма предлагается использовать кратковременную вестибулярную гальваническую стимуляцию при повороте головы.

Первым шагом, который решается в космическом эксперименте, должны стать критерии начала поворота головы основываясь на акселерометрической информации, и анализ характерных движений при повседневной деятельности.

Работа опубликована по материалам исследований, выполненных в рамках КЭ «Вектор-МБИ-1» на российском сегменте Международной космической станции»

ЛУННАЯ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВАЯ ЭКЗОСФЕРА: МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ

Кузнецов И.А., Захаров А.В., Дольников Г.Г., Ляш А.Н.,
Шеховцова А., Бычкова А., Карташева А., Дубов А.Е.,
Шашкова И.А.

Институт космических исследований РАН

Поверхность Луны, как и поверхность любого безатмосферного тела Солнечной системы, подвержено постоянной бомбардировке микрометеоритов, воздействию солнечного излучения, солнечного ветра и других факторов космического пространства. В результате ударных воздействий высокоскоростных микрометеоритов в течение миллиардов лет силикатная основа поверхности Луны измельчается, превращаясь в частицы с широким распределением по размерам – от десятков нанометров до миллиметров. Частицы лунного реголита подобных размеров называются лунной пылью. Учитывая взрывную природу возникновения, эти частицы, характеризуется крайне нерегулярной формой с заостренными краями, либо спекшимися при больших температурах конгломератами, либо близкими к сферам каплям.

На освещенной стороне Луны солнечное излучение, особенно ультрафиолетовая часть, и потоки солнечного ветра при взаимодействии с верхним слоем реголита приводят к формированию поверхностного заряда пылевых частиц. Фотоэлектроны, возникшие над поверхностью, и заряженная поверхность реголита создают приповерхностный двойной слой. Электрическое поле, возникающее в этом слое, и флуктуации заряда частиц на поверхности приводят к тому, что электрические силы могут превышать силы гравитации и силы адгезии Ван-дер-Ваальса. В результате этого частицы реголита микронного и субмикронного размеров способны отрываться от поверхности и левитировать над поверхностью.

Наблюдения и измерения данного феномена находились на пике активности в конце 60х – начале 70х годов. Именно тогда как автоматическими аппаратами, так и пилотируемыми экспедициями было получено множество свидетельств наличия пылевых левитирующих структур вблизи поверхности Луны. С тех пор теория возникновения левитирующих пылевых частиц и динамики плазменно-пылевой лунной экзосферы развивалась довольно быстро.

Изучение пыли на Луне носит не только научный, но и практический интерес. Лунная пыль обладает чрезвычайно высокой адгезией, устранение ее с рабочих поверхностей приборов и механизмов нетривиально. Помимо негативного влияния на показатели приборов, пыль также представляет существенную опасность для пилотируемых миссий.

Данная работа посвящена созданию экспериментальной установки, позволяющей моделировать плазменно-пылевые процессы, происходящие на Луне, а также методам моделирования и изучения свойств плазменно-пылевой лунной экзосферы.

РАСЧЁТ И КОРРЕКЦИЯ АБЕРРАЦИИ НЕ ОБЩЕГО ПУТИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ЭКЗОПЛАНЕТ ПОСРЕДСТВОМ ЗВЁЗДНОГО КОРОНОГРАФА

Лазуткин Д.В.^{1,2}, Тавров А.В.²

¹ *Московский физико-технический институт*

² *Институт космических исследований РАН*

В настоящее время исследование экзопланет — новое бурно развивающееся направление в астрономии. На начало 2020 года подтверждено только чуть более четырех тысяч экзопланет, однако уже хорошо известно, что существование планет вокруг других звезд типично для нашей Галактики, а также о большом разнообразии их параметров в сравнении с планетами Солнечной системы. Однако для их детектирования необходимо иметь большую точность волнового фронта.

Цель работы - расчет аббераций необщего пути коронографа и постановка адаптивной оптики для коррекции волнового фронта

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ ДЕТЕКТОР ЧАСТИЦ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА ЗАРЯЖЕННОЙ КОМПОНЕНТЫ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В.

Полярный геофизический институт

В Полярном геофизическом институте был разработан программный комплекс RUSCOSMICS, который позволяет рассчитывать прохождение первичных частиц космических лучей через атмосферу Земли и получать характеристики потоков вторичных частиц, в том числе высотные профили ионизации. Немаловажным этапом при проведении моделирования является верификация полученных результатов, которую удобно проводить при помощи рядов данных, записанных системами сбора с детекторами заряженных частиц (счетчиков Гейгера). Одним из главных источников таких данных является балонный эксперимент, который проводится группой ученых ФИАН. Но несмотря на то, что измерения носят долговременный характер, а также покрывают диапазон высот вплоть до 30 км, они являются локальными. Поэтому было принято решение в дополнение к ним разработать и создать портативный детектор, позволяющий регистрировать скорость счета заряженных частиц и сохранять эти данные для дальнейшей обработки. Как основные особенности устройства, отличающие его от аналогичного оборудования, можно выделить использование в нем модуля источника высокого напряжения собственной разработки, имеющего крайне низкое энергопотребление, а также модуля формирования импульсов при совместном использовании отечественного счетчика Гейгера СТС-5. В качестве системы сбора и обработки сигнала используется микроконтроллер ESP-32. Все это позволяет в значительной мере снизить стоимость детектора, сохраняя при этом его характеристики на уровне специализированного научного оборудования. В работе представлена реализация разработки как на программном, так и на аппаратном уровне и показан пример записанных данных.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО МАКЕТА СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ СВЕРХМАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ КВАДРО-МАХОВИЧНОЙ СТРУКТУРЫ

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

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Создание активной системы ориентации и стабилизации (СОС) для сверхмалых космических аппаратов (СМКА) состоит из нескольких этапов [1-2]. С учетом требований к СМКА и на основе номенклатуры доступных компонентов формируется необходимая элементная база СОС, выбираются оптимальные алгоритмы управления исполнительными органами, разрабатывается и исследуется математическая модель углового движения СМКА, создаётся функциональный аналог (электронно-механический макет), с помощью которого проходит отладка алгоритма и испытания на полунатурном стенде, на заключительном этапе проводятся летные испытания.

Созданный электронный макет СОС предназначен для использования в составе инженерной модели СМКА «Наноспутник БГУ BSUSat-2», спроектированного в форм-факторе Cubesat-3U. Активная система ориентации и стабилизации этого СМКА базируется на комплексе из четырех исполнительных устройств (электродвигатели с маховиками) и трёх ортогональных магнитных катушек для разгрузки маховиков. Оси вращения четырех электро-маховиков расположены соосно с ребрами правильной четырехугольной пирамиды (углы наклона боковых граней к плоскости основания порядка 34°). Такое решение обеспечивает трёхосевой режим управления кинетическим моментом СМКА и дополнительное аппаратное резервирование. Динамическое управление моментом выполнено за счет изменения частоты вращения ротора каждого из электродвигателей маховиков в пределах от 0 до 9 000 об/мин, с возможностью реверсирования. Для управления специальными высокоскоростными бесколлекторными электродвигателями постоянного тока использован синусоидальный закон управления 3-фазных сигналов с использованием обратной связи на основе датчиков Холла.

Создан алгоритм управления в виде PD-регулятора с обратной связью на основе измерительных данных от бортовых датчиков углового движения (микроэлектромеханический гироскоп, магнитометр и датчики направления на Солнце), реализованы и проверены основные режимы одноосной ориентации СМКА на длинном струнном подвесе – успокоение, поиск ориентиров, стабилизация, повороты на заданные углы, угловые маневры. Управление драйверами электродвигателей и работа алгоритма СОС осуществляется под управлением микроконтроллера ARM-архитектуры семейства STM32L.

Проведены аналитические и численные исследования созданной математической модели одноосного углового движения СМКА под управлением СОС в среде MatLab® для проверки устойчивости, уточнения режимов работы, формирования областей допустимых параметров управления, выявления критических условий эксплуатации. Выполнены испытания созданного электронно-механического макета при одноосной ориентации на струнном подвесе.

Полученные результаты и наработки будут использованы при создании летного образца подсистемы ориентации и стабилизации для СМКА BSUSat-2, с целью проведения технологических испытаний в термо-вакуумной камере и на полунатурном стенде с воздушным подвесом.

Литература:

[1] А.В. Туманов, В.В. Зеленцов, Г.А. Щеглов // Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. — 572с.

[2] Интернет-портал NASA [Электронный ресурс] Small Spacecraft Technology State of the Art NASA/TP-2015-216648/REV1 – Режим доступа: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/small_spacecraft_technology_state_of_the_art_2015_tagged.pdf.

СОЗДАНИЕ И ОТРАБОТКА МАКЕТОВ ГЛУБИННЫХ ГРУНТОЗАБОРНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ МИССИИ ЛУНА-27

Носов А.В., Литвак М.Л., Козлова Т.О.

Институт космических исследований РАН

Создание летного образца глубинного грунтозаборного устройства требует глубокой проработки и понимания процессов бурения лунного реголита и отбора проб. Помимо изучения накопленного опыта предыдущих миссий и созданных ранее прототипов необходимы натурные отработки как существующих, так и принципиально новых способов бурения и отбора проб. Для этого создаются лабораторные образцы таких устройств, каждый из которых предназначен для выполнения той или иной задачи, общей целью которых является полная отработка различных методов бурения и отбора проб, предлагаемых для использования в летном образце.

В рамках эскизного проекта российского глубинного грунтозаборного устройства для миссии Луна - 27 был успешно создан и протестирован первый прототип. Данный макет предназначен для бурения и отбора проб с глубин до 2 м с использованием различных буровых инструментов и пробоотборников. В данном материале подробно изложены возможности макета, полученные результаты и этапы дальнейших проработок.

Следующим глобальным этапом макетирования грунтозаборных устройств станет создание прототипа, способного бурить аналог лунного реголита и брать пробы в условиях, максимально приближенных к условиям на лунной поверхности. Данная отработка предполагается в специальной криовакуумной камере, уже созданной и успешно функционирующей в ИКИ РАН. Прототип грунтозаборного устройства сможет верифицировать предложенную методику бурения замороженного аналога лунного грунта с различным содержанием водяного льда (до 5 – 10% по массовой доле) в условиях низких давлений ($<10^{-2}$ мм рт. ст.) и криогенных температур. Отработка этого макета также позволит на ранних этапах испытать специально разработанные приводы в криовакуумном исполнении, системы управления и контроля.

С учетом отработки макетов будет скорректирована методика космического эксперимента связанного с бурением лунного реголита, оценено качество и количество ожидаемых проб реголита, а также отработаны технологии, предлагаемые для летного образца российского глубинного грунтозаборного устройства.

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРОТОТИПОВ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРЕДОБРАБОТКИ, ПОДГОТОВКИ ОБРАЗЦОВ ЛУННОГО ГРУНТА И ИХ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ПЕРЕДАЧИ В АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ НА БОРТУ БУДУЩИХ ЛУННЫХ МИССИЙ

Перхов А.С., Литвак М.Л.

Институт космических исследований РАН

Для достоверности результатов, получаемых аналитическими научными приборами на борту посадочных модулей, необходимо соблюдать определенные требования в процессе предобработки и передачи проб грунта и приводить забираемые образцы к заданному уровню подготовки, чтобы максимально повысить эффективность анализа свойств грунта. Это особенно важно, когда извлекаемый грунт может содержать частицы замороженного лунного льда. Поэтому к разрабатываемым прототипам перегрузочных устройств необходимо предъявлять несколько требований касательно предварительной подготовки грунта до его передачи в аналитические приборы.

Во-первых, это минимально возможное время от момента забора грунта до загрузки образца в приемное отверстие аналитического прибора или герметичного отсека возвращаемого аппарата. Это необходимо, чтобы как можно меньше воды и прочих летучих веществ в результате нагрева испарилось из образца грунта. Вторым условием, вытекающим из первого требования соответственно является минимально возможное изменение температуры образца грунта. Кроме этого, в зависимости от конкретного аналитического прибора, могут предъявляться требования по обработке грунта (удаление камней, разделение на фракции и т.д.).

Критерием успешности разрабатываемых прототипов являются специальные наземные испытания. Это касается процедуры перегрузки с аналогами лунного грунта, содержащими прогнозируемый процент воды. Это позволит понять, какой процент воды останется в образце грунта от первоначального после проведения процедуры перегрузки грунта в условиях, приближенных к условиям космического эксперимента.

Востребованность предлагаемых прототипов проиллюстрирована на примере будущей российской комической миссии «Луна-Ресурс-1». Так как посадка аппарата планируется на полярные широты, то предполагается возможность взятия образцов лунного грунта, содержащих частицы льда (до 5% по массовой доле). А это как раз требует качества подготовки грунта, оговоренного выше. В рамках этой миссии взятие образцов будет осуществляться с разных глубин (до 2 м) лунной поверхности европейским или российским буровым устройством и анализироваться на предмет элементного, изотопного состава, а также наличия различных летучих веществ российским и европейским аналитическим комплексами.

