

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

**Лагойда Илья Алексеевич**

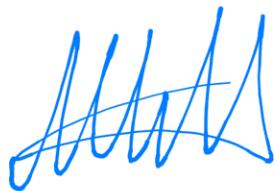
**Характеристики Форбуш понижений по данным эксперимента «ПАМЕЛА»**

Специальность 01.04.16 «Физика атомного ядра и элементарных частиц»

**Автореферат**

Диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

**Научный руководитель:**

**Воронов Сергей Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры «Экспериментальной ядерной физики и космофизики» № 7, Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

**Официальные оппоненты:**

**Свертилов Сергей Игоревич**,  
доктор физико-математических наук, профессор, и. о. зав. кафедры  
физики космоса  
Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В.  
Скobelцына Московского государственного университета имени М. В.  
Ломоносова.

**Топчиев Николай Петрович**,  
доктор физико-математических наук, высококвалифицированный  
ведущий научный сотрудник лаборатории гамма-астрономии  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии  
наук

**Абунина Мария Александровна**,  
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
лаборатории экспериментальных методов исследования вариаций  
космических лучей  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института земного магнетизма, ионосферы и распространения  
радиоволн им Н. В. Пушкова Российской академии наук.

Защита состоится «02» марта 2022 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета МИФИ.01.01 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте: <https://ds.mephi.ru>. федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Автореферат разослан «\_\_» 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного  
Совета МИФИ.01.01, д.ф.-м.н., профессор

С. Е. Улин

## **Общая характеристика работы**

### **Введение**

Резкие уменьшения регистрируемой интенсивности космических лучей (КЛ) впервые были зарегистрированы С. Е. Форбушем в 1937 г., с помощью ионизационных камер [1]. Данное явление получило название в честь своего первооткрывателя, и сегодня известно, как Форбуш понижение (ФП). Изначально предполагалось, что ФП связаны с геомагнитной активностью Земли. Однако, в 1954 году Д. А. Симпсон показал [2], что регистрируемые ФП, как и другие кратковременные вариации КЛ, имеют внеземную природу и являются откликом частиц космических лучей (КЛ) на различные процессы, происходящие на Солнце и его поверхности. Корональные выбросы массы (КВМ) с поверхности Солнца являются главной причиной ФП, регистрируемых научной аппаратурой [3]. На сегодняшний день известно, что ФП не являются локальным эффектом, а наблюдаются по всей гелиосфере на расстояниях до 100 а.е [4, 5].

КВМ представляет собой гигантскую движущуюся массу плазмы, включающую вмороженное в нее магнитное поле, и обладает специфической структурой [6]. Эта структура, распространяясь в межпланетном пространстве, искажает межпланетное магнитное поле, которое воздействует на частицы космических лучей, модулируя их потоки, что приводит к наблюдению эффекта их резкого уменьшения, то есть Форбуш понижения.

### **Актуальность**

Практически все научные исследования, выполненные на сегодняшний день в рамках изучения свойств ФП, основаны на данных наземных детекторов частиц КЛ, таких как нейтронные мониторы [7-12] и мюонные гodosкопы [13-17]. Данная аппаратура регистрирует вторичную компоненту КЛ, образовавшуюся после взаимодействия ГКЛ с атмосферой Земли. Поэтому многие истинные характеристики ФП в космических лучах могут быть искажены или утеряны после взаимодействия ГКЛ, модулированных структурой КВМ, с атмосферой и магнитным полем Земли. Более того, эффект ФП наиболее сильно проявляется в низкоэнергетической компоненте КЛ, в то время как жесткость геомагнитного обрезания для большинства наземных установок  $\gtrsim 10$  ГВ, и, следовательно, все характеристики ФП полученные с помощью наземной аппаратуры относятся к потокам КЛ в диапазоне жесткости  $\gtrsim 10$  ГВ. Этих противоречий и трудностей лишены прямые измерения потоков космических лучей вне атмосферы Земли в экспериментах на борту космических спутников. Современные космофизические эксперименты на орбите Земли, позволяют проводить длительные измерения в широком диапазоне энергий КЛ, а также исследовать проявление ФП для различных их компонент. Прямые исследования характеристик ФП, проводившиеся ранее, основаны на данных интегральных счетчиков, регистрирующих интегральные потоки частиц КЛ. Такие данные не позволяют изучать энергетические зависимости характеристик ФП. Более того, профили интенсивностей КЛ во время ФП, полученные такими приборами, зачастую сильно искажены возросшими потоками солнечных энергичных частиц (рис. 1.), что в свою очередь также не позволяет достоверно судить об амплитудах и других характеристиках изучаемого эффекта.

На сегодняшний день не существует адекватной теории генерации ФП в потоках КЛ, нет так же однозначного понимания основных процессов, ответственных за их формирования. К главным трудностям, препятствующим созданию точной теоретической модели, можно отнести значительное количество физических процессов, вовлеченных в процесс формирования ФП в потоках КЛ, а также отсутствие экспериментальных данных о характеристиках ФП. Поэтому

результаты прямых измерений характеристик ФП являются научно значимыми и актуальными. В частности, данная работа, основанная на экспериментальных данных, полученных в космофизическом эксперименте ПАМЕЛА, посвященная изучению ФП в потоках галактических протонов в интервале жесткостей от 0.7 до 20 ГВ, является одной из попыток экспериментального исследования характеристик и свойств ФП, наблюдавшихся в период проведения эксперимента ПАМЕЛА с 2006 по 2016 гг., а также их связи с КВМ.

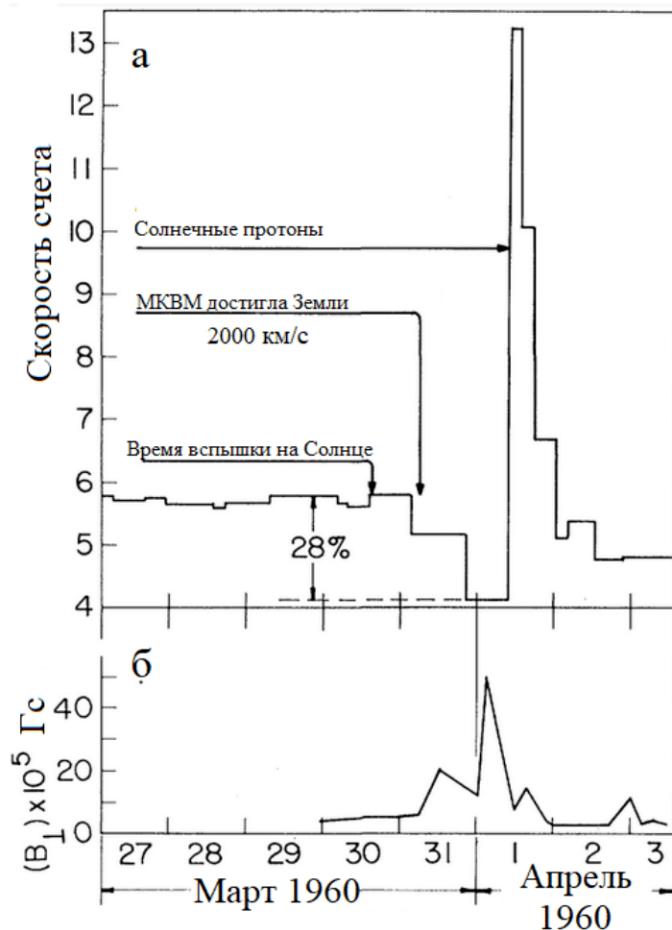


Рис. 1. а – Скорость счета (имп/с) интегральных счетчиков космического аппарата Пионер 5 ( $E_{\pi} \geq 75$  МэВ), б – значение напряженности магнитного поля, измеренное магнитометром космического аппарата Пионер 5 [18].  
МКБМ – межпланетный корональный выброс массы.

### Цели и задачи работы

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование характеристик Форбуш понижений в потоке галактических космических лучей. В рамках этого исследования были решены следующие задачи:

1. Отбор событий, связанных с ФП, собственно регистрация ФП в потоках галактических протонов, зарегистрированных спектрометром ПАМЕЛА с 2006 по 2014 гг. и построение их временных профилей. Одновременный отбор кандидатов КВМ, потенциально ответственных за формирование наблюдаемых ФП.
2. Исследование корреляций амплитуд ФП с основными характеристиками межпланетной среды во время распространения КВМ, связанных с формированием наблюдаемых явлений:

величиной модуля напряженности межпланетного магнитного поля  $B$ , скоростью солнечного ветра  $V_{\text{св}}$  и параметра - их произведения  $V_{\text{св}} \cdot B$  [11].

3. Установление связи с событиями КВМ, для отобранных событий ФП.
4. Измерение амплитуд, зарегистрированных ФП, в первичных потоках космических протонов. Изучение их зависимости от жесткости частиц в диапазоне 0.8 - 12.8 ГВ.
5. Изучение зависимостей времен восстановления интенсивности частиц КЛ во время ФП от их магнитной жесткости в диапазоне 0.8 - 12.8 ГВ.
6. Изучение характеристик, зарегистрированных ФП, в первичных потоках ядер гелия.
7. Сопоставление характеристик ФП, измеренных в эксперименте, с величинами, полученными по данным наземных нейтронных мониторов.

### **Научная новизна работы.**

На сегодняшний день большинство исследований, выполненных в рамках изучения Форбуш понижений основаны на данных, полученных сетью наземных нейтронных мониторов и мюонных гodosкопов. Данная научная аппаратура регистрирует вторичную компоненту космических лучей, образовавшуюся после взаимодействия первичных космических лучей с атмосферой Земли. Более того, данные нейтронных мониторов подвержены нежелательному вкладу от так называемого барометрического эффекта – вариаций атмосферного давления. Зависимости основных характеристик Форбуш понижений (амплитуда и время восстановления) от жесткости частиц космических лучей полученные по данным установок, расположенных на поверхности Земли, относятся к энергетическому диапазону  $\approx 10$  ГВ [10, 19, 20]. Исследования Форбуш понижений проводимые ранее на космических спутниках, осуществлялись интегральными сцинтилляционными счетчиками частиц космических лучей, регистрирующими потоки частиц с пороговыми энергиями от нескольких сотен МэВ. Такие счетчики не позволяли изучать характеристики Форбуш понижений, в различных диапазонах жесткости. Временные профили Форбуш понижений, полученные такими детекторами, подвержены нежелательному вкладу потоков солнечных энергетических частиц, исказжающих реальные характеристики Форбуш понижений [18, 21].

Научная новизна работы заключается в том, что для изучения характеристик Форбуш понижений впервые использовались данные о первичных потоках космических лучей, в диапазоне жесткости 0.8 – 20 ГВ, полученные спектрометром ПАМЕЛА с 2006 по 2014 г. Спектрометр ПАМЕЛА был запущен на орбиту Земли в июне 2006 года и был способен измерять потоки различных частиц и легких ядер космических лучей в диапазоне от нескольких сотен МэВ до нескольких сотен ГэВ. Из данных, полученных спектрометром ПАМЕЛА в период работы на орбите с 2006 по 2014 г., были отобраны события, связанные с Форбуш понижениями, амплитуда которых составила  $> 5\%$  для потока протонов ( $R = 1.1 - 2.9$  ГВ).

Впервые получены корреляционные зависимости амплитуд ФП для потока протонов в диапазоне жесткости 1.1 – 2.9 ГВ и характеристик межпланетного пространства, таких, как скорость солнечного ветра  $V_{\text{св}}$ , величина модуля напряженности межпланетного магнитного поля  $B$ , во время распространения КВМ, ответственных за формирование наблюдаемых ФП, а также их нормированного произведения  $V_{\text{св}} \cdot B$  [11].

Впервые получены зависимости амплитуд ФП от жесткости частиц КЛ в потоках первичных космических лучей в диапазоне жесткости 0.8 – 12.9 ГВ, получен степенной закон

зависимости амплитуды ФП от жесткости частиц  $A_{\text{ФП}} = CR^{-\gamma}$ , где  $A_{\text{ФП}}$  – амплитуда ФП для выбранного интервала жесткости  $R$  частиц КЛ,  $\gamma$  – показатель степени, равный  $0.4 \pm 0.1$ , С – постоянный коэффициент, примерно равный  $0.4 \pm 0.1$ .

Впервые, с помощью прямых измерений на орбите Земли, установлено что время восстановления ФП зависит от жесткости частиц КЛ, а также от свойств корональных выбросов масс ответственных за формирование наблюдаемых ФП. Данная зависимость может быть описана степенным законом  $\tau = CR^{-\gamma}$ , где  $\tau$  – время восстановления ФП для выбранного интервала жесткости  $R$  частиц КЛ,  $\gamma$  – показатель степени, лежащий в диапазоне  $0.3 – 0.4$ , С – постоянный коэффициент, лежащий в диапазоне  $8.2 – 8.3$ .

Впервые получен степенной закон распределения амплитуд ФП, вычисленных для первичного потока КЛ ( $R = 1.1 – 2.9$  ГВ) от времени распространения КВМ от Солнца до Земли, вида  $A_{\text{ФП}} = \tau_{\text{СЗ}}^{-\alpha}$ , где  $A_{\text{ФП}}$  – амплитуда ФП для выбранного интервала жесткости частиц КЛ; показатель  $\alpha$  близок к величине 2.5.

Впервые получены характеристики Форбуш понижений в первичных потоках ядер гелия.

Впервые установлено, что амплитуды ФП, полученные при прямых измерениях вне атмосферы для потока протонов КЛ, в среднем в четыре раза больше, чем амплитуды для тех же событий в потоках вторичных космических лучей, полученных по данным наземных нейтронных мониторов.

