#### 6 раздел

#### Наземные эксперименты и теоретические исследования

#### СОДЕРЖАНИЕ

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова (НИИЯФ МГУ)

**6.1. Астрофизическая обсерватория ТАЙГА** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

В течение многих лет НИИЯФ МГУ проводит исследования космических лучей совместно с Иркутским государственным университетом (ИГУ) на базе «Астрофизического комплекса МГУ-ИГУ» в Тункинской долине, недалеко от озера Байкал.

В конце 2013 года учеными НИИЯФ МГУ и ИГУ была создана коллаборация ТАЙГАсовместно с российскими коллегами из ИЯИ, НИЯУ МИФИ, ОИЯИ, а также зарубежными исследователями из Университета Гамбурга, DESY, MPI (Мюнхен), Университета Турина) была образована коллаборация ТАЙГА - TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy). Основная цель коллаборации - проведение исследований в области астрофизики частиц высоких энергий на новом уровне чувствительности.

В последние несколько лет на астрофизическом полигоне в Тункинской долине (50 км от озера Байкал) началось развертывание обсерватории для проведения исследований в области астрофизики частиц высоких энергий. Название обсерватории – TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy). Три главных направления исследований новой обсерватории следующие.

Основное направление научных исследований для данной установки - гамма-астрономия высоких энергий. В диапазоне энергий гамма-квантов выше 30 ТэВ есть ряд принципиальных вопросов, на которые в настоящее время нет ответов. Прежде всего это вопрос об источниках галактических космических лучей с энергиями вокруг 1 ПэВ (ПэВатронов), области энергий, примыкающей к области классического колена в энергетическом спектре космических лучей. Исследование высокоэнергичного спектра гамма-квантов от ярких внегалактических источников позволит получить важную информацию об электромагнитном фоне Вселенной.

В последние несколько лет на астрофизическом полигоне в Тункинской долине (50 км от озера Байкал) началось развертывание обсерватории для проведения исследований в области астрофизики частиц высоких энергий. Ближайшая цель – построить до конца 2019 года первую часть обсерватории TAIGA, которая будет состоять из: 100–110 оптических станций установки TAIGA-HiSCORE, расположенных на площади 1 км², три атмосферных черенковских телескопа с анализом изображений (АЧТ) и 200 м² детекторов мюонов (установка TAIGA-MUON). Такая установка позволит доказать эффективность гибридного подхода для гамма-астрономии сверхвысоких энергий и начать проведение серьезной научной программы.

Одна из станций установки TAIGA-HiSCORE с АЧТ-1 представлена на Рис.49.



Рис.49. Станция HiSCORE с AЧТ-1 на заднем плане (установка TAIGA в Тункинской долине, в районе озера Байкал).

Главным преимуществом работы АЧТ в сети широкоугольных черенковских станций является более эффективное выделение событий от гамма-квантов на фоне ШАЛ от заряженных космических лучей. Информация о параметрах изображения ШАЛ (параметрах Хилласа) дополняется параметрами ШАЛ (положение оси, направление, энергия), хорошо восстанавливаемыми широкоугольной установкой. Высокая эффективность подавления событий от космических лучей в современных гамма-обсерваториях достигается при стереоскопическом подходе, при котором ШАЛ регистрируется несколькими АЧТ.

Ожидаемая интегральная чувствительность установки площадью 1 км2 за 300 часов наблюдения источника при энергии 100 ТэВ составляет примерно 2.5 ×10<sup>-13</sup> ТэВ см<sup>-2</sup>сек<sup>-1</sup>, что сравнимо с чувствительность эксплуатируемых и планируемых установок в области сверхвысоких энергий. В настоящее время TAIGA опережает своего главного «соперника» в области сверхвысоких энергий - LHAASO в Тибете. Это лидерство будет сохраняться в течение примерно 2 лет, пока чувствительность LHAASO не превзойдет чувствительность ТАЙГИ. Тем не менее, необходимо отметить, что в поле зрения установки TAIGA попадают области неба, недоступные LHAASO. В частности, источник гамма-излучения в остатке сверхновой Тихо Браге, практически недоступный для LHAASO, будет в поле зрения детекторов обсерватории TAIGA в течение 500 часов в год.

#### Публикации:

N. Budnev et al. (TAIGA Collaboration), Journal of Physics: Conference Series 718, 052006 (2016).

L. Kuzmichev et al. (TAIGA Collaboration), EPJ Web of Conf. 145, 01001 (2017).

## **6.2. Эксперимент СФЕРА** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

В эксперименте СФЕРА изучается энергетический спектр и массовый состав первичного космического излучения. Небольшой оптический детектор СФЕРА-2, поднимаемый над заснеженной поверхностью Земли, регистрирует отраженный от снега черенковский свет (ЧС) широких атмосферных ливней.

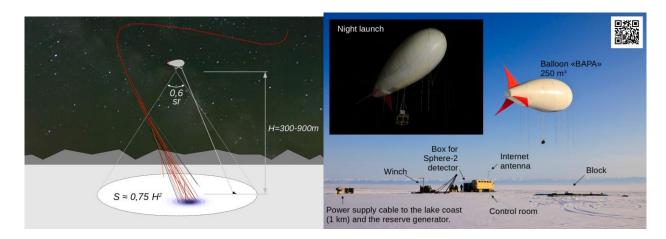


Рис. 50. Схема и фотография эксперимента СФЕРА-2.

СФЕРА является единственным в мире экспериментом, в котором по отраженному черенковсому свету зарегистрировано значительное количество ШАЛ, проведен индивидуальный анализ и реконструкция функции пространственного распределения всех

событий. Установка СФЕРА-2 состоит из сферического зеркала с диаметром 1.5 м, апертурной диафрагмы и мозаики фотоумножителей, расположенной в фокальной поверхности зеркала. Эксперимент проводился в 2008-2013 года в районе озера Байкал. Детектор СФЕРА-2 поднимался на привязном аэростате на высоту от 200 до 900 м над уровнем поверхности озера, как показано на рис. 50. Время экспозиции составило приблизительно 30 часов в год, всего было зарегистрировано около 1100 событий ШАЛ.

Полное детальное прямое Монте-Карло моделирование было проведено с помощью специального многомодульного программного обеспечения. Был разработан метод определения массового состава КЛ в диапазоне энергий 10-200 ПэВ путем анализа параметра крутизны ФПР индувидуальных событий. Также было показано, что возможно улучшить разделение событий на классы с использованием многопараметрического анализа. Было применено Баесово многопараметрическое распознавание в предположении многомерного гауссова распределения признаков событий. Энергетический спектр ПКЛ, восстановленный по данным наблюдений детектора, показан на Рис.51. Было показано, погрешность включая систематическую, сопоставима ЧТО полная спектра, неопределенностью для наземных экспериментов.

Доля легких ядер — протонов и гелия — в области энергий 10–200 ПэВ, определенная в режиме анализа индивидуальных событий ШАЛ по параметру крутизны ФПР приведена на Рис.52.

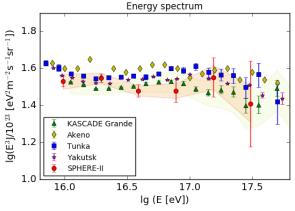


Рис.51. Энергетический спектр ПКЛ, восстановленный по данным, полученным в эксперименте СФЕРА в 2011-2013 гг. Систематические погрешности показаны закрашенными областями.

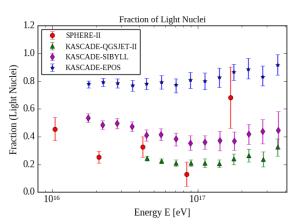


Рис.52. Доля легких ядер, полученная в эксперименте СФЕРА по данным 2013 года.