В данной работе рассмотрены различные концепции и прототипы устройств для решения проблем подготовки грунта. Это могут быть как стационарные устройства, так и входящие в состав манипулятора, который осуществляет перегрузку образцов в аналитические приборы. Дальнейшее развитие этих прототипов может быть также использовано и в будущих космических миссиях – не только лунных, но и других объектов Солнечной системы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСПУТНИКОВЫХ ГРУППИРОВОК КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Сазонов В.В., Самыловский И.А., Сазонова С.В.,
Филиппов А.А., Абрамова В.В., Морозов О.В.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Задачи, связанные с моделированием и анализом эффективности построения много-спутниковых группировок, требуют специального программного обеспечения, позволяющего, с одной стороны, выполнять операции, интересующие специалистов в области проектной баллистики, а с другой – предоставлять возможности, интересующие системных инженеров. Данная работа посвящена концепции интегрированной среды разработки (IDE), предоставляющей возможности по созданию и редактированию орбитальных группировок с набором правил взаимодействия между объектами. Используемое для построения модели мира дерево физических и абстрактных объектов позволяет создать образ системы из взаимосвязанных компонентов, которая затем допускает как интерактивное моделирование, так и генерацию отчетов в заданном формате. Приводятся примеры моделирования группировок, состоящих из спутников с различным распределением по орбитальным плоскостям, орбитам различного наклона и т.д.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО АСТРООРИЕНТИРАМ

Сазонов В.В., Самыловский И.А., Соловьев С.В.,
Морозов О.В., Петров А.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Растет количество миссий к различным телам солнечной системы. Для качественного решения научных задач необходимо оперативное определение положения космического аппарата на орбите вокруг небесного тела. Оптимальным решением этой задачи представляется использование данных от бортовых оптических измерительных приборов, в частности звездных датчиков. Этими приборами производя измерения определяют наборы угловых координат реперных объектов, включая Солнце, планеты или другие тела солнечной системы.

В связи с этим возникает задача определения фазового вектора космического аппарата как решения задачи минимизации функционала, задающего отклонение "промоделированных" измерений (т.е. тех, которые были бы произведены на "промоделированной" траектории, порожденной приближением реального фазового вектора) от реальных (т.е. тех, которые были получены с бортовых приборов): Учитывается динамика КА как материальной точки, вращательное движение моделируется "кинематически" за счет нацеливания оптических осей определенных приборов на реперные объекты (Солнце, спутник небесного тела и т.д.).

Для поиска решения применяется программная реализация метода Левенберга-Марквардта и прототип программного комплекса, позволяющий конфигурировать приборный состав КА и параметры набора измерений.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОРРЕКЦИЙ ТРАЕКТОРИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ КОСМИЧЕСКИХ МИССИЙ

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

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Космическая миссия представляет собой многокомпонентную систему, элементы которой взаимодействуют между собой и влияют друг на друга. Системное проектирование такой миссии - сложная задача, требующая анализа взаимной работы наземного и орбитального сегментов и их подсистем. Настоящий доклад посвящен использованию разрабатываемой на факультете космических исследований МГУ инструментальной среды разработки космических миссий MIDE (Missions Integrated Development Environment) для решения задач, связанных с разбиением траектории перелета на несколько участков и ее сквозную оптимизацию с учетом "сшивки" сегментов, заданных в различных системах координат. Используемое для построения модели мира дерево физических и абстрактных объектов позволяет создать образ системы из взаимосвязанных компонентов, которая затем допускает как интерактивное моделирование, так и генерацию отчетов в заданном формате. Предлагается сценарий моделирования перелета космического аппарата с двигателем малой тяги с околоземной на окололунную орбиту, использующий для расчета процедуры решения конечномерной задачи оптимизации, в которой параметрами являются в том числе времена изменения режимов работы двигателя.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЛИНИИ "НАЗЕМНЫЙ ПУНКТ - КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ" В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИССИЙ

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

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Космическая миссия представляет собой многокомпонентную систему, элементы которой взаимодействуют между собой и влияют друг на друга. Системное проектирование такой миссии - сложная задача, требующая анализа взаимной работы наземного и орбитального сегментов и их подсистем. Одна из групп возникающих связей - взаимодействие антенных комплексов наземного контура управления и бортовых антенн космического аппарата. Такие разнородные факторы как положение и ориентация аппарата, его геометрия, подведенная к бортовому передатчику мощность, параметры шумовой температуры на Земле и т.д. определяют значение мощности на входе приемника, шумы и прочие параметры радиолинии. Прогнозирование таких параметров - важная задача системного проектирования хотя бы за счет того, что исходя из проектной пропускной способности канала связи можно определить требуемую мощность на борту и, соответственно, смоделировать работу систем энергоснабжения. Представляемый доклад посвящен использованию для такого моделирования разрабатываемой на факультете космических исследований МГУ инструментальной среды разработки космических миссий MIDE (Missions Integrated Development Environment). Используемое для построения модели мира дерево физических и абстрактных объектов позволяет создать образ системы из взаимосвязанных компонентов, которая затем допускает как интерактивное моделирование, так и генерацию отчетов в заданном формате. Приводится пример миссии, включающей космический аппарат и комплекс модельных наземных станций в Крыму, на Кавказе и в районе Памира (проект "Памир-Чакалтая").

ОБ ИЗМЕРЕНИИ ДАВЛЕНИЯ АТМОСФЕРЫ МАРСА В РАМКАХ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА М-ДЛС

Тептеева Е.С.¹, Казаков В.А.²

¹ *Московский Физико-Технический Институт*

² *Институт Космических Исследований Российской Академии Наук*

Для изучения изотопологических соотношений воды и углекислого газа в атмосфере Марса разработан и изготовлен Марсианский многоканальный диодно-лазерный спектрометр (М-ДЛС), входящий в состав миссии ЭкзоМарс-2022 [1]. Важным аспектом в данном исследовании является точное определение давления исследуемой смеси газов. Интервал давлений, в котором производятся исследования лежит от 1 до 50 торр. Для решения поставленной задачи в приборе М-ДЛС использованы два типа датчиков. Один из них – это датчик Пирани типа HVS Vac04 фирмы «Heimann Sensors», который позволяет проводить измерения в области от 1 до 10 торр [2]. Особенностью датчика подобного типа является зависимость его показаний от рода исследуемого газа. В отличие от Пирани, датчик давления типа ХТМ-140 фирмы «Kulite» начинает корректно работать от 7 торр и выше, тем самым обеспечивая пересечение диапазонов применимости этих двух типов приборов.

Данные датчики хорошо изучены при работе в воздухе и при комнатной температуре. Однако для других газов и при других температурах потребовалось провести лабораторные и теоретические исследования. Получение расчетной зависимости напряжения U датчика Пирани от давления p при различных температурах T было получено путем разделения рассеиваемой мощности на составляющие теплопроводности твердых тел [2,3]:

$$N(U, T) = P_c(T) + P_r(T) + P_g(p, T), \quad (1)$$

где N – электрическая мощность, выделяемая на чувствительном элементе; P_c – мощность, отводимая за счет теплопроводности мембраны; P_r – мощность, отводимая за счет излучения; P_g – мощность, отводимая за счет теплопередачи газа.

Проведено сравнение градуировочных кривых $U(p, T)$ датчика давления, полученной моделированием, с экспериментальной, подтвердившее правильность расчётов. В экспериментах использовался чистый азот для отработки методики, а затем и углекислый газ, так как он составляет основу атмосферы Марса. На данном этапе эксперименты с датчиком Пирани проводились при температурах от 5 до 35 °С и в диапазоне давлений до 10 торр.

Для измерения давления в диапазоне от 7 до 50 торр и при температуре от 5 до 35 °С использовался датчик типа ХТМ-140 фирмы «Kulite». Получение функциональной зависимости $U(p, T)$ для данного датчика проводилось путём аппроксимации полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов для функции двух переменных.

Литература:

[1] Alexander Rodin et al // Martian Multichannel Diode Laser Spectrometer (M-DLS) for In-situ Atmospheric Composition Measurements on Mars onboard ExoMars-2022 Landing Platform // Applied Sciences Q1, 2020, 10 // <https://doi.org/10.3390/app10248805>.

[2] Grau, Mario. et al. // Optimized MEMS Pirani sensor with increased pressure measurement sensitivity in the fine and rough vacuum regimes.: AVS: Science & Technology of Materials, Interfaces, and Processing, 2014 г.

[3] M. Wutz, H. Adam, W. Walcher // Handbuch Vakuumtechnik.: 9th ed. (Vieweg, Wiesbaden, 1997).

РАЗРАБОТКА МЕТОДА РАСЧЕТА И СОЗДАНИЕ ВИХРЕВОГО СТРУЙНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ УСТАНОВКАМИ

Усс А.Ю., Пугачук А.С.

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Работа посвящена разработке вихревых струйных устройств (ВСУ), предназначенных для управления расходом газа. Данный тип арматуры не содержит механически подвижных частей и применяется там, где невозможно применение существующих запорно-регулирующих устройств: для управления высокотемпературными, химически агрессивными и запыленными газами. Основоположниками разработки ВСУ в 60-70 годах были США, Россия, Великобритания, Германия, Чехия, Канада. Военные использовали ВСУ для создания высоконадежных и компактных средств управления летательными аппаратами, которые могут противостоять сильнейшим перегрузкам, радиационным и электромагнитным воздействиям. В результате обзора научно-технической литературы обнаружен ряд систем автоматического управления с применением ВСУ, к которым можно отнести: управления тягой и вектором тяги силовых установок. Известные математические модели рабочего процесса, протекающего в рабочей полости ВСУ основывались на эмпирических зависимостях, которые на практике могут служить лишь в первом приближении для расчета подобного рода конструкций. В связи с отсутствием отлаженных алгоритмов проектирования, большинство из рассмотренных схем так и не было доведено до широкого практического применения. В связи с этим, в данной работе разработан алгоритм проектирования ВСУ, который включает в себя ряд этапов. На первом этапе проведён синтез расчетной схемы, при помощи разработанной классификации ВСУ по ряду конструктивных и функциональных признаков. Затем составлена математическая модель рабочего процесса, протекающего в рабочей полости ВСУ, которая решена численным методом. На следующем этапе разработан стенд и методика проведения экспериментальных исследований. Проведена верификация математической модели. Разработанный алгоритм проектирования ВСУ прошел верификацию на принципиально новой геометрии рабочей полости с торообразной вихревой камерой и распределенной по периметру вихревой камеры подачи питающего и управляющего потоков рабочей среды. В результате проделанной работы, разработан инструмент, позволяющий разработчикам проводить разработку новых ВСУ в интерактивном режиме, а также повысить эффективность проектирования и сократить сроки на разработку за счет возможности внесения изменения в конструктивную схему ещё на этапах проектирования. Предложенный подход к проектированию прошел апробацию при создании газореактивного привода, в котором реализована система управления тягой при помощи ВСУ.

ДОКЛАДА О СРЕДСТВАХ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ, В ЧАСТНОСТИ К ВОПРОСУ О ВИБРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ ПРИ ГОРЕНИИ И ДЕТОНАЦИИ В УСЛОВИЯХ КОСМИЧЕСКОГО ВАКУУМА И МИКРОГРАВИТАЦИИ

Шалевич Д.В.

ООО Лаборатория "Барьер Неизвестности"

Доклад посвящён фундаментальным и прикладным задачам в области приборостроения для исследования космической акустики, а также экспериментальным и производственным возможностям, которые станут доступны в рамках осуществления изобретения "Орбитальная студия" и готовящихся для последующего патентования способов построения на основе космической студии газодинамической и акустической лабораторий по исследованиям процессов детонации, горения и распространению акустических и электромагнитных волн в условиях микрогравитации и экстремального космического вакуума. Отдельное внимание посвящено переосмыслению физико-математических моделей Кирилла Ивановича Щёлкина для актуальных задач в области астрофизических и астрономических исследований ударных волн, распространяющихся в космическом пространстве при различных явлениях, например вспышках сверхновых звёзд.

ПРОВЕДЕНИЕ НАЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЛУННОГО МАНИПУЛЯТОРНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ РАБОТЕ В ЛУННЫХ УСЛОВИЯХ

Яковлев В.А., Литвак М.Л., Козлова Т.О., Носов А.В.

Институт космических исследований РАН

Луна-25 – ближайшая лунная миссия (запуск в октябре 2021 г.), на которой будет установлен лунный манипуляторный комплекс, предназначенный для забора образцов лунного реголита (с глубин 5–25 см) и их последующей передачи в аналитический прибор (лазерный спектрометр ЛАЗМА) для анализа элементного и изотопного состава. В 2020 – 2021 гг. прошли испытания манипулятора в криовакуумной камере в условиях, приближённых к условиям на лунной поверхности (криогенные температуры и низкое давление).

Важной задачей при создании лунного манипуляторного комплекса является верификация его работоспособности в условиях криогенных температур и низких давлений, которые наблюдаются на поверхности Луны. Для решения этой задачи была использована криовакуумная камера, способная имитировать лунную атмосферу, криогенные температуры и образцы-аналоги лунного реголита.

При работе манипулятора в условиях, приближенных к лунным, необходимо учитывать, как множество внешних факторов, таких как состав, температура и плотность образцов аналогов лунного грунта, процент влажности грунта (включая его распределение по глубине), давление в криовакуумной камере, так и параметры самого манипулятора (температура, потребляемый ток, параметры работы приводов и т.д.).

Для установки лунного манипуляторного комплекса в криовакуумную камеру была разработана специальная оснастка, дающая возможность проводить процесс копания и отбора проб близко к тому, как это будет проходить на поверхности Луны, учитывая ограниченные размеры камеры. Нагреватели, установленные на критические элементы конструкции, поддерживают манипулятор в диапазоне рабочих температур. А сама температура контролируется специально созданной системой термодатчиков, показывающей температуры криовакуумной камеры, манипулятора и аналога лунного реголита на разных глубинах. Захолаживание производится порционной подачей жидкого азота в азотные экраны внутри камеры.

В наземном эксперименте была решена задача захолаживания аналога лунного реголита и воспроизведена процедура копания и забора образцов грунта с глубины 4–15 см. Для контроля движений манипулятора были использованы 3 видеокамеры, расположенные в разных местах (одна непосредственно установлена на грунте), дающие панорамную картинку процесса копания и грунтозабора.