### **Научная и практическая значимость работы.**

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для разработки и проверки существующих теоретических моделей ФП. Они также могут быть использованы при разработке моделей КВМ.

Одновременно их можно применить для калибровки показаний наземных нейтронных мониторов и мюонных годоскопов на реальные значения потоков первичных космических лучей.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Корреляционные зависимости амплитуд ФП, вычисленных для потока космических протонов ( $R = 1.1 – 2.9$  ГВ), от основных характеристик межпланетного пространства: скорости солнечного ветра  $V_{\text{св}}$ , межпланетного магнитного поля  $B$ , а также их нормированного произведения  $V_{\text{св}} \cdot B$ , во время распространения КВМ.

2. Результаты анализа амплитуд ФП в потоках первичной компоненты КЛ. Закон распределения амплитуд ФП в зависимости от жесткости частиц КЛ  $A_{\text{ФП}} = C \cdot R^{-\gamma}$ , где  $A_{\text{ФП}}$  – амплитуда ФП для выбранного интервала жесткости  $R$  частиц КЛ, а  $\gamma$  показатель степени, примерно равный  $0.4 \pm 0.1$ , С - постоянный коэффициент примерно равный  $0.4 \pm 0.1$

3. Результаты сопоставления амплитуд ФП, полученных по данным внеатмосферного эксперимента ПАМЕЛА с данными полученными на поверхности Земли.

4. Результаты анализа амплитуд ФП и их зависимости от жесткости частиц КЛ и характеристик КВМ, связанных с формированием наблюдаемых ФП.

5. Результаты анализа времен восстановления ФП и их зависимости от жесткости частиц КЛ и характеристик КВМ, связанных с формированием наблюдаемых ФП.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов работы основана на надежности данных и многочисленных результатов, полученных в эксперименте ПАМЕЛА при измерении потоков частиц и античастиц

в широком диапазоне энергий, и подтвержденных в других более поздних экспериментах, таких, как Ферми, AMS-2 и других; на использовании отработанных классических методов обработки данных и корреляционного анализа; на временных совпадениях результатов с данными наземных установок и экспериментов, в которых исследовались ФП и КВМ.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы (121 наименования). Ее объем составляет 119 страниц, включая список литературы, 70 рисунков, 12 таблиц.

### **Апробация работы**

Основные результаты работы были представлены на следующих российских и международных конференциях и научных школах:

International School of Space Science (2017, L'aquila, Italy)

3rd international conference on particle physics and astrophysics ICPPA (2017, Moscow, Russia)

XXVI Европейский симпозиум по космическим лучам ECRS (2018, Барнаул, Россия)

The 2nd International Symposium on Cosmic Rays and Astrophysics ISCRA (2019, Moscow, Russia)

5th International Conference on Particle Physics and Astrophysics (2020, Moscow, Russia)

36 Всероссийская конференция по космическим лучам (2020, Москва, Россия)

По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ в рецензируемых изданиях в период с 2017 по 2021 гг., из которых 3 работы в журналах, включенных в перечень ВАК, и 3 работы в журналах, включенных в базы Web of Science и Scopus.

1. И. А. Лагойда, С. А. Воронов, В. В. Михайлов, М. Д. Нгобени. Энергетические зависимости основных характеристик Форбуш понижений по данным эксперимента ПАМЕЛА, 2021, Известия РАН. Серия Физическая, Т. 85. В. 11. С. 1618-1621. (Перечень ВАК)
2. Lagoida I. A., Voronov S. A., Mikhailov V. V. Rigidity dependences of the main characteristics of Forbush decreases. 2020, J. Phys.: Conf. Ser., V. 1690. P. 012009. (Web of Science и Scopus)
3. И. А. Лагойда, С. А. Воронов, В. В. Михайлов. Природа кратковременных вариаций потоков космических лучей. 2019, Физика элементарных частиц и атомного ядра, Т. 50. В. 6. С. 1077-1094. (Перечень ВАК)
4. Лагойда И. А., Воронов С. А., Михайлов В. В. Форбуш-понижения в потоках галактических космических лучей по данным эксперимента ПАМЕЛА //Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2019. – Т. 83. – №. 8. – С. 1070-1072. (Перечень ВАК)
5. Lagoida I. A., Voronov S. A., Mikhailov V. V. Characteristics of Forbush Decreases Measured by the PAMELA Instrument During 2006–2014, 2019, Physics of Atomic Nuclei. V. 82. N. 6. P. 750-753. (Web of Science и Scopus)
6. Lagoida I. A., Voronov S. A., Mikhailov V. V. Investigations of Forbush decreases in the PAMELA experiment, 2017, Phys.: Conf. Ser., V. 798. P. 012038. (Web of Science и Scopus)

## **Личный вклад автора в публикациях**

Все результаты, полученные в работах выполнены автором лично либо при его определяющем участии. В работе [1, 2] исследованы зависимости амплитуд и времен восстановления Форбуш понижений от жесткости частиц в первичных потоках частиц космических лучей. В работе [3] описана методика идентификации различных стадий структуры межпланетных корональных выбросов масс в окрестности Земли, вовремя Форбуш понижений. В работе [4] получены корреляционные зависимости амплитуд Форбуш понижений вычисленных в потоках первичных протонов ( $R = 1.1 - 2.9 \text{ ГВ}$ ) от характеристик межпланетного пространства, таких как скорость солнечного ветра и значение модуля напряженности межпланетного магнитного поля. В работе [5] получены зависимости амплитуд Форбуш понижений от жесткости частиц космических лучей. В работе [6] опубликован временной профиль потоков первичных ядер гелия во время Форбуш понижения.

## **Содержание работы**

**Введение** посвящено общей характеристике выполненной работы, в данном разделе поясняется важность и актуальность работы.

**Глава 1** «Космические лучи в гелиосфере». В данной главе представлены современные представления о структуре Солнца и гелиосферы. Описаны основные процессы взаимодействия частиц космических лучей с солнечным ветром и солнечным магнитным полем, а также механизмы генерации кратковременных вариаций космических лучей.

**Глава 2** «Форбуш понижения в потоках космических лучей» Эффект Форбуш понижения заключается в резком уменьшении регистрируемой интенсивности космических лучей, которое часто сопровождается магнитными бурями на Земле. Впервые такое явление было зарегистрировано С. Форбушем в 1937 году, с помощью ионизационных камер [1]. Главной причиной Форбуш понижений являются корональные выбросы масс (КВМ) с поверхности Солнца - огромные сгустки солнечной материи с вмороженным в нее магнитным полем, распространяющиеся в межпланетном пространстве и часто сопровождающиеся солнечными вспышками. КВМ распространяющийся в межпланетной среде называется межпланетным корональным выбросом массы (МКВМ). МКВМ локально изменяет структуру межпланетного магнитного поля, что в свою очередь проявляется уменьшении регистрируемой интенсивности космических лучей, а именно Форбуш понижении [3].

Структура классического КВМ/МКВМ, состоит из трех стадий [22]:

1. Ударная волна – сжатая, быстро движущаяся солнечная плазма.
2. Турбулентная область – образовавшаяся после прохождения ударной волны. Данная область характеризуются возросшим уровнем флюктуаций величин и направлений компонент скорости солнечного ветра, и напряженностей межпланетного магнитного поля.
3. Магнитное облако – более медленная стадия КВМ, характеризующаяся возросшими значениями модуля напряжённости межпланетного магнитного поля, которые лишены резких флюктуаций. Линии напряжённости магнитного облака замкнуты на Солнце.

На сегодняшний день классическим Форбуш понижением считается двухступенчатый профиль понижения интенсивности КЛ, первая стадия снижения которого соответствует прохождению ударной волны, а вторая вызвана прохождением магнитного облака в точке регистрации [3] (рис. 2).

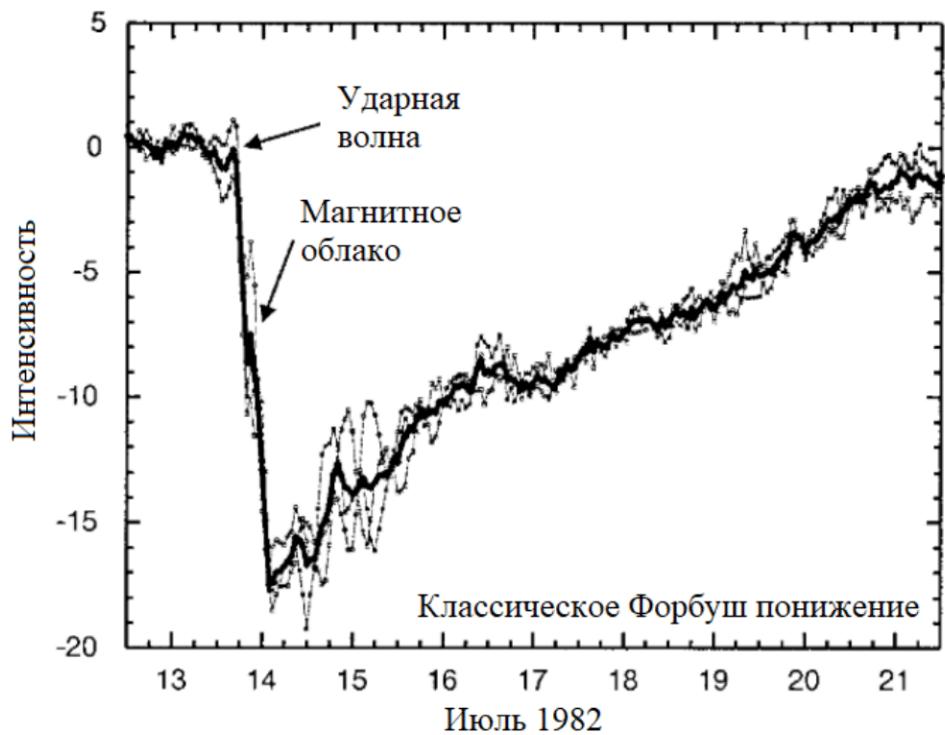


Рис. 2. Классический двухступенчатый профиль Форбуш понижения зарегистрированный наземным нейтронным монитором [3].

Однако, колоссальный разброс физических характеристик КВМ, проявляется в большом различии свойств Форбуш понижений, регистрируемых в окрестности Земли. Поэтому события, связанные с Форбуш понижениями, предварительно необходимо классифицировать по группам со схожими характеристиками КВМ. Для этого могут быть использованы данные хронографов спутниковых обсерваторий, которые ведут непрерывное наблюдение за солнечной поверхностью [23].

Аналогично, события Форбуш понижений, должны быть классифицированы по свойствам и структуре МКВМ наблюдаемым в окрестности Земли. Одним из способов классификации МКВМ, является изучение временных профилей основных характеристик межпланетного пространства, таких как скорость солнечного ветра, модуль напряженности межпланетного магнитного поля, а также температура протонной плазмы. На рис. 3., изображено Форбуш понижение, зарегистрированное спектрометром ПАМЕЛА в потоке первичных протонов в диапазоне жесткости (1.1 - 2.9 ГВ). Как видно из рисунка, временные профили напряженности межпланетного магнитного поля и скорости солнечного ветра, характеризуются резким увеличением в начале фазы снижения потока космических лучей, что свидетельствует о прохождении ударной волны. Затем появляются значительные флуктуации вектора напряженности межпланетного магнитного поля - область турбулентности, которые впоследствии сменяются относительно спокойными и спадающими временными профилями скорости солнечного ветра и модуля напряженности межпланетного магнитного поля. Однако, магнитное облако не всегда удается точно определить из временных профилей скорости солнечного ветра и модуля напряженности межпланетного магнитного поля. На сегодняшний день известен целый набор косвенных критериев, которые коррелируют с распространением облака магнитной плазмы в точке регистрации [24]. Одним из таких критериев является отношение значений реальной и ожидаемой температуры протонной плазмы.

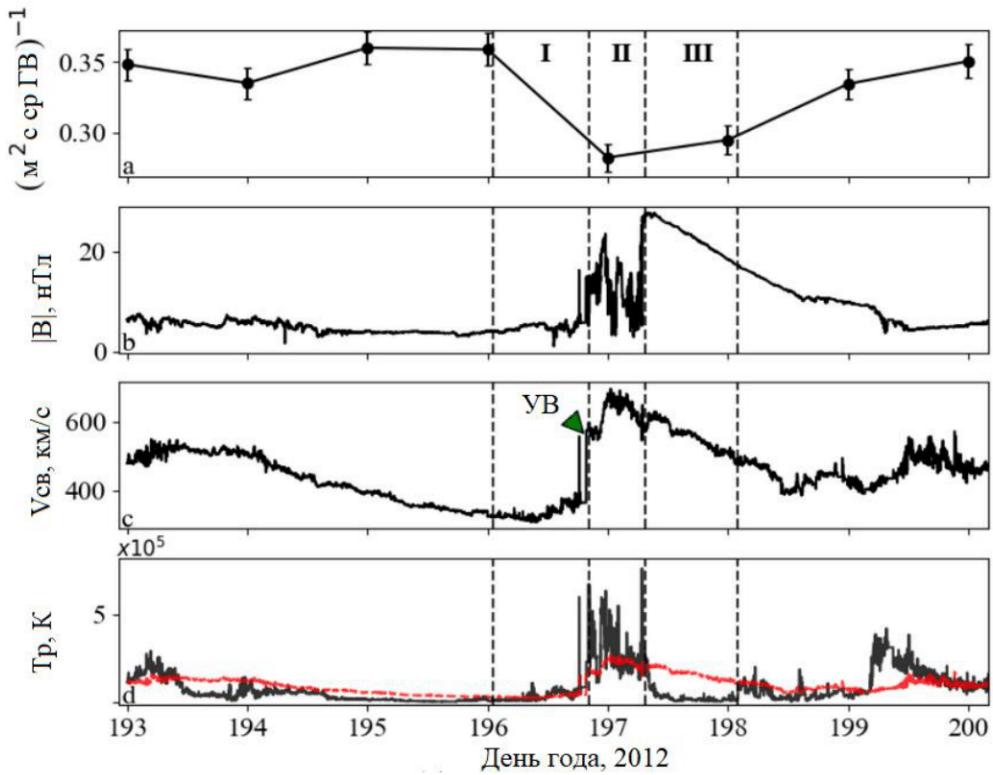


Рис. 3. Форбуш понижение в потоке космических протонов ( $R = 1.1 - 2.9$  ГВ) и соответствующие ему стадии МКВМ вычисленные с помощью временных значений скорости солнечного ветра, модуля напряженности межпланетного магнитного поля и температуры протонной плазмы [25].

