

ОСОБЕННОСТИ ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ДЕТЕКТОРОВ

© 2024 г. И. А. Лагойда¹⁾*, С. А. Воронов¹⁾, В. В. Михайлов¹⁾

Поступила в редакцию 13.09.2023 г.; после доработки 01.10.2023 г.; принята к публикации 25.10.2023 г.

Форбуш-понижения проявляются в виде резкого уменьшения интенсивности космического излучения, регистрируемой широким спектром наземной и спутниковой аппаратуры. Природа данного явления тесно связана с корональными выбросами масс — турбулентными процессами, происходящими в солнечной атмосфере. Корональные выбросы масс, распространяясь в межпланетной среде, воздействуют на частицы космических лучей, выметая их из области модуляции, что и проявляется в виде эффекта, известного сегодня как форбуш-понижение. В настоящей работе изучены особенности поведения временных профилей интенсивности космических лучей во время форбуш-понижений от жесткости частиц с использованием данных по потокам космических протонов, зарегистрированных спектрометром АМС-02 в период с 2011 по 2019 г.

DOI: 10.31857/S0044002724020036, EDN: KRVVZK

1. ВВЕДЕНИЕ

Форбуш-понижения (ФП) проявляются в виде резких уменьшений интенсивности космического излучения, регистрируемого различной научной аппаратурой [1]. Частота таких событий коррелирует с уровнем солнечной активности, главным образом с частотой корональных выбросов масс (КВМ), регистрируемых в атмосфере Солнца. ФП изучаются на протяжении нескольких десятков лет, однако до сих пор не существует полноценной теоретической модели, способной качественно и количественно описать регистрируемые временные профили ФП. Основные трудности создания полноценной теоретической модели заключаются в том, что характеристики ФП сильно варьируются от события к событию, что в свою очередь связано с большим разбросом основных характеристик КВМ. Поведение временных профилей потоков космических лучей во время ФП зависит от расположения регистрирующей аппаратуры относительно фронта движущегося КВМ в межпланетном пространстве [2]. Более того, основные исследования характеристик ФП выполнены с помощью установок, расположенных на поверхности Земли, регистрирующих вторичную компоненту КЛ, образовавшуюся после взаимодействия КЛ с атмосферой Земли [3–5].

На сегодняшний день принято считать, что структура классического КВМ состоит из трех

стадий: ударной волны, области турбулентности и магнитного облака [6]. Ударная волна является первой высокоскоростной стадией КВМ и тесно связана с взрывной природой самого явления в атмосфере Солнца. Область турбулентности является следствием взаимодействия ударной волны с фоновым солнечным ветром и характеризуется значительно возросшим уровнем флуктуаций физических величин межпланетного пространства. Магнитное облако — это финальная стадия развития КВМ, представляющая собой движущееся облако солнечной плазмы, выброшенное в межпланетное пространство из атмосферы Солнца. Следовательно, для правильного понимания процессов, происходящих во время ФП, требуется всестороннее изучение обоих явлений. Характеристики и свойства ФП должны изучаться в совокупности с характеристиками КВМ, а ФП должны быть классифицированы в зависимости от характера и свойств КВМ, ответственного за формирование ФП в области регистрации.

2. ОТБОР СОБЫТИЙ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Для классификации ФП по типу КВМ, ответственного за формирование наблюдаемого ФП, необходимо иметь возможность идентификации структуры КВМ в окрестности Земли. На сегодняшний день КВМ, распространяющийся в межпланетной среде, принято называть межпланетным корональным выбросом массы (МКВМ). Стадии МКВМ могут быть идентифицированы с помощью временных профилей скорости солнечного ветра (СВ) и напряженности межпланетного