Метод регистрации отраженного черенковского света ШАЛ имеет определенные сходства и различия с другими методами, разработанными для наблюдения ШАЛ. Наиболее похожим на эксперимент СФЕРА является проект JEM-EUSO. Однако, JEM-EUSO разработан для регистрации в основном флуоресцентного света ШАЛ, в то время, как СФЕРА предназначена для наблюдения черенковского света. Еще одним отличием

является то, что типичный размер площади проекции одного оптического пикселя мозаики установки JEM-EUSO на поверхность земли составляет порядка  $1~{\rm km}^2$ , а у детектора СФЕРА-2 на три порядка меньше, что позволяет в эксперименте СФЕРА проводить детальное изучение формы ФПР ЧС.

В настоящее время время разрабатывается проект эксперимента с новой аэростатной установкой СФЕРА-Антарктида для измерения отраженного черенковского и прямого флуоресцентного излучений ШАЛ с энергиями  $5 \cdot 10^{18} - 5 \cdot 10^{19}$  эВ в Антарктиде. Время экспозиции в проекте СФЕРА-Антарктида будет по крайней мере на 3-4 порядка больше, чем в эксперименте с установкой СФЕРА-2.

Интернет сайт эксперимента СФЕРА: <a href="http://sphere.sinp.msu.ru/">http://sphere.sinp.msu.ru/</a>

#### Публикации:

Podgrudkov D.A., Antonov R.A., Bonvech E.A., Chernov D.V., Finger Miroslav, Finger Michael, Dzhatdoev T.A., Cosmic ray study by means of reflected EAS Cherenkov light method with the SPHERE-2 detector. PoS(ICRC2017)537.

Chernov D.V., Antonov R.A., Bonvech E.A., Podgrudkov D.A., Roganova T.M., Dedenko L.G., Finger Mir., Detector for the ultrahigh energy cosmic rays composition study in Antarctica. Journal of Physics: Conference Series (798)1, 1-5, 2017.

Antonov R.A., Bonvech E.A., Chernov D.V., Podgrudkov D.A., Roganova T.M., The LED calibration system of the SPHERE-2 detector. Astroparticle Physics (77), 55-65, 2016.

Chernov D.V., Antonov R.A., Aulova T.V., Bonvech E.A., Galkin V.I., Dzhatdoev T.A., 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 (46)1, 60-93, 2015.

### **6.3. Эксперимент ТУНКА** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

Начиная с 1993 года в Тункинской долине (республик Бурятия) в 50 км от озера Байкал создается большой экспериментальный центр в области физики космических лучей и гамма астрономии. Первая установка ТУНКА-133 (Рис. 12) предназначена для регистрации космических лучей по черенковскому свету, возникающему при прохождении частиц широких атмосферных ливней (ШАЛ) через атмосферу. ТУНКА-133 состоит из 175 оптических детекторов, расположенных на площади 3 км². В настоящее время она является самой большой в мире установкой подобного типа. При ее создании использовались самые передовые достижения в области электроники (передача информации по оптоволоконным кабелям, сверхбыстрые АЦП с частотой 200 МГц,

программируемые логические матрицы), что позволило значительно повысить качество получаемой о событиях информации.

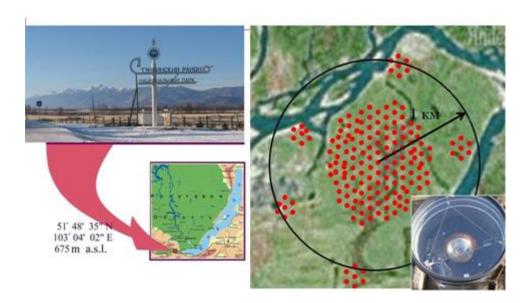


Рис. 53. Установка ТУНКА.

В создании этой установки наряду с российскими учеными (НИИЯФ МГУ, ИГУ, ОЯИ, ИЗМИРАН) принимают участие исследователи из Германии и Италии.

Установка подобного класса позволяет изучать космические лучи в интервале энергий  $10^{15}$  -  $10^{18}$  эВ единым методом, в том числе излом спектра при энергии  $3\cdot10^{15}$  эВ, а также другие особенности спектра, возможно, связанные с переходом от галактических к внегалактическим космическим лучам, и осуществлять поиск источников ГКЛ сверхвысоких энергий.

Одним из наиболее важных научных результатов, полученных на установке ТУНКА-133, стало подтверждение более сложной зависимости интенсивности космических лучей от энергии, чем это предполагалось ранее. В спектре были обнаружены две статистические особенности. При энергии  $2 \cdot 10^{16}$  эВ наклон энергетического спектра уменьшается примерно на 0.2 (см. Рис.53), а при энергии  $3 \cdot 10^{17}$  эВ наклон спектра возрастает примерно на 0.3. На том же рисунке приведен спектр, полученный по данным установки ТУНКА-25, предшественницы ТУНКИ-133. Изменение спектра при энергии  $3 \cdot 10^{17}$  эВ можно рассматривать как «второе колено», связанное с переходом от галактических к внегалактическим источникам. Кроме того, поведение спектров «тяжелых» и «легких» ядер также показывает переход к внегалактическим космическим лучам. В спектре тяжелых ядер изгиб наблюдается при энергии  $8 \cdot 10^{16}$  эВ. Вероятно, это предел ускорения галактических космических лучей.

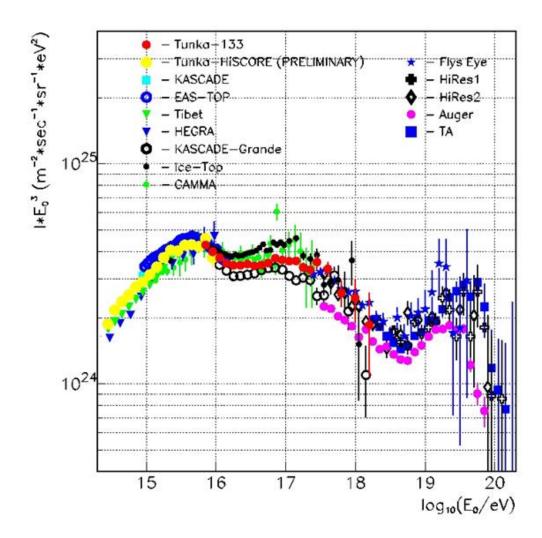


Рис. 54. Энергетический спектр, полученный по экспериментам в Тункинской долине (ТУНКА-25, ТУНКА-133 и ТАЙГА-НіSCORE), в сравнении с другими экспериментами.

#### Публикации:

Prosin V.V., et al., (Tunka Collaboration) NIM A 756, 94 (2014) Prosin et al., (TAIGA Collaboration) EPJ Web of Conferences 121, 03004 (2016)

## **6.4. Мюонная радиография** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

Космические лучи, традиционно являющиеся источником информации о процессах в космическом пространстве, также дают возможность изучать физические процессы, протекающие на Земле. Изучение потоков мюонов космического происхождения легло в основу метода мюонной радиографии (МР) — метода неразрушающего контроля, основанного на "просвечивании" объекта мюонным излучением и регистрации излучения, прошедшего через этот объект. Анализ особенностей прохождения потоков космических

мюонов через вещество позволяет исследовать внутреннее состояние крупных природных и промышленных объектов на поверхности Земли и в ее толще, являющихся либо объектом научных или прикладных исследований, либо источником потенциальной опасности для окружающей инфраструктуры. Метод мюонной радиографии дает возможность получать двумерное или трехмерное изображение исследуемых объектов.