Области в которых  $T_{\text{реал}}/T_{\text{ожид}} < 0.5$  свидетельствуют о распространении магнитного облака в точке регистрации. Ожидаемая температура плазмы вычисляется согласно эмпирически установленной корреляционной зависимости значений температур протонной плазмы и скоростей солнечного ветра:

$$T_{\text{ожид}} = (0.0106 V_{\text{св}} - 0.278)^3 / R, \text{ для } V_{\text{св}} \leq 500 \text{ км/с}$$

$$T_{\text{ожид}} = (0.0106 V_{\text{св}} - 0.278) / R, \text{ для } V_{\text{св}} > 500 \text{ км/с.}$$

$R$  - расстояние от Солнца до точки в которой регистрируется значение скорости солнечного ветра, выраженное в астрономических единицах.

**Глава 3 «Эксперимент ПАМЕЛА».** ПАМЕЛА – спектрометр, специально разработанный для изучения потоков заряженных частиц [26, 27, 28, 29], который был помещен в специальный герметичный корпус и был запущен на орбиту Земли в составе спутника Ресурс-ДК 1 15-го июня 2006 года с космодрома Байконур. Спутник Ресурс-ДК 1 находился на квазиполярной орбите с наклонением  $70^\circ$  и высотой 350 - 610 км.

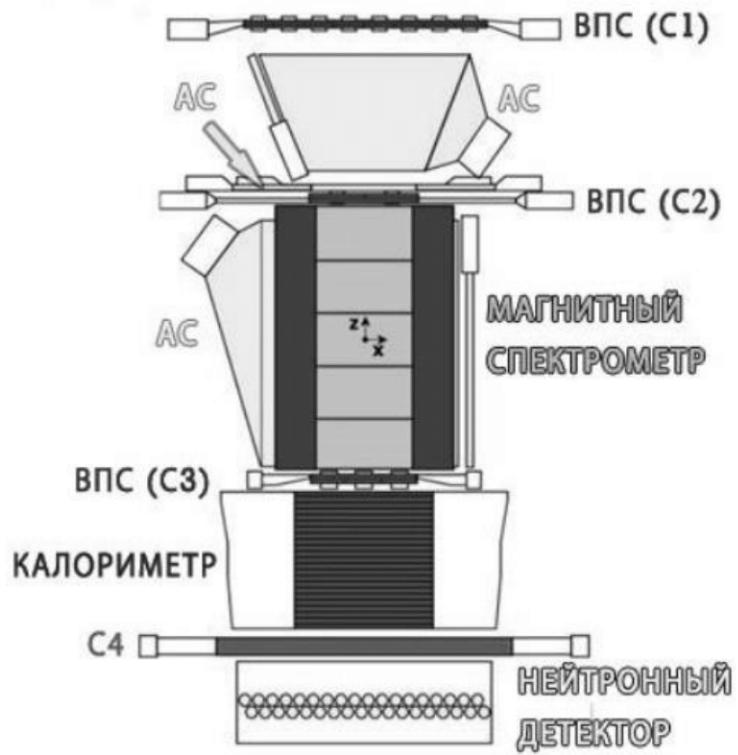


Рис. 4. Спектрометр ПАМЕЛА.

Основные возможности спектрометра ПАМЕЛА:

- измерение спектров антипротонов в диапазоне энергий 60 МэВ - 180 ГэВ
- измерение спектров позитронов в диапазоне энергий 50 МэВ - 250 ГэВ
- измерение спектров протонов в диапазоне энергий 80 МэВ - 700 ГэВ
- измерение спектров электронов в диапазоне энергий 50 МэВ - 600 ГэВ
- измерение спектров легких ядер ( $Z \leq 6$ ) в диапазоне энергий 0.1 - 300 ГэВ/нукл

Спектрометр ПАМЕЛА состоял из следующих детекторов и детектирующих систем (рис. 4):

- времяпролетной системы (ВПС), состоящая из трех групп сцинтилляторов (C1, C2, C3)
- магнитного спектрометра, состоящего из 5 модулей, сделанных из постоянного магнита, между которыми расположены 6 плоскостей кремниевых микростриповых детекторов. Средняя величина магнитного поля внутри магнитного спектрометра составляла 0.43 Тл.
- электромагнитного калориметра, состоящего из 22 вольфрамовых пластин, каждая из которых расположена между двумя кремниевыми стриповыми плоскостями.
- систем антисовпадений, состоящих из пластических сцинтилляторов, расположенных по бокам и сверху магнитного спектрометра.
- нейтронного детектора.

**Глава 4 «Характеристики Форбуш понижений по данным эксперимента ПАМЕЛА».** В качестве первого этапа отбора событий, связанных с Форбуш понижениями в потоках первичных частиц КЛ, был использован поток космических протонов, зарегистрированный спектрометром ПАМЕЛА с 2006 по 2014 г, в диапазоне жесткости 1.1 - 2.9 ГВ. На рис. 5. показана скорость счета главного триггера спектрометра ПАМЕЛА для всего интервала экспериментальных измерений, начиная с 2006 г. Пики интенсивностей на данном рисунке, соответствуют распространению возросших потоков солнечных энергичных частиц, а, следовательно, МКВМ и ФП. Как видно из

рисунка, МКВМ и соответствующие им ФП, практически не происходят в течении 2006 - 2009 годов, за исключением одного выделенного события в декабре 2006 г. произошедшего во время минимума цикла солнечной активности. Промежуток с 2007 до 2010 года характеризуется относительно спокойными условиями солнечной активности, в течении которого не было зарегистрировано значительных ФП.

Всего было отобрано 29 событий, связанных с понижением интенсивности КЛ, амплитуда которых  $\geq 5\%$  для потока первичных протонов в диапазоне жесткости 1.1 - 2.9 ГВ. В данном отборе, события, связанные с 27 дневными вариациями, имевшими место в 2007 и 2014 годах, не рассматривались. Даты минимумов понижений, зарегистрированных в потоке первичных протонов показаны в таблице 1. Также в таблице указаны максимальные значения скорости солнечного ветра и модуля напряженности межпланетного магнитного поля во время наблюдаемого эффекта ФП. Данные о физических характеристиках межпланетного пространства были взяты из базы данных OMNI [25].

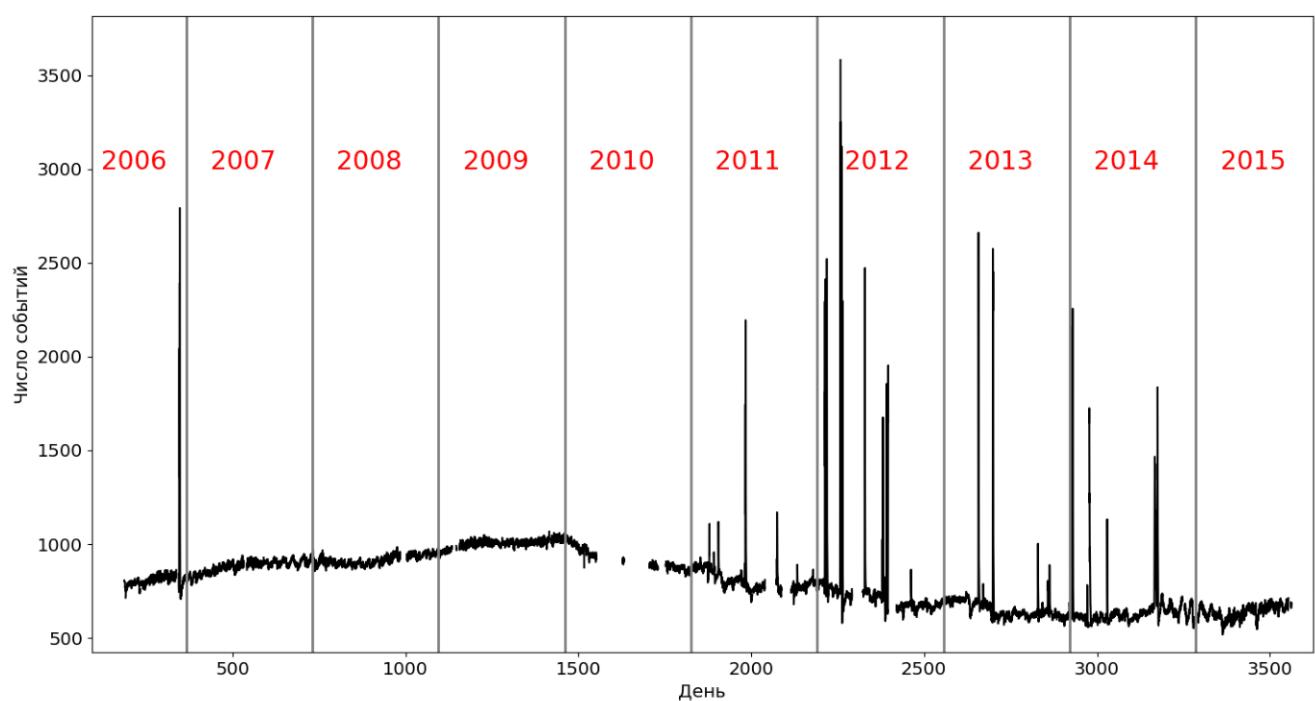


Рис. 5. Скорость счета главного триггера спектрометра ПАМЕЛА на протяжении всего эксперимента.

Таблица 1. Отобранные события, связанные с кратковременными понижениями значений потоков КЛ, зарегистрированные спектрометром ПАМЕЛА в период с 2006 по 2014 г.

| Дата минимума понижения | $A_{\text{памела}}$ ,<br>(1.1 - 2.9 ГВ) | $B_{\text{макс}}$ , нТл | $V_{\text{св\_макс}}$ ,<br>км/с |
|-------------------------|---|-------------------------|---------------------------------|
| 14/12/2006              | $29.5 \pm 1$                            | 19.7                    | 925                             |
| 12/01/2010              | $5.5 \pm 1.5$                           | 13.7                    | 538                             |
| 23/03/2010              | $11 \pm 1.1$                            | 18.8                    | 521                             |
| 16/09/2010              | $11.1 \pm 1$                            | 10                      | 500                             |

|            |                |      |       |
|------------|----------------|------|-------|
| 19/10/2010 | $11.5 \pm 1$   | 10.1 | 455   |
| 06/12/2010 | $7.1 \pm 1$    | 9    | 42    |
| 15/12/2010 | $13 \pm 1.7$   | 13   | 672   |
| 09/01/2011 | $9.6 \pm 1.5$  | 15.7 | 657   |
| 15/02/2011 | $9.8 \pm 1.3$  | 18.8 | 497   |
| 19/02/2011 | $17.6 \pm 2$   | 31   | 691   |
| 04/03/2011 | $16 \pm 2.1$   | 17   | 700   |
| 07/04/2011 | $18.6 \pm 2$   | 16.3 | 604   |
| 24/06/2011 | $13.2 \pm 1.6$ | 10.8 | 679   |
| 15/02/2012 | $11.5 \pm 2.2$ | 11   | 420   |
| 28/02/2012 | $10.8 \pm 1.9$ | 15   | 493   |
| 08/03/2012 | $40 \pm 2.9$   | 41   | 796   |
| 06/04/2012 | $16 \pm 1.6$   | 12   | 380   |
| 16/06/2012 | $18 \pm 4$     | 41   | 533   |
| 06/07/2012 | $10.4 \pm 1.5$ | 10.3 | 547   |
| 15/07/2012 | $24 \pm 2$     | 27.7 | 683.6 |
| 28/08/2012 | $12.8 \pm 2$   | 10   | 700   |
| 07/09/2012 | $19.7 \pm 2.1$ | 15.2 | 545   |
| 19/03/2013 | $22.9 \pm 3$   | 21.3 | 753   |
| 14/04/2013 | $18.6 \pm 1.8$ | 14.4 | 529   |
| 06/05/2013 | $12.5 \pm 1.4$ | 12   | 550   |
| 22/05/2013 | $13 \pm 4$     | 13.5 | 471   |
| 10/01/2014 | $7 \pm 2$      | 12.2 | 436   |
| 01/03/2014 | $17.6 \pm 1.6$ | 22   | 480.5 |

|            |        |    |     |
|------------|--------|----|-----|
| 06/04/2014 | 15.5±3 | 18 | 516 |
|------------|--------|----|-----|

Корреляционный анализ основных свойств ФП и характеристик межпланетного пространства, участвующих в теории модуляции космических лучей в гелиосфере получил широкое распространение в качестве метода, позволяющего оценить вклад того или иного процесса в характер наблюдаемых характеристик ФП. На сегодняшний день, роли различных процессов в формировании амплитуды ФП не установлены. Так же неизвестно, какой процесс является преобладающим. Положительные корреляции амплитуд ФП со значениями скорости солнечного ветра могут свидетельствовать о том, что определяющим процессом в формировании амплитуды ФП является диффузионно конвекционный процесс. В тоже время, такие корреляции амплитуд ФП с характеристиками межпланетного магнитного поля, такими, как значение его напряженности, могут создавать предпосылки, позволяющие выделить процесс рассеяния частиц КЛ на магнитных неоднородностях, в качестве преобладающего процесса, модулирующего амплитуду ФП.

