НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ)

4. Информация о научных проектах Федеральной космической программы России, находящихся в стадии разработки

Проект МГУ «Ломоносов»

Комплекс научной аппаратуры «Ломоносов» предназначен для решения трех основных научных задач:

- изучения космических лучей предельно высоких энергий;
- регистрации и наблюдения гамма-всплесков в мультиспектральном режиме;
- комплексного мониторинга околоземного космического пространства (ОКП).

Эти задачи являются наиболее актуальными с точки зрения современных космических исследований.

Расчетные параметры орбиты космического аппарата:

- высота 490 ± 10 км;
- наклонение 98°;
- время восходящего узла (локальное время космического аппарата) 11:15.

Расчетный срок активного существования 3 года.

Основные научные цели приборов комплекса научной аппаратуры «Ломоносов»:

- Отработка методики регистрации КЛ ПВЭ с борта ИСЗ флуоресцентным методом, измерение УФ фона ночной атмосферы Земли.
- 2) Регистрация событий КЛ ПВЭ в области предела Грейзена-Зацепина-Кузьмина, измерение направления прихода и энергии частиц КЛ ПВЭ.
- Измерения УФ вспышек в атмосфере Земли, связанных с грозовой активностью (так называемые транзиентные атмосферные явления – спрайты, голубый струи, эльфы и пр.).
- Регистрация гамма-всплесков в широком волновом диапазоне от оптического и ультрафиолетового до рентгеновского и гамма.
- 5) Оперативная передача координат начавшегося гамма-всплеска в наземную сеть телескопов (GCN) для помощи в их наведении на событие.
- 6) Регистрация движущихся объектов в верхней полусфере КА, в том числе небольших астероидов и космического мусора.
- 7) Экспериментальное определение общей радиационной нагрузки (как от заряженных, так и от нейтральных частиц) при полете по полярной орбите с помощью дозиметрической аппаратуры, разработанной для этих целей.
- Одновременное измерение пространственного распределения потоков заряженных частиц и вариаций магнитного поля в одной точке пространства.
- 9) Измерение микрогравитационной обстановки на малом космическом аппарате.

Для реализации научных целей проекта был разработан и создан комплекс научной аппаратуры, состоящий из нескольких научных приборов, объединенных общей системой энергопитания, управления, сбора, хранения, обработки и передачи на Землю накопленных научных данных и телеметрии (Рис. 1). Научные цели, решаемые отдельными приборами, частично перекрываются для получения более полных и объективных данных, а также для увеличения надежности комплекса в целом.



Рис. 1. Структурная схема КНА «Ломоносов»

Комплекс научной аппаратуры «Ломоносов» структурно состоит из:

 модуля ТУС (трековой установки), предназначенного, прежде всего, для изучения космических лучей предельно высоких энергий;

- прибора БИ (блок информации), осуществляющего распределение питания, управление, сбор, обработку, хранение и передачу на целевую радиолинию научной и телеметрической информации комплекса;
- приборов БДРГ (блок детекторов рентгеновского и гаммаизлучений),
- - ШОК (широкоапертурная оптическая камера),
- UFFO (ultra fast flash observatory), решающих задачу регистрации и наблюдения событий в верхней полусфере космического аппарата, в том числе поиска гамма-всплесков в мультиспектральном режиме;
- приборов ДЭПРОН (дозиметр электронов, протонов и нейтронов),
- ELFIN-L (electron and field investigator for Lomonosov), обеспечивающих наблюдение за околоземной радиацией;
- прибора ИМИСС-1, измеряющего микроускорения и микровибрации космического аппарата.

Конструктивно приборы установлены отдельной на раме (производства АО НИИЭМ) с автономной системой терморегуляции (Рис. 2). Общий вес модуля научной аппаратуры (без передатчика целевой радиолинии) составляет около 300 КΓ, общий суточный объем передаваемых данных – до 8 Гб (может настраиваться в широких пределах при изменении режима эксплуатации или оперативной корректировке научных задач), общее потребление питания – примерно 230 Вт. На раму крепится служебная платформа космического аппарата (производства АО «Корпорация ВНИИЭМ»), обеспечивающая электропитание, ориентацию и навигацию и связь с бортовым и целевым радиокомплексами (Рис. 3).



Рис. 2. Расположение приборов на раме модуля научной аппаратуры КА «Ломоносов»



Рис. 3. Общий вид космического аппарата «Ломоносов»



Рис. 4. Космический аппарат «Ломоносов» на испытательном стенде.

Детектор «ТУС» является первым флуоресцентным детектором КЛ ПВЭ, который будет регистрировать космические лучи с борта ИСЗ. Данный детектор имеет высокое временное разрешение (0,8 мкс) и большую светосилу (площадь зеркала-концентратора порядка 2 м²), что позволяет регистрировать слабый трек УФ свечения от ливня частиц, двигающегося со скоростью света через атмосферу Земли. Разработка этой методики открывает возможность в дальнейшем наблюдать КЛ ПВЭ с очень большой и равномерной экспозицией по всей небесной сфере, что увеличит статистику регистрируемых событий на порядок и более.

Оперативное (в течение первых секунд после начала события) оповещение сети GCN о начале гамма-всплеска позволит комплексу научной аппаратуры «Ломоносов» стать одним из лучших средств оповещения о гамма-всплесках в мире и самым быстрым в России.

Установка камер ШОК будет первым экспериментом с камерами сверхширокого поля обзора на орбите Земли. Особый интерес вызывает отработка методов регистрации опасных астероидов и космического мусора из космоса. Отдельно стоит отметить, что оптические камеры, установленные на борту космического аппарата «Ломоносов», будут работать едином пространстве управления С сетью В наземных телескопов «MACTEP», что автоматических позволяет говорить 0 развертывании полноценной автоматической системы оптического наблюдения за ОКП.

Прибор ДЭПРОН является прототипом новой системы радиационного контроля для пилотируемых космических аппаратов, в том числе для МКС. Полученные с прибора данные позволят уточнить радиационную обстановку внутри перспективных пилотируемых КА (на средних и высоких широтах, на которых в настоящее время обитаемые миссии отсутствуют).

Одновременная регистрация вариаций магнитного поля и потоков квазизахваченных заряженных частиц является новым наиболее востребованным средством наблюдения радиационной обстановки ОКП, позволяющим изучать кратко- и средневременную динамику радиационных поясов Земли.

Ожидаемые результаты:

- Подтверждение и обоснование методики регистрации КЛ ПВЭ с борта ИСЗ в условиях переменного УФ фона ночной атмосферы Земли.
- Получение дополнительных данных о потоке КЛ ПВЭ в области предела Грейзена-Зацепина-Кузьмина. Анализ крупномасштабной анизотропии и поиск возможных источников КЛ ПВЭ.
- 3) Измерения УФ фона ночной атмосферы и оценка влияния

транзиентных атмосферных явлений на эффективность регистрации КЛ ПВЭ.

- Регистрация примерно 100 новых гамма-всплесков в год, в диапазонах волн от оптических до гамма, вхождение в GCN в качестве оперативного оповещателя о гамма-всплесках.
- Создание космического сегмента системы оптического наблюдения за ОКП.
- б) Получение большого объема регулярных мониторинговых данных о радиационной, в т.ч. дозиметрической, обстановке в ОКП для уточнения эмпирических и верификации физических моделей околоземной радиации.
- Разработка системы купирования дисфункции вестибулярного аппарата космонавтов в условиях невесомости.
- 8) Отработка аппаратных и программных решений для систем управления в условиях космического пространства.
- 9) Отработка системы GlobalStar как недорогого резервного двустороннего радиоканала.

Основные направления дальнейшего использования предполагаемых результатов:

Результаты эксперимента «ТУС» необходимы для планирования и разработки более масштабных проектов по регистрации КЛ ПВЭ в космических экспериментах. В проекте важна как технологическая (разработка легкого, термостабильного зеркала-концентратора большой площади, быстрой техники регистрации слабого светового сигнала), так и научно-прикладная составляющая (новые знания о фоне свечения атмосферы с высоким временным разрешением в диапазоне длин волн

300-400 нм, измерения потока и направлений прихода частиц КЛ ПВЭ). Развитие данного научного направления и использование полученного опыта предполагается в последующих экспериментах «КЛПВЭ» и JEM-EUSO, планируемых на борту МКС. Детектор «КЛПВЭ» входит в программу НПИ на РС МКС и находится в стадии эскизного проекта.

Результаты наблюдений гамма-всплесков имеют прежде всего первостепенное значение для фундаментальной астрофизики.

Космическая квалификация оптических систем комплекса (приборы ШОК, UFFO) позволит использовать наработки и технологии в более масштабных космических экспериментах, а интеграция данных прибора ШОК с системой телескопов МАСТЕР позволит перейти к качественно новому уровню наблюдений за ОКП.

Наработки, полученные при проектировании прибора ДЭПРОН, используются при разработке нового дозиметрического комплекса по радиационному контролю для перспективного космического корабля, а научные данные прибора ДЭПРОН позволят уточнить радиационные условия на перспективных высокоширотных орбитах для ПКК, а значит – оптимизировать защиту экипажей и улучшить условия их работы.

Результаты измерений радиационной обстановки дополнят базу данных, собранную в НИИЯФ МГУ для различных орбит, высот и годов, что позволит как поддерживать актуальными модели радиационной обстановки для более точного расчета радиационных условий ОКП, так и дорабатывать теоретические модели динамики околоземной радиации.

Разработка системы купирования дисфункции вестибулярного аппарата космонавтов в условиях невесомости ведется в рамках научной программы РС МКС. В работе предполагается использовать как

технологические наработки, полученные при проектировании и изготовлении прибора ИМИСС-1, так и данные по микровибрациям и микроускорениям свободнолетящего КА.



Рис. 5. Третья ступень РН «Союз 2.1а» с эмблемой спутника «Ломоносов».

Космический аппарат «Ломоносов» был запущен 28 апреля 2016 г. с космодрома «Восточный» на полярную круговую орбиту с высотой около 500 км.

космодрома Восточный на полярную круговую орбиту с высотой около 500 км.

Ссылки

- Sadovnichiy V.A., Amelyushkin A.M., Angelopoulos V., et.al., Space experiments aboard the Lomonosov MSU satellite. Cosmic Research (English translation of Kosimicheskie Issledovaniya) (51), 427-433, 2013
- Sadovnichiy V.A., Amelyushkin A.M., Angelopoulos V., et.al., Space Experiments aboard the Lomonosov MSU Satellite. Cosmic Research (English translation of Kosimicheskie Issledovaniya) (52), 250-250, 2014

Контакт:

Панасюк Михаил Игоревич, panasyuk@sinp.msu.ru

Орбитальные детекторы КЛПВЭ и JEM-EUSO

Научные задачи орбитальных детекторов КЛПВЭ и JEM-EUSO

Первоочередными задачами проектов «КЛПВЭ» и JEM-EUSO являются:

- Изучение энергетического спектра и состава первичного космического излучения как до ГЗК обрыва (энергии от 30 до 50 ЭэВ), так и после обрыва (энергии более 50 эВ) – космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ).
- Поиск «точечных» источников частиц и изучение анизотропии прихода частиц с энергией >20 ЭэВ по всей небесной сфере.
- *3.* Сопоставление данных космического детектора и данных наземных детекторов при энергиях 20-100 ЭэВ.
- 4. Развитие новых «космических» детекторов с целью увеличения площади обозреваемой атмосферы до 10⁵-10⁷ км² при пороговой энергии 100 ЭэВ и уменьшения пороговой энергии до 3 ЭэВ при площади обзора атмосферы 10⁴ км².

В настоящее время для создания международной орбитальной обсерватории для изучения Вселенной в лучах частиц экстремальных энергий предлагается объединение двух экспериментов, развивавшихся до 2014 года независимо и основанных на различных оптических системах. В

первом эксперименте, «КЛПВЭ», используется простая оптическая система из зеркала-концентратора с фотоприемником в его фокусе, обладающая сравнительно узким полем зрения. Ее преимуществом является возможность понижения энергетического порога детектора путем создания огромных по площади зеркал-концентраторов (космический детектор с площадью зеркала более 100 кв м, работающий на высоте 400 км, способен регистрировать частицы с пороговой энергией 1 ЭэВ с фактором экспозиции ~10⁴ кв. км ср в год, что пока неосуществимо для наземных установок). Такой космический детектор позволит наблюдать анизотропию направлений прихода частиц КЛ ПВЭ с высокой статистической точностью, оценить массовый состав первичных частиц и, возможно, сделать это для отдельных областей небесной сферы, в направлении которых будет наблюдаться анизотропия направлений прихода частиц. На сегодняшний день в рамках этого направления уже создан детектор «ТУС» и запущен на борту спутника Ломоносов (площадь зеркала 2 м²) и готовится для установки на МКС детектор «КЛПВЭ» (площадь зеркала 10 м²).

В проекте JEM-EUSO рассматривается сложная оптическая система из 2-3 линз Френеля с широким полем зрения 60°, что позволяет увеличить площадь обозреваемой атмосферы при заданной высоте спутника: широкоугольный детектор КЛ ПВЭ. Для орбиты МКС площадь обозреваемой км². $\sim 2 \times 10^{5}$ атмосферы Недостатком таким детектором такого широкоугольного детектора является высокая стоимость создания оптической системы с большой площадью сбора света. Разработанная оптическая система детектора JEM-EUSO имеет площадь сбора света 4,5 м² и эффективность пропускания света флуоресценции через оптическую фокусирующую систему 50%. Энергетический порог детектора по оценкам авторов составляет 50 ЭэВ.

1. Текущее состояние проектов

1.1. «КЛПВЭ»

В 2015 году согласовано и выпущено техническое задание на комплекс научной аппаратуры «КЛПВЭ», на основании которого начаты работы над эскизным проектом. Проведение КЭ запланировано на 2021-2024 гг.

По результатам предварительной проработки, проведенной на стадии аванпроекта, детектор «КЛПВЭ» состоял из следующих систем:

- составное зеркало-концентратор;

– блок фотоприемников;

– несущая конструкция;

– блок обработки и хранения данных.



Рис.1 Комплекс научной аппаратуры «КЛПВЭ» (по материалам аванпроекта).



Рис. 2 Экспозиция наземных И космических экспериментов по регистрации КЛ ПВЭ: ТА – Telescope Array, Auger – обсерватория Оже, KLYPVE (orig.) «КЛПВЭ» по материалам аванпроекта, KLYPVE Baseline METS И модернизированные варианты «КЛПВЭ».

Согласно изначальному проекту поле зрения прибора составляло 7,5 градусов, что оказалось недостаточным даже по сравнению с наземными установками, см. рис. 2 (KLYPVE(orig.) – годовая экспозиция меньше чем у наземной Обсерватории Пьера Оже). В результате было принято решение модернизировать оптическую систему с помощью корректирующих оптических элементов.