На поверхности Земли существует большое количество проблемных геологических и промышленных зон, состояние которых представляет серьезную угрозу для окружающей инфраструктуры и требует непрерывного социальной мониторинга. Предлагаемый метод позволяет обнаружить области повышенной или пониженной плотности в массиве изучаемого объекта путем сравнения степени поглощения космических мюонов его различными частями. Метод может применяться как для мониторинга крупных природных объектов — вулканов (см. рис. 55), геологических плит и т.п., так и для неразрушающего контроля промышленных объектов — шахт и рудников, ядерно-энергетического комплекса (см. рис.56), производственных и строительных объектов (тоннелей, дамб, доменных печей, опор мостовых конструкций и т.д.), для мониторинга пожароопасных углепородных отвалов, анализа сейсмических процессов, а также как перспективное дополнение к геофизическим методам при разведке полезных ископаемых.

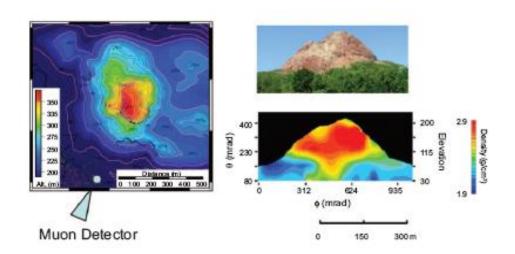


Рис. 55. Радиографическое изображение вулканического кратера под лавовым куполом. Слева — карта лавового купола и положение мюонного детектора. Справа — вид вулкана и распределение плотности породы в вертикальной плоскости, полученное методом MP.

Из всех детекторов, применяемых в односторонней мюонной радиографии, наилучшим угловым разрешением — несколько миллирадиан — обладают эмульсионные трековые детекторы. Ни один из ныне известных детекторов элементарных частиц не может обеспечить пространственное разрешение, которое дает ядерная эмульсия: при размере зерна 0,3 – 1 микрон отклонение зерен от восстановленной траектории движения частицы в среднем не превышает 0,8 микрона, а при определенных условиях может составлять 0,2 микрона. Эмульсионные пленки, являющиеся основой детекторов MP, не требуют

энергоснабжения и электронной считывающей системы, что является существенным преимуществом в сложных условиях эксперимента.

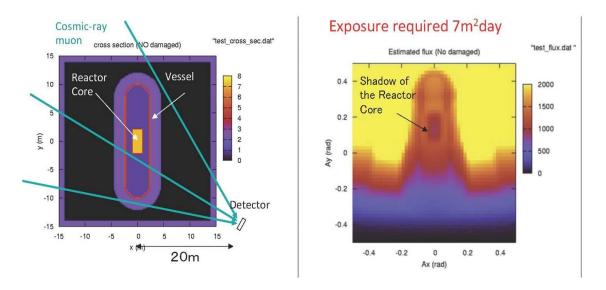


Рис. 56. Мюонная томография ядерного реактора. Слева — возможное расположение детектора при проведении мюонной томографии и траектории мюонов. Справа — угловой скан результатов мюонной томографии после экспозиции 7 т2-day (видна активная зона реактора, разрушения не обнаружены).

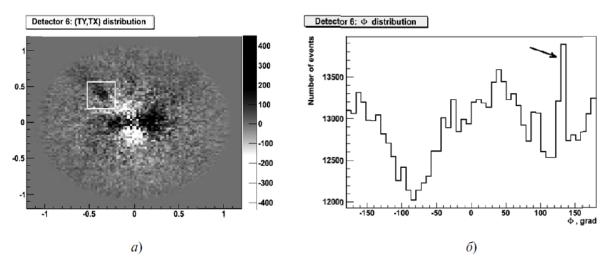


Рис. 57. Видимый сигнал от шахты лифта и неоднородностей в грунте при проведении эксперимента в исследовательской геофизической шахте в г. Обнинске. а) двумерное угловое распределение потока мюонов на глубине 30 м после вычета фона, усредненного по углу  $\varphi$ ; б) распределении потоков мюонов на глубине 30 м по азимутальному углу  $\varphi$  (пик в районе  $135^{\circ}$  соответствует направлению на шахту лифта, выделенную белым квадратом на рис. а).

Сотрудниками НИИЯФ МГУ и ФИАН был проведен ряд тестовых экспериментов с целью внедрения метода мюонной радиографии при использовании в качестве детекторов мюонов ядерных эмульсий. Обработка эмульсионных данных проводилась на имеющихся

в распоряжении сотрудников НИИЯФ МГУ и ФИАН комплексах измерительной аппаратуры, оснащенных оптическими столами с высокой точностью перемещения и цифровыми видеокамерами высокого разрешения для регистрации и оцифровки оптических изображений. Проведенный анализ результатов тестовых экспериментов показал, что эмульсионная трековая методика позволяет получать информацию об особенностях структуры исследуемых массивных индустриальных и природных объектов (см. рис. 57). Модельные расчеты неоднородностей в структуре объектов и пространственные распределения потоков мюонов, измеренные в тестовых экспериментах, в целом дают хорошее согласие.

Т.о. работа с результатами анализа экспериментальных данных и расчетов по мюонной радиографии говорит о возможности и перспективах развития метода мюонной радиографии с использованием эмульсионных трековых детекторов в российских институтах, обладающих средствами сканирования и обработки эмульсионных данных.

В НИИЯФ МГУ проводится дальнейшая работа по освоению и развитию метода МР, оптимизация работ на автоматических сканаторах, анализ экспериментальных данных и модельных расчетов по МР, планируются новые эксперименты, раскрывающие возможности методики.

#### Публикации:

Aleksandrov A.B., Baklagin S.A., Galkin V.I., Grachev V.M., Vladimirov M.S., Zemskova S.G., Konovalova N.S., Managadze A.K., Polukhina N.G., Roganova T.M., Starkov N.I., Tyukov V.E., Chernyavsky M.M., Shchedrina T.V. Using Muon Radiography to Study the Structure of Massive Objects. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2017. Vol. 81. № 4. PP. 500-502.

Andrey Aleksandrov, Alexander Bagulya, Sergei Baklagin, Mikhail Chernyavsky, Vladimir Galkin, Victor Grachev, Nina Konovalova, Alexander Managadze, Natalya Polukhina, Tatiana Roganova, Nikolai Starkov, Tatiana Shchedrina, Valeri Tioukov, Mykhailo Vladymirov, Svetlana Zemskova. Experiments on muon radiography with emulsion track detectors. EPJ Web of Conferences. 2016. Vol. 125, P. 02022.

Baklagin S.A., Grachev V.M., Konovalova N.S., Malovichko A.A., Managadze A.K., Polukhina N.G., Roganova T.M., Starkov N.I., Tyukov V.E., Shchedrina T.V. Large Industrial and Natural Objects Investigation by the Muon Radiography on the Basis of Track Detectors. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2016. Vol. 5. № 7. PP. 12229-12236.

**6.5. Модели адронных взаимодействий** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

Последние результаты очень точных измерений энергетических спектров первичных космических протонов и ядер гелия (AMS-02, PAMELA, CREAM, ATIC-2 и др.) и некоторые довольно точные оценки энергетических спектров ядер протонов и гелия, генерируемых в остатках сверхновых, позволили нам разработать новую высокоточную исходную аппроксимацию энергетических спектров первичных нуклонов. Поскольку точность этого приближения достаточно высока, мы можем использовать его для проверки различных моделей адронных взаимодействий с помощью энергетических спектров атмосферных мюонов. Энергетические спектры вертикальных атмосферных мюонов были рассчитаны в рамках моделей EPOS LHC, QGSJET01, QGSJETII-03 и QGSJETII-04 в диапазоне энергий  $10^2$ - $10^5$  ГэВ с помощью пакета CORSIKA, и это нового приближения спектра первичных нуклонов. Результаты расчетов были сопоставлены с мюонов, полученными в работах L3 + Cosmic, LVD и MACRO. Анализ показал, что все модели прогнозируют примерно в два раза меньшую интенсивность энергетических спектров мюонов. Поскольку эти мюоны являются продуктами распадов наиболее энергетических  $\pi$ - и K-мезонов в атмосфере, можно заключить, что образование этих  $\pi$ - и К-мезонов примерно в два раза недооценивается модельми EPOS LHC, QGSJET01, QGSJETII-03 и QGSJETII-04. На Рис. 58 и 59, где показаны расчетные спектры мюонов и экспериментальные данные, ясно видно это различие. Рассмотренные модели могут использоваться для моделирования широких атмосферных ливней, и некоторые рекомендации в связи с этим тестированием должны быть разработаны.

