

**Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
(Московский инженерно-физический институт)**

**2. Результаты научных исследований по завершённым космическим проектам, полученные российскими учеными в 2014-2015 годах**

**Спутниковые эксперименты АРИНА и ВСПЛЕСК по изучению вариаций потоков высокоэнергичных протонов и электронов в околоземном космическом пространстве. Основные результаты 2014 – 2015 гг.**

**1. Описание спутниковых экспериментов АРИНА и ВСПЛЕСК**

Радиационная обстановка в околоземном космическом пространстве в стационарных условиях формируется в основном потоками галактических космических лучей, частиц атмосферного альbedo, частиц радиационного пояса. Сегодня актуально изучение изменений радиационных условий, проявляющихся в виде вариаций и всплесков потоков заряженных частиц в широком диапазоне энергий, связанных с солнечно-магнитосферными и геофизическими возмущениями.

Спутниковые низкоорбитальные эксперименты АРИНА (космический аппарат «Ресурс-ДК1», 2006 – 2016 гг.) и ВСПЛЕСК (Международная космическая станция, 2008 – 2013 гг.) были разработаны и проведены НИЯУ МИФИ [1, 2].

Спектрометры АРИНА и ВСПЛЕСК для регистрации вариаций высокоэнергичных электронов и протонов детально описаны в [3]. Приборы

полностью идентичны по физической схеме, имеют одинаковые физические параметры (геомфактор, энергетический диапазон, энергетическое и угловое разрешения и др.), регистрируют и идентифицируют электроны (3-30 МэВ) и протоны (30-100 МэВ), измеряют их энергии и позволяют изучать энергетические спектры и временные профили потоков частиц. Многослойный сцинтилляционный детектор (С1, С2,..., С10) является главной частью прибора. Заряженные частицы (электроны, протоны), движущиеся в прямом направлении («сверху вниз») и попадающие в апертуру прибора, проходят последовательно через детекторы С1, С2 С3 и т.д., теряют энергию и поглощаются в приборе. Частицы обратного направления и частицы прошедшие через весь прибор отсекаются детектором С10, включенным в антисовпадение. Таким образом, остановившиеся в веществе прибора частицы – электроны с энергиями 3-30 МэВ и протоны с энергиями 30-100 МэВ. Частицы идентифицируются по их энерговыделению (амплитуде сигналов с фотоумножителей) в каждом детекторе и пробегу в приборе. Энергия электронов и протонов измеряется по их пробегу в детекторах прибора. Спектрометры позволяют проводить измерения энергетических спектров частиц и их эволюцию, определять временные профили всплесков частиц с высоким временным разрешением ( $\sim 1\text{нс}$ ), могут работать в высокоинтенсивных потоках частиц (время формирования триггерного сигнала  $\sim 100\text{нс}$ ).

Большая статистика частиц, накопленная в период проведения экспериментов (2006 – 2015 гг.), позволила построить детальную карту потоков протонов и электронов в околоземном космическом пространстве (в геомагнитных и географических координатах с учетом питч-углов частиц) отдельно для каждого года измерений. В свою очередь это позволило выявить вариации потоков частиц разного временного масштаба, которые при этом имеют разную физическую природу. Среди них: всплески частиц

продолжительностью десятки секунд, связанные с локальными геофизическими возмущениями радиационного пояса (землетрясениями, молниевыми разрядами и др.), вариации продолжительностью от нескольких часов до нескольких суток, вызванные солнечно-магнитосферными возмущениями, вариации с характерным временем порядка одного года (и более), определяемые 11-летним циклом солнечной активности и глобальными изменениями геомагнитного поля.

Ниже представлены основные результаты, полученные в 2014 – 2015 гг.

