

# ПРИРОДА КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

*И. А. Лагойда* \*, *С. А. Воронов*, *В. В. Михайлов*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

ВВЕДЕНИЕ	1077
ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ	1087
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	1092
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	1092

---

\*E-mail: [iliyalagoida@gmail.com](mailto:iliyalagoida@gmail.com)

## ПРИРОДА КРАТКОВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ ПОТОКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

*И. А. Лагойда* \*, *С. А. Воронов*, *В. В. Михайлов*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Регистрация потоков частиц космической радиации позволяет изучать динамику межпланетного магнитного поля и получать информацию о процессах, происходящих как на поверхности Солнца, так и во всей Солнечной системе. К основным кратковременным вариациям потоков космических лучей относятся 27-дневные вариации и форбуш-эффекты. Причинами данных вариаций являются сложные пространственные образования солнечной плазмы, создаваемые различными процессами на поверхности Солнца и распространяющиеся в космической среде в широком диапазоне скоростей. В работе используются данные о потоках космических лучей, зарегистрированные магнитным спектрометром PAMELA с 2006 по 2016 г. на борту спутника «Ресурс-ДК1».

Registration of cosmic ray fluxes makes it possible to study the dynamics of interplanetary magnetic field and to obtain information about processes which occur in the interplanetary space. The 27 day variations and Forbush decreases are main short fluctuations of cosmic ray intensity. Drivers of such variations are processes on the Sun such as coronal mass ejections and corotating interaction regions. Fluxes of cosmic rays registered by the PAMELA magnetic spectrometer are used in the paper to show some examples of cosmic ray variations. The PAMELA spectrometer was launched on board of Resurs-DK1 satellite in the middle of 2006 and worked up to 2016.

PACS: 94.20.wq

### ВВЕДЕНИЕ

Солнечная корона представляет собой высокопроводящую плазму, температура которой  $\sim 10^6$  К [1]. Динамика корональных явлений, вращение Солнца вокруг своей оси и одиннадцатилетний цикл солнечной активности являются основными причинами изменения пространственной конфигурации межпланетного магнитного поля, его амплитуды, флуктуаций и направлений.

---

\*E-mail: [iliyalagoida@gmail.com](mailto:iliyalagoida@gmail.com)

Высокая температура солнечной короны приводит к образованию солнечного ветра, заполняющего всю Солнечную систему и ее окрестности. В космической плазме скорость звука определяется скоростью Альфвена [2]:

$$v_A = \sqrt{\frac{B^2}{\rho\mu_0}},$$

где  $B$  — амплитуда межпланетного магнитного поля;  $\rho$  — плотность частиц;  $\mu_0$  — магнитная постоянная. Подставляя значения  $\rho = 10^7 \text{ м}^{-3}$  и  $B = 5 \text{ нТл}$ , характерные для межпланетной среды, получаем  $v_A = 35 \text{ км/с}$ , в то время как средняя скорость солнечного ветра на расстояниях нескольких солнечных радиусов составляет  $\sim 400 \text{ км/с}$ . Таким образом, солнечный ветер является плазмой, движущейся в межпланетном пространстве со сверхзвуковой скоростью.

Потоки плазмы, исходящие с поверхности Солнца вследствие вращения последнего вокруг своей оси, распространяются в среде по линиям, напоминающим спирали Архимеда [3]. Следовательно, магнитное поле, вмороженное в солнечный ветер, должно также иметь спиральную структуру. Согласно экспериментальным данным аппарата «Улисс» [4] межпланетное магнитное поле периодически меняет свое направление с идущего от Солнца на противоположное, при этом смена полярностей разделена промежутком с пониженной амплитудой магнитного поля относительно средних значений. Такое поведение определяется тем, что солнечное магнитное поле в период минимума солнечной активности имеет дипольную конфигурацию, при которой магнитные силовые линии в полярных областях уходят в бесконечность [5]. При этом ось магнитного диполя наклонена к оси вращения Солнца на угол, величина которого находится в диапазоне  $10\text{--}30^\circ$ . Следовательно, по мере вращения Солнца вокруг своей оси Земля и спутники на орбите Земли оказываются в области то северного магнитного полюса, то южного. Пространство, разделяющее области с противоположными направлениями магнитных силовых линий, получило название гелиосферного токового слоя. Магнитные силовые линии гелиосферного токового слоя замкнуты на Солнце и поэтому препятствуют свободному распространению солнечной плазмы в окружающее пространство.

Вышеописанная структура солнечного магнитного поля отображается в различии скоростей солнечного ветра, регистрируемых на различных широтах. Солнечный ветер в космическом пространстве присутствует в виде двух составляющих — быстрой и медленной [6], что было подтверждено экспериментально космическим аппаратом «Улисс» [7] (рис. 1). Таким образом, дипольное солнечное магнитное поле в период минимума солнечной активности характеризуется двумя составляющими солнечного ветра — медленной и быстрой — с усредненными скоростями 400 и 800 км/с соответственно.

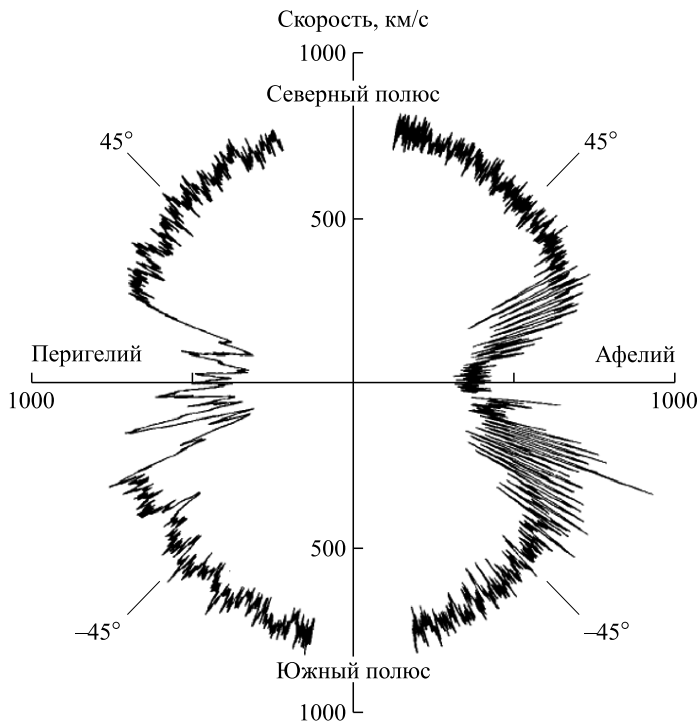


Рис. 1. Быстрый и медленный потоки солнечного ветра, данные эксперимента «Улисс» [4]