1.2 JEM-EUSO

Детектор JEM-EUSO, разрабатываемый международной коллаборацией, является широкоугольной камерой (±30°), в состав которой входят три большие (2,65 м в диаметре) линзы Френеля и фотоприемник с количеством пикселей порядка нескольких сотен тысяч. Угловое разрешение камеры 1 мрад. Изначально телескоп предполагалось установить на японском экспериментальном модуле МКС, однако после отказа Японского космического агентство от финансирования и ведущей роли в проекте, было принято решение, используя опыт и наработки коллаборации JEM-EUSO (в частности, опыт создания больших линз Френеля), реализовать проект на основе российского эксперимента «КЛПВЭ».

Основные направления работы коллаборации в 2014-2015 гг.:

- 1) Участие в модернизации КЭ «КЛПВЭ» (KLYPVE-EUSO).
- 2) Проведение экспериментов на прототипах JEM-EUSO (EUSO-TA и EUSO-balloon)
- 3) Подготовка новых экспериментов для отработки элементов детектора JEM-EUSO и алгоритмов регистрации событий и обработки данных (EUSO Super Pressure Balloon, mini-EUSO)

2. Оптические системы модернизированного детектора «КЛПВЭ»

Одним из самых активных направлений работы в рамках КЭ «КЛПВЭ» является разработка и создание оптической системы детектора, в рамках которых можно выделить три основных направления:

- 1) Моделирование и проектирование вариантов оптических систем
- Изготовление и тестирование пресс-формы сегмента зеркалаконцентратора
- Изготовление и тестирование образцов зеркал для детектора «КЛПВЭ».

В первом направлении работы были проработаны и оптимизированы две оптические схемы: базовый вариант и трехзрачковый.

В базовом варианте системы размер рефлектора остается практически таким же, как и планировался на предыдущем этапе - его диаметр составляет 3,4 м. При этом для корректировки сильных внеосевых аберраций предлагается размещать корректирующую линзу относительно далеко от фотоприемника: осевое расстояние от задней поверхности линзы до фокальной поверхности составляет 70 см (рис. 3 слева). Диаметр линзы 1,7 м. Общая осевая длина системы (расстояние от полюса зеркала до центра фокальной поверхности) — 4 м, диаметр фокальной поверхности 1,4 м. Радиус кривизны обеих поверхностей линзы одинаков и равен 1,872 м. При толщине 10 мм масса линзы составит 27,5 кг.



Рис. 3. Слева - базовый вариант (Baseline) оптической системы детектора К-EUSO. Справа - поверхности линзы Baseline.

Существенной проблемой в этом случае является доставка такой крупногабаритной системы на орбиту, а также дополнительные сложности при развертывание системы и ее юстировке в открытом космосе, которые возникают в случае сегменитрования элементов (зеркала, линзы, фотоприемника, опорной конструкции). Это является одной из ключевых причин рассмотрения второго варианта детектора – мульти-зрачковой системы (Multi Eye telescope system – METS).

Основная идея METS заключается в разбиении широкого поля зрения на совокупность нескольких умеренных полей, сопряженных друг с другом. Отдельные части системы представляют собой телескопы со своим рефлектором, фотоприемником и корректирующей линзой (см. рис. 4). Однако в силу меньшего поля зрения отдельного телескопа, линзу можно разместить в непосредственной близости от фокальной поверхности. Возможно различное положение фотоприемника в процессе доставки и в рабочем положении (рис. 5).



Рис. 4. Мульти-зрачковый вариант детектора «КЛПВЭ»



Рис. 5. Один из телескопов METS в транспортном (слева) и развернутом для работы (справа) состоянии. Фотоприемник и корректор образуют единый блок.

Оптимальным вариантом при заданных габаритных ограничениях для проекта на МКС является система трехзрачкового телескопа, METS-3, причем диаметр каждого рефлектора и его осевая длина (расстояние от полюса рефлектора до центра фокальной поверхности) равны соответственно 2,4 и 3 м. Остальные характеристики системы (параметры линзового корректора и его расположение, форма рефлектора и фокальной поверхности) выбираются в результате оптимизационных вычислений.

Изготовление пресс-формы

Для проверки возможности изготовления зеркала большой площади с повышенными требованиями к качеству поверхности решено изготовить тестовый вариант центрального сегмента зеркала для детектора «КЛПВЭ» в исполнении METS-3 с параболической формой поверхности (модель зеркала показана на рис. 6). Это позволит проверить всю технологическую цепочку изготовления зеркала (от производства пресс-формы до нанесения отражающего и защитного слоев) и проведение оптических тестов.



Рис. 6. 3D модель зеркала-концентратора METS-3.

В Научно-техническом центре приборостроения НИИЯФ МГУ разработана и изготовлена пресс-форма центрального сегмента, по которой в последствии будет произведено изготовление самого сегмента зеркала.

Одновременно с процессом изготовления пресс-формы происходит разработка и совершенствование технологии производства угле-пластиковых зеркал. Изготовленные образцы (один плоский образец и два сферических) тестируются на предмет оценки их шероховатости, профиля и оптических характеристик. Предварительные исследования показали необходимость утолщения верхнего слоя углепластика и применения тканей с меньшим диаметром волокон для улучшения качества отражающей поверхности.

3. Фотоприемник КЛПВЭ

После разработки двухкомпонентной ОС с добавлением корректирующей линзы, стало возможно обеспечить фокусировку сигнала в один пиксель 64-канального МАФЭУ в более широком поле зрения. Поэтому, было принято решение перейти на использование двухкомпонентной ОС и фотоприемника на основе МАФЭУ (фотосенсора, используемого в проекте JEM-EUSO).

Принцип организации фокальной плоскости детектора JEM-EUSO представлен на рис. 7. Четыре МАФЭУ образуют элементарную ячейку фотоприемника, 9 ячеек (36 МАФЭУ) составляют модуль фотоприемника. 137 модулей располагаются на фокальной поверхности и образуют фотодетектор. Каждый модуль работает независимо от остальных (своя система электропитания, аналоговая и цифровая электроника). В каждом модуле фотоприемника происходит независимая обработка сигнала вплоть до триггера первого уровня (триггера по превышению порога в отдельной ячейке фотоприменика).



Рис. 7. Принцип организации фокальной плоскости детектора JEM-EUSO.

В случае модернизированного детектора «КЛПВЭ» (базовый вариант) фокальная поверхность имеет диаметр 1,4 м и может быть заполнена 1872 МАФЭУ. МАФЭУ объединены в элементарные ячейки и модули фотоприемника. Общее число пикселей 1,2×10⁵.

Важно отметить, что из-за ограничения на размер составных частей аппаратуры, которые можно доставить на МКС в ТГК «Прогресс» и затем вынести через шлюзовую камеру и разместить на внешней поверхности МКС, фотоприемник будет состоять из четырех частей размером примерно 70×70 см².

В модернизированном варианте детектора «КЛПВЭ» иерархическая структура на цифровом уровне обработки сигнала заменена сетевой. Каждый модуль фотоприемника является полноценным и полнофункциональным элементом системы фотоприемника. Цифровую часть обработки сигнала в модуле фотоприемника было решено реализовать на основе интегральных микросхем Zynq фирмы XILINX. Данный чип совмещает в себе ПЛИС, позволяющую производить очень быстрый опрос МАФЭУ, и процессорную часть, в которой возможно реализовывать более сложные алгоритмы обработки зарегистрированных событий. Более того, процессор позволяет использовать каждый модуль как отдельную вычислительную машину. Благодаря этому на базе одного модуля фотоприемника возможно осуществить полноценную регистрацию события и выработку триггера события (в JEM-EUSO на уровне модуля вырабатывается только триггер первого уровня). Модули фотоприемника объединены в локальную сеть с помощью двух интерфейсов: Ethernet и CAN. По интерфейсу Ethernet происходит обмен триггерными данными между модулями (для выработки триггеров событий, произошедших на границе двух модулей), а также запись полезной информации в память прибора о событиях ШАЛ для дальнейшей передачи ее на землю.

- M.I. Panasyuk, M. Casolino, G.K. Garipov, T. Ebisuzaki, P. Gorodetzky, B.A. Khrenov, P.A. Klimov, V.S. Morozenko, N. Sakaki, O.A. Saprykin, S.A. Sharakin, Y. Takizawa, L.G. Tkachev, I.V. Yashin, and M.Yu Zotov. The current status of orbital experiments for UHECR studies. Journal of Physics, 632(1):012097, 2015.
- Г.К. Гарипов, М.Ю. Зотов, П.А. Климов, М.И. Панасюк, О.А. Сапрыкин, Л.Г. Ткачев, С.А. Шаракин, Б.А. Хренов, И.В. Яшин. Детектор космических лучей предельно высоких энергий КЛПВЭ на борту МКС. Известия РАН, серия физическая, 79(3):358–361, 2015.

Контакт: Климов Павел Александрович, pavel.klimov@gmail.com

Проект УФ атмосфера (mini-EUSO)

Цели космического эксперимента можно разделить на два класса: научные и технологические.

- I. Научные цели:
- Измерение пространственно-временной структуры свечения ночной атмосферы в области «ближнего» ультрафиолета (300-400 нм) с высоким временным (2,5 мкс) и пространственным (5 км) разрешением в широком поле зрения (±18,3°).
- 2. Изучение временного и пространственного распределения свечения при быстрых (1-100 мс) электрических разрядах в атмосфере (транзиентные атмосферные явления) и поиск корреляции карты распределения ТАЯ различного типа с геофизическими явлениями в верхней атмосфере, ионосфере и магнитосфере.

Данным прибором возможна также регистрация свечений другой природы: биолюминесценции, метеоров, космического мусора.

- II. Технологические цели:
- 1. Использование линз Френеля в космическом эксперименте
- Разработки и оптимизация систем детектора космических лучей предельно высоких энергий (EUSO).
- Разработка и тестирование новых решений для будущих космических экспериментов, в частности использование кремниевых фотоумножителей.

В 2015 году КЭ «УФ атмосфера» включен к Этапную программу научноприкладных исследований и экспериментов на российском сегменте МКС. Проведение КЭ запланировано на 2019-2020 гг. К настоящему времени полностью завершено введение КЭ в программу, подготовлено и согласовано техническое задание на научную.

В 2015 году был также подписан научный протокол между НИИЯФ МГУ и участниками коллаборации JEM-EUSO, в котором стороны согласились в проведении этого эксперимента как совместного.

Состав НА «УФ атмосфера»

В состав НА «УФ атмосфера» входят широкоугольный детектор и адаптер для крепления широкоугольного детектора к иллюминатору из кварцевого стекла.

Физические характеристики НА «УФ атмосфера» приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Физические характеристики НА «УФ атмосфера»:

Габаритные размеры	Не более 370×370×620 мм
Диапазон длин волн наблюдения	УФ: 300 – 450 нм
Поле зрения	36°× 36° = 0.42 cp
Входной зрачок	
Диаметр	25 см
Площадь	490 cm ²
Фокусное расстояние	25 – 27 см

Размер ячейки	3 мм
Число ячеек;	2304
число 64-канальных МАФЭУ	36
Разрешение изображения объекта	4.5 – 5 км
в атмосфере	
Площадь обзора атмосферы	260 км × 260 км = 6.8·10 ⁴ км ²
Максимальное временное	2,5 мкс
разрешение	

На рисунке 1 представлена блок-схема детектора, демонстрирующая основные части прибора.

Состав детектора:

- Телескоп состоит из корпуса, обеспечивающего конструктивную целостность прибора и оптической системы, которая предназначена для концентрации УФ излучения атмосферы на поверхность фотоприемника.
- Модуль телеметрического контроля предназначен для контроля состояния блоков детектора.
- Модуль фотодетектора предназначен для регистрации УФ излучения, выработки первичного триггера.
- Модуль обработки и хранения данных предназначен для обработки, записи и хранения экспериментальных данных.
- Система дополнительных сенсоров предназначена для вспомогательного проведения измерений излучения атмосферы в других диапазонах длин волн (видимом и ИК).
- Система питания для обеспечения электропитания блоков НА.
- Бортовая кабельная сеть для внутренней коммутации блоков НА.



Рис. 1. Блок-схема НА «УФ атмосфера»

В 2015 году начата предварительная работа по проектированию отдельных узлов детектора.

Механическая система

Вариант механической конструкции с размещением блоков внутри прибора показан на Рис.2 слева. 3D модель адаптера для крепления к иллюминатору МКС, представлен на Рис.2 - справа.



Рис. 2. Вариант механической конструкции НА «УФ атмосфера» (слева), адаптер для иллюминатора (справа).

Оптическая система

Оптическая система детектора предназначена для формирования изображения объекта в поле зрения прибора. Основное требование к ОС заключается в том, чтобы во всем поле зрения (достаточно широком – до 40 градусов в диаметре) размер пятна от параллельного пучка света не должен превышать размер отдельной ячейки фотоприемника.

Оптика детектора представлена двухлинзовым телескопом, причем каждая из линз является двухсторонней френелевской. Диаметр обеих линз 250 мм, толщина - 11 мм, материал - специальный УФ-чувствительный пластик РММА-000 (коэффициент преломления в ближнем УФ составляет примерно 1.5). Наличие четырех френелевских поверхностей позволило удовлетворить основное требование по фокусировке сигнала.

На рис. 3 показан результат последовательной трассировки лучей, выполненной в программном пакете ZEMAX. На рисунке изображена сама оптическая система и ход УФ лучей для полевых углов 0°, 5°, 10°, 15°, 20° и 25°, а на рис. 4 приведена точечная диаграмма - изображение в фокальной плоскости - для этих же углов. Размер пятна, выраженный в RMS-диаметре, составляет не более 2 мм, что меньше размера ячейки фотоприемника.



Рис. 3. Последовательная трассировка лучей в ОС, полевой угол: 0°, 5°, 10°, 15°, 20° и 25°.



Рис. 4. Точечная диаграмма для полевых углов: 0°, 5°, 10°, 15°, 20° и 25°.

Фокальная плоскость

Светочувствительным элементом фотоприемника является многоканальный (многоанодный) фотоэлектронный умножитель (МАФЭУ), который обеспечивает высокую чувствительность и возможность регистрации быстрых сигналов в УФ диапазоне.

В качестве основного варианта МАФЭУ рассматривается R11265-M64 производства фирмы Hamamatsu, разработанный для проекта JEM-EUSO. Он имеет бищелочной фотокатод с квантовой эффективностью порядка 35%. Размер отдельного пикселя 2.88 × 2.88 мм, максимум чувствительной площади всего МАФЭУ примерно 23.04 × 23.04 мм. Данный ФЭУ прошел ряд летных испытаний, в частности, успешно использовался в баллонном эксперименте по изучению фона ночной атмосферы (эксперимент EUSO-Balloon). На рис. 5 показан вид фокальной плоскости (слева) и 3D модель фотоприемника справа.



Рис. 5 Фокальная плоскость детектора

При возникновении импульса УФ свечения на входе в детектор МАФЭУ преобразуют этот импульс в электрический сигнал (происходит выбивание электрона на фотокатоде МАФЭУ, и его усиление за счет развития каскада электронов вторичной эмиссии на динодах МАФЭУ). Электрические импульсы с МАФЭУ соответствуют отдельным фотонам. Преобразование аналоговых импульсов в число фотоэлектронов за такт регистрации (2,5 мкс) происходит в платах аналогово-цифрового преобразования (АЦП), откуда в цифровом виде информация о числе фотоэлектронов поступает в блок цифровой обработки данных модуля фотоприемника. Основным элементом плат АЦП является специализированная интегральная микросхема (ASIC), которая осуществляет данное преобразование. В НА «УФ атмосфера» использован ASIC, разработанный специально для проекта JEM-EUSO – SPACIROC. Этот чип оптимизирован для опроса 64-канальных МАФЭУ в режиме счета фотонов.