Коэффициент корреляции амплитуд, отобранных событий (табл. 1.) с максимальными значениями скорости солнечного ветра, находится на уровне  $\sim 0.7$ . Аналогичный коэффициент корреляции получен для зависимости амплитуд ФП от значения модуля напряженности межпланетного магнитного поля. Нормированное произведение этих характеристик ( $V_{cb} \cdot B$ ) [11] коррелирует с амплитудами ФП на уровне  $\sim 0.8$ . Нормировочные значения соответствуют спокойным условиям межпланетного пространства, обычно находящимся на уровне 500 км/с и 5 нТл. Таким образом, амплитуда ФП зависит от одновременных увеличений и скорости солнечного ветра и напряженности межпланетного магнитного поля.

Для сравнения амплитуд ФП вычисленных на орбите Земли с данными наземных установок, были использованы данные с трех нейтронных мониторов с различными значениями жесткости геомагнитного обрезания. Первый нейтронный монитор Оулу, находится в г. Оулу (Финляндия) и характеризуется значением жесткости геомагнитного обрезания  $R_c \sim 0.8$  ГВ [30], второй нейтронный монитор Москва, находится в городе Троицк (Россия), его жесткость геомагнитного обрезания находится на уровне  $R_c \sim 2$  ГВ [30], третий нейтронный монитор Рим, находится в Риме (Италия) и характеризуется значением жесткости геомагнитного обрезания на уровне  $R_c \sim 6$  ГВ [30]. Три интервала жесткостей были выбраны (I: 0.8 - 20 ГВ, II: 2.3 - 20 ГВ, III: 6.2 - 20 ГВ) в качестве каналов соответствия, диапазонам жесткостей потоков вторичной компоненты КЛ, частицы которых способны внести вклад в интенсивность выбранных нейтронных мониторов - Оулу, Москва, Рим соответственно.

Коэффициент корреляции амплитуд для всех трех зависимостей находится на уровне 0.8 - 0.9. Исходя из полученных зависимостей, амплитуда эффекта ФП вычисленная в первичном потоке КЛ в среднем в 4 раза больше, чем амплитуда соответствующего эффекта, зарегистрированная с помощью аппаратуры на поверхности Земли. Так, например, амплитуды ФП полученные для потока протонов (0.8 - 20 ГВ) заключены в диапазоне 5 – 35 %, в то время как соответствующие амплитуды полученные по данным нейтронного монитора Оулу, находятся в диапазоне 2 – 13 %. Таким образом, изучение амплитуд ФП по данным спутниковых экспериментов, в среднем в 4 раза чувствительнее, в сравнении с классическими методами, которые основаны на данных наземных нейтронных мониторов.

Огромное многообразие КВМ и соответствующих их МКВМ проявляется в большом разнообразии различных ФП регистрируемых спутниковой и наземной аппаратурой.

Следовательно, события ФП должны быть классифицированы как по характеристикам КВМ, в окрестности Солнца, так и по характеристикам МКВМ наблюдаемым в окрестности Земли. В данной работе, для дальнейшей классификации отобранных событий и для приближения выборки отобранных событий ФП к классическому представлению об изучаемом эффекте, события ФП будут считаться значимыми и соответственно “классическими”, только если:

1. Установлена связь между наблюдаемым ФП, и мощным КВМ или несколькими КВМ потенциально ответственными за формирование наблюдаемого ФП в окрестности Земли.
2. Структуры МКВМ отчетливо различимы во временных профилях скорости солнечного ветра, модуля напряженности межпланетного магнитного поля и температуры протонной плазмы.

ФП зарегистрированное спектрометром ПАМЕЛА 18 марта 2013 года, отвечало данному набору критериев. Данное событие, с большой долей вероятности, было вызвано одним мощным КВМ и соответствующим ему МКВМ. Согласно каталогу МКВМ космического аппарата Wind [31] ударная волна достигла окрестности Земли 17 марта в 05:21 UT (табл. 2). КВМ, потенциально ответственное за формирование наблюдаемого ФП, было зарегистрировано обсерваторией SOHO 15 марта в 03:24 UT (табл. 3). Временные профили наблюдаемого ФП, для потоков протонов и ядер гелия показаны на рисунках 6 - 7. Временные профили основных характеристик межпланетного пространства, во время наблюдаемого ФП, характеризуются наличием одного полноценного МКВМ наблюдаемого в окрестности Земли (рис. 8).

Связь с КВМ/МКВМ была установлена для 10 событий ФП. Амплитуды данных событий в потоке первичных протонов ( $R = 1.1 - 12.8$  ГВ) и ядер гелия ( $R = 1 - 15.6$  ГВ), в порядке убывания показаны в таблице 4.

Таблица 2. МКВМ наблюдаемые спутником Wind в марте 2013 года

| Дата регистрации ударной волны | Дата регистрации магнитного облака | Дата завершения регистрации магнитного облака |
|--------------------------------|------------------------------------|---|
| 2013.03.17<br>05:21            | 2013.03.17<br>14:19                | 2013.03.19<br>16:04                           |

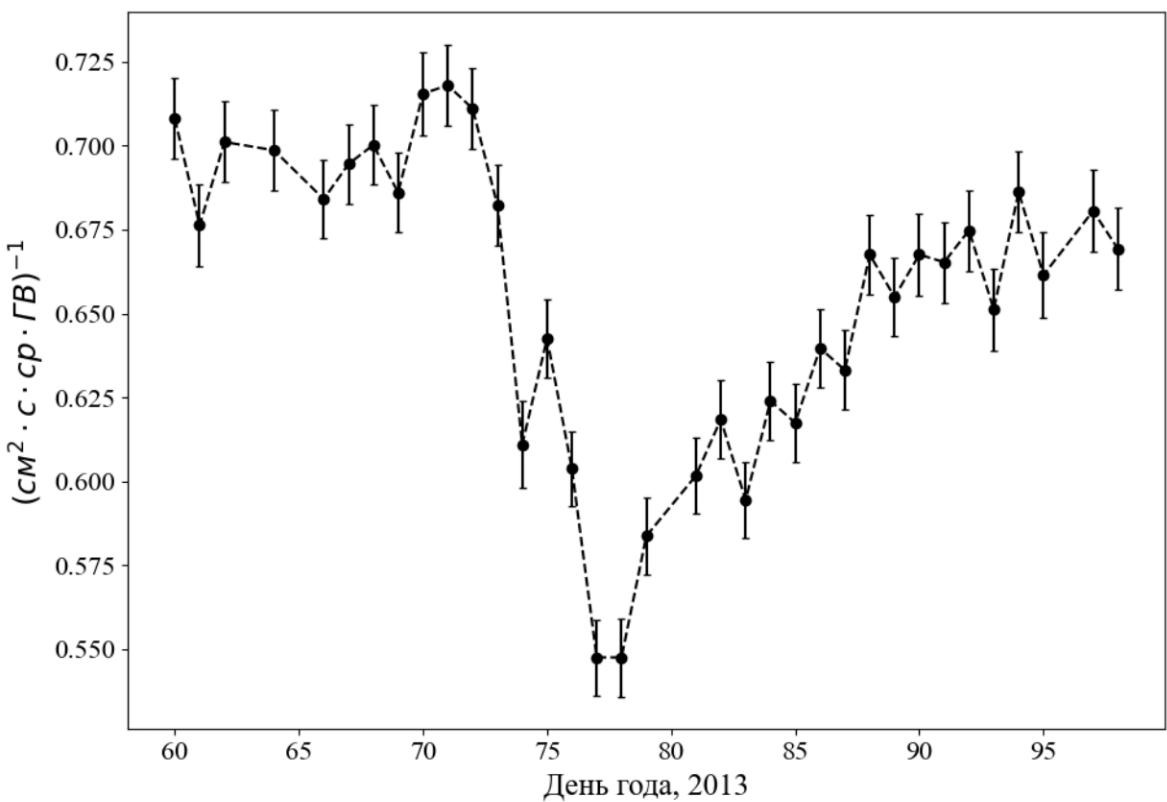


Рис. 6. ФП зарегистрированное спектрометром ПАМЕЛА в потоке первичных протонов ( $R = 1.1$  - 12.8 ГВ) в марте 2013 года, амплитуда составил  $21.2 \pm 3.2\%$ .

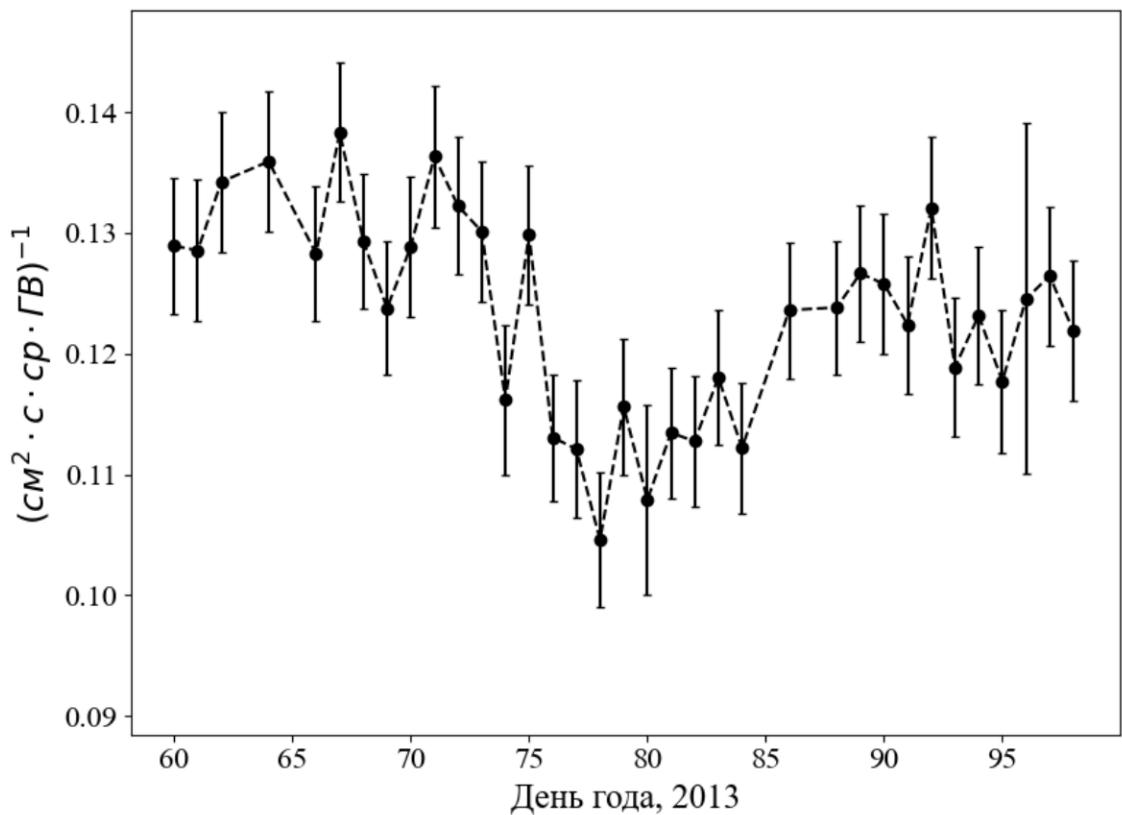


Рис. 7. ФП зарегистрированное спектрометром ПАМЕЛА в потоке первичных ядер гелия ( $R = 1$  - 15.6 ГВ) в марте 2013 года амплитуда составила  $20 \pm 4.5\%$ .