Во время максимума солнечной активности дипольная структура солнечного магнитного поля сильно нарушается и приобретает вид, изображенный на рис. 2. В связи с этим в период максимума солнечной активности в окружающем пространстве доминирует медленный солнечный ветер, так как большинство силовых линий магнитного поля замкнуты, следовательно, препятствуют распространению плазмы с поверхности Солнца.

В период минимума солнечной активности в Солнечной системе формируется область, в которой потоки быстрого солнечного ветра догоняют медленные, вследствие чего в пространстве между потоками формируется тонкий разделяющий слой [8]. Так как солнечный ветер является плазмой, распространяющейся со сверхзвуковой скоростью, такую область можно рассматривать в качестве ударной волны (рис. 3).

Напряженность магнитного поля и плотность плазмы в окрестности разделяющего слоя увеличены в силу сжатия, обусловленного давлением быстрого солнечного ветра и сопротивлением медленного. Такая конфигурация быстрого и медленного потоков солнечного ветра вращается вместе с Солн-

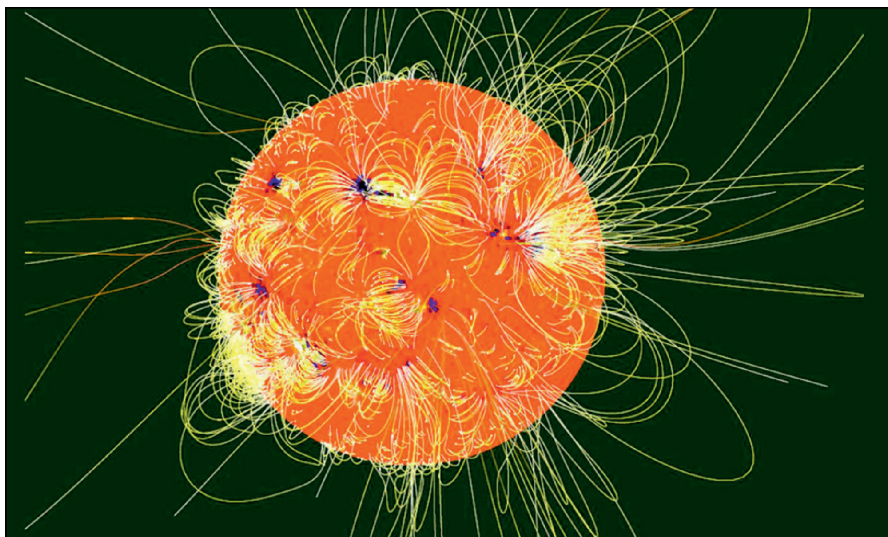


Рис. 2. Солнечное магнитное поле в период максимума солнечной активности [9]

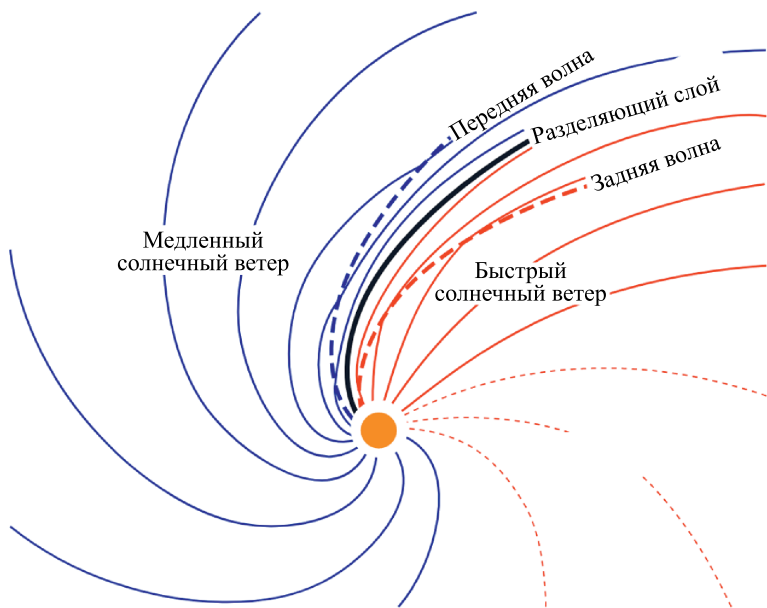


Рис. 3. Ударная волна, образованная на границе между быстрым и медленным потоками солнечного ветра [3]

цем, модулируя потоки частиц галактических космических лучей (ГКЛ) с периодичностью около 27 дней.

На сегодня вариации потоков космических лучей изучаются в основном при помощи наземных установок, таких как нейтронные мониторы и мюонные годоскопы. Такие приборы обеспечивают хорошую статистику измерений, однако с точки зрения регистрации потоков ГКЛ имеют ограниченные возможности. В первую очередь на поверхности Земли регистрируется только вторичная компонента ГКЛ, образовавшаяся после взаимодействия частиц ГКЛ с атмосферой. Наземные установки более чувствительны к высокоэнергичным потокам ГКЛ, в то время как вариационные эффекты наиболее ярко выражаются в менее энергетической компоненте. С учетом вышесказанного изучение кратковременных вариаций в потоках космических лучей вне атмосферы на орбите Земли позволяет получить более надежные данные о характеристиках наблюдаемых эффектов.