Затем сигнал поступает В логическую часть электроники (кросс-плата, фотоприемника, которая представлена тремя платами процессорная плата и Плата управления питанием – на рис. 5 показаны зеленым цветом на 3D модели). В логической части реализованы несколько алгоритмов отбора полезных событий (триггеров) на разных временных масштабах (от 2,5 мкс до 40 мс). Полезная информация передается в центральное процессорное устройство и записывается в съемное ЗУ. ЗУ по мере заполнения сменяется другим и отправляется на Землю для обработки данных.

На сегодняшний день НИИЯФ МГУ и коллаборация JEM-EUSO ведут активную работу по созданию аппаратуры с целью возможного осуществления космического эксперимента на борту МКС в 2017 году при участии итальянского астронавта П. Несполи (53/54 экспедиция МКС) и российского космонавта, выпускника МГУ им. М.В. Ломоносова С.Н. Рязанского (54/55 экспедиция МКС).

Контакт: Климов Павел Александрович, pavel.klimov@gmail.com

Проект Интергелиозонд

Цель проекта — получение оригинальной научной информации в области физики Солнца при проведении внеэклиптических наблюдений Солнца, включая его приполярные области, а также измерений вблизи Солнца (не ближе 60-70 радиусов Солнца).

Для регистрации анизотропии прихода частиц из различных направлений на КА «Интергелиозонд» предполагается установить не менее двух аналогичных «телескопов» СПЭР под различными углами к направлению «КА – Солнце» с единым для них блоком электроники.

Для исследования потока нейтронов от Солнца при проведении внеэклиптических наблюдений Солнца, включая его приполярные области, а также измерений вблизи Солнца на КА «Интергелиозонд» в НИИЯФ разрабатывается нейтронный направленный телескоп ИнтерСОНГ. Принцип регистрации быстрого нейтрона базируется на последовательности процессов взаимодействия регистрируемого нейтрона с веществом годоскопа ИЗ сцинтилляционных волокон И сцинтилляционного характерных особенностей калориметра. Для выяснения И типов взаимодействия нейтронов, как первичных, И после первого так взаимодействия в годоскопе, была проведена длительная программа моделирования событий и их критериев отбора в телескопе нейтронов.



В 2014-2015 гг. выполнялись работы в рамках дополнения к Эскизному Интергелиозонду. В проекту по том числе был изготовлен прибора экспериментальный образец ИнтерСОНГ И проведены метрологические измерения с этим образцом.

Контакт: Панасюк Михаил Игоревич, panasyuk@sinp.msu.ru

Обсерватория Лучей Высоких Энергий (ОЛВЭ) - разработка концепции проекта, научно-техническое обоснование для разработки проекта ТЗ

Предметом исследования является внеатмосферное изучение космического высоких энергий. Определены основные излучения концепции ДЛЯ эксперимента ОЛВЭ. Проведено осуществления научно-техническое обоснование исходных данных для разработки проекта ТЗ на ОКР по созданию космического комплекса ОЛВЭ. Приведены основные принципы и технологии регистрации космического излучения высоких энергий. Определен проектный облик КНА ОЛВЭ и основные характеристики ОЛВЭ. Сформированы исходные данные для разработки проекта ТЗ на ОКР по созданию космического комплекса ОЛВЭ. Для осуществления эксперимента необходимо реализовать четыре основных требования:

 высокое значение фактора экспозиции, который должен превышать на полтора порядка таковой у всех проведенных и запланированных экспериментов за последние пятьдесят лет исследования;

2) высокая точность измерений, что означает большую массу экспонируемой научной аппаратуры;

3) используются предельные возможности вывода отечественных КА тяжелого класса

4) построение комплекса научной аппаратуры ОЛВЭ осуществляется с использованием и дальнейшим развитием новейших технологий экспериментальной физики высоких энергий, которые получили апробацию в ряде наземных и космических экспериментов. Все применяемые методики должны быть доступны отечественному изготовителю.

Контакт: Подорожный Дмитрий Михайлович, <u>dmp@eas.sinp.msu.ru</u>

Космический комплекс НЕЙТРОНИЙ для исследования первичного космического излучения – разработка концепции

В соответствии с последними общемировыми данными, определены цели и основные научные задачи, решаемые с помощью регистрации космических лучей на поверхности Луны. Масштабность и широта охватываемых задач подтверждает чрезвычайную актуальность продолжения работ в данной области. Были исследованы особенности регистрации ядерной компоненты космических лучей. Для работы в области высоких энергий предлагается использовать три компоненты обратного тока: гамма-кванты, нейтроны и радиоизлучение на частотах 1–10 ГГц. Ядра низких энергий должны регистрироваться многослойным кремниевым детектором, входящим в состав комплекса научной аппаратуры НЕЙТРОНИЙ. Сформулированы предложения использованию комплекса научной аппаратуры ПО НЕЙТРОНИЙ в качестве гамма-обсерватории, а также для геологических исследований на Луне (с использованием отраженного от базальтового слоя радиосигнала). В результате работы определена концепция космического комплекса НЕЙТРОНИЙ, заключающаяся в том, что для измерения параметров частиц ПКИ, падающих на лунную поверхность, предлагается использовать сразу три компоненты. При одновременной регистрации трех компонент погрешность определения энергии составит ~50%. Конструкция установки должна включать в себя кремниевые падовые детекторы заряда, сцинтилляционные детекторы обратного тока и плоские антенны для регистрации радиоизлучения. Суммарный геометрический фактор составит не менее 300 м²ср на первом этапе. Для гамма-астрономических исследований часть модулей должна включать в себя заглубляемую в реголит часть в виде стержней из сцинтиллятора длиной ~1 м.

Контакт: Подорожный Дмитрий Михайлович, dmp@eas.sinp.msu.ru

Разработка составной части технического предложения по внешним радиационным условиям полета КА «Лаплас-П»

Проведены расчёты радиационных условий миссии «Лаплас-П» к спутнику Юпитера Ганимед в рамках ОКР по теме «Лаплас-П». Рассчитаны интегральные и дифференциальные энергетические спектры электронов и протонов магнитосферы Юпитера и протонов и ионов солнечных и галактических космических лучей и спектры ЛПЭ ионов космических лучей на траектории полёта и за защитам разной толщины, а также дозы радиации за защитам разной толщины за время межпланетного перелёта, гравитационных манёвров в системе Юпитера, и функционирования КА «Лаплас-П» на орбите и поверхности Ганимеда.

Podzolko M. V., Getselev I. V., Gubar Yu. I. Radiation hazard for different scenarios of space missions to Jupiter's moons, 6th Moscow Solar System Symposium (6M-S3), 5–9 October 2015, IKI RAS, Moscow, Russia, p. 6MS3-GP-02.

Контакт: Подзолко Михаил Владимирович, <u>spacerad@mail.ru</u>

Расчёт радиационных условий полёта КА «Арктика-М»

Рассчитаны потоки электронов и протонов радиационных поясов Земли и космических лучей и дозы радиации за защитами различной толщины на орбите КА «Арктика-М». Проведено сопоставление результатов с уровнями радиации на других околоземных орбитах. Показано, что КА на данной орбите подвергнется серьёзной радиационной нагрузке. Расчётное значение дозы радиации за год максимума солнечного цикла за защитой 1 г/см² составляет ≈20 крад, за 1.5 г/см² – ≈5 крад (срок активной эксплуатации КА 5– 7 лет). Частицы радиационных поясов будут воздействовать на КА на «нерабочем» участке орбиты; на главном участке: 3 часа до и 3 часа после прохождения апогея, КА будет находиться выше поясов, в области действия космических лучей. Выбор большей высоты перигея орбиты даёт снижение дозы за защитами ≥1.5–2 г/см² на фактор ≥1.5–2. Полученные расчётные оценки могут быть использованы для задания требований по стойкости к воздействию космической радиации к проектируемой аппаратуре для КА «Арктика-М».

Подзолко М. В., Гецелев И. В., Тасенко С. В., Шатов П. В., Радиационные условия полёта КА «Арктика-М», Гелиогеофизические исследования, выпуск 14, 2015

Контакт: Гецелев Игорь Владимирович, getselev@mail.ru

Космический комплекс, состоящий из 3-х специализированных малых космических аппаратов массой не более 100 кг

Для обеспечения мониторинга радиационной обстановки в ОКП с возможностью предсказания радиационных условий для КА, находящихся на орбитах, околоземных впервые предлагается специализированный космический комплекс, состоящий из 3 малых космических аппаратов (МКА) массой не более 100 кг. Аппараты должны быть выведены на несколько круговых орбит (имеющих высоты 650, 1700 и 8000 км и наклонения 80, 77 и 60° соответственно), где каждый будет измерять потоки энергичных протонов И электронов при помощи нескольких идентичных разнонаправленных детекторных систем (спектрометров). Предложена оригинальная компоновка из 4-х спектрометров. МКА будут оснащены идентичной измерительной аппаратурой.

Предлагаемый космический комплекс позволит воспроизводить распределения потоков частиц в реальном времени, что обеспечит выполнение задач оперативного мониторинга для данных орбит и возможность оценки радиационных доз в реальном времени в любой точке ближнего ОКП, т.е. для других КА.




Рис. Слева - группировка из 3-х МКА на различных круговых орбитах, справа оригинальная компоновка из 4-х спектрометров для раздельной регистрации протонов и электронов, основных радиационных компонентов в ОКП.

М. И. Панасюк, М. В. Подзолко, А. С. Ковтюх, И. А. Брильков, Н. А. Власова, В. В. Калегаев, В. И. Оседло, В. И. Тулупов, И. В. Яшин «Оперативный радиационный мониторинг в околоземном космическом пространстве на базе многоярусной группировки малых космических аппаратов» Космические исследования, 2015, том 53, № 6, с. 461–468

Контакт: Тулупов Владимир Иванович, ikt0840@mail.ru

Приборы для регистрации потоков быстрых нейтронов в верхней атмосфере Земли

Разработан прибор, в нескольких модификациях, для регистрации нейтрального (гамма-кванты, нейтроны) излучения в ходе спутниковых или баллонных мониторных наблюдений. Прибор обладает пространственной чувствительностью И позволяет определять направление прихода Спектральные регистрируемых частиц И квантов. И временные характеристики позволяют регистрировать линии гамма-излучения и тонкую временную структуру всплесков.

Iyudin A.F., Bogomolov V.V., Galkin V.I. et al. Instruments to study fast neutrons fluxes in the upper atmosphere with the use of high-altitude balloons, Advances in Space Research, 2015, 56(10), 2073-2079, doi 10.1016/j.asr.2015.08.002

Контакт: Июдин Анатолий Федорович, aiyudin@srd.sinp.msu.ru

Разработка экспериментальных и теоретических методов мониторинга радиационных полей в околоземном космическом пространстве

Проведено моделирование треков одиночных частиц в ПЗС-матрице и сравнение расчетных образов с экспериментальными, что позволило понять спектры плотностей энерговыделений в матрицах SOHO/STEREO. Анохин М.В., Галкин В.И., Дитлов В.А., Дубов А.Е., Калегаев В.В., Королёв А.Г., Кузнецов Н.В., Макарычев С.В., Панасюк М.И., Попов В.Д., Чабанов В.М., Шилло А.Г. К вопросу о роли пика Брэгга при оценке воздействия поля ионизующих частиц на микроэлектронику космических аппаратов. Научно-технический сборник «Стойкость 2015», Тезисы докладов 18 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем. г. Лыткарино, 2-3 июня 2015г., стр.27-29. ISSN 1997-2830. ФГУП НИИП.

Контакт: Галкин Владимир Игоревич, <u>v i galkin@mail.ru</u>

Развитие новых методов регистрации ШАЛ и черенковской гаммаастрономии

Предложена новая методика исследования массового состава первичного космического излучения по угловым распределениям мюонов в составе ШАЛ, продемонстрирована ее принципиальная способность разделять весь первичной поток первичных ядер на три группы по массе. Проанализирована чувствительность базового (пилотного) набора оптических детекторов установки "Памир-XXI", показано, что для точечных источников она примерно соответствует чувствительности полноразмерной установки LHAASO.

Galkin V.I., Anokhina A.M., Bakhromzod R., Mukumov A. How to deal with PCR composition problem at $E_0 >= 10^{17}$ eV arXiv:1507.03150v1

Контакт: Галкин Владимир Игоревич, v i galkin@mail.ru

Исследования химического состава галактических космических лучей на космических аппаратах и аэростатах

Энергетические спектры ядер от протонов до железа в источниках по данным эксперимента ATIC

Одним из основных результатов стратосферного эксперимента ATIC является измерение спектров энергий обильных ядер космических лучей: протонов, He, C, O, Ne, Mg, Si, Fe, которые представлены в терминах энергии на частицу в диапазоне энергий от 50 ГэВ до нескольких десятков ТэВ. В данной работе с использованием нескольких моделей распространения космических лучей в Галактике, основанных на системе GALPROP, для измеренных спектров энергии обильных ядер эксперимента ATIC решена задача обратного распространения для получения спектров магнитной жесткости в источниках. Показано, что результаты для отличия спектральных индексов разных ядер в источнике устойчивы ПО отношению К частному выбору модели распространения. С высокой статистической значимостью показано, что спектр гелия в источнике положе спектра протонов. Показано, что в диапазоне магнитной жесткости от 50 ГВ до 1500 ГВ имеется статистически значимый устойчивый рост крутизны спектров ядер в источнике с ростом заряда от гелия до железа. Это говорит о том, что ядра с различными зарядами ускоряются в различных условиях, то есть нет единого универсального ускорителя космических лучей, который одинаково работал бы для разных ядер.

A.D. Panov, N.V. Sokolskaya and V.I. Zatsepin, Energy spectra of nuclei from protons to iron in sources, according to the ATIC experiment, Доклад на ICRC2015, 29 July - 06 August 2015, Hague, Netherlands, PoS(ICRC2015)321, http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=236#session-2514

Контакт: Панов Александр Дмитриевич, panov@dec1.sinp.msu.ru

Гамма-астрономия высоких энергий и исследование космических лучей с помощью наземных установок.

Корреляция энергии первичных космических лучей, измеренной по радиоизлучению и черенковскому свету ШАЛ

В совместном эксперименте на установках Тунка-133 и Тунка-Rex обнаружена корреляция энергий первичных космических лучей, измеренных по радиоизлучению ШАЛ с энергиями, измеренными по потоку черенковского света от ШАЛ. Этот результат открывает перспективы изучения спектра и состава космических лучей при энергиях 10¹⁷ – 10¹⁹ эВ в совместном эксперименте с установкой сцинтилляционных детекторов Тунка-GRANDE с темпом набора статистики в 20 раз быстрее, чем при регистрации черенковского света ШАЛ.