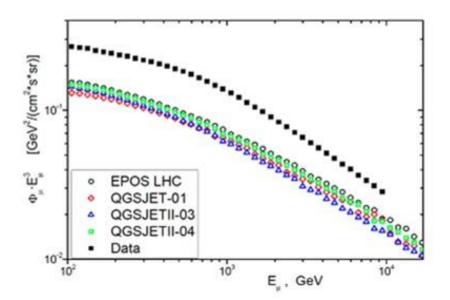


Рис. 58. Рассчитанный и экспериментальный спектры мюонов.

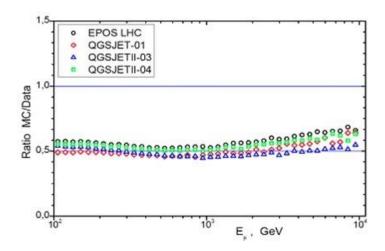


Рис. 59. Отношение рассчитанного мюонного спектра к экспериментальному.

Чтобы решить многие фундаментальные проблемы физики космических лучей в области сверхвысоких энергий, необходимо определить направление прихода, природу и энергию частицы первичного космического излучения (ПКИ). Целью является изучение взаимодействия частиц ПКЛ с атомными ядрами в атмосфере, поиск различных возможных проявлений новой физики при энергиях, значительно превышающих те, которые достигаются на Большом адронном коллайдере, выяснение механизмов ускорения и источников космических лучей. Метод исследования в области сверхвысоких энергий состоит в наблюдении сигналов в различных детекторах от вторичных частиц широких атмосферных ливней.

Предложены новые формулы для оценки энергии наклонных широких атмосферных ливней на основе сигналов в детекторах. Подробные таблицы таких сигналов, создаваемых в сцинтилляционных детекторах фотонами, электронами, позитронами и мюонами, были рассчитаны с помощью пакета GEANT4. Параметры, представленные в предложенных формулах, рассчитывались с использованием пакета CORSIKA. Было показано, что расчетные оценки энергии позволяют снизить интенсивность космических лучей, наблюдаемых на якутской установке, до уровня, сравнимого по ошибкам с интенсивностью, наблюдаемой на установке Telescope аггау. Тайна космических лучей с чрезвычайно высокой энергией должна быть раскрыта.

#### Публикации:

Dedenko L.G., Lukyashin A.V., Roganova T.M., Fedorova G.F. Calculating Vertical Atmospheric Muon Energy Spectra for Energies Ranging from 102 to 105 GeV. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2017, V. 81, № 4, p. 496-499.

Dedenko L.G., Roganova T.M., Fedorova G.F. New Energy Estimates of Extensive Air ShowersUsing Signals Detected at Great Distances from the Shower Axis. MOSCOW UNIVERSITY PHYSICS BULLETIN, 2017, V.72, № 2, p. 187-190.

Anyutin N.V., Dedenko L.G., Roganova T.M., Fedorova G.F. New Estimates of Extensive-Air-Shower Energies on the Basis of Signalsin Scintillation Detectors. Physics of Atomic Nuclei, 2017, V. 80, № 2, p. 260-265.

Dedenko L.G., Lukyashin A.V., Roganova T.M., Fedorova G.F. Testing of the DPMJET and VENUS hadronic interaction models with help of the atmospheric muons. Journal of Physics: Conference Series, 2017, V. 798, p. 012045-012045+4.

**6.6.** Эксперимент ТАЙГА (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

В настоящее время ученые ОКН НИИЯФ МГУ в коллаборацией ТАЙГА выполняют проверку чувствительной камеры первого атмосферного черенковского гамма-телескопа с анализом изображений (АЧТ) в составе обсерватории ТАЙГА - TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy). Камера состоит из 560 ФЭУ, Угол обзора камеры –  $10^{\circ}$ х $10^{\circ}$ .

Сам телескоп, изготовленный в ОЯИЯ, в настоящее время находится уже в Тункинской долине, где ученые и инженеры ИГУ предпринимают все усилия для обеспечения его работы во время суровой сибирской зимы. Чувствительная камера вскоре будет отправлена в Иркутск.

К зиме 2017-2018 гг. Прототип установки состоял из 60 широкоугольных станций, размещенных на площади  $0.6~{\rm km^2}$ , и одного телескопа. Ожидаемая интегральная чувствительности прототипа при 200 часов наблюдений (около 2 лет работы установки) для энергетического диапазона  $30-200~{\rm T}_{\rm P}$  составляет около 10-12 эрг/(см² сек), что сравнимо с интегральной чувствительностью установки HAWC в этом энергетическом диапазоне для 5 лет работы.

#### Публикации:

N.Budnev et al (TAIGA collaboration)// Journal of Instrumentation, Institute of Physics (United Kingdom), V 12, N 08, c. 08018-1-08018-17

N.Budnev et al (TAIGA collaboration) //NIM A, V 845, P. 330-333

Gress O, et all (TAIGA collaboration // NIM A, V 845, P. 367-372

#### 6.7. Каскадные эффекты внегалактического распространения гамма-

**квантов** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

Вселенная заполнена фотонами внегалактического фонового излучения (extragalactic background light, EBL) и реликтового излучения (cosmic microwave background, CMB). В последние 10 лет модели EBL стали намного более надежными и реалистичными, что позволяет детально исследовать процессы внегалактического распространения гаммаквантов. Подавляющее большинство работ в этой области учитывало только два элементарных процесса: поглощение первичных гамма-квантов на фотонах EBL и адиабатические потери ("модель только поглощения"). Однако, в последние годы появилось несколько указаний, что модель только поглощения является неполной и нуждается в некоторой модификации.

Электромагнитная каскадная модель предсказывает четыре основных особенности в спектре блазаров (в порядке уменьшения энергии): 1) высокоэнергетичный обрыв ("highenergy cutoff") 2) обратный излом ("ankle") при пересечении первичной и каскадной компонент 3) возможный обрыв спектра ("magnetic cutoff") при сравнительно низких энергиях в результате отклонения каскадных электронов экстрагалактическим магнитным полем (extragalactic magnetic field, EGMF) 4) второй обратный излом ("second ankle") при пересечении первичной и каскадной компонент.

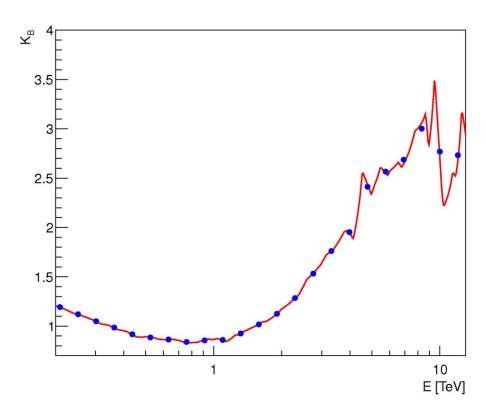
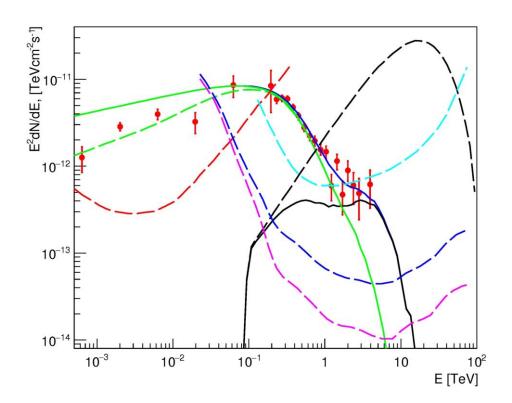


Рис. 60. Отношение аппроксимаций для электромагнитной каскадной модели и модели только поглощения (modification factor) для блазара 1ES 0347-121.