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

*E-mail: IALagoida@mephi.ru

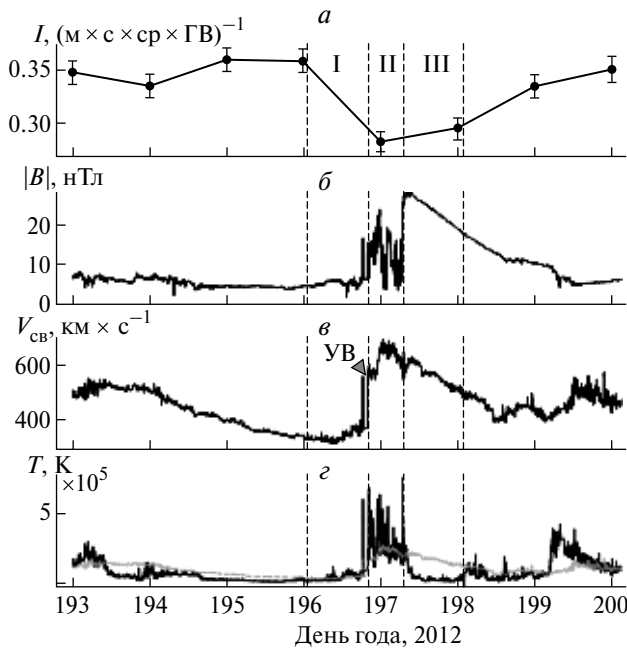


Рис. 1. *a* — ФП в потоке протонов КЛ (1.1–2.9 ГВ) по данным спектрометра PAMELA в июне 2012 г. и соответствующие стадии МКВМ (I — ударная волна, II — область турбулентности, III — магнитное облако) в характеристиках межпланетного пространства; *б* — модуль напряженности межпланетного магнитного поля; *в* — скорость солнечного ветра; *г* — реальная (сплошная кривая) и ожидаемая (штриховая кривая) температуры протонной плазмы.

магнитного поля (ММП). На рис. 1 показано ФП, зарегистрированное спектрометром PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) [7] в июле 2012 г. в потоке космических протонов в диапазоне жесткости 1.1–2.9 ГВ. На рис. 1 отчетливо видно наличие всех трех стадий МКВМ и их соответствие определенным участкам временных профилей основных характеристик межпланетного пространства во время наблюдаемого ФП. Ударная волна характеризуется сильно возросшими значениями скорости СВ и ММП. Область турбулентности проявляется в виде возросшего уровня флуктуаций величин и направлений СВ и ММП. Магнитное облако, наоборот, характеризуется “спокойными” временными профилями СВ и ММП, лишенными резких флуктуаций. Одним из косвенных признаков [8] прохождения магнитного облака в области наблюдения является отношение реальной и ожидаемой температуры протонной плазмы. Ожидаемая температура плазмы вычисляется с помощью эмпирической зависимости со скоростью СВ. Временные промежутки, для которых $T_p / T_{\text{ожд}} \leq 0.5$, соответствуют распространению магнитного облака в области наблюдения [9]. Временные ряды физических величин межпланетного пространства, представленные на рис. 1, получены с помощью базы данных OMNI.

Амплитуда и время восстановления ФП являются базовыми характеристиками ФП. Эти характеристики описывают основную часть процесса модуляции космических лучей в течение наблюдаемого явления. Результаты исследования зависимостей амплитуд от жесткости частиц КЛ хорошо согласуются между собой [10, 11], в то время как результаты исследований зависимостей времен восстановления от жесткости частиц КЛ противоречивы. Первые исследования времени восстановления ФП подтверждали теоретические выводы, согласно которым время восстановления не зависит от жесткости частиц КЛ, а является лишь следствием затухания турбулентности, т.е. МКВМ [12–14]. Однако недавние исследования [15] в совокупности показали, что наблюдаются два типа событий. Для некоторых наблюдается ярко выраженная зависимость времени восстановления от жесткости частиц КЛ, в то время как остальные события характеризуются приблизительно постоянным временем восстановления для всех интервалов жесткостей потоков КЛ. Явно выраженная зависимость времени восстановления от жесткости частиц КЛ была обнаружена для событий форбуш-понижений, произошедших 09.12.2006, 08.03.2012 и 17.03.2013 [16–19]. В работе [19] был сделан вывод, что зависимость времени восстановления от жесткости частиц КЛ наблюдается для событий, вызванных МКВМ, время распространения которых от Солнца до Земли менее 2 сут, а амплитуда ФП более 20% для потока протонов с жесткостью ~ 1 ГВ. В рамках проверки данного предположения был проведен анализ ФП, основанный на суточных данных по потокам космических протонов, измеренных спектрометром AMS-02 (Alpha Magnetic Spectrometer) [20] в диапазоне жесткости от 1 до 33.5 ГВ. Кандидаты КВМ, потенциально ответственные за формирования наблюдаемых ФП, отбирались с помощью каталога гелиосферной обсерватории SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) [21]. В отобранную выборку были включены ФП, вызванные прохождением полноценного МКВМ в окрестности Земли. Предпочтение отдавалось так называемым гало КВМ с углом раствора 360° для исключения профилей ФП, генерируемых неполной структурой МКВМ. Моменты прихода ударных волн, полученные космическим аппаратом Wind [22], использовались для расчета времен прохождения МКВМ от Солнца до Земли. Всего было отобрано восемь событий ФП, основные характеристики которых представлены в табл. 1. Время восстановления профилей ФП аппроксимировалось экспоненциальной функцией:

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

где I_0 и I — интенсивности КЛ до ФП и во время него; t_0 — время начала ФП; τ — время восстановления интенсивности космических лучей.

Таблица 1. Отобранные события ФП и КВМ, потенциально ответственные за наблюдаемое ФП (t_S — время регистрации КВМ обсерваторией SOHO, t_E — время регистрации МКВМ спутником Wind, τ_{SE} — время распространения КВМ, $A_{ФП}$ — амплитуда ФП, R — жесткость)

t_S	t_E	τ_{SE}	$A_{ФП},\%$ $R = 1-1.5$ ГВ	$A_{ФП},\%$ $R = 4-5.4$ ГВ	$A_{ФП},\%$ $R = 13-33.5$ ГВ
—	17.06.2011 13:26	—	12.6 ± 1	8.1 ± 0.4	2.5 ± 0.6
07.03.2012 00:24 07.03.2012 01:30	08.03.2012 10:32	1.4	37 ± 3	19 ± 4	8 ± 1.5
12.06.2012 14:12	16.06.2012 09:03	3.8	11.4 ± 2.3	7.1 ± 0.8	3 ± 0.5
02.09.2012 04:00	04.09.2012 22:02	2.8	13.8 ± 1	8.1 ± 0.8	2.1 ± 0.5
15.03.2013 07:12	17.03.2013 05:21	1.9	22 ± 0.5	13.2 ± 0.6	5 ± 1
12.12.2013 03:36	14.12.2013 16:47	2.7	9.1 ± 0.6	4.1 ± 0.7	—
02.05.2015 20:24 03.05.2015 03:48 04.05.2015 03:12 04.05.2015 09:48	06.05.2015 00:56	2.4	10.6 ± 1.8	6.1 ± 0.8	1.9 ± 0.7
21.06.2015	22.06.2015 18:07	1.7	20.7 ± 0.5	17.7 ± 0.4	8.5 ± 0.5

На рис. 2 показаны временные профили нормированных значений интенсивности космических протонов для трех интервалов жесткостей, зарегистрированные спектрометром AMS-02 во время самого мощного из отобранных событий ФП, произошедшего в июне 2015 г. Для всех трех интервалов была произведена аппроксимация фаз восстановления наблюдаемого ФП. Нормировка потоков осуществлялась с помощью среднего

уровня потока КЛ, вычисленного за две недели до начала ФП. Как видно из рисунка, для ФП, произошедшего в июне 2015 г., время восстановления явно зависит от жесткости частиц. Для первого интервала жесткости 1–1.5 ГВ амплитуда ФП $\geq 20\%$, а время распространения КВМ от Солнца до Земли приблизительно равно 1.7 сут. Амплитуда ФП уменьшается с увеличением жесткости частиц и равна приблизительно 17.7 и 8.5% для потоков

