

**ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК 27-ДНЕВНЫХ ВАРИАЦИЙ ГКЛ  
ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТА PAMELA**

**<sup>1</sup>Р.Ф. Юлбарисов, <sup>1</sup>А.Г. Майоров, <sup>2,3</sup>О. Адриани, <sup>6</sup>Г.А. Базилевская, <sup>4,5</sup>Дж. Барбарино, <sup>7,8</sup>Р. Белотти, <sup>9</sup>М. Боецио, <sup>10</sup>Э.А. Богомолов, <sup>2,3</sup>М. Бонджи, <sup>9</sup>В. Бонвичини, <sup>3</sup>С. Боттай, <sup>7,8</sup>А. Бруно, <sup>12</sup>К. де Сантис, <sup>12,15</sup>В. ди Феличе, <sup>9,19</sup>А. Вакки, <sup>2</sup>Е. Ваннучини, <sup>10</sup>Г.И. Васильев, <sup>1</sup>С.А. Воронов, <sup>1</sup>А.М. Гальпер, <sup>1</sup>О.А. Голуб, <sup>9</sup>Дж. Зампа, <sup>9</sup>Н. Зампа, <sup>12,13</sup>М. Казолино, <sup>5</sup>Д. Кампана, <sup>1</sup>А.В. Карелин, <sup>11</sup>П. Карлсон, <sup>14</sup>Дж. Касетеллини, <sup>8</sup>Ф. Кафанья, <sup>6</sup>А.Н. Квашин, <sup>1</sup>С.А. Колдобский, <sup>1</sup>С.В. Колдашев, <sup>10</sup>С.Ю. Крутьков, <sup>1</sup>А.А. Леонов, <sup>1</sup>В.В. Малахов, <sup>12</sup>Л. Марчелли, <sup>16,18</sup>М. Мартучи, <sup>17</sup>В. Мени, <sup>12,16</sup>М. Мерге, <sup>1</sup>В.В. Михайлов, <sup>9</sup>Е. Мокьютти, <sup>7,8</sup>А. Монако, <sup>3</sup>Н. Мори, <sup>9</sup>Р. Мунины, <sup>5</sup>Дж. Остерия, <sup>5</sup>Б. Панико, <sup>3</sup>П. Папини, <sup>11</sup>М. Пирс, <sup>12,16</sup>П. Пикоцца, <sup>18</sup>М. Риччи, <sup>2,14</sup>С. Риччиарини, <sup>1</sup>С.А. Роденко, <sup>17</sup>М. Симон, <sup>12,16</sup>Р. Спарволи, <sup>2,3</sup>П. Спилантини, <sup>6</sup>Ю.И. Стожков, <sup>1</sup>Ю.Т. Юркин**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия  
starwarskust@mail.ru

<sup>2</sup>Физический факультет, Флорентийский университет, Флоренция, Италия

<sup>3</sup>Национальный институт ядерной физики, Флоренция, Италия

<sup>4</sup>Физический факультет, Неаполитанский университет имени Фридриха II, Неаполь, Италия

<sup>5</sup>Национальный институт ядерной физики, Неаполь, Италия

<sup>6</sup>Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

<sup>7</sup>Университет Бари Альдо Моро, Бари, Италия

<sup>8</sup>Национальный институт ядерной физики, Бари, Италия

<sup>9</sup>Национальный институт ядерной физики, Триест, Италия

<sup>10</sup>Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>11</sup>Физический факультет и Центр физики космических частиц им. Оскара Клейна, Стокгольм, Швеция

<sup>12</sup>Национальный институт ядерной физики, Рим, Италия

<sup>13</sup>Институт передовых наук Вако-Ши, Сайтама, Япония

<sup>14</sup>Институт прикладной физики им. Нелло Каррары, Фьюрентино, Италия

<sup>15</sup>Центр космических научных данных, Фраскати, Италия

<sup>16</sup>Римский университет Тор Вергата, Рим, Италия

<sup>17</sup>Университет г. Зиген, Зиген, Германия

<sup>18</sup>Национальная лаборатория Фраскати им. Э. Ферми, Национальный институт ядерной физики Фраскати, Италия