Кроме того, использовались аналоги лунных грунтов с различным содержанием воды (0,3 – 1,5% по массовой доле).

Результаты наземных отработок предоставляют важную информацию, которая будет использована в дальнейшем при управлении лунным манипуляторным комплексом в рамках миссии Луна-25.

О ВОЗМОЖНОСТИ СРАВНЕНИЯ ХОДЬБЫ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА «ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЕСТИБУЛЯРНОЙ СТИМУЛЯЦИИ В НЕВЕСОМОСТИ»

Янкова М.М., Кручинина А.П.

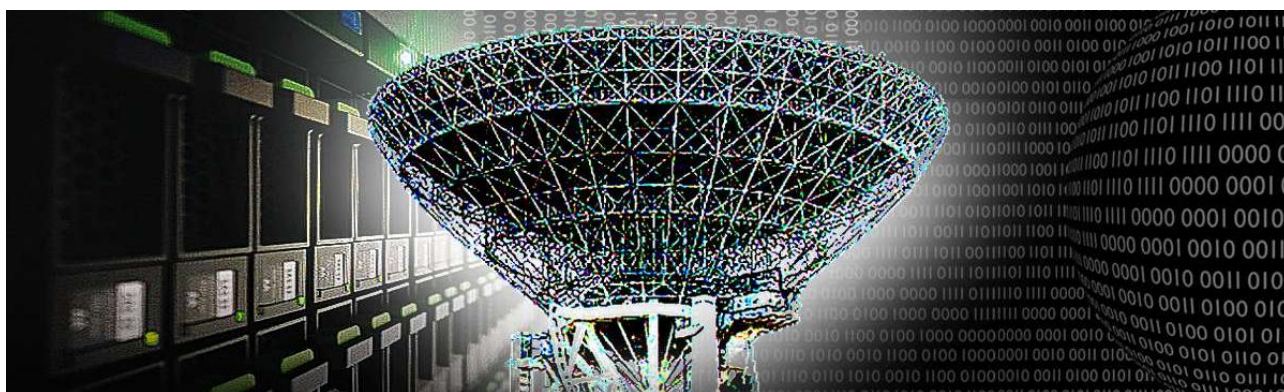
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Инерциальные датчики (акселерометры и датчики угловой скорости) используются для отслеживания и анализа разных движений человека достаточно давно, в частности, для получения рисунка бега и ходьбы человека. Обычно местом закрепления датчика становится конечность, или точка в окрестности центра масс. В космическом эксперименте «Изучение особенностей вестибулярной стимуляции в невесомости» («Вектор-МБИ-1») регистрация данных, в том числе во время бега по беговой дорожке, проводится датчиком расположенным на голове, закрепленном на подобии налобного фонарика.

В докладе будет представлено сравнение разных типов движений: ходьбы, бега по поверхности и по беговой дорожке по данным полученным с инерциального датчика закрепленного аналогичным предусматриваемому в эксперименте «Вектор-МБИ-1» образом. Сравнение данных проводится на основе спектрального анализа.

Работа опубликована по материалам исследований, выполненных в рамках КЭ «Вектор-МБИ-1» на российском сегменте Международной космической станции»

ТЕОРИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ



ЭВОЛЮЦИЯ СПЕКТРА МАГНИТНОЙ СПИРАЛЬНОСТИ В РАМКАХ ТУРБУЛЕНТНОГО ДИНАМО

Абушзаде И.З.¹, Юшков Е.В.²

¹ Бакинский филиал МГУ, Баку, Азербайджан

² ИКИ РАН, Москва, Россия

В теории генерации крупномасштабных магнитных полей планет, звезд и галактик магнитной спиральности уделяется особое внимание, как одному из инвариантов идеальной магнитогидродинамики. Однако, хорошо известно, что помимо генерации крупномасштабных полей в конвективных проводящих потоках может расти энергия мелкомасштабного магнитного поля с нулевым первым моментом. Данный эффект описывается, так называемым турбулентным динамо, при этом есть ли какое-то влияние этой генерации на крупномасштабные поля пока остается неясным. Связано это с тем, что каскад энергии по спектру осуществляется от больших масштабов к меньшим, а не наоборот, соответственно роль мелкомасштабной генерации на больших масштабах предполагается незначительной. Однако теория турбулентного динамо, помимо генерации энергии предсказывает генерацию магнитной спиральности, для которой запрета на транспорт от малых масштабов к большим не существует, а соответственно и ее влиянием в крупномасштабных процессах пренебрегать нельзя. Данный доклад посвящен описанию генерации спиральности в рамках турбулентного динамо, скорости ее роста и разделении в спектре по знаку. Обсуждается возможный транспорт генерируемой спиральности в рамках каскадных моделей и ее возможное влияние на динамо-генерацию средних полей.

МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЙ МЕТОД УСРЕДНЕНИЯ УРАВНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ

Аллахвердиев Р.Р.¹, Юшков Е.В.², Соколов Д.Д.³

¹ Бакинский филиал МГУ, Баку, Азербайджан

² ИКИ РАН, Москва, Россия

³ МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия

Усреднение уравнения магнитной индукции по случайному полю скорости лежит в основе теории динамо, описывающей формирование крупномасштабных астрофизических магнитных полей. Стандартным подходом к усреднению является асимптотический метод, предложенный Краузе и Рэдлером для двухмасштабной турбулентности, то есть для такого случайного поля скорости, которое можно представить как сумму крупномасштабной медленно меняющейся составляющей и мелкомасштабной флуктуирующей компоненты. Именно этим методом были получены классические системы солнечного динамо Паркера и галактического дискового динамо. В настоящем докладе мы расскажем об ином методе усреднения, предложенном Молчановым, Рузмайкиным и Соколовым в 1985 году, для работы с короткокоррелирующим во времени случайным потоком. Этот метод весьма близок к методу функциональных интегралов, используемому в квантовой механике. Он не требует предположения о пространственной двухмасштабности поля скорости и позволяет вывести уравнения динамо для первых и вторых моментов поля в анизотропных и неоднородных условиях. Будут продемонстрированы достоинства и недостатки мультипликативного подхода и возможные области приложения полученных результатов в теории мГД-динамо.

МОДЕЛИ ХОЛОДНОЙ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТ NEWSDM

Анохина А.М.^{1,2}, Видулин И.Д.^{1,2}, Гуляева В.В.¹,
Урсов Э.Д.^{1,2}, Халиков Э.В.²

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет*

² *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына*

К настоящему времени имеются убедительные доказательства существования во Вселенной тёмной материи. Однако для её детектирования необходимо расширение чувствительности экспериментов за пределами нейтринного фона. Направленные эксперименты по поиску темной материи призваны выявить присутствие WIMPов (Weakly Interacting Massive Particles - слабо взаимодействующие массивные частицы) - кандидатов на роль частиц тёмной материи.

Эксперимент NEWSdm [1] (Nuclear Emulsions for WIMP Search - directional measurement: ядерные эмульсии для поиска WIMPов - направленные измерения) выгодно отличается от других высокой чувствительностью эмульсий и направленной схемой эксперимента. Предполагается, что WIMPы способны упруго взаимодействовать с ядрами водорода и группы CNO с образованием коротких треков ядер отдачи (H, C, N, O входят в состав ядерных эмульсий). С помощью микроскопа данные треки изучаются в виде проявленных кристаллов AgBr эмульсии.

Ожидается, что относительно Земли поток WIMPов направлен от созвездия Лебедь с Максвелловским распределением по скоростям (средняя скорость 220 км/с, $\sigma = 156$ км/с) [2]. Планируется зафиксировать избыток событий от Лебеда, так как детектор в течение всего эксперимента будет одинаково ориентирован по отношению к данному направлению.

В настоящей работе проведено моделирование сигналов от упругого взаимодействия WIMPов и солнечных нейтрино с веществом эмульсии с учетом количественных оценок. Для WIMPов сечение взаимодействия получено с помощью программного комплекса MicrOMEGAs [3] для нескольких моделей – расширений Стандартной Модели (MSSM - Minimal Supersymmetric Model, NMSSM - Next to Minimal Supersymmetric Model, IDM - Inert Doublet Model) по различным сценариям. Получены оценки количества сигналов WIMPов и сечения взаимодействия при варьировании свободных параметров моделей в области значений, удовлетворяющих экспериментальной оценке космологической плотности темной материи. Для ядер азота учтён вклад в сечение взаимодействия от спин-зависимой компоненты. Суммарный сигнал ядер отдачи от WIMPов и солнечных нейтрино представлен в проекции Моллвейде. Данная работа позволит оценить, какие области масс WIMPов и свободных параметров моделей сможет покрыть NEWSdm по сравнению с другими экспериментами.

Литература:

[1] De Lellis G. Directional dark matter search with the NEWSdm experiment // EPJ Web Conf. / ed. De Vincenzi M., Capone A., Morselli A. 2019. V. 209. P. 1–5.

[2] Alenazi M.S., Gondolo P. Directional recoil rates for WIMP direct detection // Phys. Rev. D. 2008. V. 77, № 4. P. 1–39.

[3] Pukhov A., Belanger G., Boudjema F. micrOMEGAs : a code for the calculation of Dark Matter properties in generic models of particle interaction // arXiv:1402.0787 [hep-ph]. 2014.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ С УСТОЙЧИВОЙ СТРАТИФИКАЦИЕЙ В ФИЗИКЕ ПЛАНЕТ

Воробьев О.П.^{1,2}, Петросян А.С.^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский университет Московский физико-технический институт*

² *Институт космических исследований РАН*

Моделирование стратифицированных течений играет существенную роль в понимании различных явлений в астрофизике и физике планет. 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 вращающейся жидкости в приближении Буссинеска. В работе используются уравнения Буссинеска для описания тонкой стратифицированной сферической оболочки жидкости во вращающейся системе координат. Для численного моделирования использованных уравнений разработан псевдоспектральный метод с применением разложения поля по полиномам Чебышева. Обсуждаются результаты расчетов трехмерного поля скоростей и исследовано влияние вращения на устойчивые стратифицированные течения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСКОРЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ

Жукова Е.И.

Институт космических исследований РАН

Работа посвящена исследованию причин ускорения и переноса плазмы солнечного ветра в Земной магнитосфере. Построена численная модель, учитывающая различные сценарии ускорения плазмы в токовом слое магнитосферного хвоста Земли. Модель позволяет оценивать эффективность ускорения заряженных частиц (электронов, ионов водорода, гелия и кислорода) в процессах : (А) диполизации; (В) прохождения в среде с турбулентностью; (С) прохождения множественных диполяризационных фронтов; (D) комбинированных механизмов: (А) и (С) с добавлением (D) плазменной турбулентности. Показано, что на разных временных масштабах сценарии (А) - (D) способствуют различному ускорению популяций частиц. Чем ближе масштаб изменения поля к гиропериоду ионов, тем эффективней перенос энергий от полей к частицам. Показано, что ионы O^+ эффективно ускоряются за счет механизма (А); ионы H^+ и He^+ (и в некоторой степени e^-) более эффективно ускоряются в процессе (С), чем в (В). Установлено, что e^- могут быть значительно ускорены в процессе (D). Результаты моделирования показали, что вышеперечисленные процессы носят резонансный характер. Обсуждаются формы энергетических спектров.

ПРОБЕГ ГАММА-КВАНТА ОТ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ

Землянская Д.И., Ефремова В.А.

Московский физико-технический институт (ГУ)

Немалый интерес для физики атмосферы представляет исследование физического явления, предложенного Гуревичем, лавинообразного размножения в веществе быстрых электронов, которое называют пробоем на убегающих электронах (ПУЭ). В процессе распространения в атмосфере они могут вызвать рождение гамма-квантов, которые влияют на динамику процесса. Поэтому возникает интерес к исследованию гамма-квантов в данной системе.

При попадании в среду гамма-квант производит электроны, которые при определенной собственной энергии являются активаторами пробоя на убегающих электронах, поэтому важной характеристикой грозового облака является длина пробега гамма-кванта. Она, а также распределение рожденных квантов, были исследованы в данной работе при разных характеристиках облака.

Также при движении гамма-кванта рождаются позитроны. Они могут играть существенную роль в атмосфере, как показал Дваер, предложив механизм обратной связи от убегающих позитронов и энергичных фотонов.

Результаты получены в ходе моделирования распространения электронов в лавине с помощью библиотеки Geant4. Исследованы гамма-кванты с начальной энергией 1, 5, 9 МэВ в полях в поле до 300 кВ/м на высоте 10 км от поверхности Земли. Одним из итогов нашей работы является то, что модель пробоя на убегающих электронах лучше всего соответствует теории Гуревича на полях выше критических. При повышении данных параметров наблюдаются несоответствия. Также была замечена линейная зависимость длины пробега и длины затухания гамма-кванта от величины поля.

ПОТОКИ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ И МАГНИТНОЙ ЭНЕРГИЙ В ДВУМЕРНОЙ ЗАТУХАЮЩЕЙ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА β -ПЛОСКОСТИ

Зиняков Т.А.¹, Петросян А.С.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

Представлены численные исследования двумерной однородной затухающей магнито-гидродинамической турбулентности на β -плоскости. Изучение фундаментальных свойств такой турбулентности позволяет понять эволюцию различных астрофизических объектов: магнитоактивных атмосфер экзопланет, Солнечного тахоклина, атмосфер нейтронных звёзд. Качественный анализ потоков кинетической и магнитной энергии, квадрата потенциала магнитного поля в двумерной МГД турбулентности на β -плоскости позволяет понять причину каскадных процессов и энергообмена в такой турбулентности. Для качественного анализа и численного моделирования двумерной затухающей магнито-гидродинамической турбулентности на β -плоскости используются уравнения эволюции завихренности и потенциала магнитного поля. Реализован алгоритм расчета потоков по спектру кинетической, магнитной и полной энергий в зависимости от волнового вектора в однородной двумерной магнито-гидродинамической турбулентности на β -плоскости. Проведены соответствующие численные моделирования такой турбулентности с высоким разрешением (8192 на 8192 узлов сетки), достаточным для анализа потоков энергии. Исследованы потоки по спектру для кинетической, магнитной, полной энергий, квадрата потенциала магнитного поля, перекрестной спиральности в двумерной затухающей магнито-гидродинамической турбулентности на β -плоскости.