В настоящей работе используются данные о потоках космических лучей, полученные магнитным спектрометром PAMELA [10]. Эксперимент PAMELA проводился на борту спутника «Ресурс-ДК1», запуск которого состоялся 15 июня 2006 г. Спутник был запущен на эллиптическую орбиту (высота 350–600 км, наклонение  $70,4^\circ$ ). Прибор PAMELA состоял из магнитного спектрометра на основе постоянного магнита с постоянным магнитным полем  $\sim 0,4$  Тл, окруженного детекторами антисовпадений, позиционно-чувствительного калориметра, времяпролетной системы (TOF), а также нейтронного детектора. Спектрометр имел 6 «стриповых» кремниевых плоскостей, помещенных в магнитное поле, которые измеряли координаты трека с точностью до 3 мкм, что позволяло определять знак заряда частиц и их жесткость — отношение импульса частицы к заряду. Позиционно-чувствительный калориметр состоял из 44 однослойных «стриповых» кремниевых детекторов, прослоенных вольфрамовыми пластинами толщиной 0,26 см каждая. Суммарная толщина поглотителя соответствовала 16,3 радиационной длины. Электромагнитный калориметр позволял проводить разделение электромагнитных и адронных каскадов и измерять энергию электронов и позитронов. Геометрический фактор прибора составлял  $21,6 \text{ см}^2 \cdot \text{ср}$ . Схема прибора изображена на рис. 4.

Вариации КЛ с периодом 27 дней, зарегистрированные спектрометром PAMELA в потоке космических протонов с энергией 1 ГэВ, показаны на рис. 5. Кроме 27-дневной периодичности потоков космической радиации выделяют еще один вид кратковременных вариаций, имеющих значительно более сложную природу.

Странные извержения солнечной материи преимущественно во время максимума солнечной активности косвенно наблюдались еще до середины XX в. В дальнейшем были обнаружены всплески радиоволнового излучения, сопровождающиеся извержением солнечного вещества. Наиболее интерес-

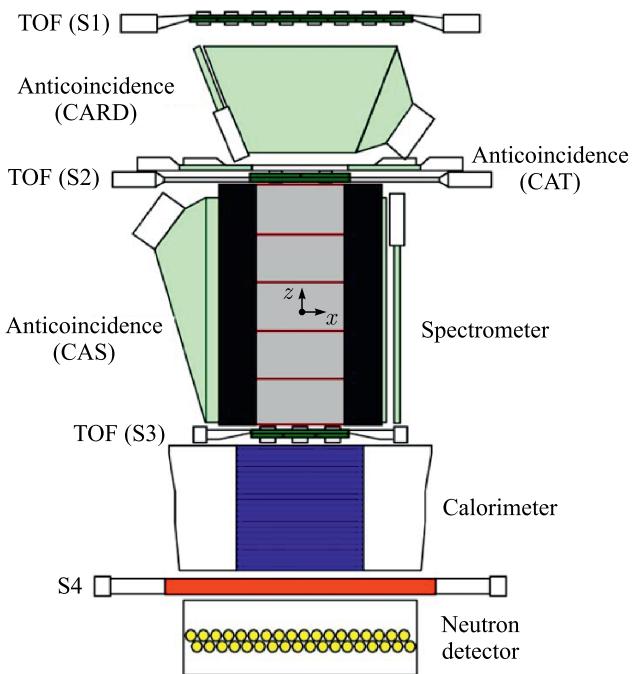


Рис. 4. Схематическое изображение прибора PAMELA

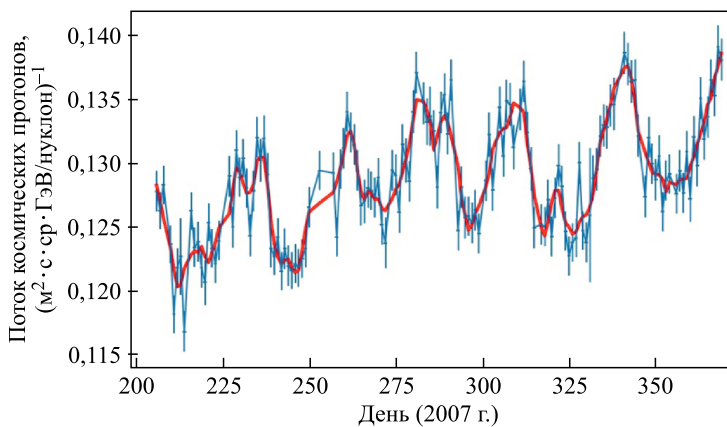


Рис. 5. 27-дневные вариации потока космических протонов с энергией 1 ГэВ по данным спектрометра PAMELA 2007 г.

ными из них оказались радиовсплески типа IV, так как из свойств радиоволнового излучения было установлено, что они вызваны облаками, состоящими из плазмы с вмороженным в нее магнитным полем, распространяющимися со скоростью  $\sim 1000$  км/с [11]. Впоследствии ударные волны, создаваемые этими извержениями, были зарегистрированы спутниковыми приборами [12].

С появлением оптических коронографов удалось установить, что ударным волнам предшествуют выпуклообразные структуры на поверхности Солнца, оптически более светлые, чем остальная часть короны. Такие выпуклые области, получившие название протуберанцев, содержащие в себе миллионы тонн плазмы, остаются стабильными в течение нескольких часов, а затем внезапно исчезают. По мере роста магнитного поля через процессы перезамыкания магнитных силовых линий такие образования начинают увеличиваться, при этом увеличивается и масса плазмы, охваченная образовавшимися силовыми линиями.