<sup>19</sup>Факультет математики и информатики, университет Удине, Удине, Италия

**EXAMINING 27-DAY VARIATIONS OF GCR MEASURED  
DURING THE PAMELA EXPERIMENT**

**<sup>1</sup>R.F. Yulbarisov, <sup>1</sup>A.G. Mayorov, <sup>2,3</sup>O. Adriani, <sup>4,5</sup>G.C. Barbarino, <sup>6</sup>G.A. Bazilevskaia, <sup>7,8</sup>R. Bellotti, <sup>9</sup>M. Boezio, <sup>10</sup>E.A. Bogomolov, <sup>2,3</sup>M. Bonghi, <sup>9</sup>V. Bonvicini, <sup>3</sup>S. Bottai, <sup>7,8</sup>A. Bruno, <sup>8</sup>F. Cafagna, <sup>5</sup>D. Campana, <sup>11</sup>P. Carlson, <sup>12,13</sup>M. Casolino, <sup>14</sup>G. Castellini, <sup>12</sup>C. de Santis, <sup>12,15</sup>V. di Felice, <sup>1</sup>A.M. Galper, <sup>1</sup>O.A. Golub, <sup>1</sup>A.V. Karelin, <sup>1</sup>S.V. Koldashov, <sup>1</sup>S.A. Koldobskiy, <sup>10</sup>S.Y. Krutkov, <sup>6</sup>A.N. Kvashnin, <sup>1</sup>A.A. Leonov, <sup>1</sup>V. Malakhov, <sup>12</sup>L. Marcelli, <sup>16,18</sup>M. Martucci, <sup>17</sup>W. Menn, <sup>12,16</sup>M. Merge, <sup>1</sup>V.V. Mikhailov, <sup>9</sup>E. Mocchiutti, <sup>7,8</sup>A. Monaco, <sup>9</sup>R. Munini, <sup>3</sup>N. Mori, <sup>5</sup>G. Osteria, <sup>5</sup>B. Panico, <sup>3</sup>P. Papini, <sup>11</sup>M. Pearce, <sup>12,16</sup>P. Picozza, <sup>18</sup>M. Ricci, <sup>3,14</sup>S.B. Ricciarini, <sup>1</sup>S.A. Rodenko, <sup>17</sup>M. Simon, <sup>12,16</sup>R. Sparvoli, <sup>2,3</sup>P. Spillantini, <sup>6</sup>Y.I. Stozhkov, <sup>9,19</sup>A. Vacchi, <sup>2</sup>E. Vannuccini, <sup>10</sup>G.I. Vasilyev, <sup>1</sup>S.A. Voronov, <sup>1</sup>Y.T. Yurkin, <sup>9</sup>G. Zampa, <sup>9</sup>N. Zampa**

<sup>1</sup>National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia  
starwarskust@mail.ru

<sup>2</sup>Department of Physics, University of Florence, Sesto Fiorentino, Italy

<sup>3</sup>INFN, Sezione di Firenze, Sesto Fiorentino, Italy

<sup>4</sup>Department of Physics, University of Naples “Federico II”, Naples, Italy

<sup>5</sup>INFN, Sezione di Napoli, Naples, Italy

<sup>6</sup>Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

<sup>7</sup>University of Bari, Bari, Italy

<sup>8</sup>INFN, Sezione di Bari, Bari, Italy

<sup>9</sup>INFN, Sezione di Trieste, Trieste, Italy

<sup>10</sup>Toffe Physical Technical Institute, St. Petersburg, Russia

<sup>11</sup>KTH, Department of Physics, and the Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, AlbaNova University Centre, Stockholm, Sweden

<sup>12</sup>INFN, Sezione di Roma II “Tor Vergata”, Rome, Italy

<sup>13</sup>RIKEN, Advanced Science Institute — Wako-shi, Saitama, Japan

<sup>14</sup>IFAC, Sesto Fiorentino, Italy

<sup>15</sup>Agenzia Spaziale Italiana (ASI) Science Data Center, Frascati, Italy