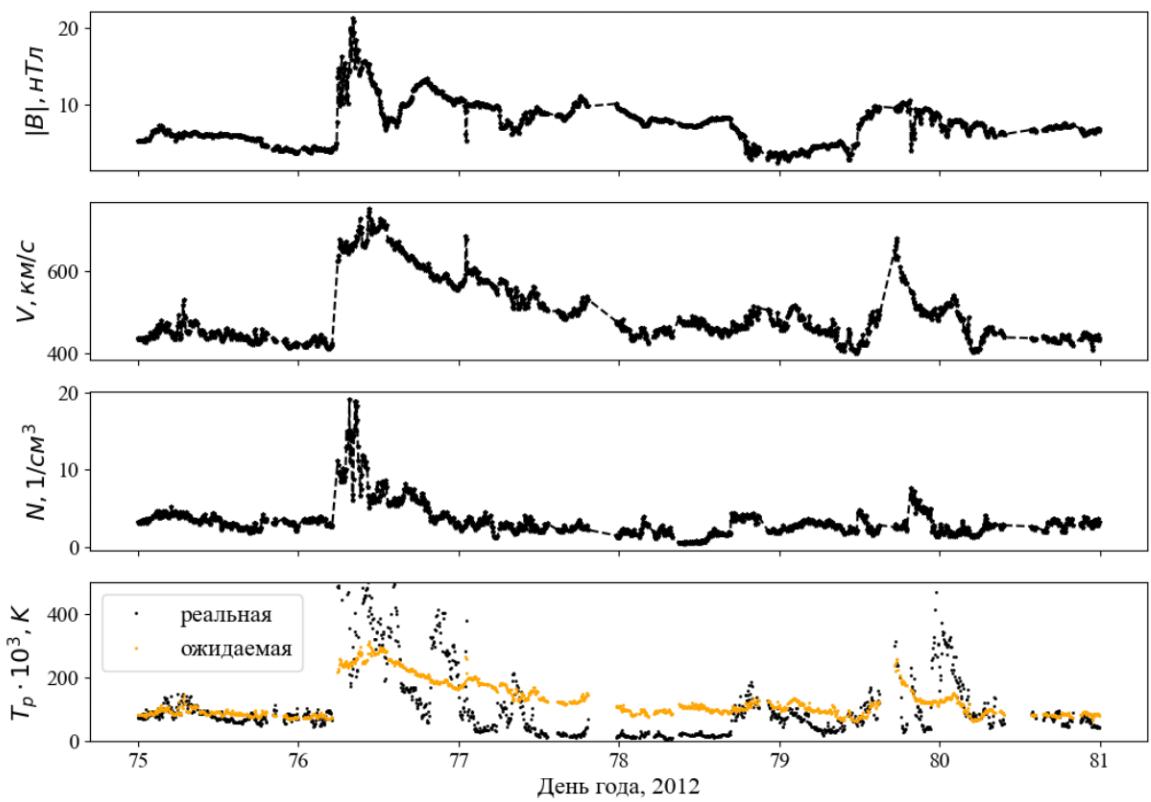


Рис. 8. Временные профили основных характеристик межпланетного пространства во время ФП в марте 2013 года

Таблица 3. КВМ ответственные за формирование ФП в марте 2013 года

| Дата регистрации, UTC  | Угол раствора КВМ | Скорость на расстоянии $20R_{\text{Солнца}}$ , км/с | Масса, г         | Кинетическая энергия, эрг | $\tau_{\text{СЗ}}$ , сутки |
|------------------------|-------------------|---|------------------|---------------------------|----------------------------|
| 15.03.2013<br>07:12:05 | 360               | 1161  | $\sim 10^{16^2}$ | $\sim 10^{31^2}$          | $\sim 1.4$                 |

Таблица 4. Амплитуды ФП, полученные для потока протонов ( $R = 1.1 - 12.9$  ГВ) и ядер гелия ( $R = 1 - 15.6$  ГВ)

| Дата ФП    | Амплитуда в потоке протонов, % | Амплитуда в потоке ядер гелия, % |
|------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 08.03.2012 | $32.6 \pm 2.6$                 | $37.1 \pm 5.2$                   |
| 14.12.2006 | $31.7 \pm 2$                   | $35 \pm 5$                       |
| 18.03.2013 | $21.2 \pm 2.9$                 | $20 \pm 4$                       |
| 03.09.2013 | $15.5 \pm 2.8$                 | -                                |

|            |                |                |
|------------|----------------|----------------|
| 18.04.2014 | $14.8 \pm 3$   | $17.7 \pm 4.9$ |
| 14.04.2013 | $13.8 \pm 2.5$ | $17.8 \pm 5.3$ |
| 25.10.2011 | $11.8 \pm 2.5$ | $12.5 \pm 4.3$ |
| 18.02.2011 | $11.1 \pm 2.1$ | $13.3 \pm 4$   |
| 30.09.2012 | $10.5 \pm 2.5$ | $11.6 \pm 4$   |
| 26.02.2012 | $10.3 \pm 2.4$ | -              |

На рисунке 9. показана зависимость амплитуд, отобранных ФП вычисленных в потоке протонов ( $R = 1.1 - 12.9$  ГВ) от времени распространения КВМ от Солнца до Земли. Если наблюдаемое ФП потенциально могло быть вызвано несколькими КВМ, время распространения от Солнца до Земли ( $\tau_{CZ}$ ) вычислялось как среднее время, усредненное по всем КВМ произошедшим в течении суток после самого первого мощного КВМ, ответственного за формирование наблюдаемого ФП. Как видно из рисунка, более быстрые МКВМ способны создать более мощный эффект ФП.

Для анализа амплитуд ФП от жесткости частиц КЛ, были получены потоки космических протонов в различном диапазоне жесткостей (табл. 5). Амплитуды ФП, находились для всех шести интервалов потоков космических протонов.

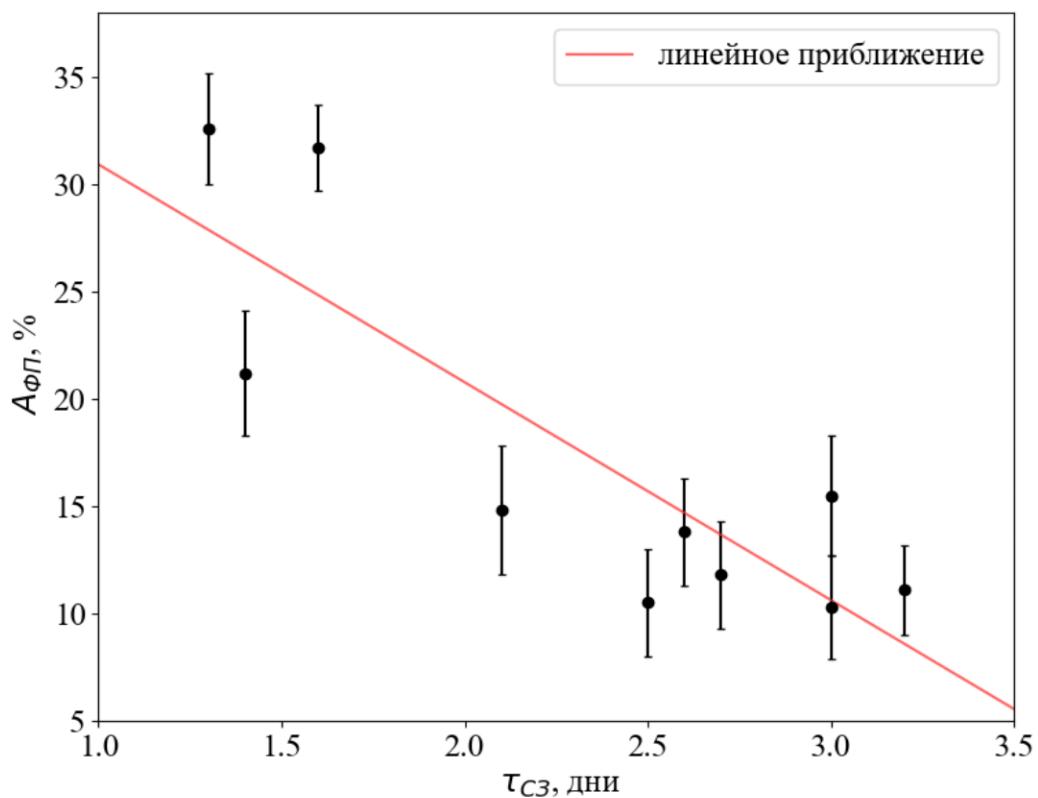


Рис. 9. Амплитуды ФП полученные для интегрального потока протонов в зависимости от времени распространения КВМ от Солнца до Земли.

Таблица 5. Диапазон жесткостей потоков космических протонов, для анализа амплитуд ФП.

| Номер диапазона | Диапазон жесткости, ГВ |
|-----------------|------------------------|
| 1               | 0.8 - 1                |
| 2               | 1.1 - 1.4              |
| 3               | 1.8 - 2.3              |
| 4               | 2.9 - 3.8              |
| 5               | 4.8 - 6.2              |
| 6               | 8.7 - 12.9             |

Зависимости амплитуд ФП от жесткости частиц КЛ, были аппроксимированы с помощью степенного закона вида:

$$A_{\Phi\Pi} = CR^{-\gamma},$$

где  $A_{\Phi\Pi}$  - относительная амплитуда ФП ( $\Delta\Phi/\Phi$ ), в потоке протонов с заданной жесткостью,  $R$  - жесткость частиц КЛ,  $C$  - постоянный коэффициент,  $\gamma$  - показатель степени. Зависимости амплитуды ФП от жесткости частиц КЛ, для трех самых мощных ФП показаны на рис. 10 - 12.

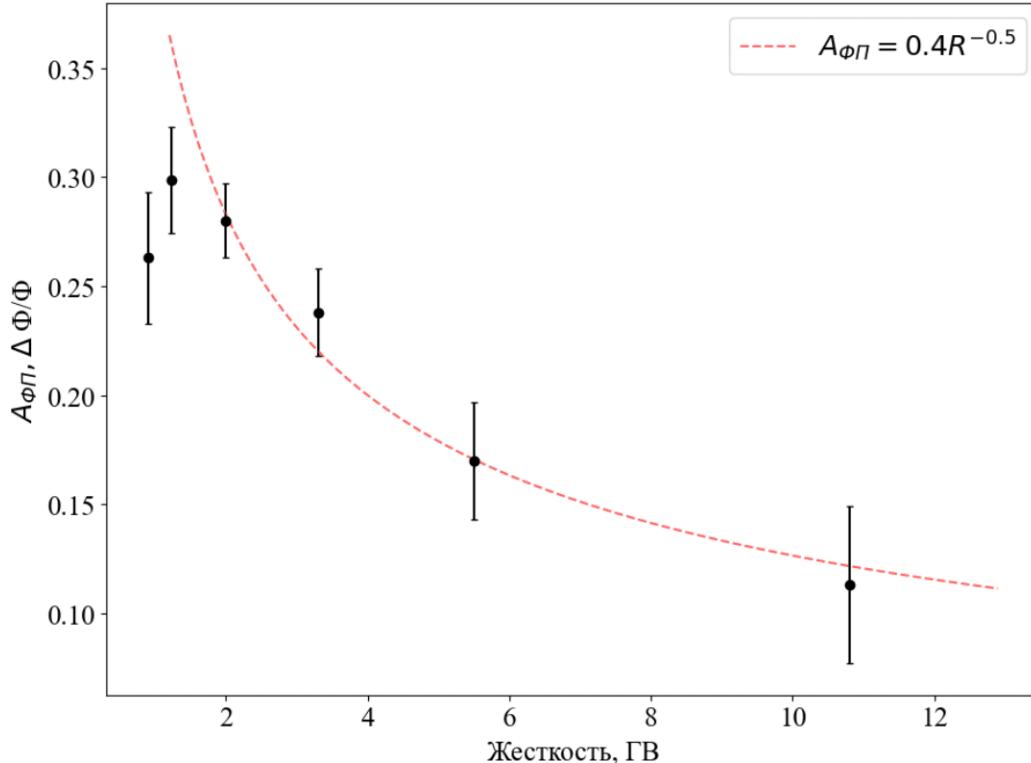


Рис. 10. Зависимость амплитуд ФП от жесткости частиц космических протонов для события 14.12.2006.

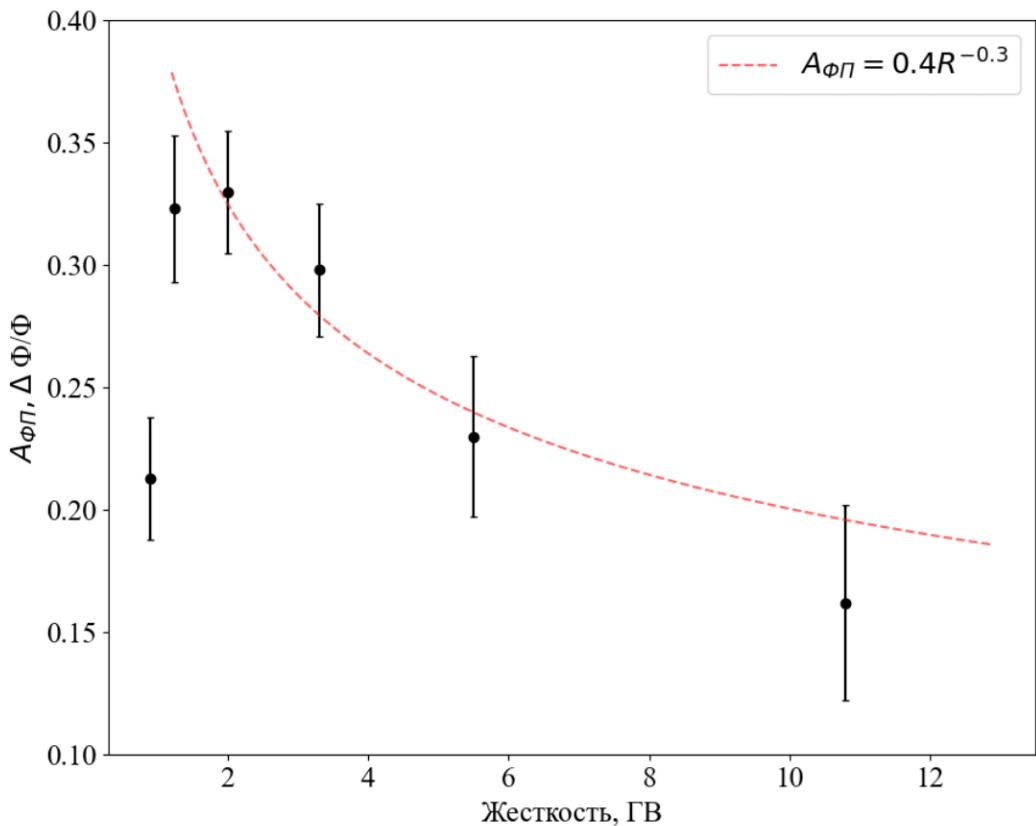


Рис. 11. Зависимость амплитуд ФП от жесткости частиц космических протонов для события 08.03.2012.