Подъем протуберанцев и их внезапная диссипация, напоминающая взрыв, может быть обусловлены или многократным перезамыканием магнитных силовых линий, или давлением космических лучей, если последние внезапно образуются в большом количестве в основании протуберанца [13]. Однако окончательной теории в настоящее время не предложено. Такие процессы сопровождаются колоссальными выбросами солнечного вещества в окружающее пространство ( $\sim 10^7$  кг) и сегодня называются корональными выбросами массы (КВМ) [14]. После распространения ударной волны окружающее пространство заполняет облако солнечной плазмы, магнитные силовые линии которого замкнуты на Солнце (рис. 6). КВМ и являются основными причинами так называемых форбуш-понижений, регистрируемых в межпланетном пространстве. Однако большое разнообразие КВМ проявляется в большом

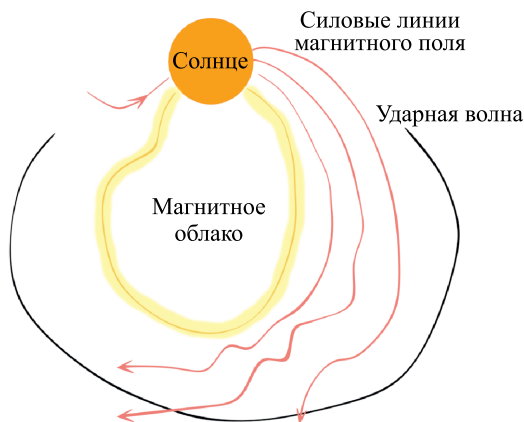


Рис. 6. Структура КВМ



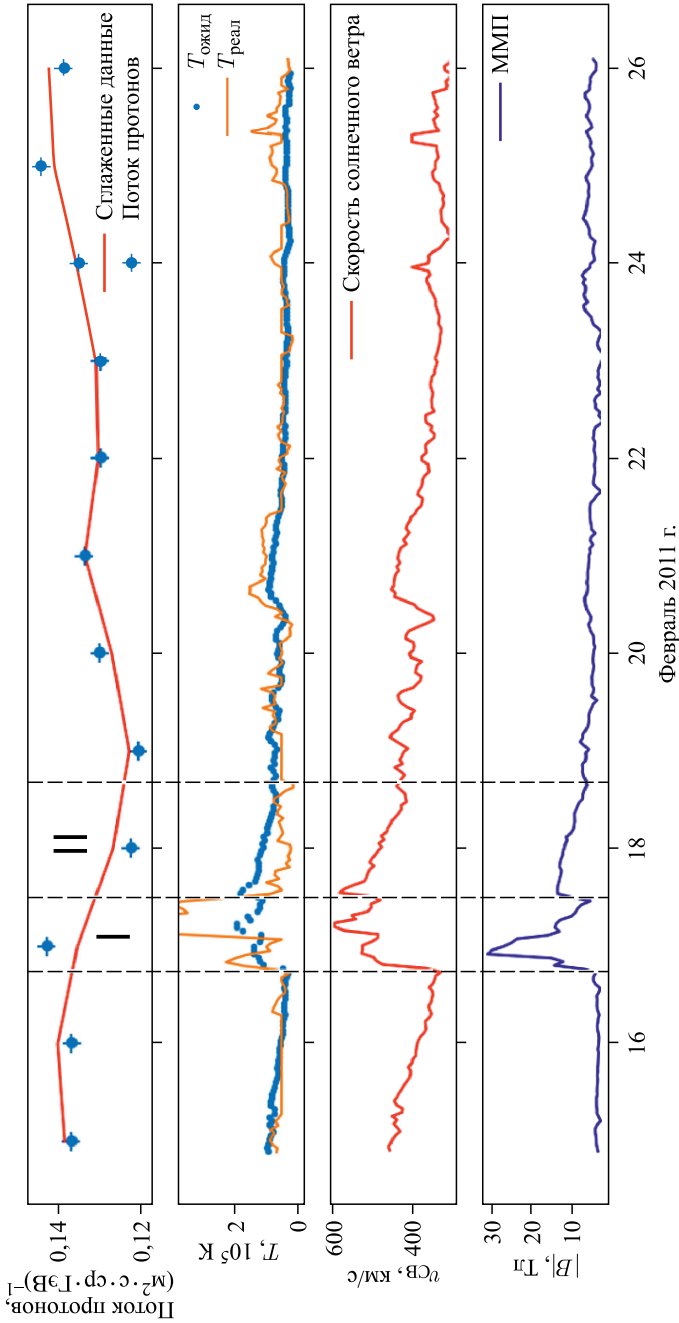


Рис. 7. Форбуш-эффект в потоке протонов космических лучей с энергией 1 ГэВ, зарегистрированный спектрометром РАМЕЛА в феврале 2011 г. I — область форбуш-понижения, связанная с прохождением ударной волны; II — то же для магнитного облака солнечной плазмы

количестве различных форбуш-эффектов, наблюдаемых спутниковой аппаратурой и наземными установками. Классическим форбуш-эффектом считается двухступенчатый профиль понижения интенсивностей космических лучей, в котором первая стадия понижения является следствием распространения ударной волны, а вторая связана с менее скоростным магнитным облаком, заполняющим межпланетное пространство [15]. Форбуш-эффект, зарегистрированный спектрометром PAMELA в феврале 2011 г., изображен на рис. 7. Также на рисунке показаны временные зависимости основных характеристик межпланетного пространства — ожидаемой ( $T_{\text{ожид}}$ ) и реальной ( $T_{\text{реал}}$ ) плазменной температуры, скорости солнечного ветра ( $v_{\text{СВ}}$ ) и величины магнитного поля ( $B$ ) во время наблюдаемого форбуш-понижения. По временным зависимостям, изображенным на рис. 7, можно установить время прохождения ударной волны. Оно характеризуется резким увеличением амплитуды межпланетного магнитного поля, а также скорости солнечного ветра, в то время как магнитное облако характеризуется более или менее стабильным межпланетным магнитным полем, лишенным резких флуктуаций, и постепенно спадающим профилем скорости солнечного ветра [16]. Еще одним косвенным признаком разделения стадий КВМ в космическом пространстве является отношение реального значения температуры плазмы к ожидаемому значению, вычисленному из хорошо известной корреляции  $v_{\text{СВ}} - T_{\text{ожид}}$  [17]. Промежутки времени, для которых  $T_{\text{реал}}/T_{\text{ожид}} \leq 0,5$ , свидетельствуют о том, что в межпланетном пространстве распространяется облако солнечной плазмы. Использование различных параметров межпланетной среды [18] при исследовании форбуш-понижений является неотъемлемой частью изучения наблюдаемых эффектов, позволяющей устанавливать основные причины понижений и осуществлять их правильную классификацию для дальнейшего изучения.