Исследованы потоки по спектру для кинетической, магнитной, полной энергий, квадрата потенциала магнитного поля, перекрестной спиральности в двумерной затухающей магнито-гидродинамической турбулентности на β -плоскости. Обнаружено наличие отрицательной функции потока кинетической энергии от нелинейного члена в уравнении Навье-Стокса, показывающее слабый обратный каскад кинетической энергии в двумерной магнито-гидродинамической турбулентности на β -плоскости, который также был обнаружен в предыдущих работах. Развита качественная теория потоков кинетической, магнитной и полной энергий, квадрата потенциала магнитного поля и перекрестной спиральности магнитного поля в двумерной магнито-гидродинамической турбулентности. Аналитически получена связь между потоком квадрата потенциала и потоком магнитной энергии в такой турбулентности. Аналитически и численно показан обратный каскад квадрата потенциала магнитного поля, характерный для такой турбулентности. Численно показано нарушение энергобаланса между кинетической и магнитной энергией во время адаптации системы к начальным условиям в двумерной затухающей магнито-гидродинамической турбулентности как без вращения, так и при наличии вращения (в приближении β -плоскости). Наличие связи между потоками квадрата потенциала и магнитной энергии приводит к процессу энергетического обмена между кинетической и магнитной энергиями в двумерной затуха-

ющей магнитогидродинамической турбулентности. Показано, что с увеличением параметра Россби энергетический обмен между магнитной и кинетической энергией усиливается в пользу магнитной энергии. Показаны соответствующие различия в потоках квадрата потенциала магнитного поля в численных моделированиях двумерной МГД турбулентности на β -плоскости для различных параметров Россби β .

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики “Базис” и выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 19-02-00016 и № 20-32-90001.

АНАЛИЗ КОГЕРЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ СТРУКТУРЫ НА ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ

Камалетдинов С.Р.^{1,2}, Васько И.Ю.^{3,1}, Юшков Е.В.^{1,2},
Артемьев А.В.^{1,4}

¹ *Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия*

² *Физический факультет, Московский Государственный Университет, Москва, Россия*

³ *Space Science Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA*

⁴ *University of California, Los Angeles, California, USA*

Головная ударная волна Земной магнитосферы представляет собой естественную лабораторию для изучения процессов и, в частности, различных типов волновой активности в сверхкритических бесстолкновительных ударных волнах. Измерения спутника Wind показали, что одним из типов электростатических флуктуаций на ударной волне являются солитоноподобные структуры с биполярным профилем параллельного электрического поля и длительностью в несколько миллисекунд. Однако, измерения спутника Wind не позволили установить природу данных структур и, кроме того, были ограничены анализом небольшого числа событий (несколько десятков). В настоящей работе, на основе измерений спутниковой миссии Magnetospheric Multiscale в десяти пересечениях головной ударной волны, проведён статистический анализ электростатических солитоноподобных структур с положительным потенциалом. Собрана статистика из 101 структуры, получены оценки параметров данных структур (масштабы, скорости, амплитуды) и установлено, что данные структуры являются электронными дырками. Показано, что наблюдаемые электронные дырки, вообще говоря, нарушают критерий трансверсальной (поперечной) устойчивости и получены оценки времени жизни данных структур. Обсуждаются механизмы генерации электронных дырок на ударной волне.

ЧЕТЫРЕХВОЛНОВЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛН ПУАНКАРЕ В НЕЙТРАЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ В ПРИБЛИЖЕНИИ МЕЛКОЙ ВОДЫ

Климачков Д.А.¹, Петросян А.С.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

При исследовании крупномасштабных течений вращающейся жидкости на плоской подстилающей поверхности традиционно изучают волны Пуанкаре. Другие типы волн во вращающейся жидкости, такие как волны Кельвина и волны Россби рассматриваются в контексте сферичности течения. Среди крупномасштабных планетарных волн волны Кельвина и волны Пуанкаре представляют собой модифицированные вращением гравитационные волны. Волны Россби образуются вследствие зависимости параметра Кориолиса от широты в течениях на вращающейся сфере. Волны Пуанкаре - это медленные крупномасштабные волны во вращающейся тяжелой жидкости, представляющие собой гравитационные волны, модифицированные вращением. Поскольку такие волны относятся к медленным планетарным гидродинамическим процессам, в которых выполняется условие малости числа Россби, равного отношению адвективного ускорения к ускорению Кориолиса, поэтому в геофизическом течении динамику жидкости определяет сила Кориолиса, в то время как влиянием силы инерции пренебрегают. Волны Пуанкаре формируют течения в атмосфере Земли и атмосферах планет, а также определяют процессы в океане.

Для описания крупномасштабных течений в геофизической гидродинамике широко используется приближение мелкой воды. В этом приближении полагают, что характерные длины изучаемых волн много больше высоты слоя жидкости. Классические уравнения мелкой воды получаются из полной трехмерной системы гидродинамических уравнений, записанных для тонкого слоя несжимаемой жидкости со свободной границей в поле силы тяжести, интегрированием по вертикали при условии гидростатического распределения давления и малости высоты слоя по сравнению с характерным горизонтальным масштабом течения.

Линейное решение полученной системы уравнений представляет собой волны Пуанкаре в нейтральной жидкости. Волны Пуанкаре формируют течения в атмосфере Земли и атмосферах планет, а также определяют процессы в океане. Настоящая работа посвящена развитию слабонелинейной теории волн Пуанкаре. Качественный анализ формы дисперсионных поверхностей волн Пуанкаре показывает невозможность трехволновых резонансов в первом порядке по малой амплитуде. Как показано в работе, в этом случае реализуются резонансные взаимодействия волн в более высоком порядке возмущения, а именно, закон дисперсии волн Пуанкаре допускает четырехволновые взаимодействия. Методом многомасштабных разложений исследовано влияние квадратичной нелинейности и получено линейное уравнение модуляций вследствие дисперсии. Получены амплитудные уравнения четырехволновых взаимодействий для всех случаев волновых синхронизмов волн Пуанкаре. В простейших случаях описана нелинейная динамика взаимодействующих волн, получено уравнение сохранения энергии. Для каждого случая исследованы возможные неустойчивости, найдены инкременты этих неустойчивостей.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис» и грантом РФФИ № 19-02-00016.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СЛАБО ИОНИЗИРОВАННОЙ ПЛАЗМЫ

Клименко Ю.Т.², Петросян А.С.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт*

Слабо ионизированной плазмой называется такая плазма, в которой степень её ионизации не превышает нескольких процентов. Важным примером слабо ионизированной плазмы является ионосфера — верхний слой земной атмосферы, а также солнечная хромосфера. Также слабо ионизированная плазма имеет место в тлеющем разряде, в технологических установках. В слабо ионизированной плазме важную роль могут играть взаимодействия ионизованной компоненты с нейтральной. Мы будем интересоваться крупномасштабными процессами в слабо ионизированной плазме при наличии таких взаимодействий. Для описания явлений, происходящих в слабо ионизированной плазме, мы используем уравнения многожидкостной гидродинамики. В работе предложена система уравнений многожидкостной гидродинамики с учетом вращения и наличия внешнего магнитного поля. Получены дисперсионные соотношения посредством линеаризации исходных уравнений и подстановки в линеаризованную систему решений в виде плоской волны. Проведен анализ дисперсионных соотношений в различных частных случаях. Обсуждаются возможности численного решения линейной задачи.

НЕЯВНЫЙ ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОМЕРНЫХ САМОГРАВИТИРУЮЩИХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННОЙ СЕТКЕ

Кондратьев И.А.^{1,2}, Моисеенко С.Г.¹, Саблин М.Н.³

¹ *Институт Космических Исследований РАН*

² *Национальный Исследовательский Университет "Высшая Школа Экономики"*

³ *ВМиК МГУ им. М.В. Ломоносова*

Многомерное численное моделирование является одним из основных методов исследования сложных сжимаемых астрофизических течений, определяющих динамику многих астрономических явлений, таких как, например, взрывы сверхновых с коллапсирующим ядром, аккреция на компактные объекты, коллапс протозвездных облаков и т.д.

При наличии вращения и/или магнитного поля, а также очень плотного плохосжимаемого вещества, течение газа может иметь различные характерные временные масштабы – например, один из которых газодинамический (т.е. связанный, в первую очередь, с распространением акустических волн), а другой может быть связан непосредственно с динамикой интересующих исследователя процессов. При использовании широко распространенных явных схем для решения уравнений газовой динамики приходится разрешать самый малый, газодинамический, масштаб времени, связанный с условием устойчивости схемы (условие Куранта-Фридрихса-Леви), что не всегда является оптимальным подходом в смысле затрат компьютерного времени. Альтернативой явным схемам для моделирования таких течений является использование неявных консервативных численных методов, обладающих большей устойчивостью, но требующих решения систем нелинейных алгебраических уравнений для нахождения параметров течения на следующем временном слое. В данной работе представлен неявный узловый операторно-разностный консервативный численный метод для решения уравнений многомерной газовой динамики в эйлеровых переменных с самогравитацией на неструктурированной сетке, состоящей из треугольников в двумерном случае, и из тетраэдров – в трехмерном.

При построении схемы был использован подход на основе метода опорных операторов [1,2,3] и метода конечного объема [4]. Решение нелинейной системы уравнений находится на каждом временном слое итерационно при помощи линеаризации по методу Ньютона, а также применением итерационного метода GMRES [5] при решении линеаризованной системы уравнений. Представлены результаты тестовых расчетов.

Литература:

- [1] Самарский А.А. Теория разностных схем, М.: Наука, 1989
- [2] Арделян Н.В., Космачевский К.В., Черниговский С.В. Вопросы построения и исследования полностью консервативных схем магнитной газовой динамики, М.: Изд.МГУ, 1987
- [3] Арделян Н.В., Саблин М.Н., Прикладная математика и информатика, №11, с.5 (2002)
- [4] Barth T.J., AIAA-91-1548-CP (1991)
- [5] Saad Y., Shultz M.H., SIAM J. Sci. Stat. Comput., vol. 7, 3, p. 856-869 (1986)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬЮ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Левашов Н.Н.¹, Попов В.Ю.^{1,2,4}, Малова Х.В.^{2,3},
Зеленый Л.М.¹

¹ Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

² Институт космических исследований РАН

³ НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова

⁴ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Переमेжаемость всегда наблюдается в потоке солнечного ветра и заключается в возникновении редких, но сильных всплесков в поведении электромагнитного поля. Для моделирования турбулентного электромагнитного поля с перемежаемостью используется комбинация турбулентного поля со степенным спектром в сочетании с полем, производимого равномерно распределенными небольшими плазмоидами [1].

Турбулентное электромагнитное поле со степенным спектром задается как ансамбль плоских волн:

$$B_z = B_0 \sum_s ((1 + k_s)^2 L^2)^{(-5/8)} \cos(kr - \omega t + \varphi_s)$$

где $\mathbf{k} = (k_x, k_y, 0)$ – волновой вектор, $\omega = C\sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, C – скорость света, L – размер рассматриваемой области.

Вторая часть поля задается путем разбиения моделируемой области на квадратные ячейки, в каждую из которых помещается один плазмод. Поле i -го плазмоида задается при помощи векторного потенциала:

$$\begin{aligned} A_{x_i} &= A_{x_{0i}} \exp(-k_c^2 (r - r_i)^2), \\ A_{x_{0i}} &= A_{0i} \sqrt{1 + (\tan(\psi_i))^2}, \\ A_{y_{0i}} &= A_{x_{0i}} * \tan(\psi_i) \end{aligned}$$

где $k_c = 8/l$, l – размер пространственной ячейки, ψ_i – угол поворота i -го плазмоида, относительно оси $Y=0$, $A_{0i}^2 = A_{y_{0i}}^2 + A_{x_{0i}}^2$ – амплитуда векторного потенциала для i -го плазмоида. Она задается следующим образом: $A_{0i} = a_0 * \alpha^{(-G)}$, где G – Гауссова величина с единичной дисперсией и нулевым средним, α – параметр, для управления степенью перемежаемости.

Статистические моменты y величины, заданной таким образом будут равны: $\langle A^p \rangle^{1/p} = a_0 * \alpha^p$

При значениях $\alpha > 1$, скорость роста моментов, с ростом p , должна неограниченно возрастать, что свидетельствует о наличии перемежаемости [2]. Из формулы для вычисления моментов видно, что чем больше значение α , тем быстрее растут статистические моменты, в зависимости от p . Таким образом, в нашей модели мы будем регулировать степень перемежаемости путем изменения параметра α .

Работа поддержана грантом РФФИ 19-02-00957

Литература:

[1] Zelenyi, L.M., S.D. Rybalko, A.V. Artemyev, A.A. Petrukovich, and G.Zimbardo // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. P. 17110.

[2] Я. Б. Зельдович, С. А. Молчанов, А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов // УФН. 1987. Т 152.

УСКОРЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С МОНОХРОМАТИЧЕСКИМИ СИГНАЛАМИ НАЗЕМНЫХ ОНЧ ПЕРЕДАТЧИКОВ

Лужковский А.А.^{1,2}, Шкляр Д.Р.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

Как известно, в радиационных поясах Земли существуют электроны высоких энергий. Проблема нагрева этих электронов в магнитосфере Земли остается актуальной задачей в физике космической плазмы. Резонансное взаимодействие свистовых волн с электронами радиационных поясов Земли является одним из существенных механизмов ускорения частиц. В настоящее время работает целый ряд наземных ОНЧ передатчиков, сигналы которых распространяются в магнитосфере Земли в свистовой моде. В нашей работе мы не будем привязываться к характеристикам конкретного передатчика. Главным упрощением рассматриваемой нами модельной задачи является предположение о дактированном распространение волны. В этом случае резонансное взаимодействие происходит только на первом циклотронном резонансе, когда продольная скорость частицы $v_{||}$ близка к резонансному значению $v_R = (\omega - \omega_c)/k$. Здесь $\mathbf{k}$ - волновой вектор, направление которого всюду близко к направлению внешнего магнитного поля $\mathbf{B}_0$. В численных расчетах мы полагаем, что ОНЧ передатчик работает стационарно, и монохроматический сигнал с частотой 10 кГц заполняет всю силовую трубку вокруг $L = 3$, так что амплитуда волны является функцией только координаты вдоль лучевой траектории s и определяется следующим уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial s}(\sigma v_g U) = 2\gamma\sigma U, \quad (1)$$

где σ – поперечное сечение лучевой трубки, v_g - групповая скорость, U – плотность энергии волны, а γ - инкремент волны. В настоящей задаче инкремент волны определяется током резонансных частиц и является нелокальным функционалом профиля амплитуды волны, так что уравнение (1) является интегро-дифференциальным уравнением. Также мы полагаем, что основной вклад в инкремент волны вносят нерелятивистские резонансные электроны. Для вычисления амплитуды волны мы пользуемся методом последовательных приближений. В нулевом приближении инкремент волны полагается равным нулю, а профиль амплитуды определяется только геометрическими факторами - поперечным сечением и групповой скоростью. В первом приближении, наряду с учетом геометрических факторов, мы задаем инкремент волны равный линейному вдоль лучевой траектории. В следующем приближении полученная таким образом амплитуда волны используется для вычисления нелинейного инкремента. В нашей работе мы исследуем нагрев электронов релятивистских энергии вследствие их резонансного взаимодействия с сигналом наземного ОНЧ передатчика, амплитуда которого определяется в соответствии с методом последовательных приближений и является заданной для релятивистских элек-

тронов. Магнитосферная плазма часто бывает неустойчивой. В предположении неустойчивой плазмы область захвата по фазе оказывается асимметричной относительно экватора, так что в полушарии противоположном передатчику зона захвата больше, чем в полушарии передатчика. Эта асимметрия приводит к существенному увеличению кинетической энергии захваченных по фазе электронов.

Таким образом, в случае неустойчивой плазмы резонансное взаимодействие релятивистских электронов с монохроматическим сигналом наземного ОНЧ передатчика, распространяющимся диктированно в магнитосфере Земли, приводит к существенному увеличению кинетической энергии малой доли резонансных частиц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ И ПИТЧ-УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В.,
Гвоздевский Б.Б.

Полярный геофизический институт

Ведущей задачей физики космических лучей является оценка уровня радиационного фона на всех высотах атмосферы во время вспышек на Солнце, сопровождающихся событиями возрастания скорости счета на нейтронных мониторах, называемыми GLE (Ground level enhancement). Такое явление обусловлено тем, что значение потока первичных частиц - преимущественно протонов - увеличивается вплоть до нескольких порядков в диапазоне энергий от 1 ГэВ до 10 ГэВ. В этом случае потери энергии будут проходить как через процесс прямой ионизации, так и через каскадные процессы, возникающие на больших глубинах атмосферы. В Полярном геофизическом институте был разработан программный комплекс RUSCOSMICS, одной из возможностей которого является способность получать высотные профили ионизации для заданного участка атмосферы, используя в качестве входных данных спектры первичных протонов космических лучей. Следует заметить, что методика расчета спектров, а также конусов приема и питч-угловых распределений также разработана в Полярном геофизическом институте. Немаловажной особенностью, которую следует отметить для этой работы, является то, что при моделировании взаимодействия частиц используются параллельные вычисления (на базе расчетного центра с установленным сопроцессором Intel Xeon Phi 5110 и основным процессором Intel Core i7). Такой подход позволяет расширить применимость модели с локального участка на глобальную геометрию всей атмосферы Земли. В работе представлены результаты, полученные при использовании в качестве первичных частиц солнечных протонов в виде ионограмм на высотах от 1 км до 80 км с шагом 1 км для всех значений широты и долготы с шагом 5 градусов. Верификация модели проводилась в более ранних работах с использованием данных, полученных во время запуска шаров-зондов, на сегодня эта часть исследования продолжается, включая также в себя разработку собственной системы измерения потоков заряженных частиц.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИК ДОЗИМЕТРИИ К РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОТОНОВ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ЧЕРЕЗ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В.

Полярный геофизический институт

В результате моделирования прохождения частиц космических лучей через атмосферу Земли получают высотные профили, которые представлены как потоки в зависимости от энергии и скорость ионизации или суммарные потоки в зависимости от высоты. В задаче оценки радиационной безопасности во время возрастания уровня естественного фонового излучения важно получать значения эффективной и эквивалентной дозы. Представленная работа посвящена освещению проблемы перехода к этим показателям как от экспериментальных данных, так и от результатов моделирования. Показаны примеры расчета доз на высотах от 0 км до 15 км, вследствие воздействия на объект вторичным излучением, наведенным в атмосфере как галактическими, так и солнечными космическими лучами.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ПРИМЕСИ В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТЕ ПРИ ВАКУУМНОТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Мелешко В.К.

МГТУ им. Н. Э. Баумана

В условиях эксплуатации космический аппарат (КА) подвергается воздействию как естественных факторов космического пространства (ФКП – излучения, вакуум и переменная температура), так и продуктов собственной внешней атмосферой (СВА) – важнейших факторов, снижающих надежность бортовых систем и сокращающих срок активного существования КА. СВА – это газовая оболочка, образующаяся в окрестности КА за счет потери массы неметаллических материалов поверхности, утечки газов из негерметичных отсеков, выбросов продуктов сгорания топлива ракетных двигателей и других процессов. Негативное влияние СВА на функционирование КА проявляется в осаждении его продуктов на чувствительных к загрязнению участках поверхности КА, в первую очередь, оптических. Наличие СВА снижает электрическую прочность открытого электротехнического и радиотехнического оборудования. С ростом давления вблизи поверхности КА увеличиваются вероятности электростатических разрядов приводящих к сбоям в работе бортовой аппаратуры. Все более широкое применение полимерных материалов и негерметизированных отсеков в конструкциях современных КА создает предпосылки для увеличения плотности СВА и присутствия в ее составе высокомолекулярных соединений легко конденсирующихся на поверхностях КА.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), используемые, например, в качестве терморегулирующих покрытий (ТРП) и занимающие значительную площадь поверхности КА, могут служить основными источниками летучих веществ (ЛВ) составляющих СВА. В качестве ЛВ могут выступать как технологические добавки в материал (пластификаторы, растворители, отвердители и т.д.), так и вещества образованные в результате взаимодействия ФКП с ПКМ.

Применение математического моделирования для разработки ПКМ даст возможность детерминировать динамику их потери массы в условиях космоса за счет выбора рецептуры и оптимизации структуры. Это позволит сократить объем испытаний для подтверждения функциональных свойств создаваемых композитов и позволит прогнозировать ожидаемый в условиях эксплуатации уровень их потери массы.

В работе на основе краевой задачи для координатно-зависимой диффузии проведено численное исследование миграции ЛВ в модельных ПКМ и выхода ЛВ в вакуум. Показано, что управляя распределением активного наполнителя ПКМ, можно ускорить или замедлить выход ЛВ в вакуум.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРА АЛЮМИНИЕВОГО ЦИЛИНДРА МИЛЛИМЕТРОВОГО РАЗМЕРА В АНАЛОГИЧНЫЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ ЦИЛИНДР

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

¹ *Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН)*

² *Санкт-Петербургский государственный университет*

С увеличивающимся в геометрической прогрессии объемом космического мусора в околоземном пространстве [1,2] (отработанные ступени ракет, отработавшие спутники, обломки, оставшиеся от случайных столкновений) все более актуальным становится вопрос о защите космического аппарата от ударов микрочастиц. Такая задача сводится к описанию процесса внедрения маленькой частицы в одно-, двух-, или многослойную обшивку космического аппарата. При построении модели такого процесса, которое невозможно осуществить аналитическими методами, можно синтезировать методологию создания схем оптимальных защитных экранов космического аппарата с точки зрения «максимальный уровень защиты от ударов микрочастиц – минимальная масса защитного пакета».

При проектировании оптимальных защитных экранов (в том числе и для разработки материалов экранов) весьма важным является детальное изучение процессов, которые происходят в начальный момент при ударе, а также процессов, происходящих при столкновении облака осколков со вторым и последующими защитными экранами. Экспериментально показано, что процессы соударения сопровождаются неустойчивостью. 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 натурных экспериментах [3] сценарий развития неустойчивости регистрировался с помощью высоко разрешающей интерферометрической диагностики ударно-деформируемых образцов различных материалов (временное разрешение 1нс).

Для построения модели развития локализованной кинетической неустойчивости при ударе рассматривалась следующая задача: удар алюминиевого цилиндра, представленного сплавом Al2024, и имеющего характерные размеры 1 мм, в цилиндр, представленный таким же материалом и имеющий такие же характерные размеры. Моделирование проводилось методом сглаженных частиц.

Вычислительное моделирование показало, что по мере развития процесса высокоскоростного деформирования инициируется коллективное движение частиц среды в противоположную от направления удара сторону. При рассмотрении удара алюминиевого ударника в алюминиевую мишень в некоторый момент времени на масштабном уровне мезо-2 наблюдается турбулизация движения частиц среды при их движении в непосредственной близости к центральной оси мишени. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что переход материала в структурно-неустойчивое состояние имеет локально-кинетическую природу. Полученные результаты позволяют в значительной степени развить кинетический критерий ударно-волновой структурной неустойчивости при ударном

нагрузении материала, а также применить этот критерий к развитию методологии проектирования защитных экранов космических аппаратов.

Литература:

[1] W. Schonberg, Protecting earth-orbiting spacecraft against micro-meteoroid/orbital debris impact damage using composite structural systems and materials: An overview, *Advances in Space Research* 15 (6) (2010) 709-720. doi:10.1016/j.asr.2009.11.014.

[2] V. Adushkin, S. Veniaminov, S. Kozlov, M. Silnikov, Orbital missions safety – A survey of kinetic hazards, *Acta Astronautica* 126 (2016), 510-516. doi:10.1016/j.actaastro.2015.12.053.

[3] Ю.И.Мещеряков. Многомасштабные ударно-волновые процессы в твёрдых телах. – СПб., Нестор-История, 2018.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Осипенко А.И., Костарев И.С.

Акционерное Общество "Научно-производственный центр "Полюс"

Сварочный процесс – один из многих, к которому в космической отрасли предъявляются жесткие требования. От его качества зависят герметичность, функциональность и надежность как космического аппарата (КА), так и входящих в его состав блоков и устройств. Например, при создании электромеханических исполнительных органов (ЭМИО) особое внимание уделяется выполнению электронно-лучевой сваркой сварного соединения кожуха и корпуса, образующих гермокамеру. Учитывая, что кожух толщиной 2 мм выполнен из алюминиево-магниевого сплава, необходимо подобрать такой режим сварки, при котором не произойдет изменения его толщины и габаритов, а полученный шов между кожухом и корпусом будет ровным, герметичным и выдержит все механические нагрузки.

Для определения оптимального режима сварки и прогнозирования распределения тепловых полей в ЭМИО при электронно-лучевой сварке наиболее удобным инструментом является математическое моделирование, которое позволяет ускорить процесс оптимизации и сократить издержки на проведение экспериментов.

Цель исследования заключается в разработке методики моделирования сварочных швов, которая позволит выбрать оптимальные параметры электронно-лучевой сварки: скорость движения, ток луча, его диаметр, ускоряющее напряжение.

Объектами исследования являются кожух и корпус ЭМИО, зафиксированные медным ободом и установленные в оправку.

Сварка кожуха и корпуса осуществляется в вакууме 10–2 мм рт. ст. пучком диаметром 0,25 мм при температуре твердого тела 22 °С. Методика математического моделирования сварки заключается в том, что для имитации сварочного процесса в модель установки в месте сварки добавлены элементы 0,25х0,25 мм, соответствующие размерам реального пучка. Для каждого элемента задавалась объемная мощность, их включение происходило последовательно по часовой стрелке. Время включения одного элемента соответствовало времени воздействия пучка в зависимости от его мощности. В связи с симметричностью модели и для сокращения времени расчета исследование проводилось только для 1/7 ее части (с радиальным углом 15°), так как данной части достаточно, чтобы установились режим и картина распределения температуры. Так как теплопередача на границе модели и вакуума отсутствует, для исключения обратной теплоотдачи считалось, что энергия пучка электронно-лучевой сварки распространяется в течение времени 0,04 с.

