

ДИНАМИКА ПОТОКОВ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ В ОБЛАСТИ БРАЗИЛЬСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ “АРИНА” И “ВСПЛЕСК”

© 2024 г. С. Ю. Александрин^{1)*}, В. М. Грачёв¹⁾, Е. И. Ольшевский¹⁾

Поступила в редакцию 02.10.2023 г.; после доработки 02.10.2023 г.; принята к публикации 02.10.2023 г.

В настоящей работе изучается динамика потоков протонов в области Бразильской магнитной аномалии (БМА) по данным спутниковых экспериментов “АРИНА” (был расположен на спутнике “Ресурс-ДК1”) за период с 2006 до 2015 г. и “ВСПЛЕСК” (2008–2013), который размещался на МКС. Оба спектрометра имеют одинаковую схему. Определяется дрейф БМА по положению максимума темпов счета высокоэнергичных протонов с энергиями в диапазоне от 30 до 100 МэВ на высоте полета спутника “Ресурс-ДК1” (около 580 км) и МКС (380–420 км). Часть времени приборы работали одновременно.

DOI: 10.31857/S0044002724010078, EDN: KEAYRB

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе изучается динамика потоков протонов Бразильской магнитной аномалии (БМА) по данным спутниковых экспериментов “АРИНА” и “ВСПЛЕСК”. Магнитосфера Земли имеет структуру, близкую к дипольной, что позволяет захватывать заряженные частицы. Ось диполя не совпадает с осью вращения Земли. Она наклонена относительно оси вращения и не проходит через центр Земли. Вследствие этого захваченные заряженные частицы радиационного пояса, дрейфующие по долготе, опускаются ниже всего в районе южной части Атлантического океана, где и наблюдаются возрастающие потоки, когда спутники пересекают БМА. Ось диполя также прецессирует относительно оси вращения Земли, что приводит к дрейфу БМА. Известно, что за все время, когда имеются данные по магнитному полю Земли, БМА движется на запад [1–3]. Дрейф БМА был замечен и в потоках частиц [4]. С развитием околоземных спутниковых систем возрастает интерес к положению БМА, где наблюдаются повышенные потоки заряженных частиц. Важно не только знать текущее положение БМА, но и прогнозировать направление и скорость ее дрейфа [5, 6]. Дрейф максимума потока протонов по долготе на заданной L -оболочке для первых несколько лет наблюдений уже наблюдался по данным спектрометра “АРИНА” [7].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Использовались данные спектрометров “АРИНА” и “ВСПЛЕСК”.

Спектрометр “АРИНА” был запущен 15 июня 2006 г. на борту космического аппарата (КА) “Ресурс-ДК1” [8, 9]. До сентября 2010 г. орбита КА была эллиптическая с перигеем ~350 км, апогеем ~600 км и наклоном 70°. В сентябре орбита была изменена почти на круговую, с высотой ~580 км. Внешний вид КА “Ресурс-ДК1” представлен на рис. 1. Потоки частиц измерялись постоянно. Два–три раза в сутки информация передавалась на Землю во время сеансов связи. Космический аппарат проработал до начала 2016 г.

Спектрометр “ВСПЛЕСК” был установлен на служебном модуле Международной космической станции (МКС) в августе 2008 г. В 2013 г. он был спущен на Землю. Высота орбиты МКС — 350–400 км, наклонение — 52°. Продолжительность, как и периодика измерения потоков частиц, была ограничена возможностями телеметрической системы станции и составляла не более 12 ч в сутки [10]. Размещение прибора “ВСПЛЕСК” на МКС показано на рис. 2.

Спектрометры “АРИНА” и “ВСПЛЕСК” идентичны по физической схеме и представляют собой стопки сцинтилляционных детекторов C1–C10 на основе полистирола, которые просматриваются ФЭУ. Схема представлена на рис. 3. Регистрируются частицы, остановившиеся в спектрометре, энергия определяется по пробегу частиц. Протоны регистрируются в диапазоне энергий от 30 до 100 МэВ с энергетическим разрешением 10%, а электроны — от 3 до 30 МэВ с разрешением 15%.

¹⁾ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия.

*E-mail: SYAleksandrin@mephi.ru



Рис. 1. Космический аппарат "Ресурс-ДК1".