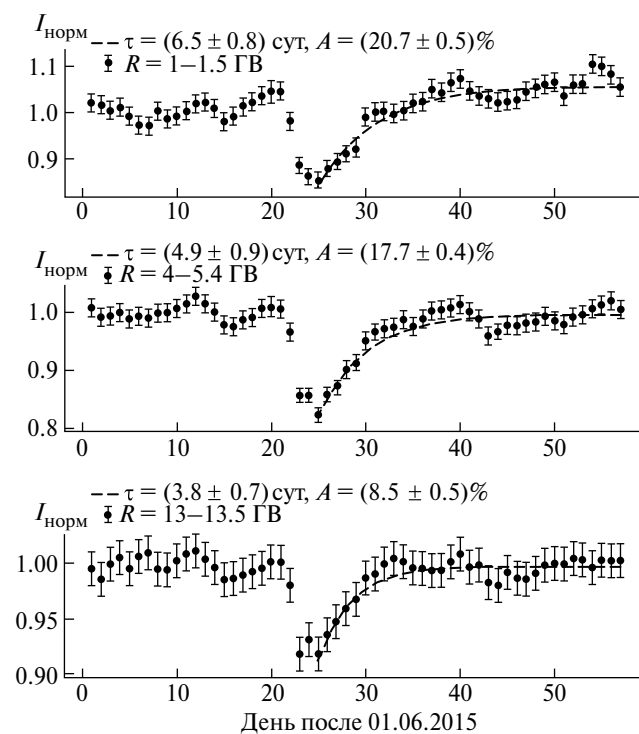


Рис. 2. $I_{\text{норм}}$ — нормированные интенсивности КЛ во время ФП, зарегистрированного спектрометром AMS-02 в июне 2015 г. для трех интервалов жесткостей; A — амплитуда ФП (%); τ — время восстановления (сут).

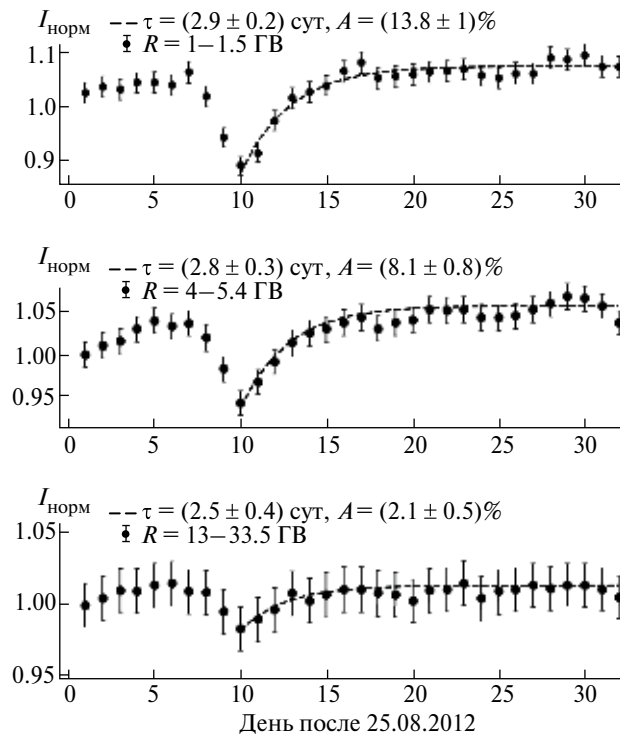


Рис. 3. $I_{\text{норм}}$ — нормированные интенсивности КЛ во время ФП, зарегистрированного спектрометром AMS-02 в сентябре 2012 г. для трех интервалов жесткостей; A — амплитуда ФП (%); τ — время восстановления (сут).