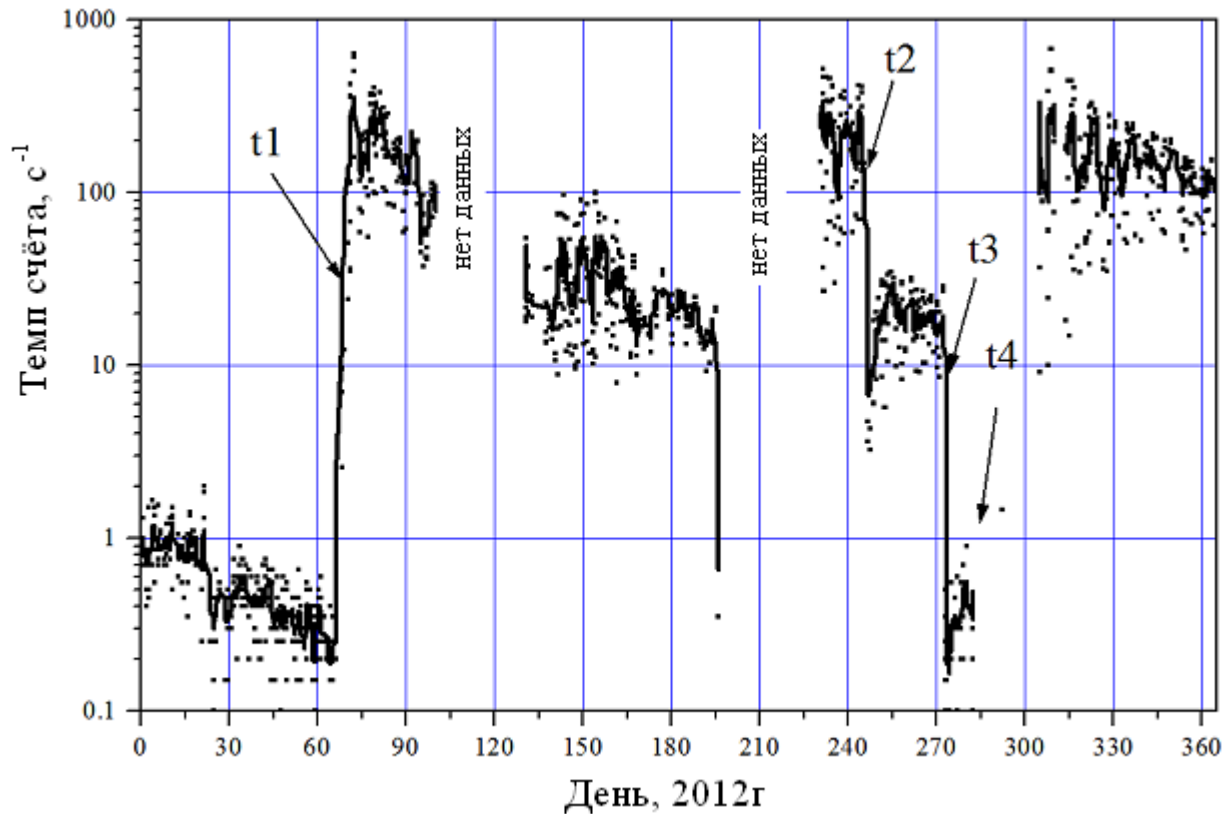
## **2. Динамика потоков высокоэнергичных электронов во внешнем радиационном поясе.**

Результаты детально описаны в работе [4].

Были изучены вариации потока высокоэнергичных электронов (более 3 МэВ) в зоне внешнего радиационного пояса ( $L=3-8$ ), связанные с магнитосферными возмущениями во время активных процессов на Солнце (вспышки, корональные выбросы массы и др.). по данным экспериментов АРИНА и ВСПЛЕСК в период 2006 – 2015 гг. Показано, что в периоды сильных солнечно-магнитосферных возмущений может происходить резкое изменение потока высокоэнергичных электронов во внешнем радиационном поясе - как его возрастание, так и убывание вплоть до фоновых величин, типичных для потока электронов атмосферного альбедо.

Типичное поведение высокоэнергичных электронов во внешнем радиационном поясе показано на рисунке 1, где представлены вариации потока электронов (4 – 6 МэВ) на  $L=3-3.5$  в течение 2012 г. Периоды значительных изменений (рост и падение) потока электронов отмечены стрелками. Анализ показал, что каждое такое изменение совпало с сильным

геомагнитным возмущением (Dst порядка – 100 нТл), вызванным солнечным событием (вспышка, корональный выброс массы).



**Рис. 1.** Вариаций потока электронов (4 – 6 МэВ) на ат L=3 - 3.5, измеренные в 2012 г. Точками показаны средние темпы счета электронов за 20-ти секундный интервал измерений. Кривая аппроксимирует экспериментальные точки. Стрелками (t1, t2, t3, t4) отмечены периоды сильных геомагнитных возмущений.