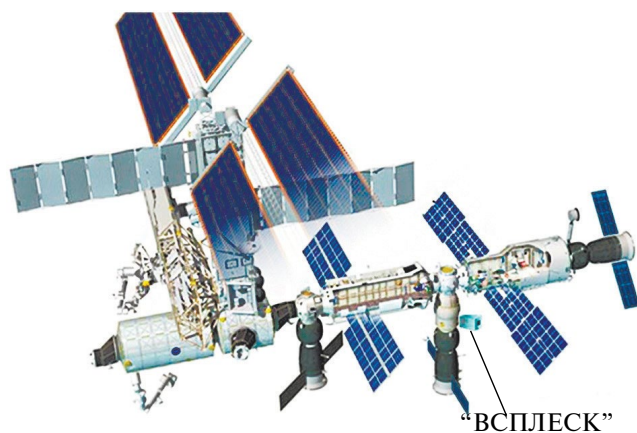


Рис. 2. Спектрометр "ВСПЛЕСК" на МКС.

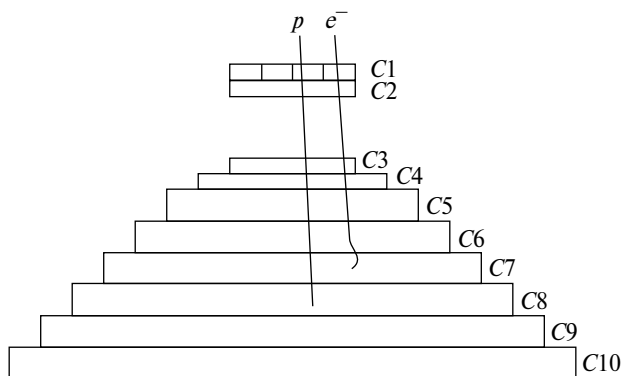


Рис. 3. Схема спектрометра "АРИНА" ("ВСПЛЕСК").

Положение Бразильской магнитной аномалии рассматривают по потокам протонов. На рис. 4 продемонстрированы потоки протонов с энергиями около 50 МэВ.

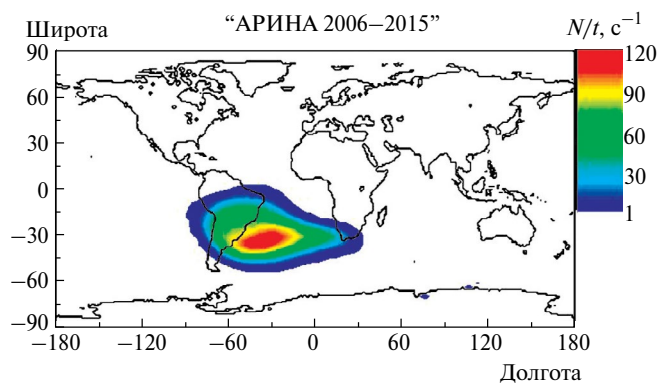


Рис. 4. Потоки протонов с энергиями ~50 МэВ по данным спутникового эксперимента "АРИНА".

3. ДИНАМИКА БРАЗИЛЬСКОЙ МАГНИТНОЙ АНОМАЛИИ

Динамика потоков высокоэнергичных протонов в области БМА определялась следующим образом. Откладывали зависимость потоков протонов от широты (рис. 5, *а*). Затем строили огибающую, отбирая максимальные значения потоков, которая аппроксимировалась полиномом (рис. 5, *б*). По уравнению полинома определяли положение максимума широтного распределения.