<sup>16</sup>Department of Physics, University of Rome “Tor Vergata”, Rome, Italy

<sup>17</sup>Department of Physics, Universitaet Siegen, Siegen, Germany

<sup>18</sup>INFN, Laboratori Nazionali di Frascati — Via Enrico Fermi, Frascati, Italy

<sup>19</sup>Department of Mathematics and Informatics, University of Udine, Udine, Italy

**Аннотация.** Магнитный спектрометр PAMELA измерял с высоким энергетическим разрешением различные компоненты космических лучей в диапазоне энергией от  $\sim 80$  МэВ/нук до нескольких сотен ГэВ/нук в течение июня 2006 – января 2016 г. В работе исследовались энергетическая и временная зависимости амплитуды 27-дневных вариаций потока протонов, наблюдавшихся в эксперименте с сентября 2007 г по апрель 2008 г. Получена зависимость амплитуды от жесткости протонов космических лучей в диапазоне от 0.43 ГВ до 6.2 ГВ. Наблюдается уменьшение амплитуды в области 0.3–0.6 ГВ. Показано, что амплитудно-энергетическая зависимость не может быть описана степенным законом при низких энергиях. Проведено сравнение с данным эксперимента STEREO.

**Ключевые слова:** космические лучи, 27-дневные вариации, амплитуды вариаций.

**Abstract.** The magnetic spectrometer PAMELA measured with high energy resolution different components of cosmic rays in the energy range from  $\sim 80$  MeV/n to several hundred GeV/n during June 2006 – January 2016. The paper investigated the energy and time dependences of the amplitude of 27-day variations of proton flux observed in the experiment from September 2007 to April 2008. The dependence of the amplitude on the rigidity of cosmic ray protons in the range from 0.43 GV to 6.2 GV was obtained. There is a decrease of amplitude in the region of 0.3 – 0.6 GV. It is shown that the amplitude-energy dependence cannot be described by the power law at low energies. A comparison with the data of the STEREO experiment was carried out.

**Keywords:** cosmic rays, 27-day variations, amplitudes of variations.

## ВВЕДЕНИЕ

Впервые временные вариации потоков галактических космических лучей (ГКЛ) с периодом 27 дней и амплитудой от нескольких процентов до 12–15 % были обнаружены С. Форбушем на основании измерений всемирной сети ионизационных камер, созданной в конце 1930-х гг. Позже эти вариации были подтверждены в 1960-х гг. в результате первых измерений потоков ГКЛ в космосе. Современный анализ показал связь 27-дневных вариаций потока галактических частиц с характеристиками межпланетной среды, например, скоростью солнечного ветра или напряженностью магнитного поля, зависящих от солнечной активности.

Магнитный спектрометр PAMELA [Picozza et al., 2007] на борту космического аппарата Ресурс-ДК1 измерял потоки заряженных частиц и античастиц в космическом излучении с июня 2006 г. по февраль 2016 г. В эксперименте PAMELA имеется возможность получать суточные данные о частицах разного типа в широком диапазоне энергий от нескольких десятков МэВ до сотен ГэВ.

## ПОДГОТОВКА ДАННЫХ

Для анализа использованы данные, полученные в эксперименте PAMELA в период с 2007 г. по 2008 г. Рассмотрена протонная компонента с жесткостью от 0.43 ГВ до 6.2 ГВ. На рис. 1 представлена зависимость интенсивности потока протонов от времени с жесткостью 1.5–2.0 ГВ.

Для анализа 27-дневных вариаций потока ГКЛ необходимо данные отфильтровать и нормировать, для чего делается следующее:

1. Определяется тренд долговременных вариаций в рассматриваемый период.
2. Чтобы исключить недостоверные значения потока, для каждой точки вычисляются верхний 0.98 и нижний 0.02 квантили на основании 30 соседних точек ( $\pm 15$ ). Если значение в данной точке превышает пределы верхнего или нижнего квантилей, оно заменяется на трендовое значение (рис. 2).
3. Удаляется долговременный тренд и производится нормировка потока (рис. 3).