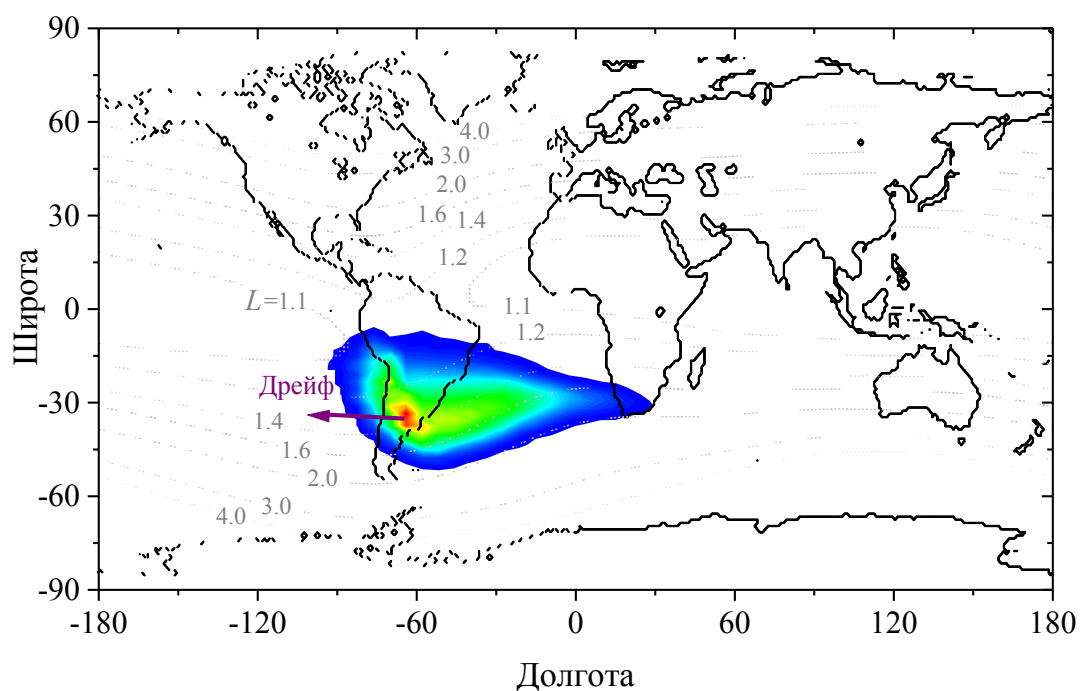
## **2. Долговременные вариации потока высокоэнергичных протонов во внутреннем радиационном поясе.**

Результаты детально описаны в работах [5, 6].

### **2.1. Дрейф области Южно-Атлантической Аномалии по данным о потоке протонов внутреннего радиационного пояса.**

По данным геомагнитных наблюдений известно, что глобальные изменения магнитного поля Земли приводят к перемещению области Южно-