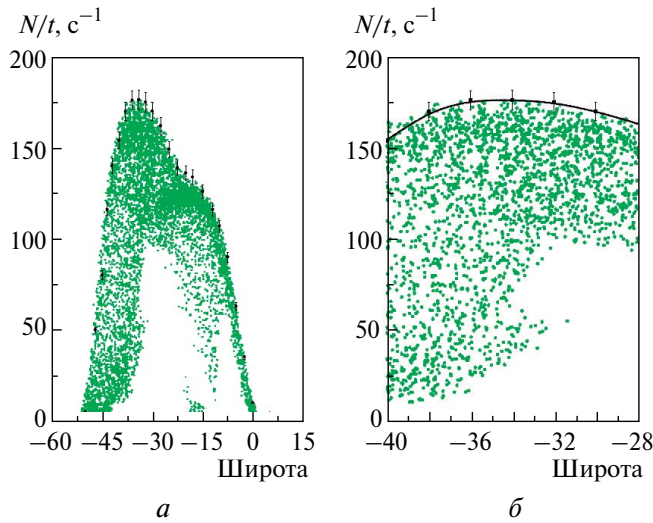
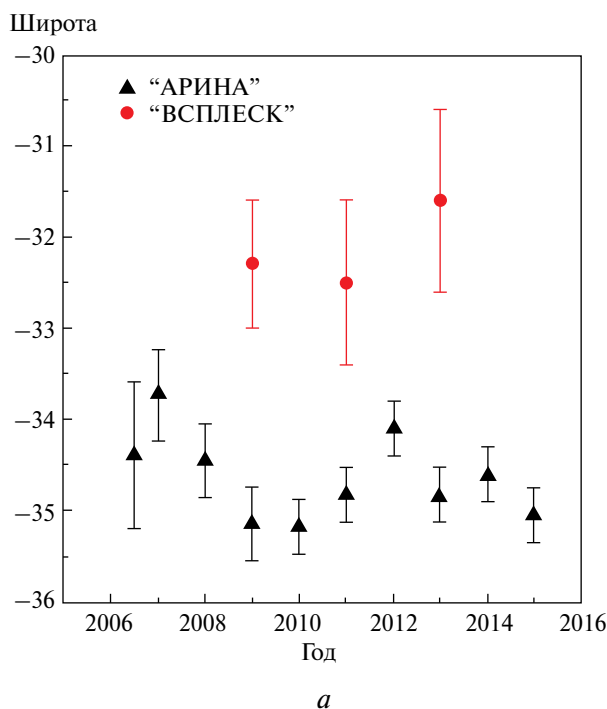


Рис. 5. Зависимость темпа счета канала протонов с энергиями ~ 50 МэВ от широты по данным спутникового эксперимента “АРИНА”.



Аналогичные действия производились и для долготного распределения. Были определены значения широты и долготы максимальных потоков для каждого года наблюдения выбранных экспериментов. На рис. 6, *а, б* показана динамика широты и долготы БМА на протяжении периода проведения экспериментов. Широта на протяжении 10 лет практически не изменяется в пределах ошибок. Координаты максимум потока протонов до 2009 г. изменяются мало, дрейфуя по долготе на восток по данным спутникового эксперимента “АРИНА”. Правда, заметное движение в восточном направлении наблюдается только до 2007 г., когда данных немного, и особенно в 2006 г. После 2009 г. наблюдается устойчивая тенденция — положение максимума потока движется на запад со скоростью $\Delta\phi = (-0.7 \pm 0.1)^\circ$ вплоть до окончания наблюдения в 2015 г. По эксперименту “ВСПЛЕСК” данных меньше, но наблюдается похожая тенденция. Возможно, что замедление дрейфа в период 2008–2009 гг. и небольшой дрейф на восток в 2006–2007 гг. связаны со сменой фазы солнечного цикла и минимумом солнечной активности. В этой фазе солнечного цикла разогрев атмосферы, а соответственно, и ее высота, минимальны, что влияет на потоки захваченных заряженных частиц намного сильнее, чем эффекты модуляции потоков космических лучей [10].

Разница положений максимумов потоков протонов, регистрируемых спектрометрами “АРИНА” и “ВСПЛЕСК”, объясняется разной высотой КА, на которых располагались инструменты.