Форбуш-понижение в потоках галактических космических лучей (ГКЛ), произошедшее 14 декабря 2006 г., впервые было подробно изучено по данным эксперимента PAMELA (рис. 8). Как видно из рисунка, форбуш-понижение было вызвано КВМ, произошедшим 13 декабря, ударная волна достигла окрестности Земли 14 декабря, вызвав первую значительную часть понижения [19]. Затем (15 декабря) окрестности Земли достигло магнитное облако солнечной плазмы, о чем свидетельствуют спадающие профили межпланетного магнитного поля и солнечного ветра, лишенные резких флуктуаций, после чего началась фаза восстановления потока ГКЛ. Впервые благодаря уникальным характеристикам магнитного спектрометра PAMELA были изучены зависимости амплитуды и времени восстановления форбуш-понижения от жесткости для различных частиц ГКЛ, отличающихся по знаку заряда и жесткости, регистрируемых во время прямых измерений (рис. 9). Зависимость амплитуды и времени восстановления от жесткости исследовалась в девяти различных экспериментальных интервалах. Было обнаружено, что амплитуда форбуш-понижения уменьшается с увеличением жесткости. Экспоненциаль-

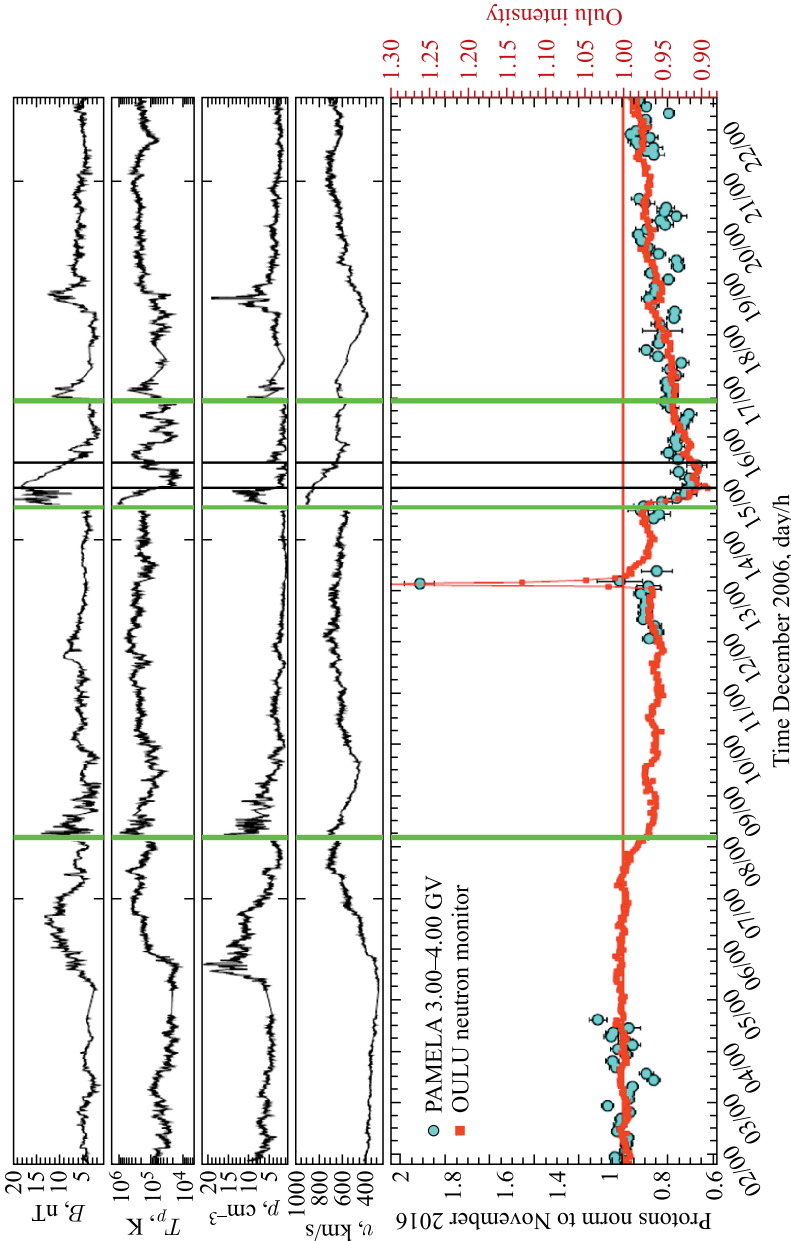


Рис. 8. Нормированный поток галактических космических протонов в диапазоне жесткостей 3–4 ГВ, зарегистрированный спектрометром PAMELA, и интенсивность нейтронного монитора Oulu [20] в течение форбуш-понижения в декабре 2006 г. в зависимости от характеристик межпланетного пространства

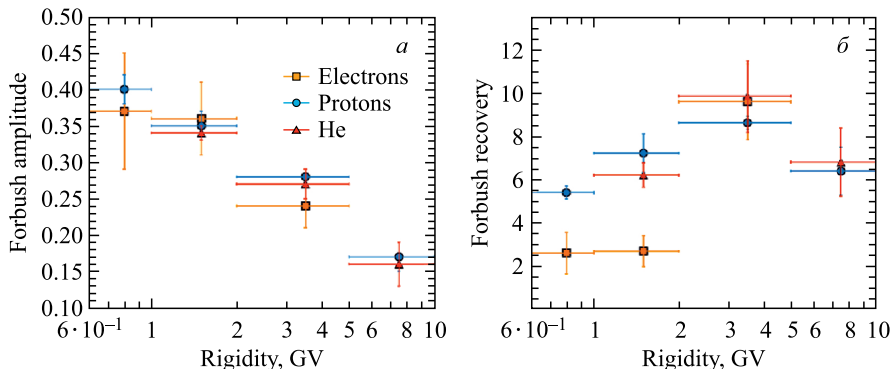


Рис. 9. Зависимости амплитуды (а) и времени восстановления (б) форбуш-понижения от жесткости по данным эксперимента PAMELA

ная аппроксимация хорошо описывает зависимость амплитуды от жесткости. Время восстановления показало тенденцию к увеличению ниже 1 ГВ, что может быть обусловлено либо загрязнением солнечными энергетическими частицами, либо реальным физическим эффектом. Выше 1 ГВ наблюдается общая тенденция к снижению. Следует отметить, что временные изменения интенсивностей протонов и гелия во время форбуш-понижения находятся в хорошем согласии, в то время как электроны с низкой жесткостью (< 2 ГВ) демонстрировали более быстрое восстановление. Это различие в восстановлении потока электронов интерпретируется как различие в глобальной картине дрейфа между протонами и электронами ГКЛ.