В результате проведенных исследований можно сказать, что предложенная методика моделирования электронно-лучевой сварки позволяет спрогнозировать распределение температуры в составных частях ЭМИО и подобрать наиболее оптимальный вариант режима исходя из скорости движения пучка, его мощности, температуры и глубины проплавления кожуха и корпуса, исключая деформацию элементов конструкции.

РАЗРАБОТКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ЧИСЛЕННОГО ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ПУАССОНА НА ВЛОЖЕННЫХ СЕТКАХ

Переладова А.Е.

Новосибирский национальный исследовательский государственный университет

Был изучен и реализован метод сопряженных градиентов для решения уравнения Пуассона для восстановления гравитационного потенциала. Необходимо исследовать реализацию на тестах, допускающих аналитическое решение, в том числе с эллипсоидом и сферы Бонна-Эберта.

К ВОПРОСУ О ФОРМИРОВАНИИ ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ИОНОСФЕРЕ МАРСА

Резниченко Ю.С.^{1,2}, Дубинский А.Ю.¹, Попель С.И.^{1,2,3}

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия,
reznichenko.yus@phystech.edu*

² *Московский физико-технический институт (государственный университет),
Долгопрудный, Россия*

³ *Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва,
Россия*

Исследована динамика пылевых частиц марсианской ионосферы на высотах около 100 км. Показано, что в результате интенсивной конденсации пересыщенного углекислого газа ионосферы создаются предпосылки для формирования слоистых пылевых образований. Также рассматривается влияние пылевых частиц, активно растущих в пересыщенном углекислом газе, на динамику заряженной компоненты ионосферы.

Кроме того, показана возможность существования и распространения в ионосфере Марса пылевых звуковых волн, например, солитонов. Исследованы пылевые звуковые солитоны, распространяющиеся в ионосфере Марса в плазменно-пылевых облаках на высотах около 100 км. Показывается, что характеристики солитонов существенным образом зависят от параметров пылевой плазмы. Так, амплитуда солитона растет с увеличением концентрации пылевых частиц или же с уменьшением концентрации электронов. Увеличение концентрации пылевых частиц на порядок дает рост амплитуды также примерно на порядок. Уменьшение концентрации электронов на порядок приводит к росту амплитуды солитона примерно на порядок величины.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СПЕКТРАЛЬНОГО ТЕНЗОРА НЕСЖИМАЕМОГО ТУРБУЛЕНТНОГО СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ

Сафонов С.И.¹, Петросян А.С.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт (НИУ)*

Исследованы спектральные и топологические характеристики турбулентного течения космической плазмы в приближении магнитной гидродинамики с помощью метода быстрых искажений. Теория быстрых искажений является методом линейного анализа для вычисления 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. Исследованы развитие изначально изотропной однородной магнитогидродинамической турбулентности при наличии крупномасштабного сдвига скорости и внешнего магнитного поля и переход к анизотропии. Получен общий вид разложения спектрального тензора корреляций скорости, магнитного поля и перекрестных корреляций на изотропную, анизотропную составляющие.

Общая структура спектрального тензора корреляций задается из геометрических соображений в базисе Крайя-Херринга, используя симметрию и несжимаемость жидкости. Полученное выражение можно разложить на базисные матрицы, соответствующие различным симметриям, и определить слагаемые, отвечающие за изотропию, анизотропию по направлению волнового вектора, поляризационную анизотропию и антисимметрию. 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.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-02-00016.

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКАХ

Семенюк Е.А.^{1,2}, Петросян А.С.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт*

Рассмотрено движение частиц пыли в турбулентном потоке газа, характерного для протопланетного диска. В простейшем случае газ считается несжимаемым, а турбулентность является кеплеровской и описывается уравнением Навье-Стокса и уравнением непрерывности:

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla P - \nabla \Phi + \nu \Delta \vec{u} \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 \end{cases}$$

Здесь u - скорость газа, P - давление газа, Φ - гравитационный потенциал протозвезды, ν - кинематическая вязкость газа.

Моделирование данного течения осуществлено с помощью упрощенной модели турбулентного потока, имитирующей локальные свойства астрофизических дисков. Локальное приближение заключается в совпадении полученных уравнений для возмущений с исходными глобальными уравнениями в небольшой области вокруг фиксированной точки в диске. К преимуществам данного подхода относятся упрощенное численное моделирование и простота в определении граничных условий. Основная идея модели состоит в осуществлении перехода в подвижную систему отсчета, связанную с центром малой вычислительной ячейки. Данная ячейка расположена таким образом, что ее характерный размер $l \ll r$, где r - расстояние от центра ячейки до протозвезды. Такой выбор вычислительной области позволяет считать разность между кеплеровской угловой скоростью для центра ячейки и кеплеровской угловой скорости в любой точке ячейки пренебрежимо малой.

$$\Omega = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}, \Omega_0 = \sqrt{\frac{GM}{r_0^3}}, \Omega - \Omega_0 \approx 0$$

Для решения упрощенной системы уравнений начальное условие получено с помощью метода кинематического моделирования, в котором поле скоростей представляется в виде суммы статистически независимых мод Фурье со случайными коэффициентами. Коэффициенты подобраны таким образом, что результирующее поле скоростей удовлетворяет уравнению непрерывности, имеет форму заданного для уравнения Эйлера энергетического спектра для изотропной трехмерной турбулентности.

Движение частиц пыли в газовом течении описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\vec{u}(\vec{x}_p(t), t) - \vec{v}}{\tau_p}$$

Здесь $\vec{v}$ - скорость частицы, $\vec{u}$ - скорость газа, $\vec{x}_p$ - координата пылинки, τ_p - характерный временной масштаб трения между частицей и газом. Поскольку движение частиц малых размеров практически целиком определяется движением газа, то отклонение траекторий можно считать малым. В связи с этим для уравнения движения частиц пыли справедливо разложение в ряд Тейлора:

$$v_i(\vec{x}, t) \simeq u_i(\vec{x}, t) - \tau_p \frac{du_i}{dt}(\vec{x}, t)$$

Если рассматривать пыль как сжимаемый газ частиц, то для него справедливо уравнение непрерывности. Взятие дивергенции в данном уравнении позволяет оценить знак дивергенции скорости газа частиц в уравнении непрерывности для газа частиц, что в свою очередь позволяет определить характер изменения плотности газа частиц. Для кеплеровской турбулентности в результате решения соответствующих уравнений получено распределение дивергенции скорости газа частиц от времени. Присутствуют устойчивые области, в которых соответствующее значение производной плотности газа частиц по времени больше нуля, что свидетельствует о кластеризации пыли в кеплеровском течении. Области скопления частиц соответствуют локальным максимумам давления газа. 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.

Литература:

- [1] Pan L., Padoan P., Scalo J., Kritsuk A.G., Norman M.L.. Turbulent Clustering of Protoplanetary Dust and Planetesimal Formation // The Astrophysical Journal, v.740, n.1
- [2] Hawley J. F., Gammie C.F., Balbus S.A.. Local Three-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Accretion Disks // Astrophysical Journal v.440, p.742

ЭФФЕКТЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЯХ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ ПО СПУТНИКОВЫМ GPS-ДАННЫМ НАД СЕЙСМИЧЕСКИМИ ЗОНАМИ КАРИБСКОГО БАССЕЙНА В ЯНВАРЕ 2010 Г.

Титова М.А.¹, Захаров В.И.^{4,5}, Пулинец С.А.^{2,3}

¹ *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН*

² *Институт космических исследований РАН*

³ *Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН*

⁴ *Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова*

⁵ *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН*

Актуальность задачи по развитию методов непрерывного мониторинга состояния ионосферной плазмы обусловлена существенным влиянием ионосферы на работу радиотехнических систем связи, локации и навигации. Одним из современных подходов к решению этой проблемы является транзионосферное зондирование, связанное с развитием глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. Исследованию возникновения ионосферных неоднородностей, как результата влияния литосферно-ионосферных проявлений в период крупного регионального землетрясения, напрямую не связанных с гелио- и геомагнитной активностью и посвящена данная работа.

Метод определения ПЭС по данным натурных стационарных наблюдений дает достаточное разрешение по пространству при совместном использовании станций специализированных сетей глобальной IGS (International Geophysical Survey) и региональной UNAVCO (University Navstar Consortium). Анализ позволил выявить структуры, связанных с эпицентром, границами тектонических плит и разломов, орографией местности. Получить оценки расстояний между местоположениями подионосферных точек и литосферными границами тектонических плит; оценки скорости, направления и отклонения азимута для каждой структуры.

ОДНОМЕРНЫЕ ТОКОВЫЙ СЛОЙ С НЕГИРОТРОПНЫМ ДАВЛЕНИЕМ: МНОГОЖИДКОСТНАЯ МОДЕЛЬ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Федоров И.Е.^{1,2}, Шустов П.И.^{1,2}, Артемьев А.В.^{1,3}

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

² *НИУ ВШЭ, Факультет Физики, Москва, Россия*

³ *Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles, California, USA*

Теоретическое описание токового слоя хвостовой области земной магнитосферы представляет собой важную, до конца не решённую задачу космической плазмы. Существующие семейства моделей токовых слоёв хорошо описывают двухмерные равновесия с изотропным и гиротропным тензорами плазменного давления, в то время как более реалистичные, и интересные с точки зрения исследований динамики магнитосферы, модели токовых слоёв с негиротропным или анизотропным давлением остаются менее разработанными. Среди наиболее детализированных и близких с данным спутниковых наблюдений моделей можно отметить серию кинетических равновесий с токовым слоем, поддерживаемым токами т.н. пролётных ионов на «сперсеровских» орбитах. Однако такие модели не имеют аналогов в МГД описании, что существенно осложняет исследование их адиабатической эволюции, свойственной длительному процессу формирования тонкого токового слоя на подготовительной фазе магнитосферной суббури. В этой работе мы исследуем один из вариантов многожидкостной одномерной модели токового слоя с негиротропным давлением, которое является отличительной чертой популяции пролётных ионов. Разбирается вопрос о роли негиротропии и анизотропии давлений в балансе токового слоя. Приведены примеры сопоставления макроскопических параметров слоя и данных спутниковых наблюдений в хвостовой области магнитосферы. Обсуждается возможность применения многожидкостных моделей для обобщения описания крупномасштабной структуры хвостовой области земной магнитосферы.

ВОЛНЫ В СЖИМАЕМЫХ УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЯХ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ

Федотова М.А.¹, Петросян А.С.^{1,2}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт (НИУ)*

В данной работе исследуются сжимаемые магнитогидродинамические течения в устойчиво стратифицированном вращающемся слое плазмы в поле силы тяжести в неупругом приближении.

В этом приближении акустические волны отфильтровываются, в системе присутствуют члены с потенциальной температурой (энтропией), а уравнение неразрывности содержит начальный стратифицированный профиль плотности. Учёт силы Кориолиса произведен в четырёх различных приближениях: на f -плоскости, на нестандартной f -плоскости (с учетом горизонтальной компоненты силы Кориолиса), на β – плоскости и на нестандартной β – плоскости. Были обнаружены новые типы волн с вращением, магнитным полем, гравитацией и сжимаемостью в качестве восстанавливающих механизмов.

Эффекты сжимаемости представлены в новых дисперсионных уравнениях частотой Брэнта – Вайсяля для сжимаемых стратифицированных течений, зависящей как от начального профиля плотности, так и от профиля давления.

Все возможные типы трёхволновых взаимодействий были выявлены путем качественного анализа дисперсионных кривых. Система уравнений для амплитуд взаимодействующих волн и инкременты параметрических неустойчивостей были получены методом многих масштабов.

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис» и грантом РФФИ № 19-02-00016.

ПОРОГ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СВИСТОВЫХ ВОЛН В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛАЗМЕ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Французов В.А.^{1,2}, Шустов П.И.^{1,2}, Артемьев А.В.^{1,3}

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

² *НИУ ВШЭ, Факультет физики, Москва, Россия*

³ *Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles, California, USA*

Одна из основных электромагнитных волновых мод в плазме – свистовые волны – существенно влияют на динамику радиационного пояса земли, отвечая за укоренение электронов до релятивистских энергий их рассеяние в ионосферу. Основным механизмом генерации свистовых волн является неустойчивость тепловой анизотропии горячих электронов. Для однокомпонентной (бимаксвелловской) плазмы теория неустойчивости даёт простое соотношение, описывающее порог генерации данных волн в зависимости от температурной анизотропии и плазменной беты. Однако, более реалистичным для плазмы магнитосферы Земли является функция распределения, состоящая из нескольких популяций различной температуры и ее анизотропии, так что температурная анизотропия оказывается существенной только для ограниченного энергетического диапазона. Такие многокомпонентные распределения могут быть неустойчивыми к генерации свистовых волн в данном диапазоне энергий, в то время как их средняя анизотропия будет значительно ниже порога неустойчивости, полученного для однокомпонентного распределения. В данной работе мы обобщаем выражение для порога генерации свистовых волн для систем с многокомпонентной функцией распределения электронов, которая характерна для магнитосферы Земли. В работе показано, что полученный более реалистичный порог генерации хорошо описывает параметры плазмы, при которых наблюдается генерация свистовых волн.

СВЕРХКОРОТКИЙ РАДИОИМПУЛЬС СО СКАЧКАМИ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ НА МЕЖПЛАНЕТНОЙ ТРАССЕ

Худышев Ю.С.

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

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 начальной фазы 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 изложены результаты теоретического анализа искажений синусоидального цуга с постоянной амплитудой колебаний и конечным числом скачков начальной фазы излучаемого поля в бесстолкновительной плазме на трассах, интегральная электронная концентрация ТЕС которых характерна для межпланетных расстояний.