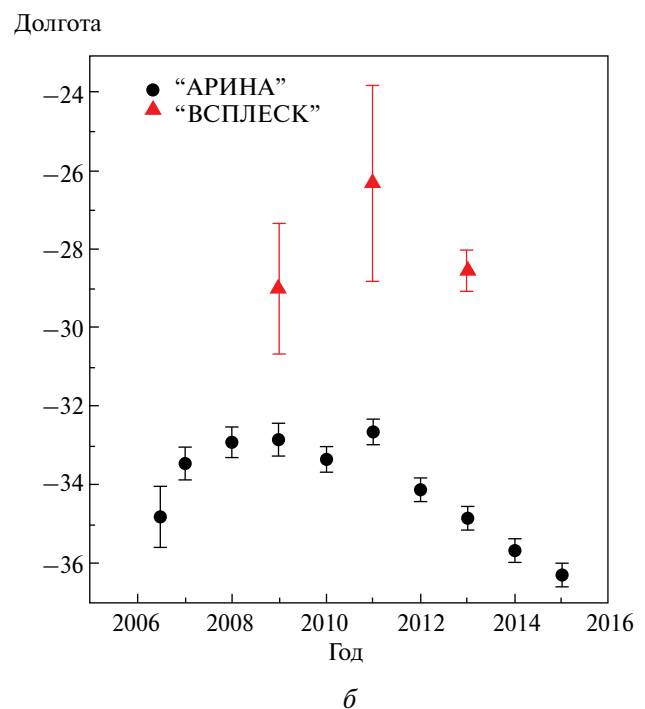


Рис. 6. Дрейф положения максимума потока протонов с энергиями ~ 50 МэВ по широте (*а*) и долготе (*б*).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным спутниковых экспериментов “АРИНА” и “ВСПЛЕСК” была изучена динамика потоков высокоэнергичных протонов в околоземном космическом пространстве за период с 2006 до 2016 г. Показано, что положение максимума этих потоков практически не изменилось по широте, положение по долготе до 2009 г. изменялось незначительно, а с 2009 г. — дрейфовало на запад со средней скоростью $\Delta\phi = -0.7 \pm 0.1$. Это связано с прецессией оси магнитного поля Земли, а соответственно, и со смещением Бразильской магнитной аномалии. Уменьшение скорости долготного дрейфа в период 2006–2008 гг., возможно, связано с фазой солнечного цикла (2009 г. — минимум солнечной активности).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е. И. Шемякин, С. С. Цыганков, Вестн. РАН **79**, 1000 (2009).
2. К. С. Иванов, В. А. Коротеев, Н. П. Костров, Докл. РАН **459**, 363 (2014).
3. A. A. Jackson and C. C. Finlay, in *Geomagnetism*, ed. by P. Olson and G. Schubert (Elsevier, 2007), p. 148. DOI: 10.1016/B978-044452748-6.00090-0.
4. А. М. Гальпер, Б. И. Лучков, Геомаг. аэрон. **23**, 669 (1983).
5. V. Pierrard, S. Benck, E. Botek, S. Borisov, A. Winant, J. Geophys. Res.: Space Phys. **128**, e2022JA031202 (2023). DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2022JA031202>.
6. H. Amit, F. Terra-Nova, M. Lézin, and R. I Trindade, Earth, Planets Space **73**, 38 (2021). DOI: 10.1186/s40623-021-01356-w.
7. S. Yu. Aleksandrin, A. M. Galper, S. V. Koldashov, and T. R. Zharaspayev. PoS (ICRC2015) 089. DOI: <https://doi.org/10.22323/1.236.0089>.
8. А. В. Бакалдин, А. Г. Батищев, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, Л. А. Гришанцева, С. В. Колдашов, П. Ю. Наумов, В. Ю. Чесноков, В. А. Шилов, Изв. РАН. Сер. физ. **69**, 918 (2005).
9. А. В. Бакалдин, А. Г. Батищев, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, Л. А. Гришанцева, С. В. Колдашов, П. Ю. Наумов, В. Ю. Чесноков, В. А. Шилов, Косм. исслед. **45**, 471 (2007).
10. С. Ю. Александрин, А. В. Бакалдин, А. Г. Батищев, М. А. Бжеумихова, С. А. Воронов, А. М. Гальпер, Л. А. Гришанцева, С. В. Колдашов, П. Ю. Наумов, А. А. Улитин, Н. Д. Шаронова, Тр. 31-й Всероссийской конференции по космическим лучам, Москва, МГУ, 2010, GEO_9.
11. A. Bruno, M. Martucci, F. S. Cafagna, R. Sparvoli, O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Boezio, E. A. Bogomolov, M. Bongi, V. Bonvicini, D. Campana, P. Carlson, M. Casolino, G. Castellini *et al.*, Astrophys. J. Lett. **917**, L21 (2021); <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac1a74>

DYNAMICS OF HIGH-ENERGY PROTON FLUXES IN THE SOUTH ATLANTIC ANOMALY REGION ACCORDING TO “ARINA” AND “VSPLESK” SATELLITE EXPERIMENT DATA

S. Yu. Aleksandrin¹⁾, V. M. Grachev¹⁾, E. I. Olshevsky¹⁾

¹⁾National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russia

This paper studies the dynamics of proton flux in the South Atlantic Anomaly (SAA) region according to “ARINA” (was operated on the Resurs-DK1 satellite from 2006 to 2015) and “VSPLESK” (which was mounted on the ISS from 2008 to 2013) satellite experiment data. Both spectrometers have the same scheme. The SAA drift is determined by the position of the maximum flux of high-energy protons with energies in the range from 30 to 100 MeV at the altitude of the Resurs-DK1 satellite (about 350–600 km) and the ISS (380–420 km). Part of the time the instruments operated simultaneously.