Изучение свойств форбуш-понижений в космических лучах и предшествующих им корональных выбросов солнечной материи с поверхности Солнца на сегодня является одной из популярных научных тем в астрофизике и физике космических лучей. Однако точное теоретическое описание наблюдаемых эффектов затруднено в силу масштабности явлений, а также большого различия их основных характеристик от одного явления к другому.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Описание распространения частиц космических лучей основано на принципе непрерывности, согласно которому изменение скорости счета частиц в выбранном объеме должно быть равно потоку частиц, пересекающих замкнутую поверхность, охватывающую данный объем, плюс скорость процессов, в которых частицы создаются или уничтожаются посредством ионизации,

неупругих столкновений, распада и т. д.:

$$\frac{dN}{dt} = - \oint \mathbf{S} da + Q,$$

где  $da$  — элемент площади поверхности;  $Q$  — функция источников. Знак минус учитывает тот факт, что при увеличении потока, проходящего через поверхность, охватывающую объем, скорость счета частиц в объеме уменьшается. В дифференциальной форме это уравнение имеет вид

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{S} = q, \quad (1)$$

где  $q$  — функция плотности источника.

В солнечном ветре поток частиц является комбинацией радиальной конвекции и рассеяния частиц на неоднородностях магнитного поля [21]. Конвекционный поток определяется просто как  $\mathbf{S}_c = n\mathbf{V}$ , где  $\mathbf{V}$  — скорость конвекции. Поток, образующийся рассеянием на магнитных неоднородностях, является основным направлением теоретических исследований за последние 50 лет.

Частица, движущаяся по спирали вдоль силовой линии магнитного поля, встречаясь с магнитной неоднородностью, может пройти сквозь неоднородность, отразиться ею или же оказаться захваченной в ее окрестности в зависимости от фазы вращения, при которой частица начинает «чувствовать» неоднородность. Это проявляется в случайном рассеянии частиц космических лучей по углам между направлением вектора скорости заряженной частицы и направлением вектора магнитного поля — питч-углом. Если плотность частиц вдоль магнитных силовых линий не изменяется, то такой процесс не приводит к дополнительному направленному потоку частиц. Однако если имеется градиент плотности частиц, питч-угловое рассеяние приводит к дополнительному потоку, который описывается первым законом Фика:  $\mathbf{S} = -k\nabla n$ .

Помимо питча углов магнитные неоднородности изменяют также и гирорадиусы частиц, вследствие чего последние могут перескочить на соседние силовые линии (рис. 10) [21]. Этот процесс также носит случайный характер и приводит к диффузионному потоку, направленному перпендикулярно основному магнитному полю.

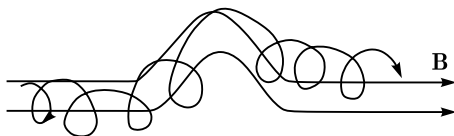


Рис. 10. Перпендикулярный дрейф частиц на неоднородностях магнитного поля

Таким образом, диффузионный поток состоит из двух компонент:  $\mathbf{S}_d = k_{\perp} \nabla n + k_{\parallel} \nabla n$ , где  $k_{\perp}$  и  $k_{\parallel}$  — коэффициенты диффузии для перпендикулярного и параллельного потоков соответственно.

Теория параллельной диффузии довольно хорошо изучена [22], в то время как теория перпендикулярной диффузии значительно сложнее, так как состоит из нескольких эффектов, включая градиентный и центробежный дрейфы. В гелиосфере усредненная скорость дрейфа частиц дается формулой [23]

$$v_{\text{дрейф}} = \frac{\beta R}{3} \nabla \times \frac{\mathbf{B}}{B^2},$$

где  $R$  — жесткость частицы. В итоге суммарный эффект рассеяния частиц магнитными неоднородностями в межпланетной среде описывается тензором диффузии космических лучей, антисимметричные компоненты которого учитывают дрейф частиц  $k_A = \beta R/3B$ :

$$K = k_{ij} = \begin{pmatrix} K_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & K_{\perp} & K_A \\ 0 & -K_A & K_{\perp} \end{pmatrix}.$$

С учетом вышесказанного диффузионный поток можно записать как  $\mathbf{S}_d = -\mathbf{K} \nabla n$  [24–26]. Полный поток частиц космических лучей в гелиосфере с учетом конвекции теперь может быть записан как  $\mathbf{S} = n\mathbf{V} - \mathbf{K} \nabla n$ . Подставляя его в уравнение непрерывности (1), получаем

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}n - \mathbf{K} \nabla n) = q. \quad (2)$$

Уравнение (2) также справедливо для усредненной по направлению функции распределения частиц космических лучей  $f(\mathbf{r}, p, t)$ :

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}f - \mathbf{K} \nabla f) = q. \quad (3)$$

В полученных уравнениях не учитывается тот факт, что частицы могут ускоряться либо замедляться посредством процессов упругого столкновения, ионизационных потерь и др. В конечном счете уравнение переноса частиц космических лучей принимает вид

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}f - \mathbf{K} \nabla f) - \frac{1}{3p^2} (\nabla \cdot \mathbf{V}) \frac{\partial}{\partial p} (p^3 f) = q. \quad (4)$$

Это уравнение впервые было получено Паркером [27] в 1965 г. в предположении о пространственной симметрии и постоянной скорости солнечного ветра ( $\mathbf{V} = \text{const}$ ). На сегодня уравнение (4) не имеет точного аналитического