Введение в расчет скачков начальной фазы обеспечивает дополнительное усложнение структуры частотного спектра излучаемого импульса и, как следствие, заметные изменения временного хода напряженности принимаемого поля. При достаточных величинах ТЕС временной ход принимаемого излучения может быть охарактеризован по виду амплитудного спектра излучаемого импульса.

Выполнен анализ корреляционных функций регистрируемого излучения и возможный вклад в него излучения плазменной среды.

ДИНАМИКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ В ПРОЦЕССЕ ЕГО ИНВЕРСИИ (ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ)

Царева О.О.

Институт космических исследований РАН

В настоящее время геомагнитное поле ослабевает, а его магнитные полюса смещаются, что может свидетельствовать о начале новой геомагнитной инверсии. Поскольку магнитное поле защищает Землю от космического излучения, возникают опасения, что его инверсия может угрожать жизни на Земле. Поэтому исследование изменений радиационной обстановки на Земле, радиационных поясов и атмосферы в процессе геомагнитной инверсии является актуальной задачей.

Для анализа эволюции радиационных поясов в процессе геомагнитной инверсии теория Штермера развита на случай суперпозиции двух осесимметричных магнитных полей, диполя и квадруполья. Определены разрешенные и запрещенные области движения заряженных частиц в дипольно-квадрупольном поле, и их области захвата, обеспечивающих устойчивое существование радиационных поясов во время геомагнитной инверсии. Оценена скорость диссипации атмосферы в процессе геомагнитной инверсии в предположении постоянного притока частиц. Показано, что во время инверсии магнитное экранирование атмосферы Земли будет все еще эффективно. Разработана численная модель динамики заряженных частиц в магнитном поле Земли. В рамках модели, согласно инверсионному сценарию, оценена радиационная опасность на Земле и на орбите МКС.

Таким образом, геомагнитная инверсия приводит к реконфигурации радиационных поясов, незначительной диссипации атмосферы и некритическому ухудшению радиационного фона на Земле.

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА ВОЛН ПУАНКАРЕ И РОССБИ В СЖИМАЕМЫХ ТЕЧЕНИЯХ МЕЛКОЙ ВОДЫ

Юденкова М.А.^{1,2}, Климачков Д.А.², Петросян А.С.^{1,2}

¹ *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*

² *Институт космических исследований Российской академии наук*

Приближение мелкой воды применяется для описания течения тонкого слоя жидкости со свободной поверхностью. Классические уравнения мелкой воды являются альтернативой решению полной системы гидродинамических уравнений в поле силы тяжести. Несмотря на фундаментальный характер теории мелкой воды, она не учитывает неоднородность плотности слоя жидкости, который возникает под действием силы тяжести. В работе классические уравнения мелкой воды обобщены на случай сжимаемой жидкости. Получена система квазилинейных дифференциальных уравнений, которая описывает течение сжимаемой жидкости со свободной поверхностью в приближении мелкой воды с учетом вращения. Найдены решения полученной системы в виде линейных волн Пуанкаре на f -плоскости и волн Россби на бета-плоскости в сжимаемых течениях. Исследована нелинейная динамика волн Пуанкаре и волн Россби в сжимаемых течениях методом многомасштабных разложений. Полученные трехволновые уравнения на амплитуды взаимодействующих волн проанализированы на наличие параметрических неустойчивостей и найдены их инкременты.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-02-00016

ФИЗИКА СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ



ПОИСК АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СОЛНЦА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ В КАРТАХ РАССЕЯННОГО СОЛНЕЧНОГО ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЯ

Авдеева А.С.^{1,3}, Измоденов В.В.^{1,2,3}, Катушкина О.А.¹

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *МГУ им. М.В. Ломоносова*

³ *НИУ ВШЭ*

Солнечные Лайман-альфа фотоны рассеиваются на нейтральных атомах водорода, которые проникают в гелиосферу из межзвездного пространства. Было показано (Bertaux et al., 2000), что данные о рассеянном Лайман-альфа излучении могут быть использованы для обнаружения активных областей на обратной (невидимой с Земли в данный момент) стороне Солнца. Так как активные области Солнца излучают больше фотонов, чем спокойные, они освещают больше атомов и вносят дополнительный вклад в регистрируемое излучение. Это дополнительное излучение можно обнаружить на полных картах рассеянного Лайман-альфа излучения даже в том случае, если активность находится на обратной стороне Солнца.

В данной работе реализуется модель рассматриваемого явления, а также предлагается метод решения обратной задачи – определения параметров активной области по данным измерений Лайман-альфа излучения на космическом аппарате SOHO (прибор SWAN) и модельному распределению межзвездного водорода в гелиосфере. Этот метод позволяет определить местоположение активной области (долготу и широту), а также комбинацию ее размера и интенсивности. Метод апробирован на модельных картах и показывает хорошее соответствие. С использованием модели проведен анализ данных SOHO (SWAN) в июле 2016 года и получены оценки параметров активной области на определенные моменты времени. Полученные нашим методом параметры активной области (долгота и широта) сравниваются с положением видимых на изображениях Солнца, полученных космическим аппаратом STEREO.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАРАЛЛАКСА ПОТОКОВ ГЕЛИОСФЕРНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

Балюкин И.И.^{1,2}, Измоденов В.В.^{1,2,3}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

³ *Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН*

Энергичные нейтральные атомы (ЭНА) образуются в процессе перезарядки протонов солнечного ветра с атомами во внутреннем ударном слое (области возмущённого солнечного ветра между внутренней ударной волной и гелиопаузой), где плазма сильно нагрета. Потоки ЭНА водорода несут определяющую информацию о свойствах границы гелиосферы. Нами была разработана численная модель распределения энергичных нейтральных атомов водорода гелиосферного происхождения (Baliukin et al., 2020), которая качественно (и во многом количественно) воспроизводит структуру потоков ЭНА, наблюдаемую в данных космического аппарата Interstellar Boundary Explorer (IBEX), который с 2008 г. проводит измерения на орбите Земли при помощи инструмента IBEX-Hi (в диапазоне энергий от 0.3 до 6 кэВ). Новизна и оригинальность разработанной модели состоит в детальном кинетическом подходе для моделирования распределения над-термальной компоненты – захваченных протонов, которые рождаются в области сверхзвукового солнечного ветра и захватываются гелиосферным магнитным полем.

В рамках разработанной модели были рассмотрены различные траектории космических миссий (с использованием одного и двух космических аппаратов), а также изучены границы применимости эффекта параллакса для определения расстояния до источников рождения ЭНА из внутреннего ударного слоя. В частности, была рассмотрена концепция космической миссии с двумя аппаратами, запущенными в плоскости эклиптики в противоположных направлениях перпендикулярно направлению движения Солнца относительно локальной межзвездной среды. Были выполнены расчеты синтетических карт неба в потоках ЭНА, которые симулируют наблюдения космических аппаратов, находящихся на различных расстояниях в заданных направлениях. Результаты данных расчетов будут полезны для планирования будущих космических миссий, таких как широко обсуждаемые сейчас миссий Interstellar Probe (NASA) и Interstellar Express (CNSA, Китай). Использование эффекта параллакса на основе синтетических модельных карт неба в потоках ЭНА позволило сделать заключение, что источники гелиосферных ЭНА водорода в направлении набегающего потока межзвёздной среды находятся на расстоянии порядка $\sim 87 - 94$ а.е. от Солнца. Данный результат хорошо согласуется с модельным значением расстояния ~ 91 а.е., полученным в случае, когда в качестве модельной меры расстояния до источника для заданного луча зрения используется взвешенное величиной интенсивности рождения ЭНА арифметическое среднее.

СТРУКТУРА ТОКОВОГО СЛОЯ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ МНОГОСПУТНИКОВОЙ МИССИИ CLUSTER

Варнаев Г.И.^{1,2}, Григоренко Е.Е.²

¹ *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия*

² *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

В данной работе исследуется структура токового слоя (ТС) в хвосте магнитосферы Земли. ТС в хвосте магнитосферы является важнейшей областью, в которой происходит накопление и высвобождение магнитной энергии. Важными факторами, влияющими на структуру и временную эволюцию ТС является ионный состав плазмы и анизотропия функции распределения заряженных частиц. В данной работе исследовано влияние относительного содержания тяжелых ионов на структуру ТС. Для изучения этих факторов используются данные, полученные космической миссией Cluster, в частности приборами CIS (Cluster Ion Spectroscopy) и FGM (Fluxgate Magnetometer) для определения плазменного состава и магнитного поля соответственно. Измерения проводились в момент, когда Cluster находился на расстоянии 15–19 земных радиусов от Земли в геомагнитном хвосте. Для исследования структуры ТС были отобраны несколько пересечений ТС с различными относительными концентрациями легких и тяжелых ионов. Были построены пространственные распределения плотности тока в зависимости от B_x компоненты магнитного поля и координаты Z вдоль нормали к плоскости ТС. Плотность тока определялась с помощью метода курлометра (Curlometer technique). В результате установлено, что наблюдаемые профили плотности тока существенно отличаются от изотропной модели Харриса и показано влияние плазменного состава на наличие вложенных токовых структур и на толщину ТС.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ГЕЛИОСФЕРЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ, СВЯЗАННЫХ С НЕСТАЦИОНАРНОСТЯМИ ГЕЛИОСФЕРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ

Годенко Е.А.^{1,2,3}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН*

³ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

Гелиосфера движется относительно локальной межзвездной среды, которая состоит из плазменной, нейтральной [1] и пылевой компонент. Вследствие относительного движения частицы межзвездной пыли могут проникать в гелиосферу. На частицы межзвездной пыли в гелиосфере основное влияние оказывают три силы: сила гравитационного притяжения, сила радиационного давления и электромагнитная сила. Ранее мы показали наличие особенностей в распределении концентрации [2] и областей повышенной концентрации межзвездной пыли для случая плоского стационарного гелиосферного токового слоя, фокусирующего пылинки в окрестности плоскости эклиптики, а также исследовали влияние дисперсии скоростей пыли [3] на упомянутые особенности. В реальности, гелиосферный токовый слой плоским и стационарным не является вследствие эффектов, связанных с циклами солнечной активности, а также вследствие вращения Солнца вокруг своей оси. Цель данной работы - выяснить то, какое влияние оказывает нестационарное поведение гелиосферного токового слоя на формирование особенностей в распределении концентрации.

Для описания движения межзвездной пыли используется кинетический подход, который состоит в решении кинетического уравнения для функции распределения по скоростям. Движение гелиосферного токового слоя складывается из двух вращений - “быстрого” вращения с периодом в 25 суток вокруг оси солнечного вращения и “медленного” вращения с периодом в 22 года (из-за циклов солнечной активности) вокруг одной из осей, лежащей в плоскости эклиптики. Решение кинетического уравнения проводится методом Монте-Карло. При добавлении указанного движения токового слоя распределение концентрации межзвездной пыли существенно меняется. В случае холодного газа для крупных пылевых частиц сингулярности в распределении концентрации смещаются вниз по направлению движения набегающего потока межзвездной среды (направление downwind). Моделирование для частиц различных размеров, удовлетворяющих распределению частиц по размерам в межзвездной среде, показывает, что в некоторые моменты времени области повышенной концентрации образуются и в направлении upwind (за счет более мелких частиц, которые более чувствительны к магнитному полю), что может быть интересно в контексте астрономических наблюдений и планирования будущих миссий по исследованию межзвездной пыли.

Литература:

[1] Izmodenov, V.V., Alexashov, D.B., 2015, *Astrophys. J. Suppl.*, V. 220, 32

[2] Mishchenko, A.V., Godenko, E.A., Izmodenov, V.V., 2020, *MNRAS*, V. 491, 2808

[3] Годенко, Е.А., Измоденов, В.В., 2021, *Письма в астрономический журнал*, том 47, 1

ЗАДАЧА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУНКЦИИ СВЕТИМОСТИ ГАММА-ВСПЫШЕК ЗЕМНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Дзюба Е.С.^{1,2}, Позаненко А.С.¹, Минаев П.Ю.¹,
Выборнов В.И.¹

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт (НИУ)*

Гамма-вспышки Земного происхождения (Terrestrial gamma-ray flashes – TGFs) – короткие (длительностью 200 мкс) импульсы гамма-излучения с энергиями фотонов до 40 МэВ, регистрируемые различными приборами на околоземной орбите со стороны Земной атмосферы. В исследовании TGFs существует ряд нерешенных проблем, одна из которых – задача восстановления функции светимости источника TGF. Целью работы является восстановление функции светимости гамма-вспышек Земного происхождения на основе данных о событиях TGF, зарегистрированных экспериментом GBM космической обсерватории Fermi. Задача разделена на несколько частей. В первой части проводится коррекция данных, полученных в эксперименте, с учетом эффектов мертвого времени, искажающих регистрируемый поток относительно истинного. Непараметрическим методом восстановлена зависимость, с помощью которой для событий групп различной интенсивности может быть найден истинный, падающий на детектор, поток. Во второй части решается задача моделирования прохождения гамма-излучения через атмосферу от источника TGF до детектора, расположенного на орбите, с целью сравнения модельных потоков с экспериментальными данными для определения параметров модели источника гамма-вспышки Земного происхождения. Моделирование проводится методом Монте-Карло с использованием программного пакета GEANT4.

НАБЛЮДЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР В ОБЛАСТИ МЕЖДУ ОБТЕКАЮЩИМ ПОТОКОМ И ИОНОСФЕРОЙ НА ДНЕВНОЙ СТОРОНЕ МАРСА

Ким К.И.^{1,2}, Шувалов С.Д.¹, Вайсберг О.Л.¹

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт (ГУ)*

Процесс взаимодействия солнечного ветра с плазменной оболочкой планет, у которых отсутствует собственное глобальное магнитное поле, например, Марс, отличается от наблюдаемого у планет с развитым магнитным полем. Однако некоторые явления наблюдаются у обоих типов планет. При обтекании солнечным ветром плазменной оболочки планеты формируются неустойчивый слой между обтекающим потоком и ионосферой планеты.