Рис. Корреляция энергий первичных космических лучей, измеренных по радиоизлучению ШАЛ с энергиями, измеренными по потоку черенковского света от ШАЛ, для первого и второго года работы установок.

Kostunin D., Korosteleva E.E., Kuzmichev L.A., Lubsandorzhiev N., Prosin V.V. The Tunka Radio Extension: reconstruction of energy and shower maximum of the first year data. Доклад на конференции: The 34th International Cosmic Ray Conference, Гаага, Нидерланды, 30 июля - 6 августа 2015

Контакт: Кузьмичев Леонид Александрович, <u>kuz@dec1.sinp.msu.ru</u>

Энергетический спектр первичных космических лучей по данным установки Тунка-HiSCORE

Получен энергетический спектр первичных космических лучей в диапазоне от 300 ТэВ до 10 ПэВ по данным 80 часов работы первого прототипа установки HiSCORE, состоявшего из 9 станций для регистрации черенковского света ШАЛ с низким порогом. Это открывает перспективы изучения спектра и состава космических лучей при энергии в 10 раз меньше энергии классического «колена» и структуры спектра в «колене».



Рис. Энергетический спектр первичных космических лучей по данным 80 часов работы первого прототипа установки Тунка-HiSCORE.

Бережнев С.Ф., Буднев Н.М., Букер М. и др. Первые результаты работы прототипа установки Тунка-HiSCORE, Известия РАН. Серия физическая, том 79, № 3, с. 381-384

Контакт: Кузьмичев Леонид Александрович, <u>kuz@dec1.sinp.msu.ru</u>

Начало набора данных на новой установке Тунка-HiSCORE-28

В 2015 г введена в эксплуатацию новая низкопороговая установка для регистрации широких атмосферных ливней по черенковскому свету Тунка-HiSCORE-28. За первый месяц наблюдений в октябре 2015 г (~ 100 часов) зарегистрировано ~ 4 млн. ШАЛ с участием 4 и более станций. Такой темп набора статистики позволит (мы надеемся) найти избыток событий от точечного источника (гамма-квантов от Крабовидной туманности) на фоне потока заряженных космических лучей.

Prosin V. The Results and Perspectives of Cosmic Rays Mass Composition Study with EAS Arrays in the Tunka Valley, Доклад на конференции: TAUP-2015, Torino, September 2015

Контакт: Просин Василий Владимирович, v-prosin@yandex.ru

Теоретические и экспериментальное исследование переноса излучения в земных и астрофизических средах

Прямое наблюдение осцилляций нейтрино в канале vµ → vт в эксперименте OPERA

В сентябре 2015 года коллаборацией OPERA объявлено об открытии осцилляций нейтрино в канале v_u → v_τ. Работа выполнена с использованием гибридного детектора OPERA, расположенного в подземной лаборатории Гран Сассо (Италия), использующего пучок мюонных нейтрино из ЦЕРНа и состоящего из электронных сенсоров, мюонных спектрометров и ядерных эмульсий, прослоенных пластинами свинца. Пространственное разрешение эмульсий (~1 мкм) позволило идентифицировать часть взаимодействий v_т в канале заряженного слабого тока. Поиск этих событий основан на наблюдении признаков распада короткоживущей частицы. Основным источником фона являются события от v_µ с рождением очарованных адронов, которые также содержат трек короткоживущей частицы и, тем самым, похожи по топологии распада на взаимодействия v_т. Экспозиция эксперимента OPERA проводилась в 2008-2012 гг. Наблюдение 4-х кандидатов на взаимодействие v_т в эмульсионном детекторе было показано ранее на части экспериментального материала. В работе [1] приводятся результаты анализа 5408 событий (что на 15% больше выборки, использованной при наблюдении 4-х кандидатов). Кроме того, была проведена новая оценка фона. В результате, статистическая значимость, соответствующая гипотезе только фона, составила 5.1 о. Характеристики всех 5 событий-кандидатов не противоречат ожидаемым для взаимодействий v_т. Тем самым, в эксперименте OPERA совершено открытие осцилляций нейтрино в канале $v_{\mu} \rightarrow v_{\tau}$.

45



Рис. Прямое наблюдение осцилляций нейтрино в канале vµ→vт в эксперименте OPERA

- Agafonova, N.; Aleksandrov, A.; Anokhina, A., Dzhatdoev, T., Podgrudkov D., Roganova T., et al., (The OPERA Collaboration) Discovery of tau neutrino appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment. Phys.Rev.Lett. v.115, 121802 (1-7) 2015, (ArXiv e-prints. n. arXiv1507014170 , pp. 1-7, 2015) DOI:<u>http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.121802</u>
- Agafonova N., Anokhina A., Dzhatdoev T., Podgrudkov D., Roganova T., et al., (The OPERA Collaboration) Limits on muon-neutrino to tau-neutrino oscillations induced by a sterile neutrino state obtained by OPERA at the CNGS beam Journal of High Energy Physics. vol. 2015, n. 6, 2015. (ArXiv ePrint n.arXiv:: 1503.01876, pp. 1-8, 2015)
- Anokhina, A.; Dzhatdoev, T.; Morgunova O., Roganova T., et al., (The NESSiE collaboration) Search for Sterile Neutrinos in the Muon Neutrino

Disappearance Mode at FNAL, ArXiv e-prints., (ArXiv:1503.07471v2 [hep-ph] pp. 1- 18, 2015)

Контакт: Роганова Татьяна Михайловна, <u>rogatm@yandex.ru</u>

Выделение легких ядер ПКЛ в режиме индивидуальных событий по данным эксперимента СФЕРА

Для изучения состава ПКЛ в области 5-200 ПэВ был применен подход анализа характеристик индивидуальных событий с использованием экспериментальных данных установки СФЕРА-2. В ходе проведенных



исследований было установлено, что легкая компонента ШАЛ может быть выделена на фоне тяжелой компоненты. Значение первичной энергии может быть восстановлено с погрешностью 10-20 % в зависимости от энергии. В результате анализа был получен график зависимости доли легкой компоненты от первичной энергии. Полученный результат не противоречит результатам эксперимента KASCADE-Grande. Кроме того, было показано, что многомерные критерии, в принципе, позволяют повысить разделимость групп ядер ПКЛ при оценке химического состава.

Рис. Доля легких ядер ПКЛ в зависимости от энергии, оцененная по данным 2013 г. экспозиции детектора СФЕРА-2.

Antonov R.A., Aulova T.V., Bonvech E.A., Chernov D.V., Dzhatdoev T.A. Finger M Фингер Mikh. Galkin V.I., Podgrudkov D.A.,Roganova T.M. Event-by-event study of CR composition with the SPHERE experiment using the 2013 data.

48

Journal of Physics: Conference Series. vol.632, n. 012090, pp. 1-8, 2015. (ArXiv e-prints. n.arXiv:1503.04988, pp. 1-8, 2015)

Chernov D.V., Antonov R.A., Aulova T.V., Bonvech E.A., Dzhatdoev T.A., Galkin V.I., Podgrudkov D.A.,Roganova T.M. Detection of reflected Cherenkov light from extensive air showers in the SPHERE experiment as a method of studying superhigh energy cosmic rays Physics of Particles and Nuclei. vol. 46, n. 1, pp. 60-93, 2015

Контакт: Чернов Дмитрий Валентинович, <u>chr@dec1.sinp.msu.ru</u>

Метод расчета энергетического спектра атмосферных мюонов

Предложен метод расчета энергетического спектра атмосферных мюонов. Рассчитанные с помощью пакета CORSIKA 7.4 распределения мюонов по энергии от первичных протонов и ядер гелия с разными фиксированными энергии умножаются значениями на первичных частиц и потоки интегрируются по энергии этих частиц. При энергии мюонов $E_{\mu} = 10^4$ ГэВ предсказания моделей SIBYLL 2.1, QGSJET II-03, QGSJET II-04 и QGSJET01 отличаются от спектра Гайсера на ~30-50%. Основной вклад в спектр мюонов дают распады π^{\pm} и K^{\pm} мезонов 1-го поколения. Таким образом, модели предсказывают заниженную или завышенную генерацию π^{\pm} и K^{\pm} мезонов в области их самых больших энергий. Это подтверждается данными ускорительных экспериментов LHCf и TOTEM. Погрешности моделей учитываются в коллаборации TELESCOPE ARRAY нормировкой сигналов на данные по флуоресцентному свету (сигнал уменьшается в 1.27 раза).

- *Dedenko L.G., Roganova T.M., Fedorova G.F.* Testing model energy spectra of charged particles produced in hadron interactions on the basis of atmospheric muonsPhysics of Atomic Nuclei, 2015, vol. 78, N7, p. 840-848)
- Lukyashin A.V., Dedenko L.G., Roganova T.M., Fedorova G.F. Constrains of hadronic interaction models from the cosmic muon observations Web of Conferences Proceedings, 2015, vol.99, p. 10003 (ArXiv Astrophysics e-prints, 2015, №1504.0585, p. 1-5)

Контакт: Деденко Леонид Григорьевич, <u>ddn@dec1.sinp/msu.ru</u>

Развитие метода мюонной радиографии в России с использованием эмульсионных трековых детекторов

Анализ результатов, полученных в тестовых экспериментах по методу мюонной радиографии с использованием ядерно эмульсионных детекторов, показал, что, в соответствии с предсказаниями модельных расчетов, эмульсионная трековая методика позволяет получать информацию об особенностях структуры исследуемых массивных индустриальных И природных объектов. Пространственные распределения потоков мюонов, измеренные В тестовых экспериментах, И расчетный прогноз неоднородностей в структуре объектов в целом дают хорошее согласие.

Это свидетельствует о возможности развития метода мюонной радиографии в России с использованием эмульсионных трековых детекторов предложенной конструкции и средств обработки эмульсионных данных, которыми располагают российские институты.

Aleksandrov A.B., Bagulya A.V., Chernyavsky M.M., Galkin V.I., Dedenko L.G., Fomenko N.V., Konovalova N.S., De Lellis G., Managadze A.K., Orurk O.I., Polukhina N.G., Roganova T.M., Shchedrina T.V., Sirignano C., Starkov N.I., Tan Naing So, Tioukov V.E., Vladimirov M.S., Zemskova S.G. Test experiments on muon radiography with emulsion track detectors in Russia Physics of Particles and Nuclei Letters. 2015. Vol. 12, № 5, PP. 713-719

Контакт: Манагадзе Александр Константинович, <u>akmanag48@mail.ru</u>

Каскадная модель аномалии в спектрах блазаров при очень высоких энергиях

Особенности спектра, возникающие в результате поглощения первичных гамма-квантов фотонами внегалактического фона (Extragalactic Background Light, EBL), выражены в спектрах некоторых блазаров гораздо слабее, чем предсказывается большинством моделей EBL. Это указывает на неполноту простейшей модели внегалактического распространения гамма-квантов, которая учитывает только процесс поглощения первичных фотонов. Рассмотрена простейшая модель указанной аномалии, которая включает вторичную (каскадную) компоненту гамма-квантов, и показано, что эта каскадная компонента может существенно уменьшать статистическую значимость аномалии.



Рис. Модель аномалии в спектре блазара 1ES 1101-232 с учетом только поглощения первичных фотонов (левый рисунок, зеленая кривая) и с учетом каскадной компоненты (правый рисунок, синяя кривая).

- Dzhatdoev T.A., Cascade model of the anomaly in blazar spectra at very high energies, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, V. 79, P. 329-331 (2015)
- Dzhatdoev T.A., On conservative models of "the pair-production anomaly" in blazar spectra at Very High Energies, Journal of Physics: Conference Series, V. 632, id. 012035 (2015)

Контакт: Джатдоев Тимур Ахматович, <u>timur1606@gmail.com</u>

Исследования Солнца, мониторинг и моделирование радиационной среды и плазменных процессов в гелиосфере и в околоземном космическом пространстве

Влияние нетепловых ядерных реакций на каталитические процессы горения в плазме солнечного ядра

Впервые теоретически установлено влияние нетепловых ядерных реакций, возникающих под действием быстрых немаксвелловских альфа-частиц – нетермализованных продуктов солнечной протон-протонной цепочки, на каталитические процессы горения в плазме солнечного ядра. Обнаружено, что эффективная температура этих частиц в 1000 раз превышает температуру ядра Солнца, а инициируемые ими (Д,р)-реакции существенным образом изменяют условия протекания солнечного СNO-цикла, блокируя некоторые стандартные (р,Д)-процессы и перераспределяя направление ядерного потока внутри цикла. Показано, что эти новые ядерно-физические эффекты могут заметно влиять на параметры металличности ядра Солнца – так, они увеличивают абсолютное содержание изотопа 170 на 1–2 порядка величины (в зависимости от расстояния до центра звезды). Полученные результаты указывают также на то, что нетепловые ядерные процессы в плазме способны приводить к ослаблению генерации солнечных 13N-, 15O- и 17Fнейтрино.



c)

Рис. Эффективная температура (а), скорость протекания прямой и обратной реакции 170 (р, 🗈) 14N (b) и содержание изотопа 17O (c) в описании стандартной модели (синие точки и кривые) и с учетом нетепловых ядерных реакций (красные точки и кривые).

- *V.T. Voronchev,* Nonthermal nuclear reactions induced by fast 2 particles in the solar core, Physical Review C vol.91, No.2, p.028801 (2015);
- *В.Т. Ворончев,* О нетепловых ядерных процессах в центре Солнца, Ядерная физика т.78, вып.6, с.514 (2015).

Контакт: Ворончев Виктор Тихонович, voronchev@srd.sinp.msu.ru

Влияние магнитных полей в ранней Вселенной на ядерные процессы в эпоху первичного нуклеосинтеза

Впервые изучено влияние магнитных полей в ранней Вселенной на сечения и скорости ядерных реакций в эпоху первичного нуклеосинтеза (ПН). Показано, что в области магнитных доменов с полями не ниже 10¹⁵ Гс степень индуцированной спиновой поляризации нуклонов и легких ядер составляет несколько десятков процентов, что приводит к заметному изменению сечений большинства основных реакций ПН. В частности, обнаружено, что поляризационные эффекты могут в 2 раза усиливать стартовую реакцию ПН – p(n, 💷)d, а также почти полностью блокировать реакцию ³He(n,p)³H, контролирующую взаимную конверсию изотопов с А=3 в ранней Вселенной. Сделан вывод о том, что поляризационные эффекты могут существенным образом менять картину ПН в нестандартных моделях, допускающих существование локальных полей с напряженностью 10¹⁵ Гс и выше.



Рис. Влияние магнитных полей в ранней Вселенной на сечение стартовой реакции ПHp(n, γ)d(a), и на сечение³He(n,p)³H-реакции взаимной конверсии изотопов с *A*=3 (b).

V.T. Voronchev, Y. Nakao Nuclear polarization effects in big bang nucleosynthesis, Physical Review D vol.92, No.8, p. 083008 (2015).