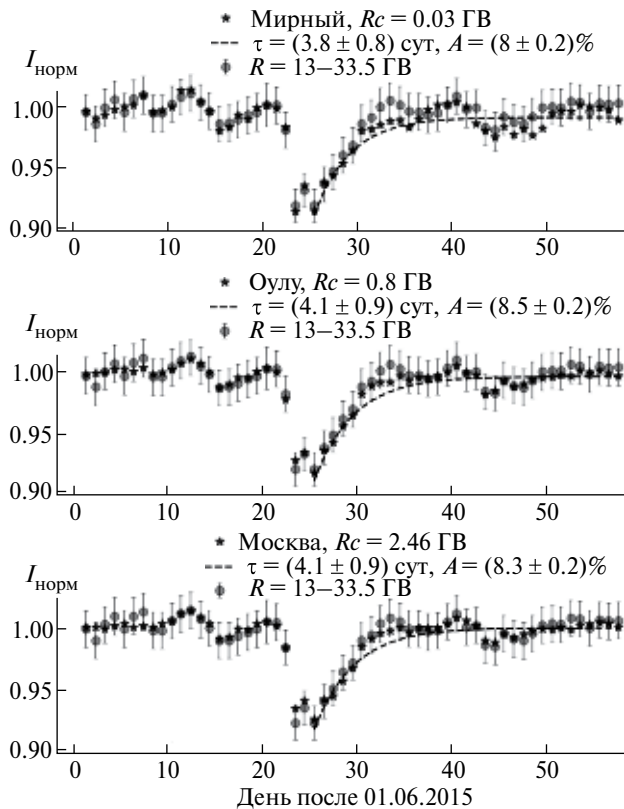


Рис. 4. $I_{\text{норм}}$ — нормированные темпы счета трех нейтронных мониторов (Москва, Оулу, Мирный) в сравнении с нормированной интенсивностью протонов во время ФП в июне 2015 г.; A — амплитуда ФП (%); τ — время восстановления (сут); R_c — жесткость геомагнитного обрезания. Амплитуды и времена восстановления ФП вычислены по данным нейтронных мониторов.

в диапазоне жесткости 4–5.4 ГВ и 13–33.5 ГВ соответственно. Для остальных событий ФП зависимость времени восстановления от жесткости частиц КЛ менее очевидна. Одним из таких событий является ФП, зарегистрированный спектрометром AMS-02 в сентябре 2012 г. Анализ фаз восстановления для данного события представлен на рис. 3. Как видно из рисунка, время восстановления приблизительно постоянное для всех трех интервалов жесткостей. Для первого интервала жесткости 1–1.5 ГВ амплитуда ФП $< 20\%$, а время распространения КВМ от Солнца до Земли приблизительно равно 3 сут. Амплитуда ФП уменьшается с увеличением жесткости частиц и равна приблизительно 8.1 и 2.1% для двух других интервалов жесткостей. Как видно из рис. 2 и 3, основной эффект ФП сосредоточен в низкоэнергетической компоненте КЛ.

На рис. 4 показаны нормированные темпы счета трех нейтронных мониторов: Москва, Оулу и Мирный, в сравнении с нормированным потоком протонов, зарегистрированным спектрометром AMS-02 в диапазоне жесткости 13–33.5 ГВ. Как видно из рисунка, амплитуды и время

восстановления ФП, вычисленные по данным нейтронных мониторов, хорошо согласуются с потоком космических протонов с жесткостью > 10 ГВ.

3. ВЫВОДЫ

По данным спектрометра AMS-02 было отобрано восемь событий ФП, каждое из которых было вызвано полноценным МКВМ в окрестности Земли. Основной эффект ФП сосредоточен в низкоэнергетической компоненте КЛ в районе 1 ГВ. Время восстановления имеет ярко выраженную зависимость от жесткости частиц КЛ для событий ФП, амплитуда жесткости $\sim 20\%$ для потока космических протонов с жесткостью ~ 1 ГВ, а время распространения КВМ от Солнца до Земли — менее двух суток. Для остальных событий зависимость времени восстановления от жесткости частиц КЛ выражена в значительно меньшей степени. Полученные зависимости времени восстановления ФП согласуются с выводами, сделанными в предыдущих исследованиях таких зависимостей.

Временные профили ФП, зарегистрированные наземными нейтронными мониторами, согласуются с профилями интенсивности космических протонов в интервале жесткостей 13–33.5 ГВ.

Работа по отбору событий КВМ и ФП выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект “Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей”, № FSWU-2023-0068). Работа по аппроксимации фаз восстановления ФП и изучению зависимостей полученных времен восстановления от жесткости частиц КЛ выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-72-10170).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. E. Forbush, Phys. Rev. **51**, 1108 (1937).
2. N. Gopalswamy, Space Sci. Rev. **124**, 145 (2006).
3. A. V. Belov, E. A. Eroshenko, A. B. Struminsky, and V. G. Yanke, Adv. Space Res. **27**, 625 (2001).
4. I. G. Richardson and H. V. Cane, Sol. Phys. **270**, 609 (2011).
5. N. Iucci, M. Parisi, M. Storini, and G. Villorresi, Nuovo Cimento **2**, 1 (1979).
6. H. S. Hudson, J. L. Bougeret, and J. Burkepille, Space Sci. Rev. **123**, 13 (2006).
7. P. Picozza, A. M. Galper, G. Castellini, O. Andriani, F. Altamura, M. Ambriola, G. C. Barbarino, A. Basili, G. A. Bazilevskaja, R. Bencardino, M. Boezio, E. A. Bogomolov, L. Bonechi, M. Bongi, L. Bongiorno, V. Bonvicini, *et al.*, Astropart. Phys. **27**, 296 (2007).
8. T. H. Zurbuchen and I. G. Richardson, Space Sci. Rev. **123**, 31 (2006).