решения, поэтому для его решения используются численные методы. Численное решение дифференциальных уравнений основано на методе разностных схем для частных производных, полученных из разложений Тейлора [28]. В качестве примера рассмотрим численное решение уравнения переноса космических лучей в случае сферической симметрии для стационарного потока ГКЛ при отсутствии дополнительных источников излучения. В этом случае уравнение (4) приобретает вид

$$-V \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 k \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 V) \frac{R}{3} \frac{1}{r^2} \frac{\partial f}{\partial R} = 0, \quad (5)$$

где импульс частицы был заменен на жесткость. Уравнение (5) можно переписать в следующей форме:

$$a \frac{\partial f^2}{\partial r^2} + b \frac{\partial f}{\partial r} + c \frac{\partial f}{\partial \ln R} = 0, \quad (6)$$

где

$$a = k, \quad b = -V + \frac{2k}{r} + \frac{\partial k}{\partial r}, \quad c = \frac{2V}{3r} + \frac{1}{3} \frac{\partial V}{\partial r}.$$

Уравнение (6) является уравнением параболического типа, с двойной частной производной по радиусу и частной производной по жесткости частицы. Следовательно, для решения этого уравнения должны существовать два граничных условия и одно начальное. Потребуем, чтобы скорость солнечного ветра вблизи поверхности Солнца равнялась нулю, а функция плотности космических лучей была неизменной:

$$V|_{r=r_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial f}{\partial r} \right|_{r=r_0} = 0,$$

где  $r_0$  — радиус Солнца. Граничное условие определяется тем, что энергетический спектр космических лучей на границе гелиосферы равен спектру космических лучей в межзвездном пространстве [29]:

$$J_R = R^2 f = J_{\text{LIS}}.$$

Таким образом, используя разностные схемы

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial \ln R} &= \frac{f_i^{n+1} - f_i^n}{l}, & \frac{\partial f}{\partial \ln R} &= \frac{f_{i+1}^{n+1} - f_{i-1}^{n+1}}{2h}, \\ \frac{\partial f^2}{\partial r^2} &= \frac{f_{i+1}^{n+1} - 2f_i^{n+1} + f_{i-1}^{n+1}}{h^2}, \end{aligned}$$

получаем следующую итерационную зависимость:

$$f_i^n = \left( -\frac{la}{h^2} + \frac{kb}{2h} \right) f_{i-1}^{n+1} + \left( \frac{2lc}{h^2} + 1 - lc \right) f_i^{n+1} + \left( -\frac{la}{h^2} - \frac{kb}{2h} \right) f_{i+1}^{n+1}.$$

В качестве начальных условий используется тот факт, что в диапазоне больших жесткостей спектр ГКЛ внутри гелиосферы равен спектру космических лучей в межзвездном пространстве (рис. 11). Таким образом, используя полученную итерационную зависимость, можно вычислить значения функции распределения космических лучей во всех узлах пространственной сетки, используя начальные и граничные условия. Также для решения уравнения переноса космических лучей нужно задать значения скорости солнечного ветра и радиального коэффициента диффузии космических лучей. Усредненное значение скорости солнечного ветра в период минимума солнечной активности  $\sim 500$  км/с. Радиальный коэффициент диффузии космических лучей зависит от жесткости частицы:

$$k = k_0 \beta R,$$

где  $k_0$  — константа.

Таким образом, варьируя коэффициент радиальной диффузии, можно моделировать спектры космических лучей в любой точке гелиосферы. Так,

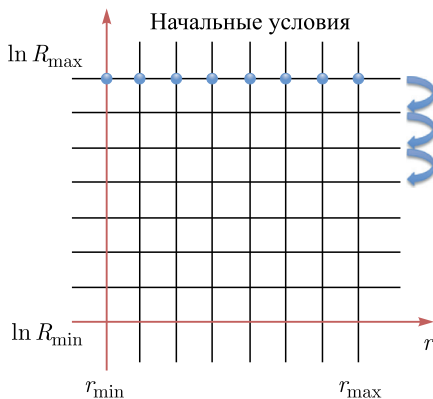


Рис. 11. Прямоугольная сетка численного решения уравнения переноса космических лучей [30]

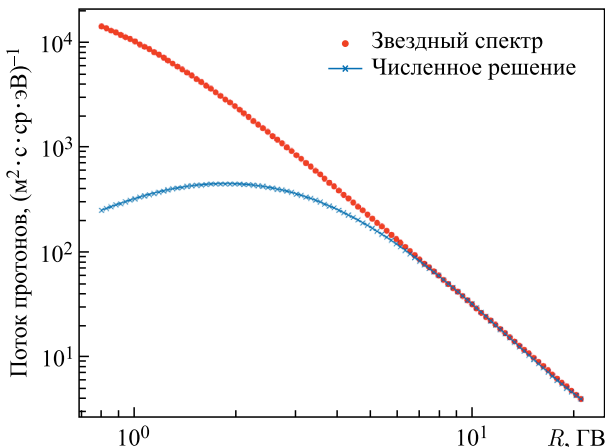


Рис. 12. Межзвездный спектр ГКЛ и численное решение уравнения переноса космических лучей



например, для значения  $k_0 = 10^{25}$  см<sup>2</sup>/с на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца решение уравнения переноса космических лучей приобретает вид, изображенный на рис. 12.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментальное изучение свойств форбуш-понижений в космических лучах и предшествующих им корональных выбросов солнечной материи с поверхности Солнца на сегодня является одной из популярных научных тем в астрофизике и физике космических лучей.

Природа кратковременных вариаций потоков космических частиц связана с процессами на Солнце, с солнечной плазмой и ее распространением в межпланетном пространстве. Сверхзвуковые структуры солнечной плазмы, распространяясь в межпланетной среде, сильно модифицируют «спокойное» межпланетное магнитное поле, тем самым изменяют компоненты тензора диффузии космических лучей в уравнении переноса. Точное теоретическое описание наблюдаемых эффектов затруднено в силу масштабности явлений, а также большого различия их основных характеристик от одного явления к другому. Поэтому для количественного описания наблюдаемых эффектов необходимо точно решить уравнение переноса частиц космических лучей численными методами в соответствии с данными, полученными спутниковой аппаратурой. Помимо детерминистических численных методов решения дифференциальных уравнений на сегодня все большей популярностью пользуются стохастические численные методы [31].