Контакт: Ворончев Виктор Тихонович, voronchev@srd.sinp.msu.ru

Энергичные электроны в хвосте и переходной области магнитосферы

Проведен сравнительный анализ параметров энергичных электронов в хвосте магнитосферы Земли, принадлежащих трем источникам – солнечного происхождения, генерированных в магнитосфере Юпитера и в земной магнитосфере. Рассмотрены отличия временного профиля потоков и энергетических спектров трех источников электронов, связь с потоками вне магнитосферы и периоды появления потоков электронов каждого типа.

В межпланетном пространстве кроме постоянного потока электронов космических лучей наблюдаются галактических возрастания потоков электронов другой природы, прежде всего от солнечных вспышек, ускоренные турбулентным магнитным полем в межпланетном пространстве и на фронтах головных ударных волн магнитосфер планет. Кроме того, ускорение электронов происходит и в самих магнитосферах планет, в частности Земли и Юпитера, которые являются предметом данного изучения. Рассмотрение пространственных, временных энергетических И возрастаний потоков электронов характеристик разных позволило практически однозначно идентифицировать их источники - солнечный, юпитерианский и магнитосферный.



Рис. Спектры электронов по данным IMP-8 для электронов СКЛ (5 ноября 1974 г.), магнитосферных (25 марта 1974 г.) и юпитерианских (19 марта 1974 г.).

Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И., Дайбог Е.И., Сурова Г.М. Энергичные электроны в хвосте магнитосферы и в переходной области, Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в Солнечной системе», ИКИ РАН, Москва, Россия, 13-23 февраля 2015

Контакт: Дайбог Елена Исаевна, daibog@srd.sinp.msu.ru

Структура ловушки юпитерианских электронов с внутренним ускоряющим гребнем (ridge)

На фоне 27-дневных вариаций юпитерианских электронов МэВ-ных энергий, непрерывно наблюдавшихся на 1 а.е. при спокойном Солнце в 2007-2008 годах в течение 14 оборотов Солнца, зарегистрированы всплески электронов и протонов с энергией 0.1-1 МэВ, не совпадающие по времени с максимумами юпитерианских электронов.

Это значит, что магнитная ловушка с захваченными юпитерианскими электронами, вращающаяся вместе с Солнцем, имеет некоторые выделенные участки-рукава с магнитным полем с усиленным возмущением, повышенным уровнем турбулентности, способным ускорять электроны и протоны до энергий ≤ 1 МэВ. Из приведенной гипотезы следует, что даже при очень низкой солнечной активности: в магнитных ловушках уровень турбулентности достаточен для ускорения частиц до значительных энергий.



Рис. 1. Потоки электронов с энергией 0.7-3 МэВ по данным SOHO/EPHIN, скорость солнечного ветра на 1 а.е. (OMNIWeb) и потоки электронов (по данным ACE) и протонов (по данным SOHO) низких энергий в период минимума солнечной активности 2007-2008 гг.



Рис. 2. Юпитерианские электроны и сопровождающие их всплески потоков низкоэнергичных электронов и протонов несолнечного происхождения, что

следует из отсутствия всплесков радиоизлучения на протяжении бОльшей части представленного временного интервала.

Kecskemety K., Daibog E.I., Lazutin L.L., Logachev Yu.I., Kota J. Jovian electrons and magnetic traps with inner acceleration regions, 34th Int.Cosmic Rays Conf.

Контакт: Дайбог Елена Исаевна, daibog@srd.sinp.msu.ru

Крупномасштабные джеты в переходном слое и проникновение плазмы через магнитопаузу

Многоспутниковые наблюдения плазмы и магнитных полей в миссии ТЕМИС, проведенные одновременно на дневной части переходного слоя и магнитосферы, были использованы для отбора 646 крупномасштабных плазменных джетов, взаимодействующих с магнитосферой. Джеты были идентифицированы как плотные и быстрые потоки плазмы переходного слоя, плотность энергии которых выше, чем в потоке солнечного ветра. Взаимодействие джетов с магнитосферой определялось по внезапному движению магнитопаузы к Земле и усилению геомагнитного поля. Проникновение через магнитопаузу определялось по появлению плазмы переходного слоя на фоне горячей плазмы магнитосферы. Мы обнаружили, что почти 60% джетов проникают через магнитопаузу. Подавляющее большинство проникающих джетов характеризуется высокими скоростями V> 220 км/с и кинетической ⊡_k > 1, что соответствует комплексному действию конечного ларморовского механизмов радиуса И импульсного проникновения. Показано, что средний темп проникновения плазмы в дневную магнитосферу, связанный с джетами, оценивается ~ 10²⁹ частиц в день и может достигать значения 1,5 * 10²⁹ частиц в час, что сопоставимо с общего оценками количества плазмы, поступающей дневную В магнитосферу.



Рис. 1. Распределение плазменных джетов в переходном слое (серые треугольники) в зависимости от кинетической β_k и скорости джетов V. крестиками Красными И синими обозначены, кружками соответственно, проникающие И непроникающие джеты. Большая проникающих часть джетов характеризуется $\beta_k > 1$ и V > 210 км/с.

Рис. 2. Статистическое распределение числа ионов, переносимых магнитосферу В проникающими джетами, ИЗ Наиболее переходного слоя. вероятное значение составляет 5*10²⁸ частиц.

Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Large-scale jets in the magnetosheath and plasma penetration across the magnetopause: THEMIS observations, J. Geophys. Res., 2015, 120(6), 4423 – 4437, DOI: 10.1002/2014JA020953

Ионизирующее действие запрещенных электронов в ионосферной буре во время геомагнитной бури в декабре 2006 г.

Мы исследуем новый механизм увеличения ионизации или положительной ионосферной бури, связанный с ионизирующим воздействием электронов с энергией десятки кэВ на верхнюю атмосферу на низких широтах. Как было обнаружено недавно с помощью низкоорбитальных спутников NOAA/POES, во время геомагнитных бурь потоки энергичных электронов часто возрастают вблизи экватора под внутренним радиационным поясом, то есть в зоне квази-захвата или запрещенной зоне, в связи с чем они были названы forbidden energetic electrons (FEE). Были использованы данные по >30-кэВ электронам со спутников NOAA/POES, глобальные ионосферные карты и данные со спутников COSMIC/FORMOSAT-3 по радиозатмениям во время сильной геомагнитной бури 14-16 декабря 2006. Мы провели анализ одновременных возрастаний потоков FEE И увеличения полного электронного содержания (ТЕС) в ионосфере на разных фазах бури (начальной, главной восстановительной). Показано, И что вклад FEE ионизирующего эффекта по отношению известным К электродинамическим и термосферным механизмам положительных ионосферных бурь может быть существенным и достигать 50% на начальной и главной фазах, а на фазе восстановления даже преобладать. Кроме того, FEE-эффект объясняет необычно большую длительность положительных бурь в изучаемом событии.

62



Рис. Динамика экваториальных возрастаний квази-захваченных электронов с энергией >30 кэВ (а) в спокойные дни 2-4 декабря 2006 и (b-d) на разных фазах геомагнитной бури 14-16 декабря 2006; (е) геомагнитные индексы AL и Dst.

Suvorova, A.V., C.-M. Huang, L.-C. Tsai, Dmitriev A.V., Ratovsky K.G. Long-duration ionospheric positive storm during the December 2006 geomagnetic storm: lonizing effect of forbidden electrons, Advances in Space Research, 2015, 56(9), 2001-2011, doi: 10.1016/j.asr.2015.06.001

Контакт: Суворова Алла Васильевна, alla@jupiter.ss.ncu.edu.tw

Содержание надтепловых (suprathermal) ионов ³He, ⁴He, C, O и Fe в высокоскоростных потоках солнечного ветра из приэкваториальных корональных дыр

В результате изучения энергетических спектров ионов в диапазоне энергий 0.04 – 1 МэВ/нуклон в потоках частиц из 34 корональных дыр в минимуме 2006-09 гг. показано, что потоки надтепловых ионов представляют собой «высокотемпературный хвост» солнечного ветра. Получены свидетельства о наличии возможных дополнительных внешних источников ионов ⁴Не в надтепловых потоках из КД.



Рис.1. Распределения величин относительного содержания тепловых и надтепловых ионов (обозначены различным наклоном штриховки) He/O, C/O и Fe/O в потоках солнечного ветра из 34 корональных дыр в 2006–2011 гг.

Рис.2. Усредненные спектры надтепловых ионов 3 He, 4 He, C, O, и Fe в потоках частиц из корональных В трех диапазонах дыр максимальных скоростей солнечного ветра из КД: <400 (квадраты), 400-500 >500 км/с (кружки) И (треугольники) из числа корональных дыр - 4, 6, и 15, соответственно.

- *М.А. Зельдович, Ю.И. Логачев*. Ионы надтепловых энергий в солнечном ветре на 1 а.е. в минимуме активности 23-24 циклов. *Известия РАН. Серия физическая, 2015, т. 79, № 5, с. 660–662.*
- Zeldovich M.A., Logachev Yu.I., Kecskemety K., Veselovsky I.S. Suprathermal ions at 1 AU in solar wind streams from near equatorial coronal holes in 2006-2010, Proc. 34th Int. Cosmic Ray Conf., The Hague, paper no. 091 (2015).

Контакт: Логачев Юрий Иванович, <u>logachev@srd.sinp.msu.ru</u>

Моделирование и прогноз солнечной магнитной активности

Были исследованы наблюдательные данные о магнитном поле Солнца с помощью статистического метода анализа главных компонент, который позволил выявить волны с самым большим вкладом. Для выделенных волн был найден закон изменения их амплитуды во времени и был сделан прогноз их эволюции. Оказалось, что в 2020-2050 годах амплитуда магнитного поля Солнца будет меньше, чем обычно, и этот период времени можно будет связать с новым минимумом солнечной магнитной активности. Была выдвинута гипотеза, что минимумы солнечной магнитной активности могут быть связаны с процессом биений двух волн магнитной активности из волн генерируется на разной глубине в недрах Солнца, и эти волны имеют близкие частоты. В результате всплытия магнитного поля на поверхность эти волны взаимодействуют и в результате возникают биения амплитуды результирующего магнитного поля. Это и приводит к периодическому значительному спаду амплитуды магнитного поля на протяжении нескольких десятилетий.



Рис. Зависимость амплитуды суммы двух волн от времени.

- Zharkova V., Shepherd S., Popova E.P., Zharkov S. Heartbeat of the Sun from Principal Component Analysis and prediction of solar activity on millennium scale, Scientific reports, издательство Nature Publishing Group (United Kingdom), том 5, с. 15689, 2015.
- *Zharkova V., Shepherd S., Popova E.P., Zharkov S.* Heartbeat of the sun derived with principal component analyses and prediction of solar activity on millennium scale, National Astronomy Meeting 2015, Llandudno, North Wales, Great Britain, July 5-10, 2015

Контакт: Попова Елена Петровна, popovaelp@mail.ru

Идентификация корональных источников на основе моделирования их ионного состава

Методика локализации корональных источников по ВУФ изображениям солнечной короны показала, что по изображениям на длине волны 19.3 нм более надежно определяются параметры больших корональных дыр, по высокоскоростные которым вычисляются квазистационарные потоки солнечного ветра (СВ), а на длине волны 17.1 нм лучше вычислять параметры небольших областей пониженной яркости, по которым с большей точностью (до 65 км/с) рассчитывается профиль медленной компоненты СВ. Для выявления корональных источников транзиентной компоненты СВ была разработанаметодикадиагностики ионного состава во вспышках и проведен анализ параметров СВ, а также прослежена эволюция ионного состава в солнечной короне на примере нескольких геоэффективных корональных выбросах масс.



Рис. Черная кривая — наблюдаемая скорость СВ по данным АСЕ, голубая кривая — прогноз скорости СВ по данным с изображений на длинах волн 19.3 нм с КА SDO/ACE и 17.4 нм с КА PROBA2/SWAP. Красная кривая изменение интенсивности изображений на длине волны 19.3нм, коррелирующуе со спорадическими потоками СВ.

- V. A. Slemzin and Yu. S. Shugai Identification of Coronal Sources of the Solar Wind from Solar Images in the EUV Spectral Range, Cosmic Research, 2015, Vol. 53, No. 1, pp. 47–58.
- V. Slemzin, Yu. Shugay, F. Goryaev, P. Pagano, D. Rodkin, I. Veselovsky Identification of solar origins of several geo-effective ICMEs by modeling of their ion composition, Доклад на ISEST 2015 Workshop Mexico, 25-30 October 2015

Контакт: Шугай Юлия Сергеевна, jshugai@srd.sinp.msu.ru

Нетипичная динамика магнитосферы во время геомагнитных бурь 21– 22.I.2005 и 14–15.XII.2006

С использованием модели магнитосферного магнитного поля A2000 проведено исследование динамики крупномасштабных магнитосферных токовых систем во время геомагнитных бурь 21-22.I.2005 и 14-15.XII.2006. Развитие бури контролируется, как межпланетным магнитным полем, так и давлением солнечного ветра, которые создают условия для поступления плазмы во внутреннюю магнитосферу. Показано, что главную роль в развитии магнитной бури 21-22.1.2005 сыграл мощный импульс давления солнечного ветра в отличие от бури 14-15.XII.2006, инициированной изменением ориентации межпланетного магнитного поля. Как следствие *Dst*-вариация геомагнитного поля во время бури 21-22.1.2005 определяется, в основном, развитием кольцевого тока, а 14-15.XII.2006 – сравнимыми по величине вкладами кольцевого тока и токов хвоста магнитосферы. Результаты моделирования подтверждены данными о динамических особенностях потоков трех популяций ионов с энергией 30-80 кэВ (на низких широтах - *L*<2, а также на широтах ниже и выше границы изотропных высыпаний) по измерениям на солнечно-синхронных спутниках *NOAA (POES 15, 16, 17)*.



Рис. Временные профили усредненных по MLT максимальных потоков высыпающихся ионов (умноженные на 10) – *Jmax(Op1)* и суммарных потоков квазизахваченных ионов – *F(90p1);* неусредненных по долготе максимальных потоков захваченных ионов – *J(0p1);* положения границы

изотропизации – *L(IB*); давления солнечного ветра (*P*); *B*_z – компоненты ММП; *ASY-H* и *SYM-H* индексов.

В.В. Калегаев, Н.А. Власова, Ж. Пенг Динамика магнитосферы во время геомагнитных бурь 21–22.1.2005 и 14–15.ХІІ.2006, Космические исследования, 2015, том 53, № 2,с 105-117

Контакт: Калегаев Владимир Владимирович, <u>klg@dec1.sinp.msu.ru</u>

Эффект смягчения спектра ионов кольцевого тока и ионов на малых высотах во время магнитной бури 27-28.II.2014

Выполнен сравнительный анализ динамики кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время геомагнитной бури 27.II.2014. Использованы одновременные экспериментальные данные по потокам ионов с энергией от ~30 до ~250 кэВ в приэкваториальной области магнитосферы на высотах до 30000 км с ИСЗ Van Allen Probes и на полярной орбите до 1000 км с ИСЗ POES. Во время главной фазы бури наблюдаются возрастание потоков ионов с *E*<100 кэВ и спад потоков с *E*>100 кэВ как в области кольцевого тока, так и в приэкваториальной области на низкой орбите, отражающие смягчение спектра частиц кольцевого тока на главной фазе бури. Наблюдаемое явление может быть вызвано регистрируемыми ИСЗ POES высыпаниями частиц кольцевого тока ниже границы изотропизации. Показано, что вариации потоков ионов на низкой орбите во время геомагнитной бури в целом

отражают динамику кольцевого тока, хотя в каждой исследуемой области наблюдаются свои особенности, которые дополняют общую картину динамики магнитосферы Земли.