Предложена астрофизическая интерпретация эффекта, который заключается в наблюдении блазаров со сравнительно жесткими спектрами в области энергий 10-300 ГэВ преимущественно с направлений на пустоты в крупномасштабном распределении материи. Этот эффект может объясняться появлением в наблюдаемом спектре каскадной компоненты, которая может доминировать при энергиях Е<1 ТэВ. На рис. 61 показана аппроксимация наблюдаемого SED блазара 1ES 1218+304, включая данные инструмента Fermi-LAT в области энергий  $E < 200 \ \Gamma$ эВ. Обозначения в целом соответствуют рис. 60; дополнительно к этому зеленой штрихованной кривой обозначен спектр с учетом влияния EGMF ( $10^{-15}$   $\Gamma c$  на длине когерентности 1  $Mn\kappa$ ), красной штрихованной кривой чувствительность Fermi-LAT (10 лет наблюдения), бирюзовой штрихованной кривой чувствительность массива атмосферных черенковских телескопов H.E.S.S. (100 часов наблюдения), синей и лиловой штрихованными кривыми — чувствительность массива атмосферных черенковских телескопов СТА (100 1000 И часов наблюдения соответственно).



Puc.61. Аппроксимация наблюдаемого SED блазара 1ES 1218+304 (z=0.182), демонстрирующая эффект "магнитного обрыва спектра".

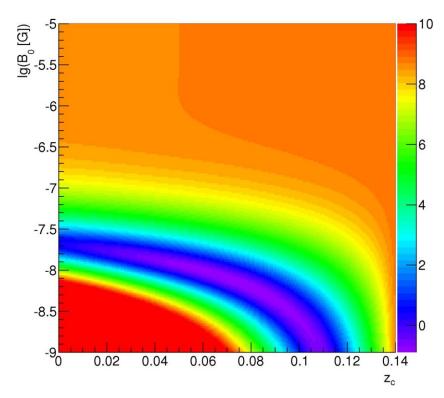


Рис. 62. Статистическая значимость, соответствующая различным адронным каскадным моделям.

С использованием наблюдательных данных показано, что модель эмиссии блазара 1ES 0229+200~(z=0.14) не позволяет объяснить наблюдаемую интенсивность гамма-квантов в

рамках "базовой адронной модели", в которой предполагается, что все наблюдаемые гамма-кванты образованы каскадами от первичных протонов предельно высоких энергий по пути от источника к наблюдателю (см. рис. 62, где  $z_c$  — красное смещение кластера галактик в модели со структурированным EGMF,  $B_0$  — напряженность магнитного поля в центре локальной структуры, окружающей блазар).

#### Публикации:

- 1. T. A. Dzhatdoev, E. V. Khalikov, A. P. Kircheva and A. A. Lyukshin. Electromagnetic cascade masquerade: a way to mimic gamma-axion-like particle mixing effects in blazar spectra, A&A, 2017, 603, A59
- 2. S.A. Baklagin, T.A. Dzhatdoev, A.P. Kircheva et al. Cascades from Primary Gamma Rays and Nuclei as a Source of Background in Searches for Oscillations between Photons and Axion-like Particles, Phys. Part. Nucl., 2018, 49, 90
- 3. T.A. Dzhatdoev, A.P. Kircheva, A.A. Lyukshin and E.V. Khalikov. Signatures of blazar spectra in the electromagnetic and hadronic intergalactic cascade models, Bull. Rus. Acad. Sci., 2017, 81, 443.

## **6.8. Осцилляции нейтрино (эксперимент OPERA)** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

В 2016-2017 годах был продолжен физический анализ нейтринного эксперимента OPERA по поиску осцилляций  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ . Проведена обработка эмульсионного материала на сканирующем комплексе НИИЯФ МГУ, изучены особенности топологии зарегистрированных событий. Всего отсканированы 67 эмульсионных блоков (кирпичей), площадь эмульсии которых составила  $\sim 37 \text{ м}^2$ .

К настоящему времени в эксперименте OPERA коллаборацией найдено 5 событий-кандидатов с рождением  $\tau$ -лептона, что доказывает существование осцилляций по каналу  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ . Параметр осцилляций для 5 кандидатов  $\Delta m_{23}^2 = 2.44 \cdot 10^{-3} \, eV^2$  в случае полного смешивания ( $\sin^2 \theta_{23}$ =1).

Основные результаты коллаборации OPERA:

Гипотеза только фона (в задаче поиска  $v_{\tau}$ ) отвергнута на уровне статистической значимости 5.1  $\sigma$ 

Продолжается поиск осцилляций по каналу  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ 

Поставлены ограничения на смешивание активных нейтрино со стерильными.

На основании анализа данных мюонных спектрометров измерено отношение  $R_{\mu} \equiv N_{\mu+}/N_{\mu-} \ \, _{\rm ДЛЯ \ aтмосферных \ мюонов}.$ 

На совещании коллаборации принято решение об организации доступа к базе данных нейтринных событий (т.е. к информации о всех характеристиках треков частиц, соответствующих ~ 6700 взаимодействиям нейтрино).

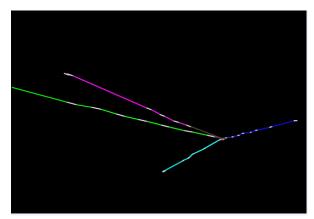


Рис.63. Пример найденной вершины

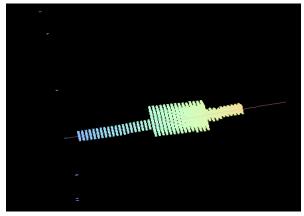
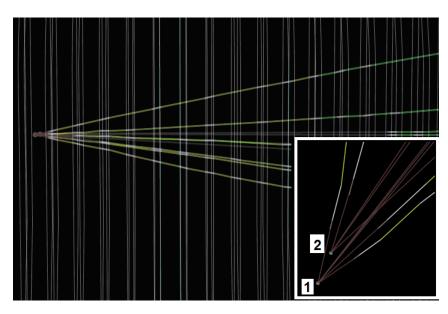


Рис. 64. Пример прослеживания трека, проходящего через все слои эмульсионного блока (кирпича)

В 2017 г. в НИИЯФ основные усилия были направлены на анализ интересного события, обнаруженного нами при сканировании эмульсионного блока 1006651. Событие изображено на Рис.65. На врезке, при большем увеличении показаны две вершины, т.е., по-видимому, существовала короткоживущая частица, которая родилась в точке 1 (точке взаимодействия нейтрино) и распалась в точке 2 с рождением новых частиц.

Такой короткоживущей частицей может быть и  $\tau$  - лептон (тогда данное событие может быть одним из осцилляционных) и чармированный мезон (такого рода события рассматриваются коллаборацией OPERA в качестве фоновых).



Для анализа события проводится его полный кинематический анализ. Для этого в 2017 году был создан банк событий взаимодействия нейтрино мюонного  $\nu_{\tau}$  и нейтрино таонного  $\nu_{\tau}$  со свинцовой мишенью с помощью современного генератора нейтринного взаимодействия GENIE2.12.0. Отлажена схема проведения частиц через элементы эмульсионного блока с помощью программного комплекса GEANT4.10.0. Моделирование распадов таонов и чармированных мезонов выполняется с помощью программного модуля PYTHIA6. В настоящее время отлаживается процесс обработки результатов моделирования для проведения многомерного анализа найденного двухвершинного события и оценки вероятности того, что событие представляет собой взаимодействие  $\nu_{\tau}$ , появившегося в результате осцилляции.