Работа выполнена за счет гранта МК-6160.2018.2 и при поддержке Министерства образования и науки РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hundhausen A. J.* Coronal Expansion and Solar Wind. Berlin: Springer, 1972.
2. *Chen F.* Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. Berlin: Springer, 2016.
3. *Mathew J. O., Forsyth R. J.* The Heliospheric Magnetic Field // *Liv. Rev. Sol. Phys.* 2013. V. 10, No. 1. P. 52.
4. *Jones G. H., Rees A., Balogh A., Forsyth R. J.* The Draping of Heliospheric Magnetic Fields Upstream of Coronal Mass Ejecta // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29, No. 1520. P. 11.
5. *Gosling J. T., Pizzo J. V.* Formation and Evolution of CIRs and Their 3D Structure // *Space Sci. Rev.* 1999. V. 89. P. 21.
6. *Wang Y. M., Sheeley N. R., Jr.* Solar Wind Speed and Coronal Flux Tube Expansion // *Astrophys. J.* 1990. V. 355. P. 726.

7. *McComas D. J., Elliott H. A., Schwadron N. A., Gosling J. T., Skoug R. M., Goldstein B. E.* The Three-Dimensional Solar Wind around Solar Maximum // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30, No. 10. P. 1517.
8. *Pizzo J. V.* The Evolution of Corotating Stream Fronts near the Ecliptic Plane in the Inner Solar System // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 94. P. 5405.
9. Max Plank Institute for Solar System Research. [https://www2.mps.mpg.de/en/aktuelles/presenotizen/presenotiz\\_20081127.html](https://www2.mps.mpg.de/en/aktuelles/presenotizen/presenotiz_20081127.html).
10. *Picozza P. et al. (PAMELA Collab.).* PAMELA — A Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-Nuclei Astrophysics // *Astropart. Phys.* 2007. V. 27. P. 296.
11. *Gopalswamy N.* Coronal Mass Ejections and Solar Radio Emissions // *Proc. of the 7th Intern. Workshop. Austrian Acad. of Sci. Press*, 2011. P. 325.
12. *Chen P. F.* Coronal Mass Ejections: Models and Their Observational Basis // *Liv. Rev. Sol. Phys.* 2011. V. 8, No. 1. P. 1.
13. *Pikelner S. B.* Fundamentals of Cosmic Electrodynamics. M.: Fizmatlit, 1961.
14. *Webb D. F., Howard T. A.* Coronal Mass Ejections: Observations // *Liv. Rev. Sol. Phys.* 2012. V. 9, No. 3. P. 27.
15. *Cane H. V.* Coronal Mass Ejections and Forbush Decreases // *Space Sci. Rev.* 2000. V. 93, No. 1–2. P. 55.
16. *Alexander D., Zurbuchen T. H., Richardson I. G.* A Brief History of CME Science // *Space Sci. Rev.* 2006. V. 123. P. 3.
17. *Richardson I. G., Cane H. V.* Regions of Abnormally Low Proton Temperature in the Solar Wind (1965–1991) and Their Association with Ejecta // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 397.
18. *Garrard T. L., Davis A. J., Hammond J. S., Sears S. R.* The ACE Science Center // *Space Sci. Rev.* 1998. V. 86, No. 1–4. P. 649.
19. *Munini R. et al. (PAMELA Collab.).* Evidence of Energy and Charge Sign Dependence of the Recovery Time for the 2006 December Forbush Event Measured by the PAMELA Experiment // *Astrophys. J.* 2018. V. 853, No. 76. P. 6.
20. *Usoskin I. G., Gil A., Kovaltsov G. A., Mihev A. L., Mikhailov V. V.* Heliospheric Modulation of Cosmic Rays during the Neutron Monitor Era: Calibration Using Pamela Data for 2006–2010 // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2017. V. 122. P. 3875.
21. *Moraal H.* Cosmic-Ray Modulation Equations // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 176, No. 1–4. P. 299.
22. *Jokipii J. R.* Cosmic-Ray Propagation. I. Charged Particles in a Random Magnetic Field // *Astrophys. J.* 1966. V. 146. P. 480.
23. *Shalci A.* Nonlinear Cosmic Ray Diffusion Theories. Berlin: Springer, 2009.
24. *Jokipii J. R., Levy H., Hubbard W. B.* Effects of Particle Drift on Cosmic-Ray Transport. I. General Properties, Application to Solar Modulation // *Astrophys. J.* 1977. V. 213. P. 861.
25. *Isenberg P. A., Jokipii J. R.* Gradient and Curvature Drifts in Magnetic Fields with Arbitrary Spatial Variation // *Astrophys. J.* 1979. V. 234. P. 746.
26. *Burger R. A., Visser D. J.* Reduction of Drift Effects Due to Solar Wind Turbulence // *Astrophys. J.* 2010. V. 725. P. 1366.
27. *Parker E. N.* The Passage of Energetic Charged Particles through Interplanetary Space // *Planet. Space Sci.* 1965. V. 13. P. 9.

28. *Chapra S. C., Canale R. P.* Numerical Methods for Engineers. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 2015.
29. *Potgieter M. S., Bisschoff D.* New Local Interstellar Spectra for Protons, Helium and Carbon Derived from PAMELA and Voyager 1 Observations // *Astrophys. Space Sci.* 2016. V. 361. P. 48.
30. *Batalha L. M. M. L.* Solar Modulation Effects on Cosmic Rays. Modelization with Force-Field Approximation, 1D and 2D Numerical Approaches and Characterization with AMS-02 Proton Fluxes. PhD Thesis. Inst. Superior Tecnico Univ. Tecnico de Lisboa, 2012.
31. *Du Toit Strauss R., Frederic. E.* A Hitch-Hiker's Guide to Stochastic Differential Equations. Solution Methods for Energetic Particle Transport in Space Physic and Astrophysics // *Space Sci. Rev.* 2017. V. 212, No. 1–2. P. 151.