Таким образом, получены нормированные и отфильтрованные зависимости потока протонов ГКЛ от времени. В итоге амплитуды вариаций ГКЛ выражаются в относительных единицах.

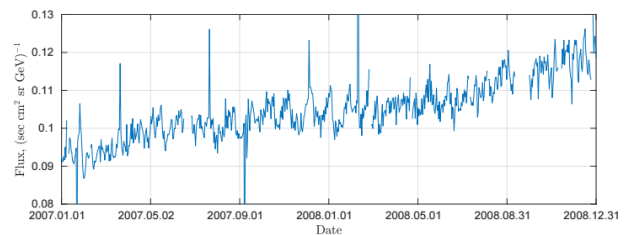


Рис. 1. Поток протонов с жесткостью 1.5–2.0 ГВ

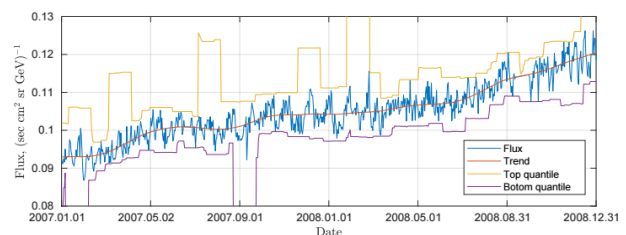


Рис. 2. Отфильтрованный поток протонов с жесткостью 1.5–2.0 ГВ

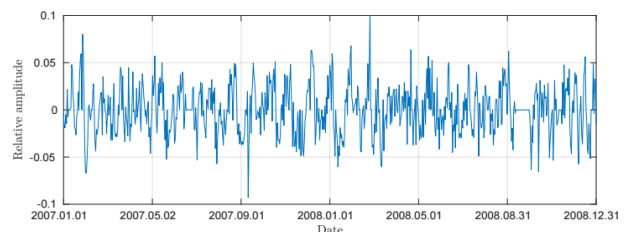


Рис. 3. Нормированный поток протонов с жесткостью 1.5–2.0 ГВ

## АНАЛИЗ 27-ДНЕВНЫХ ВАРИАЦИЙ

Для анализа 27-дневных вариаций ГКЛ используется непрерывное одномерное вейвлет-преобразование [<https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/cwt.html>] и метод доминирующих амплитуд (рис. 4): выделяется интервал интересующих частот, соответствующих периодам от 25 до 29 дней, и в нем находится максимальная амплитуда (рис. 5). Эта амплитуда вносит наибольший вклад в сигнал и является доминирующей в рассматриваемом промежутке времени.

В результате анализа построен график зависимости доминирующей амплитуды от жесткости частиц (рис. 6) для периода с 01.09.2007 по 01.04.2008 по данным PAMELA.