#### Публикации:

Agafonova N., ... Anokhina A., Dzhatdoev T., Podgrudkov D., Roganova T. et al. (OPERA collaboration). Determination of the muon charge sign with the dipolar spectrometers of the OPERA experiment. Journal of Instrumentation, 2016. V.11, P. P07022.

Anokhina A., Dzhatdoev T., Managadze A. Podgrudkov D., Roganova T. et al. (The NEWS collaboration) NEWS: Nuclear Emulsions for WIMP Search, 2016. ArXiv e-prints 1604 04199. Anokhina A., Dzhatdoev T., Morgunova O., Roganova T. et al. (The NESSiE collaboration). Search for Sterile Neutrinos in Muon Neutrino Disappearance Mode at FNAL, 2017. AarXiv.org / hep-ph, V. 1503. № 07471, P. 1-19.

Anokhina A.M., Dzhatdoev T., Morgunova O., Roganova T., et al. (NESSiE collaboration). Search for Ste-rile Neutrinos in Muon Neutrino Disappearance Mode, 2017. European Physical Journal C, V. 77, P. 1-19.

Anokhina A., Dzhatdoev T., Podgrudkov D., Roganova T., (OPERA Collaboration). Studyofcharged hadron multiplicities in charged-current neutrino-lead interactions in the OPERA detector. 2017. ArXiv e-prints. № 1706.07930, P. 1-8

Akmete A., Anokhina A., Chepurnov A., Dedenko L., Fedorova G., Podgrudkov D., Roganova T., et al. The Active Muon Shield in the SHiP Experiment. Journal of Instrumentation, 2017. V. 12. № 5. P. P05011.

## **6.9. Эффекты электромагнитного взаимодействия нейтрино и астрофизические приложения** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

В серии предыдущих работ было показано, что при движении в среде массивное нейтрино может испускать электромагнитное излучение за счет ненулевого магнитного момента -

так называемый спиновый свет нейтрино. В данной работе проведен анализ возможности генерации спинового света нейтрино в некоторых астрофизических средах. При этом показано, что эффективность генерации может быть существенной для нейтронных звезд и гамма-всплесков и, таким образом, можно ожидать что этот тип излучения от них будет регистрируемым.

В рамках стандартной схемы описания спин-флейворных осцилляций нейтрино получен строгий вывод эффективного уравнения для эволюции в магнитном поле нейтрино, обладающего ненулевыми переходными магнитными моментами, заданными в массовом базисе. Подход позволил связать эти фундаментальные параметры нейтрино с электромагнитными характеристиками физических нейтрино и параметрами (углом) смешивания. Данный подход позволяет также в явном виде учесть продольную составляющую магнитного поля которая, таким образом, также влияет на осцилляции.

#### Публикации:

Spin light of neutrino in astrophysical environments. Grigoriev A., Lokhov A., Studenikin A., Ternov A. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2017, 11, N 024, c. 1-23

Neutrino spin-flavor oscillations derived from the mass basis. Fabbricatore R., Grigoriev A., Studenikin A. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 718, c. 062058

#### Результаты теоретических расчетов и моделирования

#### 6.10. Моделирование магнитосфер планет

### **6.10.1. Развитие универсальной параболоидной модели магнитосферы** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

Науки о планетах объединяют исследования нашей солнечной системы и планетарных систем других звезд. Эта междисциплинарый раздел науки включает в себя астрономию и геофизику, освоение других планет при помощи роботизированных и пилотируемых станций, а также поиск внеземных цивилизаций. Одно из самых больших международных сообществ по планетарным исследованиям — европейское. Оно объединяет более 800 ученых и около 3000-4000 молодых исследователей из более чем 200 исследовательских групп/институтов почти из всех европейских государств. Europlanet 2020 Research Infrastructure (EPN2020-RI) — общеевропейский проект поддержки планетарных исследований и создания мощной европейской коллаборации в области исследования планет. В него вовлечены многие ключевые партнеры (в том числе из области политики, промышленности, любительской астрономии и широкой общественности). Координация

деятельности EPN2020-RI осуществляется Открытым университетом (Open University, UK), в инфраструктуру входят 35 заинтересованных организаций (в том числе, НИИЯФ МГУ) из 20 европейских стран и более 160 индивидуальных участников. Основной вклад ОКН НИИЯФ МГУ в совместную работу по этому проекту заключается в предоставлении доступа участникам к универсальной параболоидной модели магнитосферы, которую можно использовать для описания магнитосфер Меркурия, Земли, Юпитера и Сатурна. Эта модель будет, в основном, использована в двух направлениях исследований: *PSWS* (*Planetary Space Weather Service*) and *VESPA* (*Virtual European Solar and Planetary Access*), которые являются частями инфраструктуры EPN2020-RI.

#### Публикации:

T. J. Bradley, S. W.H. Cowley, G. Provan, G. J. Hunt, E. J. Bunce, S. J. Wharton, I. I. Alexeev, E. S. Belenkaya, V. V. Kalegaev, and M. K. Dougherty. Field-aligned currents in saturn's nightside magnetosphere: Subcorotation and planetary period oscillation components during northern spring. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 123(4), 2018.

Luis Ballester Jose, Alexeev Igor, Collados Manuel, Downes Turlough, Robert F. Pfaff, Gilbert Holly, Khodachenko Maxim, Khomenko Elena, Ildar F. Shaikhislamov, Soler Roberto, Vazquez-Semadeni Enrique, and Zaqarashvili Teimuraz. Partially ionized plasmas in astrophysics. Space Science Reviews, 214(2):58–207, 2018.

Elena Belenkaya, Stanley Cowley, Igor Alexeev, Vladimir Kalegaev, Ivan Pensionerov, Marina Blokhina, David Parunakian, Open and partially closed models of the solar wind interaction with outer planet magnetospheres: The case of Saturn. Annales Geophysicae (35)6, 1293-1308, 2017

Hunt G.J., Cowley S.W.H, Provan G., Bunce E.J., Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Kalegaev V.V., Dougherty M.K., Coates A.J., Field-aligned currents in Saturn's magnetosphere: Local time dependence of southern summer currents in the dawn sector between midnight and noon. Journal of Geophysical Research (121)8, 7785-7804, 2016

**6.10.2.** Моделирование переходного слоя магнитосферы Меркурия при помощи комбинированной параболоидной модели (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

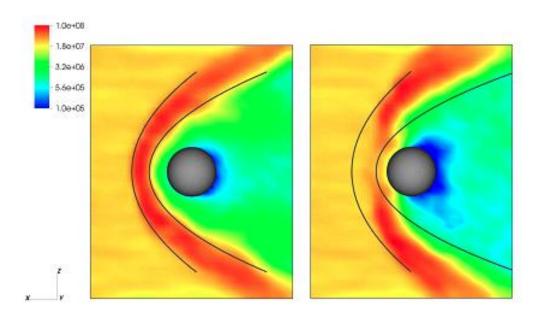


Рис. 66. Результаты моделирования магнитосферы Меркурия для северного (слева) и южного (справа) направления межпланетного магнитного поля.

#### Публикации:

Igor Alexeev, David Parunakian, Sergey Dyadechkin, Elena Belenkaya, Maxim Khodachenko, Esa Kallio, Markku Alho, Calculation of the Initial Magnetic Field for Mercury's Magnetosphere Hybrid Model. Cosmic Research (English translation of Kosimicheskie Issledovaniya) (56)2, 108-114, 2018

Parunakian David, Dyadechkin Sergey, Alexeev Igor, Belenkaya Elena, Khodachenko Maxim, Kallio Esa, and Alho Markku. Simulation of mercury's magnetosheath with a combined hybrid-paraboloid model. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 122(7), 2017.