Данная работа посвящена анализу и интерпретации данных ионного спектрометра STATIC и магнитометра MAG спутника MAVEN при пролёте сквозь данный слой. Во время пролета в этом слое зарегистрированы колебания концентрации ионов H^+ , O^+ и O^{2+} . Наблюдаемые структуры предварительно ассоциируются с вихрями неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [1]. Основным источником ионов O^+ и O^{2+} в данном слое является верхняя ионосфера Марса. При этом наблюдается ускорение ионов O^+ и O^{2+} от нескольких эВ до кэВ на масштабе времени от нескольких минут.

Проведен анализ угловых спектров H^+ , O^+ и O^{2+} в приборной системе координат и системе координат, связанной с Марсом. Также с помощью диаграмм компонента скорости – концентрация [2] проверен критерий регистрации вихря неустойчивости Кельвина – Гельмгольца из данных измерений одного спутника.

Литература:

[1]. Ruhunusiri, S., et al. (2016), MAVEN observations of partially developed Kelvin-Helmholtz vortices at Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 4763–4773, doi:10.1002/2016GL068926.

[2]. Hasegawa, H., M. Fujimoto, K. Takagi, Y. Saito, T. Mukai, and H. Re'ime (2006), Single-spacecraft detection of rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices at the flank magnetopause, *J. Geophys. Res.*, 111, A09203, doi:10.1029/2006JA011728.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ОБЛАСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАЗНОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ

Кислов Р.А.^{1,2}, Хабарова О.В.^{2,1}, Сагитов Т.М.³,
Малова Х.В.^{1,4}

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН*

³ *Высшая школа экономики*

⁴ *Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Н.В. Скобельцына*

Высокоскоростные потоки из корональных дыр отделены от окружающего солнечного ветра областями взаимодействия разноскоростных потоков (SIR). Последние имеют сложную динамическую структуру, которая определяется турбулентностью, наличием токовых слоёв и магнитных островов. По мере вращения Солнца SIR вместе с высокоскоростными потоками распространяются в гелиосфере. SIR и высокоскоростной поток можно рассматривать как единый крупномасштабный объект, напоминающий по форме магнитную трубу со стенками переменной толщины. В этом случае можно говорить не только о скорости потока плазмы внутри и вблизи данного объекта, но и о его движении вокруг Солнца как целого. Благодаря такому вращению SIRы могут пересечь орбиты двух удалённых друг от друга космических аппаратов, что может позволить исследовать пространственную эволюцию их структуры.

Мы выбрали случаи, когда SIR пересекали последовательно орбиты ACE и одного из аппаратов STEREO. Было найдено положение Stream Interface (SI), относительно которого определялось положение других структур внутри SIR. При помощи нового разработанного метода идентификации токовых слоёв [1] была изучена токовая структура SIR и свойства турбулентного потока плазмы. Даны оценки угловой скорости вращения SIR вокруг Солнца. Построена модель, которая описывает движение SIR в гелиосфере и его основные крупномасштабные свойства в согласии с наблюдениями.

Литература:

[1] Khabarova O., Sagitov T., Kislov R., Li G. (2021), <http://arxiv.org/abs/2101.02804>

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СПУТНИКЕ ERG (ARASE)

Колпак В.И.^{1,2}, Могилевский М.М.¹, Чугунин Д.В.¹,
Чернышов А.А.¹, Мойсеенко И.Л.¹

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

В настоящем исследовании проводится подробный статистический анализ более 20 месяцев непрерывных измерений АКР на спутнике ERG (также называемом Arase). Это позволило подтвердить ранее полученные результаты о местонахождении источников АКР и сезонных изменениях интенсивности излучения. Открытые вопросы о процессах в источнике АКР могут быть решены с использованием данных о диаграммах направленности в различных геомагнитных условиях. Чтобы получить ответы на эти вопросы, производится оценка угла конуса диаграмм направленности в вечернем и утреннем секторах магнитосферы Земли. Работа была поддержана РФФИ (18-29-21037).

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В МОДЕЛЬНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ НА СОЛНЦЕ

Нечаева А.Б.^{1,2}, Зимовец И.В.¹, Шарыкин И.Н.¹,
Chen F.³

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Московский физико-технический институт (НИУ)*

³ *Nanjing University, Nanjing, China*

В настоящее время определение 3D структуры электрического тока в активных областях (АО) Солнца экспериментально затруднено из-за наличия информации о магнитном поле только на одном слое – фотосфере. Это возможно или в очень редких случаях или с применением алгоритмов экстраполяции магнитного поля, которые вносят в данные определённые физические допущения и вычислительные артефакты. Поэтому в этой работе используются более физичные данные 3D МГД моделирования одной АО с помощью численных кодов MURaM [1] с распространением в солнечную корону.

Эти модельные данные позволили получить информацию о структуре электрического тока и его пространственном отношении с силовыми линиями магнитного поля в АО. В частности, получено указание на неприменимость аппроксимации горизонтальной составляющей электрического тока горизонтальной составляющей градиента вертикального магнитного поля в АО [2] в рамках модели. Также получен результат о преобладании горизонтального электрического тока на фотосфере: в большинстве пикселей модельной АО горизонтальная составляющая больше, чем вертикальная, что согласуется с некоторыми результатами, полученными ранее [3]. Исследована зависимость этого результата от высоты при переходе из фотосферы в корону. В модельной области при переходе из фотосферы в корону качественно меняется картина пространственного взаимоотношения силовых линий электрического тока и магнитного поля: в фотосфере доминирует случай, когда эти векторы перпендикулярны, в короне же они в основном параллельны, что соответствует бессиловому характеру коронального магнитного поля.

Полученные результаты исследования модельной АО могут быть полезны для дальнейшего понимания физических процессов, происходящих в реальных АО Солнца.

Литература:

- [1] Chen F., Rempel M., Fan Y. // *The Astrophysical Journal* 2017. V. 846. P. 26.
- [2] Fursyak Yu.A., Abramenko V.I. // *Astrophysics* 2017. V. 60, P. 544.
- [3] Puschmann K.G., Ruiz Cobo B., Martínez Pillet V. // *The Astrophysical Journal Letters* 2010.V. 721. P. L58.

КИНЕМАТИКА ЭРУПТИВНОГО ПРОТУБЕРАНЦА ВО ВРЕМЯ МОЩНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Радивон А.В.^{1,2}, Зимовец И.В.²

¹ НИУ МФТИ

² Институт космических исследований РАН

Связь между солнечными вспышками, эруптивными протуберанцами и корональными выбросами массы (КВМ) до сих пор точно не установлена. С целью получения новых сведений в представленной работе исследуется мощная эруптивная двухленточная вспышка рентгеновского класса X4.9, произошедшая вблизи восточного лимба Солнца 25.02.2014 в 00:39 UT. Используются данные наблюдений инструмента Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO) в нескольких каналах ЭУФ излучения с шагом 12 с. На основе этих данных строятся диаграммы расстояние-время вдоль заданных направлений. Посредством этих диаграмм определяются кинематические кривые (зависимости от времени расстояния, скорости, ускорения) различных частей эруптивного протуберанца на небольших высотах в солнечной короне (до 1.4 радиусов Солнца) и выполняется их аппроксимация аналитическими функциями. Полученные кинематические кривые сопоставляются с временными профилями рентгеновского излучения вспышки, полученными по данным наблюдений космических аппаратов GOES и RHESSI. Это позволяет изучить взаимосвязь процессов вспышечного энерговыделения и эрупции протуберанца.

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗКИХ ИОННЫХ ДРЕЙФОВ В СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Синевич А.А.^{1,2}, Чернышов А.А.¹, Чугунин Д.В.¹,
Могилевский М.М.¹

¹ *Институт космических исследований РАН*

² *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*

Поляризационный джет представляет собой узкую струю быстрых ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах верхней области ионосферы F-слоя, возникающая во время повышенной геомагнитной активности. Механизм формирования поляризационного джета и структура мелкомасштабных неоднородностей параметров ионосферы внутри него являются открытыми вопросами. В данной работе проведено исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета в субавроральной области во время геомагнитной бури. Представлены результаты измерений параметров плазмы внутри поляризационного джета с помощью зондов Ленгмюра, установленных на спутнике NorSat-1. Также в настоящем исследовании для более полного анализа свойств и динамики поляризационного джета во время геомагнитного возмущения использовались данные спутников Swarm. Внутри поляризационного джета обнаружена сильная изменчивость температуры электронов, а также несколько провалов электронной концентрации, совпадающих с ростом электронной температуры. По результатам исследования стало известно, что с уменьшением геомагнитной активности наклон спектра электронной концентрации внутри ПД уменьшается. Следовательно, при увеличении геомагнитной активности в ПД увеличивается роль крупномасштабных эффектов по сравнению с мелкомасштабными.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА МАГНИТНЫХ БУРЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Фридман М.Л.¹, Хабарова О.В.², Мингалев О.В.³

¹ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

³ Полярный геофизический институт

На данный момент проблему краткосрочного прогноза магнитных бурь можно считать в целом решенной. Между тем, среднесрочные прогнозы геомагнитных бурь с заблаговременностью от 3 часов до 3 дней отличаются низкой оправдываемостью по сравнению с краткосрочными (иногда их оправдываемость не выше 40%, <https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Max%20Kp%20and%20GPRA.pdf>) и требуют значительного улучшения. Известно, что магнитные полости, заполненные магнитными островами и токовыми слоями, образуются перед высокоскоростными потоками любого типа, что может рассматриваться как предвестник магнитных бурь (Khabarova et al., 2015, 2016, 2018; Adhikari et al., 2019). В связи с этим был проведен анализ вариаций плотности солнечного ветра в ULF-диапазоне в 1-й точке Лагранжа, наблюдаемых от нескольких часов до нескольких дней до прибытия геоэффективного потока. Факт возникновения предбуревых ULF-вариаций в солнечном ветре и даже геомагнитном поле был замечен давно (Khabarova 2007; Khabarova and Yermolaev, 2007). В докладе обсуждаются новые результаты разработки метода среднесрочного прогноза магнитных бурь, который использует рекуррентную нейронную сеть (РНС) для автоматического поиска паттернов. Минутные данные плотности солнечного ветра и данные оконного преобразования Фурье используются в качестве входного параметра. Идет работа по улучшению прогноза в результате добавления анализа данных по токовым слоям (по базе данных токовых слоев на 1 а.е., см. <https://csdb.izmiran.ru>) . Тестовый результат прогнозирования представлен на сайте.

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В МАГНИТНЫХ ОБЛАКАХ

Хохлачев А.А., Рязанцева М.О., Рахманова Л.С.,
Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г.

Институт космических исследований РАН

Гелий - второй по численности ионный компонент солнечного ветра. Относительное содержание гелия может существенно различаться в различных крупномасштабных структурах солнечного ветра, возникающих из-за неоднородности и нестационарности солнечной короны. Обычно максимальное содержание гелия наблюдается внутри магнитных облаков и может достигать $> 10\%$. Относительное содержание гелия также может динамически изменяться внутри крупномасштабных структур, что может быть результатом локальных процессов в плазме.

В магнитных облаках распределение содержания гелия имеет осесимметричный пик с максимумом в центральной области магнитного облака, где протекает ионный ток [Ермолаев и др., 2020]. В данном исследовании изучается динамика относительного содержания гелия на разных масштабах в магнитных облаках. Для этого изучались зависимости содержания гелия от некоторых параметров плазмы и магнитного поля по разным наборам данных базы данных OMNI с 1976 по 2018 год. Показано, что содержание гелия увеличивается с увеличением модуля межпланетного магнитного поля B и с уменьшением плазменного параметра β в центральной области магнитного облака размером примерно миллион километров. Кроме того, в работе изучались вариации содержания гелия на меньших масштабах внутри магнитных облаков и областей сжатия перед ними в сравнении с другими крупномасштабными типами солнечного ветра. Для этого был проведен корреляционный анализ временных рядов плотности и относительного содержания гелия, измеренных на космических аппаратах СПЕКТР-Р и WIND, которые находились на значительном расстоянии друг от друга. Рассмотрены зависимости локальных коэффициентов корреляции между измерениями от величин параметров плазмы солнечного ветра. Проведено сравнение зависимостей для разных типов солнечного ветра. Показано, что медианные значения коэффициента локальной корреляции в областях сжатой плазмы перед магнитными облаками превышают значения в других типах ветра примерно на 15%. Кроме того, коэффициент локальной корреляции увеличивается с увеличением вариаций исследуемого параметра и скорости протонов. Таким образом, вариации относительного содержания гелия на средних масштабах в этих структурах достаточно устойчивы и, по-видимому, образуются в области ускорения короны, а затем распространяются без существенных изменений.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЯДА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Шибает А.И.

МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра газовой и волновой динамики

В рассматриваемой работе используя методы машинного обучения, прогнозируются циклы солнечной активности ряда числе Вольфа (WSN v.2). Для анализа поведения и предсказания ряда используются алгоритмы на основе деревьев решений – RandomForestRegressor и XGBoostRegressor. Качество алгоритмов оценивается на трех отложенных циклах: с 22 по 24 включительно, также спрогнозирован 25 цикл солнечной активности. Помимо новой версии ряда анализировался классический ряд WSN (v.1). Отмечены расхождения областей значений параметров моделей, минимизирующих функции ошибок на 22 и 24 циклах для v.2 и их совпадение для v.1.