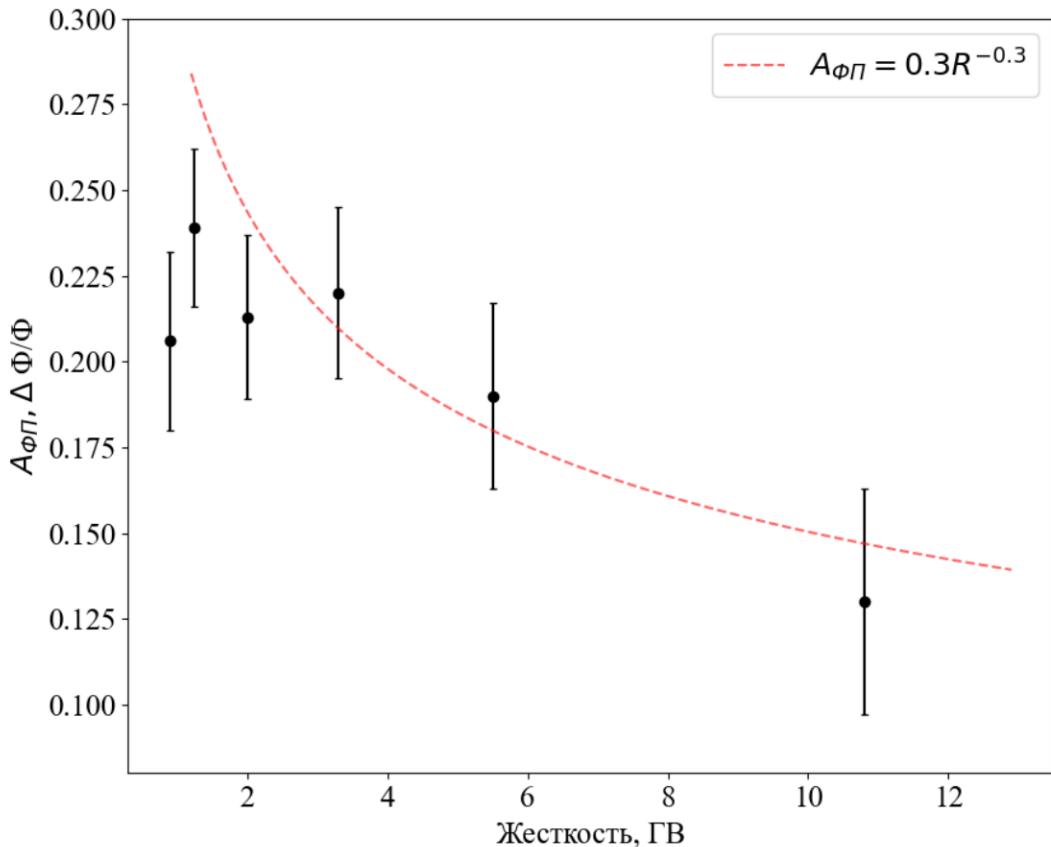


Рис. 12. Зависимость амплитуд ФП от жесткости частиц космических протонов для события 18.03.2013.

Как видно рисунков, зависимость амплитуды ФП от жесткости частиц КЛ, может быть описана как  $CR^{-\gamma}$ , где  $C = 0.4 \pm 0.1$ , а показатель степени  $\gamma = 0.4 \pm 0.1$ . Уменьшение амплитуд ФП для жесткостей диапазоне 0.8 - 1 ГВ, вызвано возросшими потоками солнечных энергетических частиц, амплитуды ФП найденные в этом интервале жесткости, для аппроксимации зависимостей степенным законом не использовалась.

Ярко выраженная зависимость амплитуды от жесткости частиц КЛ, была найдена только для трех самых мощных ФП, зарегистрированных спектрометром ПАМЕЛА 14.12.2006, 08.03.2012 и 18.03.2013. Для этих событий время распространения КВМ от Солнца до Земли  $\tau_{CZ} < 2$  суток. В то время как зависимости амплитуд ФП, для которых  $\tau_{CZ} > 2$  суток, менее ярко выражена. Так, например, амплитуды ФП, зарегистрированные спектрометром ПАМЕЛА в феврале 2011 в выбранных интервалах жесткостей, заключены в диапазоне 9.0 - 12.8 % (рис. 13).

На сегодняшний день считается, что время восстановления ФП не зависит от жесткости частиц КЛ, и является лишь следствием затухания МКВМ по мере его распространения в межпланетном пространстве [19, 32]. Однако, согласно разрозненным результатам немногочисленных исследований выполненных с помощью наземных установок, ответа о существовании таких зависимостей, либо об их отсутствии, получено не было [10, 20].

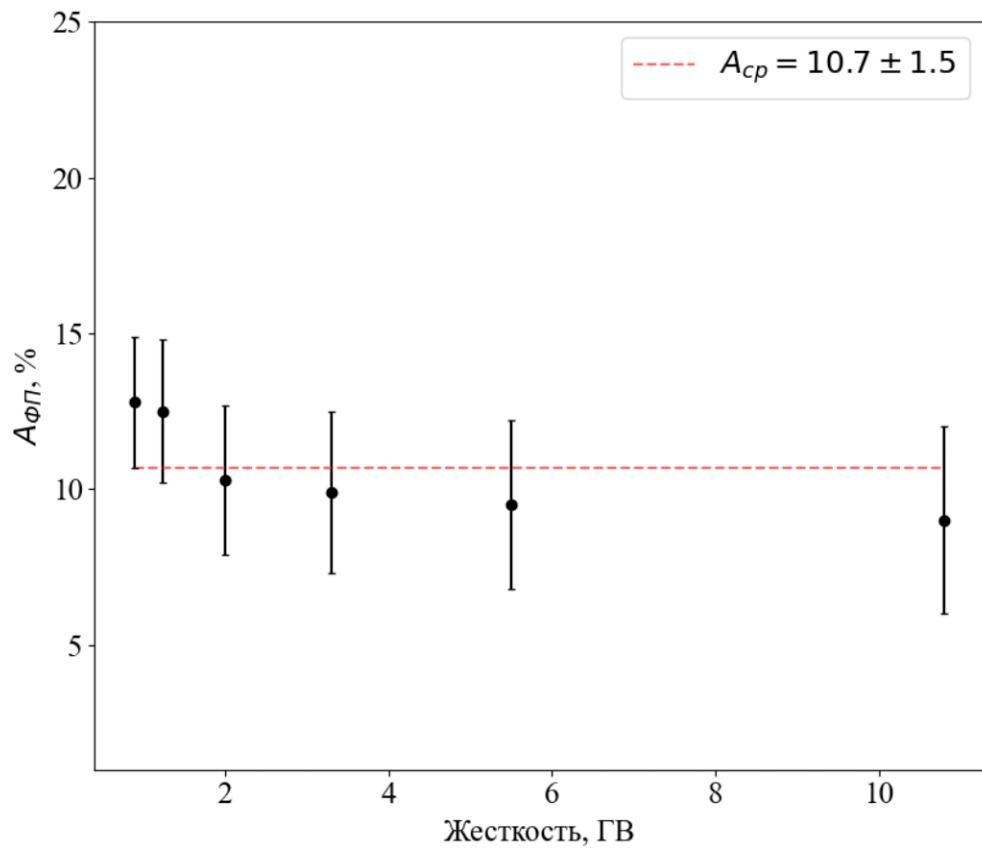


Рис. 13. Зависимость амплитуд ФП от жесткости частиц космических протонов для события 18.02.2011.

Анализ времен восстановления проводился для событий ФП, представленных в таблице 4., которые по своим свойствам наиболее близки к классическим представлениям об изучаемом эффекте. Фазы восстановления событий ФП, зарегистрированных в потоках космических протонов, были аппроксимированы с помощью экспоненциальной зависимости вида:

$$\frac{I_0 - I}{I_0} = A \cdot \left( 1 - \exp \left( \frac{t_0 - t}{\tau} \right) \right)$$

где  $I_0$  - уровень потока частиц предшествовавший наблюдаемому ФП,  $I$  - наблюдаемое значение потока частиц КЛ во время ФП,  $A$  - относительная амплитуда ФП ( $\Delta\Phi/\Phi$ ),  $t_0$  - начало ФП,  $\tau$  - время восстановления ФП.

На рис. 14., показан временной профиль потоков космических протонов ( $R = 1.1 - 12.8$  ГВ) во время ФП, фаза восстановления которого была аппроксимирована с помощью описанной зависимости. Анализ остального числа событий ФП показал, что времена восстановления ФП полученные для потока космических протонов в заданном интервале жесткости, тем больше, чем меньше время распространения КВМ от Солнца до Земли. (рис. 15).

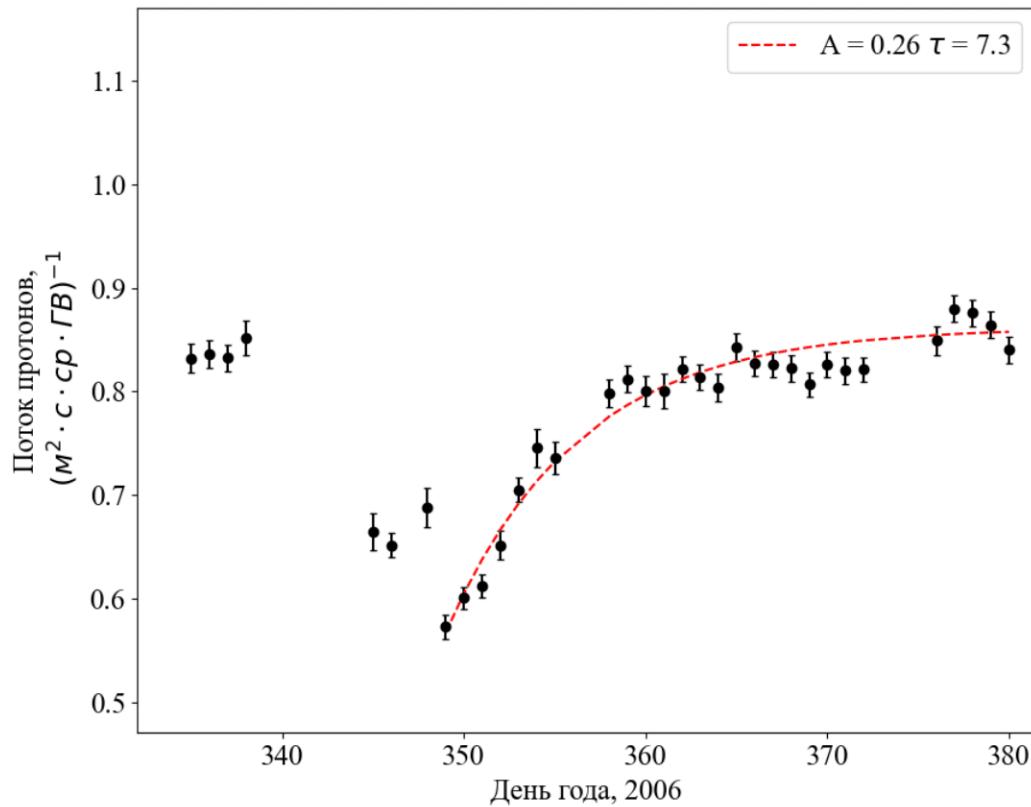


Рис. 14. ФП зарегистрированное спектрометром ПАМЕЛА в потоке космических протонов ( $R = 1.1 - 12.9$  ГВ) в декабре 2006 (14.12.2006).  $A$  - относительная амплитуда ФП ( $\Delta\Phi/\Phi$ ).  $\tau$  - время восстановления (сутки).

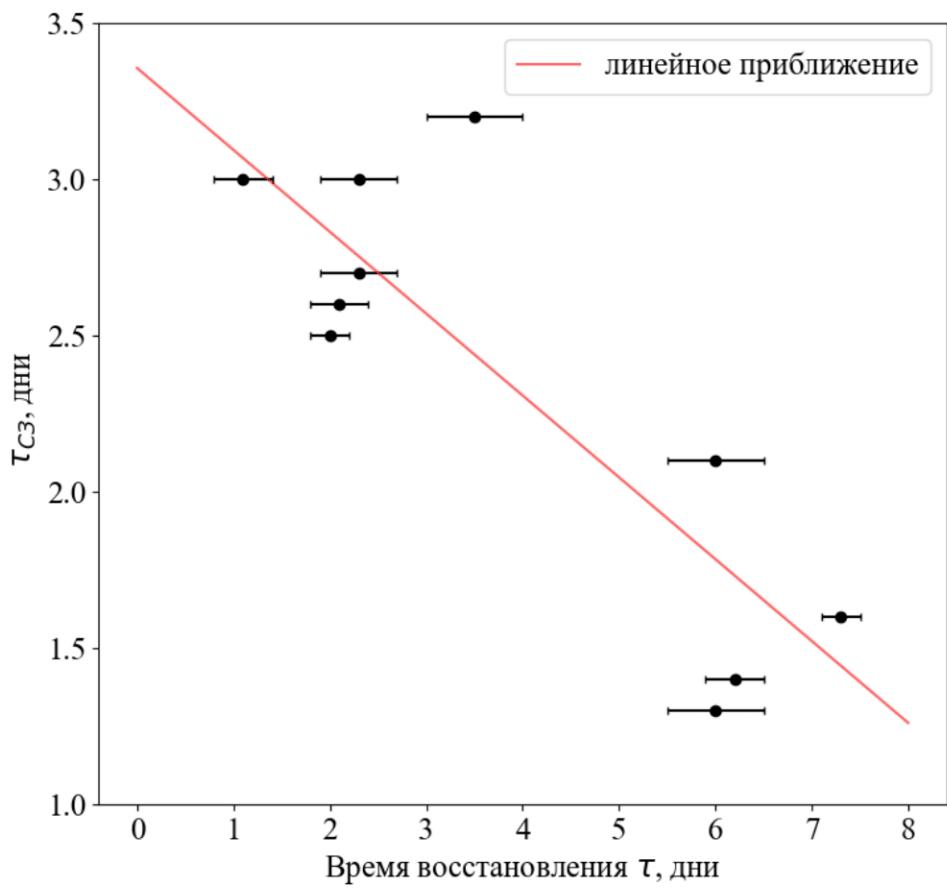


Рис. 15. Время распространения КВМ от Солнца до Земли в зависимости от времени восстановления ФП вычисленного для интегрального потока космических протонов ( $R = 1.1 - 12.9 \text{ ГВ}$ )

В качестве следующей стадии анализа времен восстановления ФП, была проведена процедура аппроксимации фаз восстановления ФП, для потоков космических протонов в различных диапазонах жесткостей (таблица 5). На рис. 16 показана полученная зависимость времен восстановления от жесткости частиц КЛ, для события 18.03.2013. Время восстановления, вычисленное для потока космических протонов в диапазоне жесткости 0.8 - 1 ГВ для аппроксимаций степенным законом не учитывалось, из-за возможного влияния возросших потоков солнечных энергетических частиц. Значение хи-квадрат, вычисленное для аппроксимаций значений времен восстановления от жесткости частиц КЛ степенным законом, находится на уровне  $\chi^2 \sim 0.1$ .