#### 6.11. Моделирование космического пространства и материалы в космосе

#### 6.11.1. Моделирование процесса накопления заряда космическим

**аппаратом на геосинхронной орбите** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

В ОКН НИИЯФ МГУ при помощи программного комплекса COULOMB-2 исследовалась вторичная электронная эмиссия вблизи космического аппарата (КА) и динамика накопления заряда КА в горячей магнитосферной плазме.

Влияние электрического поля КА на вторичные токи анализировалось путем расчета траекторий вторичных электронов. При моделировании траекторий электронов в электрическом поле КА со сложной конфигурацией поверхности необходимо точно вычислять полный электронный ток и для каждого элемента поверхности использовать уравнение баланса электронного тока.

Были предложены два пути расчета: восстановление электронов и подавление вторичного излучения. В первом варианте рассчитанные в программном комплексе COULOMB-2 при помощи моделирования траекторий вторичных электронов в электрическом поле КА добавлялись в уравнение токового баланса.

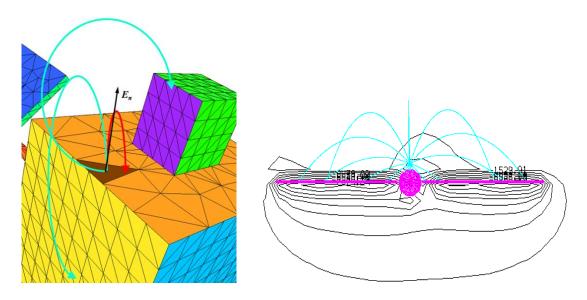


Рис. 67. Траектории вторичных электронов вблизи заряженной поверхности КА.

Подавление вторичной эмиссии соответствует случаю высоких локальных значений электрического поля, поэтому вероятность переноса испущенных электронов на другой элемент поверхности низка.

Сравнение результатов моделирования COULOMB-2 с полученными моделированием при помощи NASCAP и MUSCAT дали хорошее согласие. Отметим, что для различных

элементов поверхности сложной формы возникают несоответствия, поэтому расчеты очень чувствительны к электрическому полю.

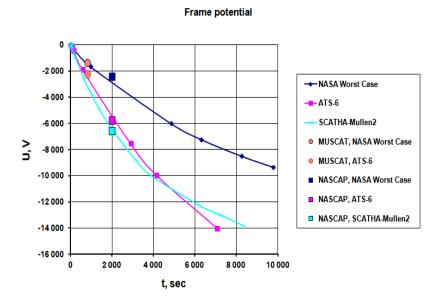


Рис.68. Электрический потенциал металлической рамы KA в различных условиях накопления заряда.

#### Публикации:

Novikov L. S., Makletsov A. A., Sinolits V. V. Comparison of Coulomb-2, NASCAP-2K, MUSCAT and SPIS codes for geosynchronous spacecraft charging // Adv. Sp. Research, vol. 57, No. 2, pp. 671-680, 2016.

Novikov L. S., Makletsov A. A., Sinolits V. V. Modeling of spacecraft charging dynamics using COULOMB-2 code // IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, No. 8, pp. 1915–1918, 2017.

Novikov L. S., Makletsov A. A., Sinolits V. V. Analysis of recollection and transfer of electrons emitted from charged spacecraft surface using COULOMB-2 code // IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, No. 8, pp. 1919–1922, 2017.

## **6.11.2.** Комбинированное воздействие протонов с энергией 500 кэВ и атомарного кислорода на полиимидные пленки (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

Были проведены лабораторные исследования комбинированного влияния протонов с энергией 500 кэВ с флюенсами  $10^{15}$ – $10^{16}$  см $^{-2}$  и атомарного кислорода с флюенсами (0.8– $3.5)10^{20}$  см $^{-2}$  на полиимидные пленки. Результаты экспериментов показали, что

предварительное облучение протонами приводит к возрастанию эрозии полиимидных образцов на 10-15%, т.е. к уменьшению их износостойкости по отношению к эрозии от атомного кислорода.

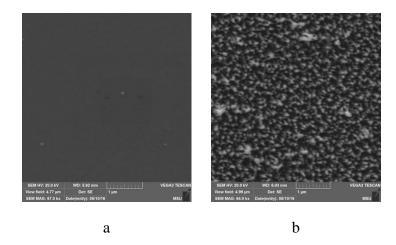


Рис. 69. Изображения поверхности полиимидных образцов, полученные на растровом электронном микроскопе: до (а)и после (b) воздействия кислорода и облучения протонами с флюенсом  $2.5x10^{15}$  cm<sup>-2</sup>.

Облучение протонами при заданных флюенсах также вызывает значительное уменьшение коэффициента спектрального пропускания в видимом диапазоне. Этот эффект можно объяснить карбонизацией приповерхностных слоев богатых углеродом полимеров. Изменения коэффициента спектрального пропускания образцов после воздействия кислородом были вызваны двумя механизмами: ковровидный рельеф приводит к увеличению отражения света, и удаление окрашенного слоя с поверхности пленки. В случае полного удаления разрушенного слоя необлученных или слабо-облученных образцов воздействие кислорода уменьшало проницаемость, в то время как для образцов, облученных протонами с более высоким флюенсом, наблюдалось восстановление проницаемости.

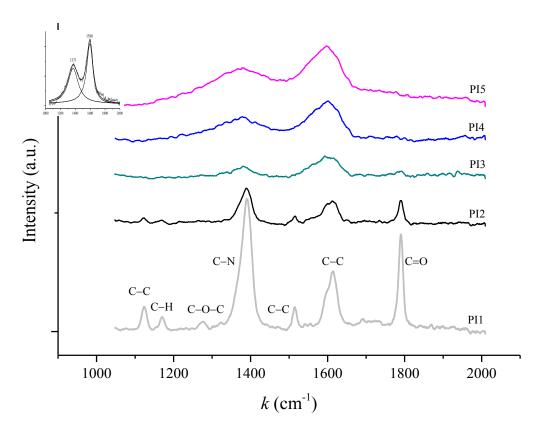


Рис. 70. Сглаженные рамановские спектры образцов в первоначальном состояние (PII) и после облучения протонами (PI2–PI5) с флюенсами (1.0; 2.5; 5.0; 7.5)х1015 см-2, соответственно.

Было проведено математическое моделирование некоторых процессов, возникающих в полиимидных образцах под действием атомарного кислорода.

Рис.71. Химическая структура РМDA-ODA (а) и компьютерная модель PI мономера (b).

#### Публикации:

Novikov L. S., Voronina E.N., Chernik V.N., Zhilyakov L.A., Chirskaya N.P. Combined impact of 500 keV protons and oxygen plasma on polyimide films. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 410, p. 60-67, 2017.

Novikov L. S., Voronina E.N., Chernik V.N., Vernigorov K.B., Yablokova M.Yu. Atomic oxygen influence on polymer nanocomposites with different fillers. Journal of Spacecraft and Rockets, vol.53, No 6, p. 1012-1018, 2016.

# **6.11.3. Моделирование опасности одиночных сбоев от космических частиц для памяти с коррекцией ошибок** (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

Микросхемы памяти на космических аппаратах (КА) подвергаются опасности одиночных сбоев (SEU, single event upsets), т. е. изменения состояния 1 бита памяти, вызванного попаданием энергичной частицы космического происхождения, или вторичных частиц, генерируемых первичными в материалах КА. Главную опасность представляют потоки энергичных протонов и ядер от мощных солнечных вспышек, а также протонов радиационных поясов.

В то же время существует технология коррекции ошибок (ECC, error checking and correction), позволяющая обнаруживать и исправлять ошибки в 1 или более битах в блоке памяти, за счёт хранения для каждого блока данных добавочных «контрольных» битов. Технология ЕСС достаточно стандартна для наземных устройств; также применяется и в космосе. В наиболее простом варианте она позволяет исправлять ошибку в 1 бите и обнаруживать ошибку в 2 битах в блоке памяти (код Хэмминга).