б

Рис. 1.

а. Временные профили потоков ионов по данным ИСЗ RBSPa и POES и геомагнитного индекса *SYM-H.*

Бременные профили потоков ионов при пролете ИСЗ РОЕЅ 18 через высокоширотные области магнитосферы.

В.В. Калегаев, Н.А. Власова, И.С.Назарков Динамика кольцевого тока и потоков ионов на малых высотах во время магнитной бури 27-28.II.2014, Геомагнетизм и аэрономия, 2015, том 55, № 6, с. 739–746
Корреляция плотности транзиентных событий образования электрического заряда в космических аппаратах, находящихся в точке Лагранжа L1 и на орбите Земли, с плотностью потока протонов и альфа частиц СКЛ

В натурном исследовании подтверждены факты, известные уже сто лет, но до сих пор, не учитываемые в отраслевых руководящих документах. А именно:

изменение свойств конденсированной среды, находящейся в поле ионизирующих частиц происходит в треках этих частиц;

наибольшие изменения состояния среды происходят в зоне пика Брэгга, то есть естественно ожидать, что выделенная энергия в пике Брэгга является основным поражающим фактором поля ионизирующих частиц, поскольку именно в этой части трека объёмная плотность мощности (сила осцилляторов, при кваново-механическом анализе) максимальна;

Впервые представляется спектр электрического заряда, образующегося под воздействием космических лучей в точке Лагранжа L1 и на орбите Земли. Впервые отслежено изменение плотности электрического заряда в пике Брэгга в ходе солнечной вспышки и превышающего уровень критического заряда типичных электронных элементов, используемых на отечественных космических аппаратах. Обнаружена ярко выраженная угловая анизотропия потока быстрых частиц в космическом аппарате во время сильных солнечных вспышках.

Анохин М.В., Галкин В.И., Дитлов В.А., Дубов А.Е., Калегаев В.В., Королёв А.Г., Кузнецов Н.В., Макарычев С.В., Панасюк М.И., Попов В.Д., Чабанов В.М., Шилло А.Г. К вопросу о роли пика Брэгга при оценке воздействия поля ионизующих частиц на микроэлектронику космических аппаратов. Научно-технический сборник «Стойкость 2015», Тезисы докладов 18 Всероссийской научно-технической конференции по радиационной стойкости электронных систем. г. Лыткарино, 2-3 июня 2015г., стр.27-29. ISSN 1997-2830. ФГУП НИИП.

Контакт: Калегаев Владимир Владимирович, <u>klg@dec1.sinp.msu.ru</u>

Постепенная и импульсная энергетизация хромосферной плазмы (результат численного МГД моделирования совместной эволюции плазмы и магнитного поля в верхней части солнечной хромосферы)

В зоне контакта двух разнополярных магнитных областей (плазменный параметр β которых около единицы) изначально неподвижная плазма с температурой 50 000К начинает двигаться и разогреваться. При этом на фоне плавного повышения температуры в 2-3 раза перетяжечнаяпинчевая неустойчивость приводит к импульсному (за 0.1 сек и меньше) увеличению скорости плазмы, при котором кинетическая энергия протонов достигает значений, сравнимых со вспышечными. Этот процесс может выступать как альтернатива энергетизации за счет магнитногопересоединения.



L.M. Alekseeva, S.P. Kshevetskii Numerical MHD simulation of the coupled evolution of plasma and magnetic field in the solar chromosphere. I. Gradual and impulsive energisation. Solar Physics (online first) , doi 10.1007/s11207-015-0788-7

Контакт: Алексеева Лидия Михайловна, <u>l.m.alekseeva@yandex.ru</u>

Гравитационное влияние планет Венеры, Земли и Юпитера на 11-летний цикл солнечной активности

В работах использован введенный автором параметр — средняя разность гелиоцентрических долгот (СРД) планет Венеры, Земли и Юпитера. По минимальным значениям СРД (планеты находятся в соединении), а также по минимальным отклонениям планет от линии, проходящей через них и Солнце при расположении планет по разные стороны от Солнца, составлен индекс (JEV), описывающий 11-летний цикл солнечной активности.

Проведены расчеты результирующей приливной силы со стороны Юпитера, Земли и Венеры, действующей на Солнце. Рассматривая приливные силы как разность сил притяжения, действующих на крайние по диаметру точки Солнца и на центр Солнца, показано, что имеются большие вариации результирующей приливной силы (РПС) в моменты времени линейных конфигураций планет Венеры, Земли и Юпитера и что максимальные значения вариаций РПС очень хорошо соответствуют минимальным значениям планетного индекса JEV, т.е. линейным конфигурациям Венеры, Земли и Юпитера.

Быстрые изменения приливной силы, действующей на Солнце со стороны планет Венеры, Земли и Юпитера, могут вызвать возмущения в физических параметрах области тахоклина, которые передадутся далее в конвективную зону и окажут воздействие на проявления солнечной активности.

Расчеты проведены для интервала времени с 1000 года по настоящее время, но для иллюстрации приведен интервал с 1700 года по настоящее время.



Рис. Для периода с 1700 по 2050 год: а - ряд солнечной активности по числам Вольфа (1700 – 2015 гг) (отн. ед.), б - данные индекса JEV (град), в скользящее среднеквадратическое отклонение по данным ряда «г», г – результирующая приливная сила трех планет (Венеры, Земли и Юпитера), действующая на Солнце (отн. ед.), д – углы между радиус-вектором Юпитера и линией Венера-Земля-Солнце (град), е - скользящее среднеквадратическое отклонение ряда углов «д».

- *Охлопков В.П.* Новый 11-летний планетный индекс солнечной активности, Сборник научных трудов по материалам Международной научнопрактической конференции «Теоретические и прикладные вопросы науки и образования», 31 января 2015 г, серия 3, с. 77-91.
- *Охлопков В.П.* Гравитационное влияние планет на 11-летний цикл солнечной активности, Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции "Образование и наука: современное состояние и перспективы развития" Тамбов, 31 августа 2015 г, том 3, с. 79-88.

Охлопков В.П. 11-летний планетный индекс солнечной активности, Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук, Москва, 2015, том 7, № 4, с. 8-19

Контакт: Охлопков Виктор Петрович, ovpetrovich@yandex.ru

Характер корреляции течений и компонент магнитных полей в растущих активных областях. Эффект окаймления

Полновекторные данные о магнитном поле и поле скоростей в растущей группе солнечных пятен, полученные в наблюдениях на КА Хиноде по разработанной нами программе, указывают на пространственную корреляцию распределений вертикальной, В_v, и горизонтальной, В_h, компоненты магнитного поля и на отсутствие их явной корреляции с полем скоростей. Найдена характерная особенность картины – эффект окаймления: локальные экстремумы B_v окаймлены областями локально усиленного В_h. Все это не поддается интерпретации с позиций популярной модели всплывающей трубки сильного магнитного поля и указывает на действие другого механизма формирования поля активной области.



Слева: сравнение вертикальной (градации серого) и горизонтальной (контуры) компонент магнитного поля; справа: сравнение поля сглаженных вертикальных скоростей (контурная карта в градациях серого с пунктирными контурами для нулевой скорости) и сглаженной вертикальной компоненты магнитного поля (цветные контуры). Красные контуры соответствуют $B_v > 0$, зеленые штрих-пунктирные контуры соответствуют $B_v = 0$ и желтые контуры - $B_v < 0$. Темные области на обеих картах обозначают отрицательные значения (направленные вверх вектора), а светлые области — положительные значения (направленные вниз вектора).

- *A.V. Getling, R. Ishikawa, A.A. Buchnev,* Doubts about the crucial role of the risingtube mechanism in the formation of sunspot groups, Advances in Space Research, v. 55, no. 3, pp. 862–870, 2015, doi:10.1016/j.asr.2014.07.024.
- A.V. Getling, R. Ishikawa, A.A. Buchnev, Development of active regions: flows, magnetic-field patterns and bordering effect, Solar Physics (submitted); препринт: arXiv:1506.01848 [astro-ph.SR].

Возможный механизм формирования разномасштабной солнечной конвекции благодаря переменной теплопроводности

Такие как переменное состояние ионизации, факторы переменные коэффициенты переноса, плотностная стратификация и т.д. могут быть ответственны за сосуществование течений различных масштабов В солнечной конвективной зоне. Наше трехмерное численное моделирование конвекции в горизонтальном слое показало, что если температурная зависимость температуропроводности обеспечивает вблизи верхней поверхности слоя статический градиент температуры, значительно больший по абсолютной величине, чем в остальной части слоя, то она способен привести к сосуществованию трех различных масштабов конвективных течений.



Рис. Результаты обработки полученного численным моделированием поля температур в плоскости *z* = 0.97тремя различными методами: слева крупномасштабная компонента, выделенная путем сглаживания;

посередине мелкомасштабная компонента, полученная вычитанием крупномасштабной из полной величины; справа результат спектральной обработки. Хорошо различимы конвективные структуры трех различных масштабов.

O.V. Shcheritsa, A.V. Getling, O.S. Mazhorova, Stratification-induced scale splitting in convection, Advances in Space Research, v. 55, no. 3, pp. 927–936, 2015, doi: 10.1016/j.asr.2014.08.034.

Контакт: Гетлинг Александр Владимирович, <u>A.Getling@mail.ru</u>

Горизонт прогноза потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите при помощи ИНС расширен до 12 часов

Получены результаты прогнозирования потоков релятивистских электронов с энергией выше 2 МэВ на геостационарной орбите при помощи искусственных нейронных сетей (ИНС) от 3 до 12 часов.

Myagkova I., Dolenko S., Shiroky V., Sentemova N., Persiantsev I. Horizon of Neural Network Prediction of Relativistic Electrons Flux in the Outer Radiation Belt of the Earth, 16th EANN Workshops, September 25-28, 2015m Rhodes Island, Greece, ACM Proceedings, p. 9

Регистрация высокоэнергичного гамма-излучения солнечной вспышки 29 октября 2003 г.

Продолжается обработка и анализ данных, полученных в указанном эксперименте. Усовершенствованные методы восстановления и модели спектров излучения солнечных вспышек позволили повысить достоверность полученных результатов. В частности, на основании измерений гаммаизлучения солнечной вспышки 29 октября 2003 г. в интервале энергий 0.04-150 МэВ были получены последовательные спектры этого излучения по данным СОНГ и RHESSI. Была проведена интеркалибровка данных в диапазоне 0.04-10 МэВ. Компонент спектра, обусловленный распадом нейтральных и заряженных пионов, был выделен достоверно в нескольких из них. Эти пионы возникают при взаимодействии протонов, ускоренных до энергий свыше 300 МэВ, с веществом солнечной атмосферы. Получена оценка временного поведения спектра ускоренных протонов на основании изменения отношения между интенсивностями пионного излучения и узких гамма-линий. Была обнаружена ассоциация между эффективностью ускорения протонов до энергий, превышающих порог рождения пионов, и процессом изменения магнитной структуры вспышки. Пионное излучение появилось в момент смены направления движения оснований силовых линий от сближения к расхождению. Самый жесткий спектр протонов с показателем S=3.4-3.7 наблюдался во время движения оснований друг от друга.

Эта вспышка сопровождалась GLE 66 (Ground Level Enhancement). Временное поведение пионного излучения было сопоставлено с временем начала регистрации GLE. Было показано, что как протоны, взаимодействующие на Солнце, так и протоны, ответственные за начало GLE, могут принадлежать к одной популяции частиц.

Связь времени ускорения протонов до высоких энергий с временем развития эруптивного процесса – это один из открытых процессов в физике Солнца, потому что потенциальными источниками ускорения частиц могут быть как процесс фундаментальной перестройки магнитного поля вспышки, так и быстрая ударная волна, возникающая при движении коронального выброса массы (СМЕ). Было найдено, что, по крайней мере, в событии 29 октября 2003 г. ускорение частиц до энергий ≥ 300 МэВ совпадает по времени с процессами перестройки магнитного поля в области вспышки.



Рис. 1. Восстановленный спектр излучения солнечной вспышки 29 октября 2003 г., измеренный детектором СОНГ. 1 — полный поток; 2 — тормозное излучение; 3 — излучение в гамма-линиях; 4 — «пионное» излучение.



Kurt V.G., Yushkov B.Yu., Kudela K., Galkin V.I., Kashapova L.K. CORONAS-F observation of HXR and gamma-ray emissions from the solar flare X10 on 29 October 2003 as a probe of accelerated proton spectrum", Contributions of the Astronomical Observatory Skalnate Pleso, т.45, № 1, с. 42-59 (2015)

Контакт: Курт Виктория Гдальевна, vgk@srd.sinp.msu.ru

Накопление поглощенной дозы на околоземных орбитах космических аппаратов при воздействии потоков частиц солнечных космических лучей

Разработана расчетная методика, позволяющая прогнозировать накопление поглощенной дозы на околоземных космических аппаратах во время развития протонного события солнечных космических лучей.



Рис. Мощность дозы (а) и поглощенная доза (b) внутри МКС в зависимости от времени полета во время солнечного протонного события в марте 2012 года. Начало оси абсцисс соответствует времени 00:00 UT 7 марта.

Сплошные кривые - орбита МКС. Пунктирные кривые - геостационарная орбита (гипотетический случай для МКС). Точки - данные, измеренные дозиметром на орбите МКС.

Кузнецов Н.В., Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Юшков Б.Ю., Бенгин В.В., Митрикас В.Г. Накопление поглощенной дозы на околоземных орбитах космических аппаратов при воздействии потоков частиц солнечных космических лучей, Вопросы Атомной Науки и Техники, серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру, Выпуск 2, стр.20-23, 2015

Контакт: Кузнецов Николай Викторович, nvk@srd.sinp.msu.ru

Сравнение моделей потоков заряженных космических частиц

Сравниваются энергетические спектры потоков частиц в космическом пространстве, предсказываемые российским и европейским пакетами программ (COSRAD и SPENVIS, соответственно). Обсуждаются особенности моделей космической радиации (радиационных поясов Земли, галактических и солнечных космических лучей), которые используются в этих программах.

Kuznetsov N.V., Nikolaeva N.I., Nymmik R.A., Panasyuk M.I., Uzhegov V.M., Yakovlev M.V. Comparison of the models of the charged particle fluxes in space that are used for the calculation of the radiation environment in space missions, International Conference on Radiation Effects on Components and Systems - RADECS-2015 (Moscow, September 14-18)

Прогнозирование факторов космической погоды в околоземном пространстве и на спутниковых орбитах

Центр оперативного космического мониторинга ниияф МГУ осуществляет анализ И прогнозирование радиационных условий В околоземном космическом пространстве (http://swx.sinp.msu.ru/). В режиме реального времени, по данным спутниковых И наземных измерений информационной системой автоматически восстанавливаются основные воздействия характеристики солнечной активности на радиационное окружение Земли. Операционные сервисы автоматически генерируют предупреждения о возрастаниях потоков СКЛ частиц И релятивистских электронов ПО



Физические условия в околоземном пространстве 12:59 UTC 20.11.2015

данным спутников на низких и геостационарных орбитах.