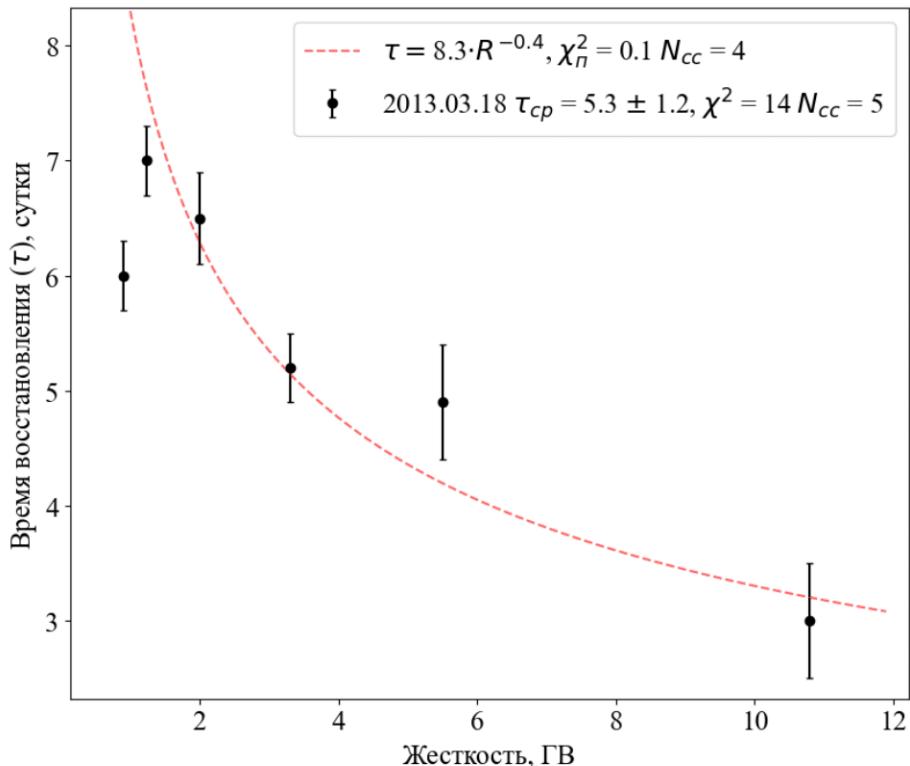


Рис. 16. Время восстановления ФП в зависимости от жесткости частиц КЛ, для события, зарегистрированного в марте 2013.  $N_{\text{cc}}$  - количество степеней свободы для выбранной зависимости.

Как видно из рисунков, событие 18.03.2013 характеризуются ярковыраженной зависимостью времени восстановления от жесткости частиц КЛ. Наличие ярковыраженной зависимости времен восстановления от жесткости, были так же обнаружены для всех ФП, вызванных КВМ для которых время распространения от Солнца до Земли  $\tau_{\text{CZ}} < 2$  суток. События ФП, для которых  $\tau_{\text{CZ}} > 2$  суток, не имеют ярковыраженной зависимости времени восстановления от жесткости частиц КЛ. Фаза восстановления потоков космических протонов во всех выбранных диапазонах жесткостей длится приблизительно одинаково и находится на уровне 3 - 4 суток. Для установления наличия или отсутствия зависимости времени восстановления от жесткости частиц КЛ была проведена проверка гипотез, которая показала, что события ФП, для которых значение  $\chi^2$ , вычисленное для зависимостей времен восстановления от жесткости частиц КЛ меньше чем 11 не имеют ярко выраженную зависимость времени восстановления от жесткости частиц КЛ, то есть характеризуются одинаковым временем восстановления для всех выбранных диапазонов жесткости (рис. 17).

На рисунке 18. показана зависимость амплитуд ФП от времени распространения КВМ от Солнца до Земли  $\tau_{\text{CZ}}$  для потока космических протонов с жесткостью в диапазоне  $R = 1.1 - 2.9$  ГВ, в котором ожидается максимальный эффект ФП. Как видно из рисунка, в данном интервале жесткости частиц прослеживается аналогичная тенденция, ФП могут быть разделены на два типа. Зависимость амплитуды ФП, полученной в данном интервале жесткости ( $R = 1.1 - 2.9$  ГВ), от времени распространения КВМ от Солнца до Земли ( $\tau_{\text{CZ}}$ ) может быть описана степенным законом  $A_{\Phi\pi} = \tau_{\text{CZ}}^{-2.5}$ .

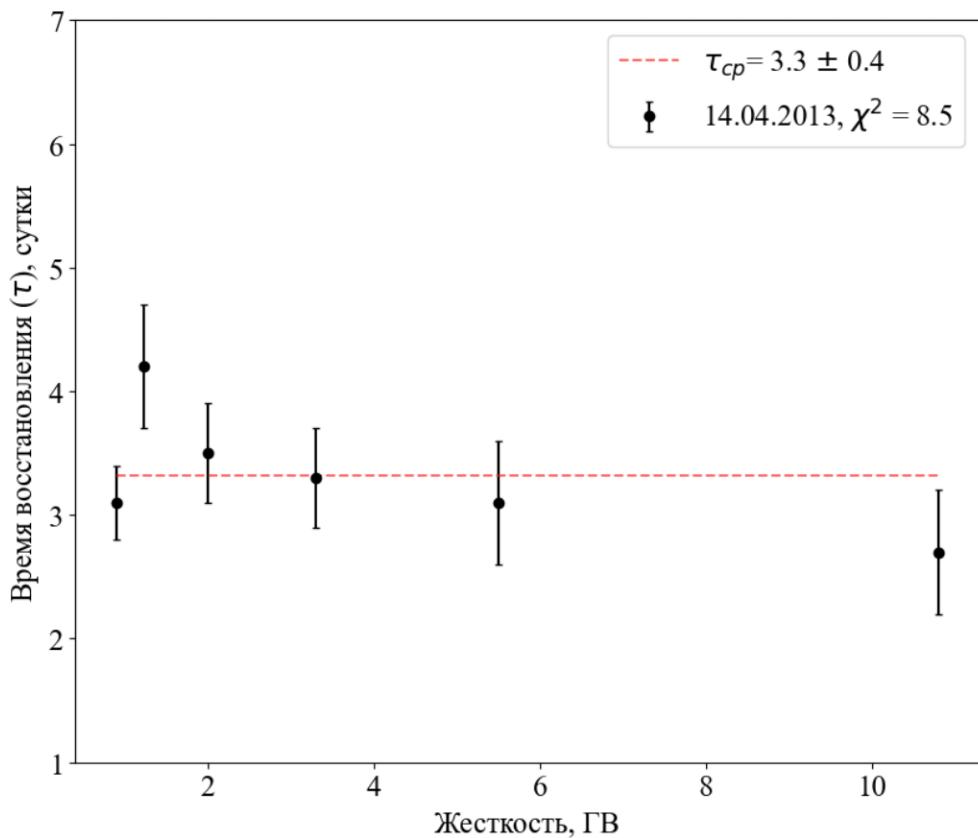


Рис. 17. Время восстановления ФП в зависимости от жесткости частиц КЛ, для события, зарегистрированного в апреле 2013 (14.04.2013).

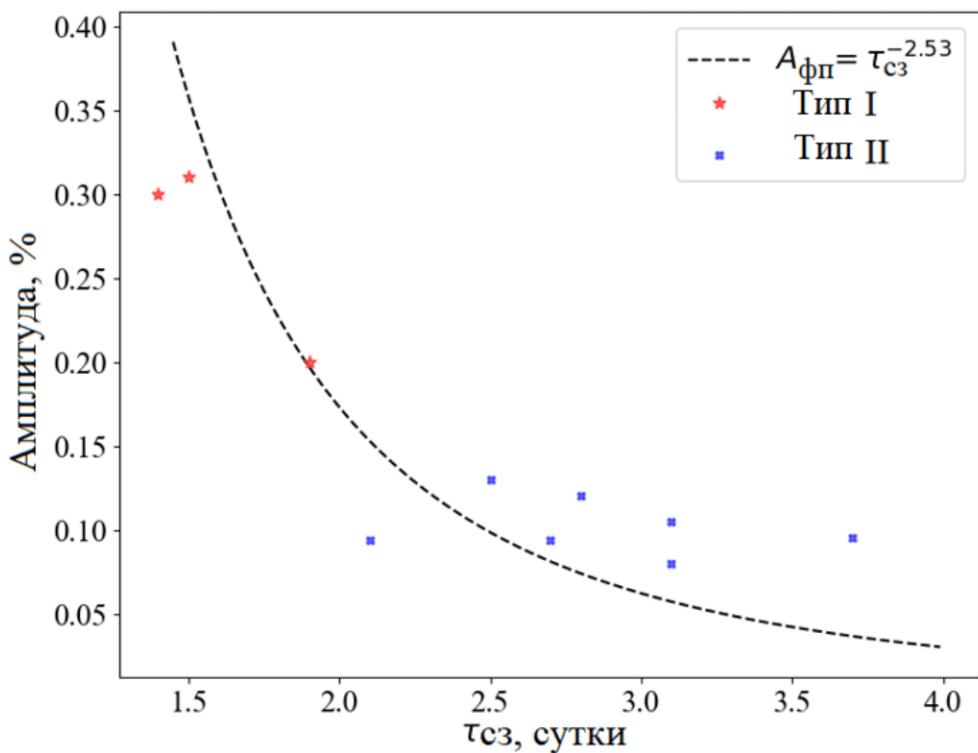


Рис. 18. Амплитуда ФП, полученная для потока первичных протонов ( $R = 1.1 - 2.9$  ГВ), в зависимости от времени распространения КВМ от Солнца до Земли.  
 Тип I – время восстановления ФП зависит от жесткости частиц КЛ ( $\chi^2 > 11$ ).  
 Тип II – время восстановления ФП не зависит от жесткости частиц КЛ ( $\chi^2 < 11$ ).

Анализ всех событий ФП, показал, что ФП могут быть разделены на два типа. События первого типа относятся к ФП вызванным КВМ, для которых время распространения от Солнца до Земли  $\tau_{CZ} < 2$  суток. Такие ФП характеризуются ярковыраженной зависимостью времени распространения от жесткости частиц КЛ ( $\chi^2 > 11$ ). Амплитуда событий первого типа в потоке космических протонов ( $R = 1.1 - 12.9$  ГВ)  $A_{FP} > 20\%$ . В событиях второго типа не было обнаружено явной зависимости времен восстановления от жесткости частиц КЛ ( $\chi^2 < 11$ ). КВМ потенциально ответственные за ФП относящиеся ко второму типу событий, характеризуются временем распространения КВМ от Солнца до Земли  $\tau_{CZ} > 2$  суток, в то время как амплитуда ФП данных событий  $A_{FP} < 20\%$ , для потока космических протонов ( $R = 1.1 - 12.9$  ГВ).

Объяснение этого эффекта может быть следующим. Ударная волна, распространяясь в межпланетном пространстве, рассеивает частицы КЛ, вызывая первое резкое падение интенсивности во время ФП. Процесс диссиpации ударной волны может быть одной из возможных причин различий полученных зависимостей времен восстановления от жесткости частиц КЛ. Когда частицы большой жесткости становятся нечувствительными к действию ударной волны, низкоэнергетические частицы еще испытывают ее влияние. Этот процесс может быть причиной наблюдаемого различия во временах восстановления между частицами высокой и малой жесткости. Уровень разброса времен восстановления, очевидно, зависит от общей мощности ударной волны и ее скорости. Поэтому в событиях, вызванных КВМ малой мощности эффект не наблюдался. После прохождения ударной волны, межпланетное пространство в области регистрации заполняется магнитным облаком. ФП заканчивается, когда магнитное облако покидает область межпланетного пространства в области регистрации. Зависимость времени восстановления от жесткости частиц КЛ может быть связана со способностью частиц космических лучей проникать внутрь магнитного облака, а также со временем, в течении которого магнитное облако может быть полностью заполнено частицами КЛ. Процесс заполнения магнитного облака частицами КЛ для медленных МКВМ завершается раньше, чем данные магнитные облака окажутся в окрестности Земли, в то время как быстрые МКВМ оказываются в окрестности Земли в фазе, когда магнитное облако еще не полностью заполнено частицами КЛ. Кроме того, сам процесс проникновения частиц КЛ внутрь магнитного облака может быть сам по себе зависеть от жесткости.