При использовании этой технологии на KA в качестве характеристики стойкости памяти к сбоям следует рассматривать не частоту сбоев как таковых, а вероятность сбоя, который не может быть исправлен с использованием ECC, т. е. появления >1, >2 и т. д. ошибок хотя бы в одном блоке памяти за заданное время.

Нами получены формулы для расчёта этой вероятности, а также выполнены модельные расчёты вероятности появления >1 и >2 ошибок хотя бы в одном блоке памяти на борту КА за время достаточно мощной солнечной вспышки и при полете в радиационных поясах Земли для некоторых микросхем оперативной памяти (ОЗУ).

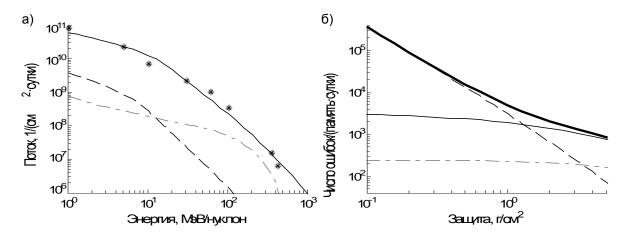


Рис. 72. а) Интегральные потоки, б) число ошибок в памяти от протонов (сплошная линия), ТЗЧ (пунктирная) и суммарное (жирная) от мощной солнечной вспышки, и от протонов радиационных поясов (пунктирно-точечная). Точками показаны флюенсы протонов в солнечном событии 19–22 октября 1989 г. по измерениям GOES-6.

Таблица 1. Частота одиночных ошибок и вероятность наличия >1 и >2 ошибок хотя бы в одном блоке памяти за время мощной солнечной вспышки; и за 1 месяц от протонов радиационных поясов на орбите высотой 1400 км.

| защита КА                            |       | ошибок/ | <i>P</i> (>1) <i>P</i> (>2) |                   |
|--------------------------------------|-------|---------|-----------------------------|-------------------|
| г/см <sup>2</sup>                    | мм Al | - сутки |                             |                   |
| Мощная солнечная вспышка,<br>1 сутки |       |         |                             |                   |
| 0.54                                 | 2     | 10000   | 0.2                         | $4 \cdot 10^{-6}$ |
| 1                                    | 3.7   | 4500    | 0.05                        | $4 \cdot 10^{-7}$ |
| 1.5                                  | 5.5   | 3000    | 0.02                        | 1.10-7            |
| Протоны радиационных поясов, 1 месяц |       |         |                             |                   |
| <2                                   | <7.4  | 250     | 0.005                       | $2 \cdot 10^{-9}$ |

Показано, что за защитой, эквивалентной нескольким мм Al, технология коррекции ошибок может обеспечить существенный уровень защиты от одиночных сбоев в ОЗУ даже при использовании коммерческих микросхем памяти SDRAM.

#### Публикации:

Подзолко М. В., Моделирование опасности одиночных сбоев от космических частиц для памяти с коррекцией ошибок, Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия,  $N_2$  6, 2017.

Подзолко М. В., Моделирование опасности одиночных сбоев от космических частиц для оперативной памяти с коррекцией ошибок, Научно-технический сборник: Тезисы докладов 20-й Всероссийской научно-технической конференции «Стойкость-2017», г. Лыткарино, 6—7 июня 2017 г., с. 51—53.

**6.11.4.** Эмпирическая модель долговременных вариаций потоков частиц галактических космических лучей (Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова)

Одним из факторов, который необходимо учитывать при изучении влияния экстремальных условий в космосе на жизнедеятельность человека и живых организмов, является наличие радиационных полей, состоящих из потоков высокоэнергичных заряженных частиц (3Ч) от разных источников. Сведения о величине этих потоков и физических характеристиках их воздействия необходимы, чтобы планировать и оптимизировать радиобиологические исследования на наземных источниках излучения и оценивать радиационные риски во время космических полетов. Чтобы иметь эти сведения в полном объеме, в том числе, с учетом изменения потоков ЗЧ в пространстве и во времени, разрабатываются количественные модели. Нами построена новая эмпирическая модель потоков ЗЧ галактических космических лучей (ГКЛ), которые являются важной частью космической радиации и в значительной степени определяют радиационные условия в межпланетном космическом пространстве. При разработке модели были использованы временные зависимости и энергетические спектры потоков протонов и ТЗЧ (заряд ядра z = 2-28) ГКЛ, которые известны по результатам их измерений на космических аппаратах (IMP-8, ACE, SOHO, Voyager-2, Pioneer-10 и др.) и в баллонных экспериментах (BESS, IMAX, CAPRICE и др.). Были проанализированы данные, полученные в течение четырех последних 11-летних циклов солнечной активности (начиная с 1973 г.). Обобщение этих данных было выполнено с использованием многопараметрической формулы, описывающей энергетические спектры протонов и ТЗЧ в зависимости от среднемесячного числа солнечных пятен W и гелиоцентрического расстояния в межпланетном пространстве. Найденные значения параметров этой формулы позволяют рассчитывать потоки протонов и ТЗЧ с энергией  $\sim (80 \div 10^5)$  МэВ/нуклон, изменяющиеся со временем в течение 11-летних циклов солнечной активности, и установить максимальный уровень потока 34, который может быть достигнут в современную эпоху. Эта формула также может быть использована для прогноза потоков ЗЧ ГКЛ в предстоящих циклах солнечной активности, если известен сценарий прогноза числа солнечных пятен W(t) в зависимости от времени t. Нами предлагается сценарий изменения значений W(t) до 2040 года, основанный на физической модели временной зависимости принципиальных компонент волновой активности фонового (основного) магнитного поля Солнца. Этот сценарий совместно с разработанной моделью предсказывает уменьшение амплитуды колебания потока ЗЧ ГКЛ в предстоящих 11-летних циклах солнечной активности. На основе данных разработанной модели и имеющихся экспериментальных данных обсуждаются мощность поглощенной дозы и спектры линейной передачи энергии, которые характеризуют меру радиационных повреждений при воздействии потоков ЗЧ ГКЛ во время полетов космических аппаратов и которые должны быть ориентиром при планировании радиобиологических исследований в наземных условиях на ускорителях ЗЧ.

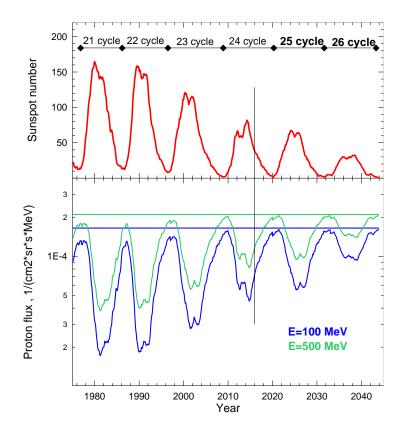


Рис. 73. Временная зависимость числа солнечных пятен (верхняя панель) и потоков ГКЛ для энергии протонов E = 100 и 500 МэВ (нижняя панель). Справа от вертикальной линии представлены прогнозируемые величины. Горизонтальные линии обозначают потоки протонов (для заданной энергии) в гипотетическом случае W = 0.

#### Публикации:

Kuznetsov N.V., Popova H., Panasyuk M.I., Empirical model of long-time variations of galactic cosmic ray particle fluxes, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2017, 122(2), 1463-1472.

Попова Е.П., Кузнецов Н.В., Панасюк М.И., Прогнозирование потоков ГКЛ для будущих космических миссий, Известия Российской академии наук. Серия физическая, 2017, 81(2), 192-195.

Kuznetsov N.V., Popova H., Panasyuk M.I., Podzolko M.V., Empirical model of galactic cosmic ray particle fluxes based on the experimental data in solar cycles 21–24, Proceedings of Science, № 35th International Cosmic Ray Conference, 2017, PoS(ICRC2017)001.