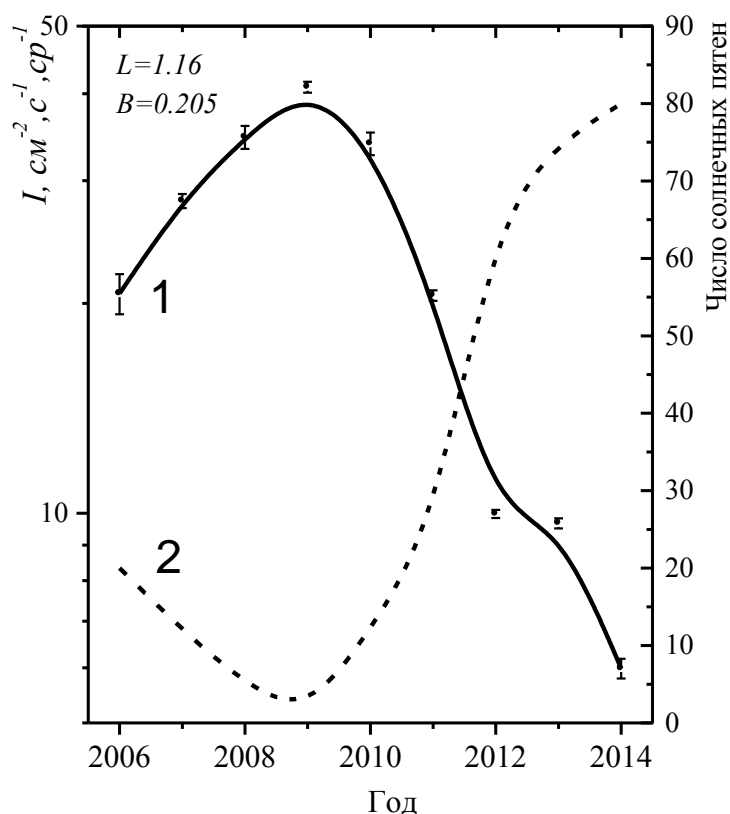
Атлантической Магнитной Аномалии (ЮАА) в западном направлении. Проявление этого эффекта в потоках высокоэнергичных протонов радиационного пояса было изучено данным экспериментов АРИНА и ВСПЛЕСК. Для каждого года в период измерений 2006 – 2015 гг. было определено местоположение (долгота) области максимального потока протонов (с энергией  $\sim 50$  МэВ) в узких интервалах L-оболочек внутреннего радиационного пояса ( $L < 2.0$ ). Это позволило выявить изменение этого местоположение в указанный временной период. В результате была определена скорость перемещения аномалии по данным о потоках частиц радиационного пояса. Было показано скорость перемещения практически не зависит от L-оболочки, равна  $0.45^\circ \pm 0.07^\circ$  и направлена на запад (рисунок 2).



**Рис. 2.** Дрейф области ЮАА по данным о потоках протонов эксперимента АРИНА (2006 – 2015 гг.).

## 2.2. Вариация потока захваченных протонов, связанная с 11-летним циклом солнечной активности [6].

Непрерывные измерения, выполненные в эксперименте АРИНА в 2006 – 2014 гг., пришлись на разные фазы 11-летнего солнечного цикла (фазы спада и минимума 23 цикла, фазы роста и максимума 24 цикла). Вариация потока высокоэнергичных протонов ( $\sim 100$  МэВ) внутреннего радиационного пояса в этот период показана на рисунке 3, из которого следует явная антикорреляция между потоком протонов солнечной активностью. При этом соотношение между интенсивностями в минимуме и максимуме солнечной активности достигает значения  $\sim 7$ .



**Рис. 3.** Вариация потока высокоэнергичных протонов ( $I$ ) во внутреннем радиационном поясе (кривая 1) в течение цикла солнечной активности (кривая 2 – средняя величина числа солнечных пятен в течение года).

А.М. Гальпер, [AMGalper@mephi.ru](mailto:AMGalper@mephi.ru)

С.В. Колдашов, [SVKoldashov@mephi.ru](mailto:SVKoldashov@mephi.ru)

## Ссылки

1. A.V. Bakaldin, A.G. Batischev, A.M. Galper et al. Cosmic Research. Vol 45. № 5. p. 471 (2007).
2. S.Yu. Alexandrin, A.V. Bakaldin, A.G. Batischev, A.M. Galper et al. Izvestiya Akademiy Nauk, physics series. Vol 73, № 3, p. 379 (2009).
3. V. Bakaldin, A. G. Batischev, M. A. Bjeumikhova, et. al. Instrumentation for Experimental Recording of Bursts of High-Energy Charged Particles in Near-Earth Space, Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz., 2005, vol. 69, no. 6, p. 918.
4. Koldashov S.V., Aleksandrin S.Yu., Eremina N.D. Dynamics of relativistic electrons in the region of outer radiation belt, caused by solar events. The 34th International Cosmic Ray Conference, 30 July- 6 August, 2015. Proceedings of science. <http://pos.sissa.it/>
5. Aleksandrin S.Yu., Galper A.M., Koldashov S.V., Zharaspayev T.R. The South Atlantic Anomaly drift on the proton flux data of satellite experiments. The 34th International Cosmic Ray Conference, 30 July- 6 August, 2015. Proceedings of science. <http://pos.sissa.it/>
6. V.V. Malakhov. S.V. Koldashov, A.G. Mayorov et al. Time variations of proton flux in Earth inner radiation belt during 23/24 solar cycles based on the PAMELA and the ARINA data. Journal of Physics: Conference Series 632 (2015) 012069.