9. I. G. Richardson and H. V. Cane, *J. Geophys. Res. Space Phys.* **100**, 23397 (1995).
10. H. V. Cane, *Space Sci. Rev.* **93**, 55 (2000).
11. J. A. Lockwood, *Space. Sci. Rev.* **12**, 658 (1971).
12. J. A. Lockwood, W. R. Webber, and J. R. Jokipii, *J. Geophys. Res. Space Phys.* **91**, 2851 (1986).
13. W. R. Webber, in *Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics*, Ed. by J. G. Wilson and S. A. Wouthuysen (North-Holland, Amsterdam, 1962), p. 75.
14. G. Wibberenz, J. A. Le Roux, M. S. Potgieter, and J. W. Bieber, *Space Sci. Rev.* **83**, 309 (1998).
15. I. G. Usoskin, I. Braun, O. G. Gladysheva, J. R. Horandel, T. Jamsen, G. A. Kovaltsov, and S. A. Starodubsev, *J. Geophys. Res.* **113**, A07102 (2008).
16. L. Zhao and L. Zhang. *Astrophys. J.* **827**, 13 (2016).
17. R. Munini, M. Boezio, A. Bruno, E. C. Christian, G. A. de Nolfi, V. Di Felice, M. Martucci, M. Merge, I. G. Richardson, J. M. Ryan, S. Stochaj, O. Adriani, G. C. Barbarino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, M. Bonggi, *et al.*, *Astrophys. J.* **853**, 11 (2018).
18. F. Alemanno, Qi An, P. Azzarello, F. C. T. Barbato, P. Bernardini, B. XiaoJun, M. Cai, E. Casilli, E. Catanzani, J. Chang, D. Chen, J. Chen, Z. Chen, M. Cui, T. Cui, Y. Cui, *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **920**, L43 (2021).
19. I. A. Lagoida, S. A. Voronov, V. V. Mikhailov, M. Boezio, R. Munini, C. Gustavino, G. A. Bazilevskaya, R. Bellotti, E. A. Bogomolov, V. Bonvicini, F. Cafanga, D. Campana, M. Casolino, A. M. Galper, S. Koldobskiy, A. N. Kvashnin, *et al.*, *Sol. Phys.* **298**, 9 (2023).
20. M. Aguilar, L. Ali Cavazonza, G. Ambrosi, L. Arruda, N. Attig, F. Barao, L. Barrin, A. Bartoloni, J. Bates, R. Battiston, M. Behlmann, B. Beischer, J. Berdugo, B. Bertucci, V. Bindi, W. de Boer, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **127**, 271102 (2021).
21. V. Domingo, B. Fleck, and A. I. Poland, *Space Sci. Rev.* **72**, 81 (1995).
22. K. W. Ogilvie and M. D. Desch, *Adv. Space Res.* **20**, 559 (1997).

FEATURES OF FORBUSH DECREASES ACCORDING TO SATELLITE AND GROUND BASED DETECTORS

© 2024 I. A. Lagoida¹⁾, S. A. Voronov¹⁾, V. V. Mikhailov¹⁾

¹⁾*National Research Nuclear University "MEPhI" (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia*

Forbush decreases are sudden drops of cosmic ray intensity recorded by ground based and satellite detectors. This effect is strongly connected with coronal mass ejections from the Sun. Those are the massive eruptions of plasma material from the Sun atmosphere into interplanetary space. Coronal mass ejections affect cosmic ray particles while moving through interplanetary space causing Forbush decrease. In this work, we have studied the behavior of temporal profiles of cosmic ray intensity during Forbush decreases using data on cosmic proton fluxes recorded by the AMS-02 spectrometer during 2011 to 2019.