В заключении (раздел «**Обсуждения и выводы**») перечислены основные результаты, полученные в работе, а именно:

1. В качестве первичного анализа событий, связанных с кратковременными снижениями уровня потоков КЛ, было идентифицировано 29 ФП в потоках космических протонов ( $R = 1.1 - 2.9$  ГВ), амплитуда которых превышала 5%. Подавляющая часть отобранных событий произошла во время максимума 24 цикла солнечной активности.
2. Корреляционный анализ амплитуд отобранных событий с максимальными значениями скорости солнечного ветра и модуля напряженности межпланетного магнитного поля, регистрируемых на протяжении наблюдаемого снижения, показал что амплитуды данных понижений одинаково коррелируют с данными физическими параметрами, коэффициент корреляции при этом находится на уровне  $\sim 0.7$ . Коэффициент корреляции для нормированного произведения скорости солнечного ветра и модуля напряженности

межпланетного магнитного поля находится на уровне  $\sim 0.8$ . На сегодняшний день, все попытки моделирования кратковременных вариаций потоков КЛ в рамках теории распространения КЛ в гелиосфере, основываются на изменении компонент тензора диффузии и полностью игнорируют процессы конвекции [32, 33, 34, 35]. В то время как статистический анализ основных характеристик ФП в зависимости от свойств межпланетного пространства показал, что амплитуда ФП является следствием одновременных изменений как модуля межпланетного магнитного поля, так и скорости солнечного ветра. Амплитуда выбранных ФП лучше всего коррелирует с нормированным произведением скорости солнечного ветра и модулем напряженности межпланетного магнитного поля.

3. Из 29 понижений в потоке космических протонов ( $R = 1.1 - 2.9$  ГВ), были отобраны события Форбуш понижений, характеристики которых наиболее близки к классическому представлению об изучаемом эффекте. Для данных событий была установлена связь с КВМ на Солнце. При этом ФП, описанные в главе 4 (раздел 3) вызваны МКВМ, для которых в окрестности Земли были зарегистрированы все три стадии МКВМ - ударная волна, область турбулентности и магнитное облако.
4. Амплитуды значимых ФП полученные для потока протонов ( $R = 1.1 - 12.8$  ГВ) находятся в диапазоне 10 - 33%, и согласуются с амплитудами, полученными для потока первичных ядер гелия ( $R = 1 - 15.6$  ГВ), для которого данные амплитуды находятся в диапазоне 11 - 37%.
5. Сравнение с данными наземных нейтронных мониторов, показало, что амплитуда, рассчитанная для первичного потока частиц КЛ, в среднем в четыре раза больше чем амплитуда соответствующего понижения, полученного наземными установками.
6. Анализ амплитуд ФП в потоке космических протонов ( $R = 1.1 - 12.8$  ГВ), в зависимости от скорости распространения КВМ от Солнца до Земли ( $\tau_{CZ}$ ), показал, что более быстрые КВМ, и соответствующие им МКВМ, ответственны за более высокоамплитудные ФП регистрируемые в окрестности Земли.
7. Уникальные возможности спектрометра ПАМЕЛА, позволили получить зависимости основных характеристик ФП (время восстановления и амплитуда) в зависимости от жесткости частиц. На сегодняшний день, такие зависимости получались при помощи сети нейтронных мониторов, и не могли быть получены непосредственно при прямых измерениях. Более того, аналогичные зависимости полученные ранее, описывали зависимость амплитуд ФП в высокоэнергетической компоненте КЛ ( $R \geq 10$  ГВ), в то время как в данной работе, анализ характеристик ФП ведется в низкоэнергетической компоненте КЛ ( $R < 13$  ГВ), в которой эффект ФП выражен наиболее сильно. Полученные зависимости были аппроксимированы с помощью степенного закона вида:

$$A_{\Phi\Pi} = C \cdot R^{-\gamma}$$

Зависимость амплитуды ФП, вызванных мощными КВМ ( $\tau_{CZ} < 2$  суток) от жесткости частиц космических протонов в диапазоне  $R = 1.1 - 12.8$  ГВ, может быть описана степенным законом, для которого  $C = 0.4 \pm 0.1$ , а показатель степени  $\gamma = 0.4 \pm 0.1$ . Амплитуда рассчитанная для потоков космических протонов для жесткости частиц  $KL < 1$  ГВ, искажена значительным вкладом возросших потоков солнечных энергичных частиц, и поэтому в рамках аппроксимации степенным законом не учитывались. Амплитуды ФП вызванные менее мощными МКВМ ( $\tau_{CZ} > 2$  суток) значительно не изменяются и приблизительно равны во всех выбранных интервалах жесткостей потоков KL.

8. Фазы восстановления всех ФП, для которых была установлена связь с КВМ/МКВМ, были аппроксимированы с помощью экспоненциальной зависимости вида:

$$\frac{I_0 - I}{I_0} = A \cdot \left( 1 - \exp \left( \frac{t_0 - t}{\tau} \right) \right)$$

где  $I_0$  - поток частиц KL, предшествовавший наблюдаемому ФП,  $I$  - наблюдаемое значение потока частиц KL во время ФП,  $A$  - относительная амплитуда ФП ( $\Delta\Phi/\Phi$ ),  $t_0$  - начало ФП,  $\tau$  - время восстановления ФП (сутки). Анализ времени восстановления, полученного для потока космических протонов ( $R = 1.1 - 12.8$  ГВ) показал, что время восстановление ФП больше, для событий, вызванных КВМ время распространение которых от Солнца до Земли меньше. Зависимости времен восстановления от жесткости частиц KL, найденные для 6 интервалов жесткостей в общем диапазоне 0.8 - 12.8 ГВ, показали, что ФП могут быть разделены на 2 типа. События ФП относящиеся к первому типу, характеризуются ярковыраженной зависимостью времени восстановления от жесткости частиц KL, которая может быть описана с помощью степенного закона, для которого  $C$  находится в пределах 8.3 - 8.4, а показатель степени  $\gamma$  находится в пределах 0.3 - 0.4. Время восстановление вычисленное для событий второго типа ФП постоянно и находится в диапазоне 3 - 4 дней. КВМ ответственные за ФП относящиеся к первому типу, характеризуются временем распространения от Солнца до Земли  $\tau_{CZ} < 2$  суток, при этом амплитуда ФП в потоке космических протонов ( $R = 1.1 - 12.8$  ГВ), для данных событий  $A_{\Phi\Pi} > 20\%$ . События ФП относящиеся ко второму типу, в котором не было обнаружено явной зависимости времени восстановления от жесткости частиц KL, вызваны более медленными

КВМ,  $\tau_{\text{C3}} > 2$  суток и амплитуда данных событий в потоке космических протонов ( $R = 1.1 - 12.8$  ГВ), для данных событий  $A_{\text{ФП}} < 20\%$ .

### Список литературы

- [1]. Forbush S. E. On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm //Physical Review. – 1937. – Т. 51. – №. 12. – С. 1108.
- [2]. Simpson J. A. Cosmic-radiation intensity-time variations and their origin. III. The origin of 27-day variations //Physical Review. – 1954. – Т. 94. – №. 2. – С. 426.
- [3]. Cane H. V. Coronal mass ejections and Forbush decreases //Cosmic rays and Earth. – 2000. – С. 55-77.
- [4] Bothmer V. The effects of coronal mass ejections on galactic Rays in the high latitude heliosphere: Observations from Ulysses first Orbit. // Proc. 25th Intl. Cosmic Ray Conf. – 1997. – Т. 1. – С. 333
- [5]. Ahluwalia H. S., Ygbuhay R. C., Duldig M. L. Two intense Forbush decreases of solar activity cycle 22 //Advances in space research. – 2009. – Т. 44. – №. 1. – С. 58-63.
- [6]. Kilpua E., Koskinen H. E. J., Pulkkinen T. I. Coronal mass ejections and their sheath regions in interplanetary space // Living Reviews in Solar Physics. – 2017. – Т. 14. – №. 1. – С. 1-83.
- [7]. Cane H. V., Richardson I. G., Von Rosenvinge T. T. Cosmic ray decreases: 1964–1994 //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 1996. – Т. 101. – №. A10. – С. 21561-21572.
- [8]. Jordan A. P. et al. Revisiting two-step Forbush decreases //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2011. – Т. 116. – №. A11.
- [9]. Kang J. et al. Forbush decreases observed by Daejeon neutron monitor //Advances in Space Research. – 2016. – Т. 57. – №. 3. – С. 912-918.
- [10]. Zhao L. L., Zhang H. Transient galactic cosmic-ray modulation during solar cycle 24: A comparative study of two prominent Forbush decrease events //The Astrophysical Journal. – 2016. – Т. 827. – №. 1. – С. 13.
- [11]. Belov A. V. et al. What determines the magnitude of Forbush decreases? //Advances in Space Research. – 2001. – Т. 27. – №. 3. – С. 625-630.
- [12]. Chilingarian A., Bostanjyan N. On the relation of the Forbush decreases detected by ASEC monitors during the 23rd solar activity cycle with ICME parameters //Advances in Space Research. – 2010. – Т. 45. – №. 5. – С. 614-621.
- [13]. Fushishita A. et al. Precursors of the Forbush decrease on 2006 December 14 observed with the Global Muon Detector Network (GMDN) //The Astrophysical Journal. – 2010. – Т. 715. – №. 2. – С. 1239.
- [14]. Munakata K. et al. Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2000. – Т. 105. – №. A12. – С. 27457-27468.
- [15]. Dumbović M. et al. Cosmic ray modulation by solar wind disturbances //Astronomy & Astrophysics. – 2011. – Т. 531. – С. A91.
- [16]. Dumbović M. et al. Cosmic ray modulation by different types of solar wind disturbances //Astronomy & Astrophysics. – 2012. – Т. 538. – С. A28.
- [17]. Čalogović J. et al. Cosmic ray modulation by corotating interaction regions //Proceedings of the International Astronomical Union. – 2008. – Т. 4. – №. S257. – С. 425-427.
- [18]. Fan C. Y., Meyer P., Simpson J. A. Rapid reduction of cosmic-radiation intensity measured in interplanetary space //Physical Review Letters. – 1960. – Т. 5. – №. 6. – С. 269.

- [19]. Lockwood J. A., Webber W. R., Jokipii J. R. Characteristic recovery times of Forbush-type decreases in the cosmic radiation: 1. Observations at Earth at different energies //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 1986. – Т. 91. – №. A3. – С. 2851-2857.
- [20]. Usoskin I. G. et al. Forbush decreases of cosmic rays: Energy dependence of the recovery phase //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2008. – Т. 113. – №. A7.
- [21]. Cane H. V., Richardson I. G., Wibberenz G. Helios 1 and 2 observations of particle decreases, ejecta, and magnetic clouds //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 1997. – Т. 102. – №. A4. – С. 7075-7086.
- [22]. Zhang J., Cheng X. On the Three-Part Structure of Coronal Mass Ejections Before and During the Eruption // Solar Heliospheric and Interplanetary Environment (SHINE 2011). – 2011. – С. 33.
23. Domingo V., Fleck B., Poland A. I. SOHO: the solar and heliospheric observatory //Space Science Reviews. – 1995. – Т. 72. – №. 1. – С. 81.
- [24]. Zurbuchen T. H., Richardson I. G. In-situ solar wind and magnetic field signatures of interplanetary coronal mass ejections //Coronal mass ejections. – 2006. – С. 31-43.
- [25]. База данных OMNI [Электронный ресурс] // URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>
- [26]. Picozza P. et al. PAMELA-A payload for antimatter matter exploration and light-nuclei astrophysics //Astroparticle physics. – 2007. – Т. 27. – №. 4. – С. 296-315.
- [27]. Orsi S. et al. PAMELA: A payload for antimatter matter exploration and light nuclei astrophysics //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2007. – Т. 580. – №. 2. – С. 880-883.
- [28]. Boezio M. et al. The PAMELA space experiment: First year of operation //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2008. – Т. 110. – №. 6. – С. 062002.
- [29]. Adriani O. et al. Ten years of PAMELA in space //La Rivista del Nuovo Cimento. – 2017. – Т. 40. – №. 10. – С. 473-522.
- [30]. Alanko K. M. et al. Effective energy of neutron monitors //International Cosmic Ray Conference. – 2003. – Т. 7. – С. 3901.
- [31]. Earth directed ICME catalogue [Электронный ресурс] // URL: <https://wind.nasa.gov/ICMEindex.php>
- [32]. Mulder M. S., Moraal H. The effect of gradient and curvature drift on cosmic-ray Forbush decreases //The Astrophysical Journal. – 1986. – Т. 303. – С. L75-L78.
- [33]. Wawrzynczak A., Alania M. V. Modeling and data analysis of a Forbush decrease //Advances in space research. – 2010. – Т. 45. – №. 5. – С. 622-631.
- [34]. Le Roux J. A., Potgieter M. S. The simulation of Forbush decreases with time-dependent cosmic-ray modulation models of varying complexity //Astronomy and Astrophysics. – 1991. – Т. 243. – С. 531-545.
- [35]. Luo X. et al. A numerical study of Forbush decreases with a 3D cosmic-ray modulation model based on an SDE approach //The Astrophysical Journal. – 2017. – Т. 839. – №. 1. – С. 53.
- [36]. Luo X. et al. A study of electron Forbush decreases with a 3D SDE numerical model //The Astrophysical Journal. – 2018. – Т. 860. – №. 2. – С. 160.