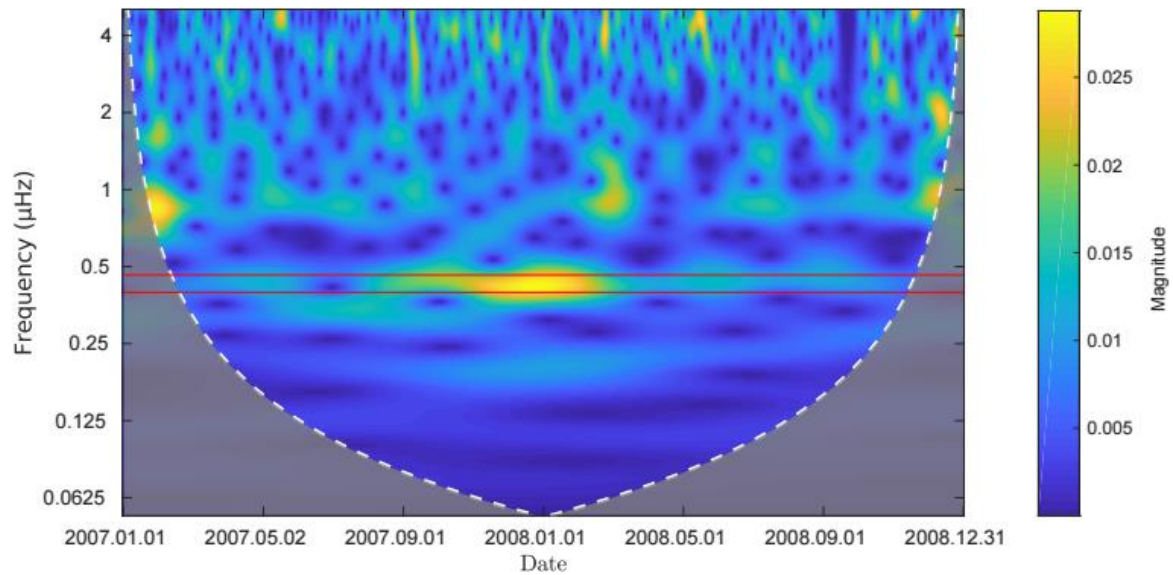


Рис. 4. Амплитудная скейлограмма вейвлет-преобразования

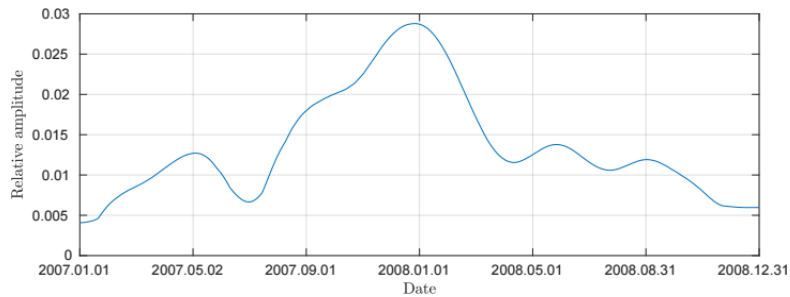


Рис. 5. Зависимость амплитуды вариаций от времени

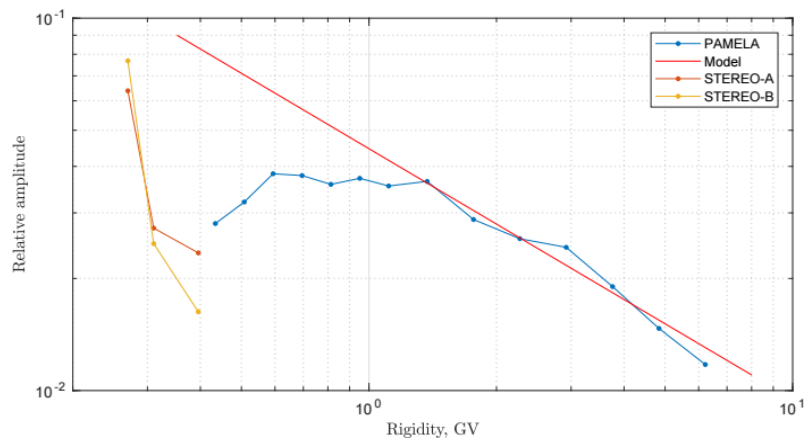


Рис. 6. Зависимость доминирующей амплитуды вариаций от жесткости

При высоких жесткостях полученную зависимость можно аппроксимировать степенным законом [Alania et al., 2010]. Однако в районе 0.3–0.6 ГВ наблюдается уменьшение амплитуды, что не согласуется с существующими моделями. Для подтверждения обнаруженного эффекта проведено сравнение с экспериментом STEREO, чьи данные подверглись аналогичной обработке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ранее на высоких гелиоширотах космический аппарат *Ulysses* наблюдал аналогичное поведение 27-дневных вариаций космических лучей. Представленный в работе результат наблюдается впер-

вые в оклоземном пространстве, где PAMELA проводила свои измерения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-02-00582).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Picozza P., Galper A.M., Castellini G., et al. PAMELA – A payload for antimatter matter exploration and light-nuclei astrophysics // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. P. 296–315.

Alania M. On the rigidity spectrum of the 27-day variation of the galactic cosmic ray intensity in different epochs of solar activity // *Adv. Space Res.* 2010. V. 45, N 3. P. 429–436.

URL: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/ref/cwt.html>.