Carolus J. Schrijver, Kauristie Kirsti, Alan D. Aylward, Clezio M. Denardini, Sarah E. Gibson, Glover Alexi, Gopalswamy Nat, Grande Manuel, Hapgood Mike, Heynderickx Daniel, Jakowski Norbert, Vladimir V. Kalegaev, Lapenta Giovanni, Jon A. Linker, Liu Siqing, Cristina H. Mandrini, Ian R. Mann, Nagatsuma Tsutomu, Nandy Dibyendu, Obara Takahiro, O'Brien T. Paul, Onsager Terrance, Hermann J. Opgenoorth, Terkildsen Michael, Cesar E. Valladares, and Vilmer Nicole. Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS. Advances in Space Research, 55(12): 2745-2807, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023

Контакт: Калегаев Владимир Владимирович, <u>klg@dec1.sinp.msu.ru</u>

Регистрация пика давления плазмы и экваториальной кромки западного аврорального электроджета в области формирования внешнего радиационного пояса во время магнитной бури

Получены результаты, проливающие свет на решение проблемы формирования внешнего радиационного пояса Земли, впервые зарегистрированного на втором искусственном спутнике Земли [Вернов, Григоров, Логачев, Чудаков, ДАН, т. 120, № 6, с. 1231-1233, 1958]. Ключевым

моментом решения проблемы является анализ динамики плотности релятивистских электронов В фазовом пространстве. Несмотря на длительный период изучения внешнего радиационного пояса, включая современный многоспутниковый проект Van Allen, удалось описать динамику плотности релятивистских электронов внешнего радиационного пояса в фазовом пространстве и точно зафиксировать локализацию данной плотности только [Reeves, privatecommunication, максимума September 2015] для магнитной бури 8–9 октября 2012 [Reevesetal. 2013, doi:10.1126/science.1237743]. Однако, динамика аврорального овала во время данной бури и роль авроральных процессов в ускорении электронов внешнего радиационного пояса не была исследована должным образом.

Проведен движения аврорального анализ овала аврорального И электроджета к экватору во время магнитной бури 8-9 октября 2012 г. с использованием данных наблюдений спутников DMSP и магнитной цепочки IMAGE. Впервые зарегистрировано резкое локальное увеличение давления на геоцентрическом расстоянии L=4, на котором на фазе восстановления бури наблюдался максимум плотности релятивистских электронов в фазовом пространстве. Показано, что положение экваториальной кромки западного аврорального электроджетаво время главной фазы бури совпадает с положением максимума плотности релятивистских электронов в фазовом пространстве на фазе восстановления. Сравнение положения максимума образовавшегося пояса с величиной минимального Dst для рассмотренной бури подтвердило в пределах ошибок зависимость, полученную в работах Тверской [см. обзор Тверская, 2011, doi: 10.1134/S0016793211010142] (предсказания Тверской - Lmin=4.02, результат Reevesetal. -Lmin=4.2).

Полученные результаты дают возможность разработать методику предсказания локализации максимума образующегося на фазе

восстановления магнитной бури нового радиационного пояса, используя данные авроральных спутников таких как МЕТЕОР и наземные магнитные наблюдения.



Рис. 1. Результаты наблюдений на спутнике DMSP(а), положение аврорального электроджета по магнитной цепочке IMAGE (б) и положение максимума зарегистрированного пояса на кривой Тверской (в). Зарегистрированное событие показано голубой звездой на рисунке (в). Стрелка показывает положение зарегистрированного максимума давления.



Рис. 2. Профиль давления, полученный па данным спутника DMSPF17 при пересечении аврорального овала 8 октября 2012 г. между 21:47:40 и 21:52:50 UT и спроецированный на экваториальную плоскость с использованием модели IGRF (красные точки) и модели Tsyganenko 2004 (синие точки) [Antonova and Stepanova, 2015]. Максимум плотности релятивистских электронов в фазовом пространстве зафиксирован спутниками VanAllen [Reevesetal., 2013, Science341:991, doi:10.1126/science.1237743] на L=4.2.

- Antonova E. E., M. V. Stepanova, The problem of the acceleration of electrons of the outer radiation belt and magnetospheric substorms. Earth, Planets and Space, v. **67.**doi:10.1186/s40623-015-0319-7.
- Antonova E. E., V. G. Vorobjev, M. O. Riazantseva, I. P. Kirpichev, O. I. Yagodkina,
 V. V. Vovchenko, M. S. Pulinets, S. S. Znatkova, I. L. Ovchinnikov, I. A.
 Kornilov, T. A. Kornilova, M. V. Stepanova, Auroral oval mapping and the
 main problems of magnetospheric dynamics, Unsolved problems in
 magnetospheric physics, 6-12th September, 2015, Scarborough, UK, p. 2

Контакт: Антонова Елизавета Евгеньевна, Elizaveta.antonova@gmail.com

Определение изменений параметров каппа-распределений ионов и электронов с ростом геоцентрического расстояния в хвосте магнитосферы Земли

Проведен анализ зависимостей характеристик функций распределения ионов и электронов от геоцентрического расстояния в хвосте магнитосферы Земли с использованием данных наблюдений международной миссии THEMIS. Изучались события, при которых все пять спутников миссии выстраивались в одну линию на геоцентрических расстояниях от 7 до 30 радиусов Земли (Рис.).

Показано, что наблюдаемые функции распределения хорошо описываются каппа-распределениями. Показано, что для большинства изученных событий показатель степени немаксвелловского хвоста функции распределения увеличивался с ростом геоцентрического расстояния, что свидетельствует о области ускорения глубоко внутри магнитосферы. локализации турбулентного Проанализированы роли регулярного и переноса В формировании наблюдаемой зависимости. Показано, что турбулентный перенос сопровождаемый процессами релаксации функций распределения ионов и электронов играет существенную роль в формировании функций распределения, регистрируемых в хвосте магнитосферы Земли.



Рис. Положение пяти спутников миссии THEMISB системе координат GSM для пяти проанализированных событий, демонстрирующее расположение спутников в одну линию в направлении хвоста (левая часть рисунка). Усредненные спектры электронов и ионов, измеренные 22 февраля 2008 г. между 7:26 и 7:38 UT и их фитирование каппа-распределением: (a, b) THB, XGSM= -22.9*RE*, (c, d) THC, XGSM= -16.9*RE*, (e, f) THD, XGSM= -11.3*RE*, (g, h)THE, XGSM= -11.2*RE*, and (i, j) THA, XGSM= -8.3*RE* (правая часть рисунка).

- Stepanova M., E. E. Antonova, Role of turbulent transport in the evolution of the distribution functions in the plasma sheet, J. Geophys. Res., v. 120, No 5, p. 3702-3714, 2015, doi:<u>10.1002/2014JA020684</u>
- Stepanova M., E.E. Antonova, Turbulent transport and evolution of kappa distribution in the plasma sheet, Unsolved problems in magnetospheric physics, 6-12th September, 2015, Scarborough, UK, p. 49.

Контакт: Антонова Елизавета Евгеньевна, Elizaveta.antonova@gmail.com

Проецирование основной части аврорального овала на окружающее Землю плазменное кольцо

На основе разработанной ранее методики проецирования авроральных областей на экваториальную плоскость без использования моделей магнитного поля показано, что основная часть аврорального овала проецируется не на плазменный слой магнитосферы Земли как считалось ранее, а на окружающее Землю плазменное кольцо. Методика основана на сравнение давления плазмы на авроральных высотах и в экваториальной плоскости в условиях магнитостатического равновесия и изотропии давления. Давление плазмы в данных условиях постоянно на магнитной силовой линии, что позволяет "маркировать" силовую линию. Получены давления ионосферных распределения плазмы на высотах И В экваториальной плоскости с использованием данных наблюдений спутников DMSP и пятиспутниковой миссии THEMIS в спокойных (Рис.) и возмущенных геомагнитных условиях. Показано, что в области проекции аврорального овала на экваториальную плоскость течет поперечный ток, являющийся высокоширотным продолжением кольцевого тока. Данный ток не учтен в моделях геомагнитного поля с заранее определяемой геометрией токовых систем, что приводит к избыточной вытянутости магнитных силовых линий в ночном секторе. Полученный результат позволяет объяснить кольцевую форму аврорального овала, имеющего конечную толщину в районе полудня.



Рис. Результаты, демонстрирующие проецирование аврорального овала (показан зеленым на рис. (а)) на окружающее Землю плазменное кольцо в магнитоспокойных условияхAL = –100 нТл и Dst = –5 нТл: распределение авроральных высыпаний на малых высотах (а), распределение давления плазмы на малых высотах (b)и в экваториальной плоскости (c), анизотропия давления в экваториальной плоскости (d).

- Antonova E. E., V. G. Vorobjev, I. P. Kirpichev, O. I. Yagodkina, M. V., Stepanova, Problems with mapping the auroral oval and magnetospheric substorms, Earth, Planets and Space, (2015) 67:1666 DOI 10.1186/s40623-015-0336-6
- Воробьев В. Г., О. И. Ягодкина, Е. Е. Антонова, Особенности планетарного распределения ионных высыпаний при разных уровнях магнитной активности, Геомагнетизм и аэрономия. Т. *55,* № 5, с. 611–622, 2015, doi:10.7868/S0016794015050193.

Контакт: Антонова Елизавета Евгеньевна, Elizaveta.antonova@gmail.com

Определение роли флуктуаций в магнитослое магнитосферы Земли в процессе проникновения плазмы внутрь магнитосферы и формирования низкоширотного погранслоя

Проведен анализ роли высокого уровня флуктуаций в магнитослое магнитосферы Земли в процессе проникновения плазмы внутрь магнитосферы и формирования низкоширотного погранслоя 96 (lowlatitudeboundarylayer - LLBL) на примере событий 1 и 5 ноября 2007 г. с использованием данных наблюдений на спутнике THEMIS-A (Puc.). Во время отобранных пересечений низкоширотного погранслоя спутник проводил измерения за квазипараллельной и квазиперпендикулярной ударными волнами. В качестве параметра, отражающего уровень флуктуаций в магнитослое, выбран угол между направлением магнитного поля в солнечном ветре и нормали к магнитопаузе OBn. Показано, что при малом угле OBn и высоком уровне турбулентности в магнитослое наблюдается толстый низкоширотный погранслой. При большом угле OBn толщина слоя уменьшается. Рассмотрены возможные механизмы формирования толстого LLBL.



Рис. Пример анализа пересечения низкоширотного пограгслоя спутниками мисии THEMIS.

- Знаткова С. С., Е. Е. Антонова, М. С. Пулинец, И. П. Кирпичев, М. О. *Рязанцева,* Толщина низкоширотного погранслоя при разных уровнях флуктуаций магнитного поля в магнитослое, Геомагнетизм и аэрономия. T. *55,* № 5, с. 598–607, 2015, doi: 10.7868/S0016794015050211.
- Пулинец М.С., Е.Е. Антонова, М.О. Рязанцева, С.С. Знаткова, И.П. Кирпичев, Статистическое сравнение пересечений магнитопаузы в спокойных геомагнитной обстановке и во время магнитных бурь по данным проекта THEMIS, Тезисы докладов Восьмой Ежегодная Конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 16 - 20 февраля 2015 г., ИКИ РАН, с. 114.
- Pulinets M., E. Antonova, M. Riazantseva, S. Znatkova, I. Kirpichev, Statistical comparison of the magnetopause crossings in a quiet geomagnetic conditions and during magnetic storms according to the THEMIS data. 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Prague, Czech Republic, June 22 July 2, 2015. Abstract: A33p-003
- Znatkova S., E. Antonova, I. Kirpichev, M. Pulinets, Plasma velocities in the lowlatitude boundary layer, 26th General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), Prague, Czech Republic, June 22 - July 2, 2015. Abstract: A33p-002.

Контакт: Антонова Елизавета Евгеньевна, <u>Elizaveta.antonova@gmail.com</u>

Исследование динамических свойств мелкомасштабных структур плазмы солнечного ветра

Работа посвящена последним результатам изучения мелкомасштабных флуктуаций в турбулентном потоке солнечного ветра с использованием измерений экстремально высокого временного разрешения (вплоть до 0.03 с) плазменного спектрометра БМСВ. Спектрометр установлен на борту астрофизического космического аппарата СПЕКТР-Р, удаляющегося от Земли вплоть до 350 000 км. Систематически исследуются спектры флуктуаций потока ионов солнечного ветра на масштабах от 0.03 до 100 с. Для разных условий в солнечном ветре анализируется разница между наклонами низкочастотной и высокочастотной частей спектра флуктуаций и частота точки излома между ними. Также тщательно исследуются статистические свойства флуктуаций потока ионов солнечного ветра на масштабах менее 10 с. Демонстрируется высокий уровень перемежаемости исследуемого потока. самоподобие Показано, постоянно наблюдается расширенное что турбулентного потока ионов солнечного ветра. Проведена аппроксимация не Гауссовских функций распределения флуктуаций потока ионов с помощью Цаллисовской статистики, показано, что наблюдается не экстенсивный характер флуктуаций солнечного ветра. Проведено сравнение статистических флуктуаций характеристик потока ионов С предсказаниями Лог-Пуассоновской модели. В результате Лог-Пуассоновской параметризации скейлинга структурных функций, показано, что в турбулентном потоке правило, наблюдаются филаменто-подобные солнечного ветра, как структуры.



Рис. Пример спектра флуктуаций потока ионов солнечного ветра и зависимости величины эксцесса от частоты флуктуаций для интервала 27-28/09/2011 23:00-09:00 UT. Рост эксцесса к малым масштабам отражает перемежаемый характер потока.

Riazantseva M.O., Budaev V.P., Zelenyi L.M., Zastenker G.N., Pavlos G.P., Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. and Nemec F., Dynamic properties of small scale solar wind plasma fluctuations, Phil. Trans. R. Soc. A, 373 (2041), 20140146, 2015. http://dx.doi.org/ 10.1098/rsta.2014.0146. Impact factor (Web of Science) – 3.04

Контакт: Рязанцева Мария Олеговна, orearm@gmail.com

Изучение солнечной вспышки, обогащённой изотопом³Не

Мощная солнечная вспышка 20 января 2005 г. исследовалась предложенным ранее методом анализа у-излучения в нейтронной линии 2.223 МэВ с привлечением для анализа «мгновенных» ядерных линий, главным образом, от ¹⁶О и ¹²С. Работа основана на данных, полученных с СОНГ-Д/АВС-Ф/КОРОНАС-Ф/. Выявлена эволюция ряда параметров вспышки за время гамма-излучения: (а) изменение спектра ускоренных во вспышке частиц от более мягкого в период роста и максимума потока гаммаизлучения в линии 2.223 МэВ к более жёсткому в период спада этого потока; (б) изменение модели плотности солнечной атмосферы (т.е. найдена динамика уплотнения подвспышечной области;. (в) впервые обнаружена эволюция величины отношения концентраций к≡n(³He)/n(¹H) от 2×10⁻⁵ в период начальной фазы роста потока к 1.4×10⁻⁴ в период максимума и до 2.0×10⁻⁴ на спаде. При этом усреднённое по времени вспышки значение составляет 1.4×10⁻⁴, в отличие от ранее исследованных вспышек, где к обычно составляет (2÷4)×10⁻⁵. Найдена наилучшая аппроксимация наблюдательных данных при варьировании параметров в трёх временных интервалах (см. рис.). Показано, что ионы гелия-3, первоначально ускоренные В процессе того или иного, возможного В случае преимущественного ускорения ³Не, механизма ускорения на турбулентности (например, ионно-звуковой, возможно, также в сочетании со скрещенными магнитном И электрическом полями, или геликонной), затем распространяются и накапливаются в области фотосферы и нижней хромосферы.



Рис. Комбинированная аппроксимация временного профиля γ-излучения с энергией 2.223 МэВ во время солнечной вспышки 20.01.2005г. αT – спектральный индекс ускоренных ионов - в случае представления спектра функцией Бесселя 2-го рода (случай стохастического ускорения), m – номер реализующейся модели плотности солнечной атмосферы: m=1 – модель невозмущённой атмосферы, m=2 – модель вспышечной атмосферы.

Найдены значения параметров в каждом интервале:

I — $\kappa=2\times10^{-5}$, $\alpha T=0.005$, модель — невозмущённая плотность солнечной атмосферы (модель HSRA), 1.5×10^{16} см⁻³ на вершине фотосферы.

 $II - \kappa = 1.4 \times 10^{-4}$, $\alpha T = 0.03$; $III - \kappa = 2.0 \times 10^{-4}$, $\alpha T = 0.1$.

Модель плотности в II и III –типичная для вспышек, плотность увеличена до 2×10¹⁷ см⁻³ в нижней хромосфере и фотосфере.

E.V. Troitskaya, I.V. Arkhangelskaja, A.I. Arkhangelskiy, About ³He Ions Predominant Acceleration During the January 20, 2005 Solar Flare. <u>Physics</u> <u>Procedia</u>. <u>Volume 74</u>.V. 74. P 274–280. *Троицкая Е.В., Архангельская И.В., Архангельский А.И.* Исследование солнечной вспышки 20 января 2005 г. по данным о ее гамма-излучении, сборник тезисов Десятой ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 16-20 февраля 2015 г, Москва, с.39-39

Контакт: Троицкая Евгения Викторовна, troi@srd.sinp.msu.ru

Повышенное содержание элементов с низким первым потенциалом ионизации на границе фотосферы с короной. Северо-южная годовая асимметрия ионосферы

а) На основе анализа спектров, полученных французскими наблюдателями с высоким пространственным разрешением (45 км) во время полных солнечных затмений в 2008, 2009, 2010, 2012 и 2013 г. найдено и проанализировано повышенное содержание элементов с низким первым потенциалом ионизации (Fe II, Ti II, Ba II) в области температурного минимума на высотах от 200 до 600 км над поверхностью фотосферы.

б) Ретроспективный анализ асимметрии ионосферы в северном и южном магнитном полушарии во время равноденствий в 1996-2012 гг. по данным многочисленных спутниковых измерений, проанализированных и приведенных к единой мере полного электронного содержания с помощью специально введенного нового индекса асимметрии, позволил выявить несколько достоверных особенностей, которые связываются с активностью Солнца и другими факторами.

Контакт: Веселовский Игорь Станиславович, veselov@dec1.sinp.msu.ru

Топологическая структура магнитных полей вблизи нулевых точек. Потоки энергии и вещества вблизи Солнца

Сформулированы общие принципы описания геометрических И топологических свойств линий магнитного поля вблизи нулей 2-го и высших порядков в пространстве за счёт выбора базисных функций и решения специальным образом поставленной задачи на собственные значения. Представлена их классификация в потенциальном случае и рассмотрены возможные приложения для процессов на Солнце. Теоретически и на основе наблюдений показано, что потоки энергии и вещества не параллельны в турбосфере вокруг Солнца на расстояниях 1-6 солнечных радиусов и могут иметь различное направление. Источники вещества и энергии имеют различное расположение и в общем случае не совпадают. Это делает проблему происхождения солнечного ветра нелокальной и эволюционной. Сделан вывод, что солнечный ветер на данной стадии эволюции Солнца существует в основном благодаря ускорению электромагнитными полями, а не градиентом газового давления.

Lukashenko A.T., Veselovsky I.S. General Principles of Describing Second- and Higher-Order Null Points of a Potential Magnetic Field in 3D // Geomagnetism and Aeronomy, Vol. 55, № 8, p. 1152–1158. 2015.

Контакт: Веселовский Игорь Станиславович, veselov@dec1.sinp.msu.ru

Исследование экстремальных явлений в рентгеновском и гаммадиапазонах во Вселенной на космических аппаратах

Измерение поляризации жесткого рентгеновского излучения от Крабовидной туманности прибором PoGOLite Pathfinder

Измерена линейная поляризация жесткого рентгеновского излучения от Крабовидной туманности в прежде неисследованном диапазоне энергий 20-120 кэВ. Измерения поляризованной фракции и угла плоскости поляризации позволяет разделить геометрические и физические эффекты и уточнить геометрию пульсарного ветра и магнитного поля области излучения. Измерения выполнены прибором PoGOLite Pathfinder - поляриметром запущенном на высотном аэростате на круговую приполярную орбиту. Поляризационные измерения выполнены с применением измерений комптоновского рассеяния матрице пластических сцинтилляторов В антисовпадательной защиты. С 99% расположенной внутри колпака достоверностью поляризованная часть излучения не превышает 42.4%, при угле поляризации равном примерно 142 градуса.

Chauvin M., Floren H.-G., Jackson M. et al. Observation of polarized hard X-ray emission from the Crab by the PoGOLite Pathfinder, Monthly Notices Letters

of the Royal Astronomical Society, 2016, 456, L84-L88, doi:10.1093/mnrasl/slv177

Контакт: Июдин Анатолий Федорович, aiyudin@srd.sinp.msu.ru

Теоретические модели магнитосфер планет Солнечной системы

Динамо во внешнем гелиошисе: Необходимые условия работы механизма динамо за гелиопаузой

Представлен возможный механизм, объясняющий наблюдаемое Вояджером 1 при выходе за гелиопазу усиление величины магнитного поля без изменения его направления. При этом температура и число энергичных гелиосферных частиц уменьшилось, а интенсивность галактических космических лучей и плотность плазмы возросли. Вояджер 1 обнаружил, что за гелиопаузой сохраняется спиральная структура магнитного поля, вызванная вращением Солнца. Перечислены необходимые условия процесса динамо. Из анализа данных Вояджер 1 сделан вывод, что все необходимые условия механизма динамо выполнены за гелиопаузой. Показано, что дифференциальное вращение существует в ближайшей к гелиопаузе области внешнего гелиошиса с усиленной электрической проводимостью, которая, однако, меньше продольной проводимости. Получен вывод о том, что в динамо-слое за гелиопаузой кинетическая энергия вращения плазмы межзвездной среды порядка наблюдаемой магнитной энергии, что подтверждает необходимое для динамо условие, согласно которому энергия вращения Солнца является источником энергии для усиления магнитного поля во внешнем гелиошисе.



Рис. Z – ось вращения, М – магнитная ось солнца. Слева: схематическое изображение гелиосферы в потоке межзвездной среды. Динамо-слой заштрихован фиолетовым цветом, звездочкой отмечено место пересечения гелиопаузы Вояджером-1. Красные линии обозначают открытые силовые линии, зеленые – замкнутые, расположенные между ними черные линии – линии гелиосферного токового слоя; голубая линия – межзвездное магнитное поле. Справа – внутренняя гелиосфера.

E.S. Belenkaya, Dynamo in the Outer Heliosheath: Necessary Conditions, Solar Physics, 290, Issue 7, pp. 2077-2092, 2015, DOI 10.1007/s11207-015-0741-9. Impact Factor: 4.039

Контакт: Беленькая Елена Семеновна, <u>elena@dec1.sinp.msu.ru</u>

Модели тонкого токового слоя с нормальной компонентой магнитного поля на пролетных частицах

Тонкие токовые слои, толщина которых равна нескольким ларморовским радиусам тепловых ионов, являются фундаментальным физическим объектом, который играет существенную роль в формировании основных магнитосферных токовых систем (токового слоя хвоста магнитосферы, экваториального магнитодиска Юпитера, гелиосферного токового слоя и др.). В рамках гибридной модели токового слоя в хвосте магнитосферы Земли исследованы распределение плотности тока и магнитных полей с учетом сдвиговой магнитной компоненты. Исследована нелинейная динамика заряженных частиц, которые формируют слой и обеспечивают наблюдаемое статическое равновесие. Аналитическое решение ДЛЯ плотности и профиля тока сопоставлено с результатом численных расчетов и результатами измерений на спутниках Cluster. Получен характерный пространственный масштаб (расстояние между максимумами) как функция питч-углового распределения падающих частиц, учтен эффект тепловой дисперсии падающего пучка. Показано, что в рамках численной модели токового слоя, основанной на методе крупных частиц, возникновение
самосогласованной компоненты электрического поля в окрестности токового слоя может приводить к значительному уменьшению толщины слоя и, в конечном счете, к формированию многомасштабной конфигурации, в центре которой находится тонкий токовый слой, поддерживаемый пролетными частицами. Продемонстрирован существенный вкладе электронов в формирование равновесной структуры тока. Получен новый тип равновесных решений, в которых при определенных начальных условиях появляются сдвиговые моды.



Рис. 1. Конфигурация магнитного поля (а). Схематическое изображение траектории протона, совершающего колебания вблизи токового слоя (b, c).



Рис. 2. Вариации питч-угла и фазы ларморовского вращения в зависимости от начального питч-угла θ0 (а). Красная и синяя кривые соответствуют θ0 = 0.2 и θ0 = 0.6. (b)

- Malova H. V.; Mingalev O. V.; Grigorenko E. E.; et al., Formation of self-organized shear structures in thin current sheets, Journal of Geophys.Res.-Space Physics. 120(6). pp. 4802-4824. 2015.
- Sasunov Yu. L.; Khodachenko M. L.; Alexeev I. I.; Belenkaya E.S., et al., Investigation of scaling properties of a thin current sheet by means of particle trajectories study, Journal of Geophys.Res.-Space Physics. 120(3). pp. 1633-1645. 2015.

Контакт: Алексеев Игорь Иванович, <u>alexeev@dec1.sinp.msu.ru</u>

Расчет продольных токов в южной ночной магнитосфере Сатурна

На основании анализа магнитных возмущений, связанных с продольными токами, по данным 34 пролетов КА Кассини в пред-полуночном секторе северной авроральной области в 2008 г. обнаружено, что они модулированы не только северной системой, ответственной за осцилляции планетарного периода (PPO), но и с южной PPO системой. Это свидетельствует о существовании токов перетекания между полушариями, связанными с PPO системами. Главные продольные токи двух PPO систем оказываются расположенными там же, где и северная ионосферная коширота северной системы PPO, локализованной между областью границы между открытыми и замкнутыми силовыми линиями и силовыми линиями, проектирующимися на ~9 радиусов Сатурна в экваториальной плоскости. Все три токовые системы имеют токи сравнимой величины ~3 МА в каждом полуцикле PPO.

Hunt G.J., Cowley S.W.H., Provan G. et al. Field-aligned currents in Saturn's northern nightside magnetosphere: Evidence for inter-hemispheric current flow associated with planetary period oscillations, Journal of Geophysical Research, 120, doi:10.1002/2015JA021454

Контакт: Алексеев Игорь Иванович, <u>alexeev@dec1.sinp.msu.ru</u>

Модели осесимметричных токовых слоев в космической плазме

Построены и исследованы модели осесимметричных токовых слоев магнитодиска Юпитера и гелиосферного токового слоя. Создана самосогласованная МГД – модель магнитодиска Юпитера. Учтено влияние вулканизма спутника Юпитера Ио и конечной проводимости ионосферы планеты. Показано, что основным механизмом генерации продольных токов является униполярная генерация, связанная с нарушением коротации в верхних слоях ионосферы. Показано, что для понимания физических механизмов формирования магнитодиска необходим учет не только поперечных, но и продольных токов, замыкающихся на ионосфере планеты. В новой МГД модели гелиосферных токового и плазменного слоев учтена их вложенная многомасштабная структура, разделяющая магнитные потоки с разной полярностью. Оценена величина полного тока в гелиосферном токовом слое на различных гелиоцентрических расстояниях. Предсказана возможность поворота радиального тока за орбитой Земли, что отличает модель от известной модели Паркера. Показано, что на сепаратрисах, области разделяющих открытых И замкнутых магнитных линий, располагаются токовые слои, ограничивающие плазменный слой. Дана оценка его толщины и показано согласие с наблюдениями аппарата Ulysses

- *Kislov R.A., O. Khabarova, H.V. Malova,* A new stationary analytical model of the heliospheric current sheet, Journal of Geophysical Research, V. 120, doi: 10.1002/2015JA021294, 2015.
- Кислов Р.А., Малова Х. В., Васько И.Ю., Двумерная МГД модель магнитодиска Юпитера, Космические исследования, 2015, Т.53, №5, С. 374-387

Контакт: Малова Хельми Витальевна, <u>hmalova@yandex.ru</u>

Эффекты магнитного поля в эволюции атмосферы экзопланеты и потери массы, под воздействием звездного излучения и звездного ветра

Построена самосогласованная модель, описывающая потерю массы намагниченной экзопланеты-гиганта, находящейся на близкой орбите (так называемом горячем Юпитере. Сделано обобщение за счет учета собственного магнитного поля экзопланеты гидродинамической модели расширяющейся водородной атмосферы горячего Юпитера. Модель учитывает реалистичный спектр излучения в рентгеновском и УФ диапазоне солнечного типа. Модель учитывает химический состав атмосферы и излучении в линиях H_3^+ и Lya. Взаимодействие охлаждение при расширяющейся атмосферы и планетарного поля приводит к формированию магнитодиска. Причем процесс оказывается циклическим с периодическим сбросом плазмоида кольцевой формы. Для того, чтобы магнитное поле играло существенную роль в потери массы экзопланеты типа HD 209458b, поле на поверхности планеты должно быть порядка 1 Гс.

Khodachenko, M.L., Shaykhislamov, I., Lammer, H., Prokopov, P.A., Atmosphere Expansion and Mass Loss of Close-Orbit Giant Exoplanets heated by Stellar XUV. II. Effects of Planetary Magnetic Field; Structuring of inner Magnetosphere, Astrophys. J., 2015, 813:50 (DOI: 10.1088/0004-637X/813/1/50)

Контакт: Ходаченко Максим Леонидович, maxim.khodachenko@oeaw.ac.at