

Характеристики эффекта Форбуша в потоках протонов и ядер гелия по данным АМС-02



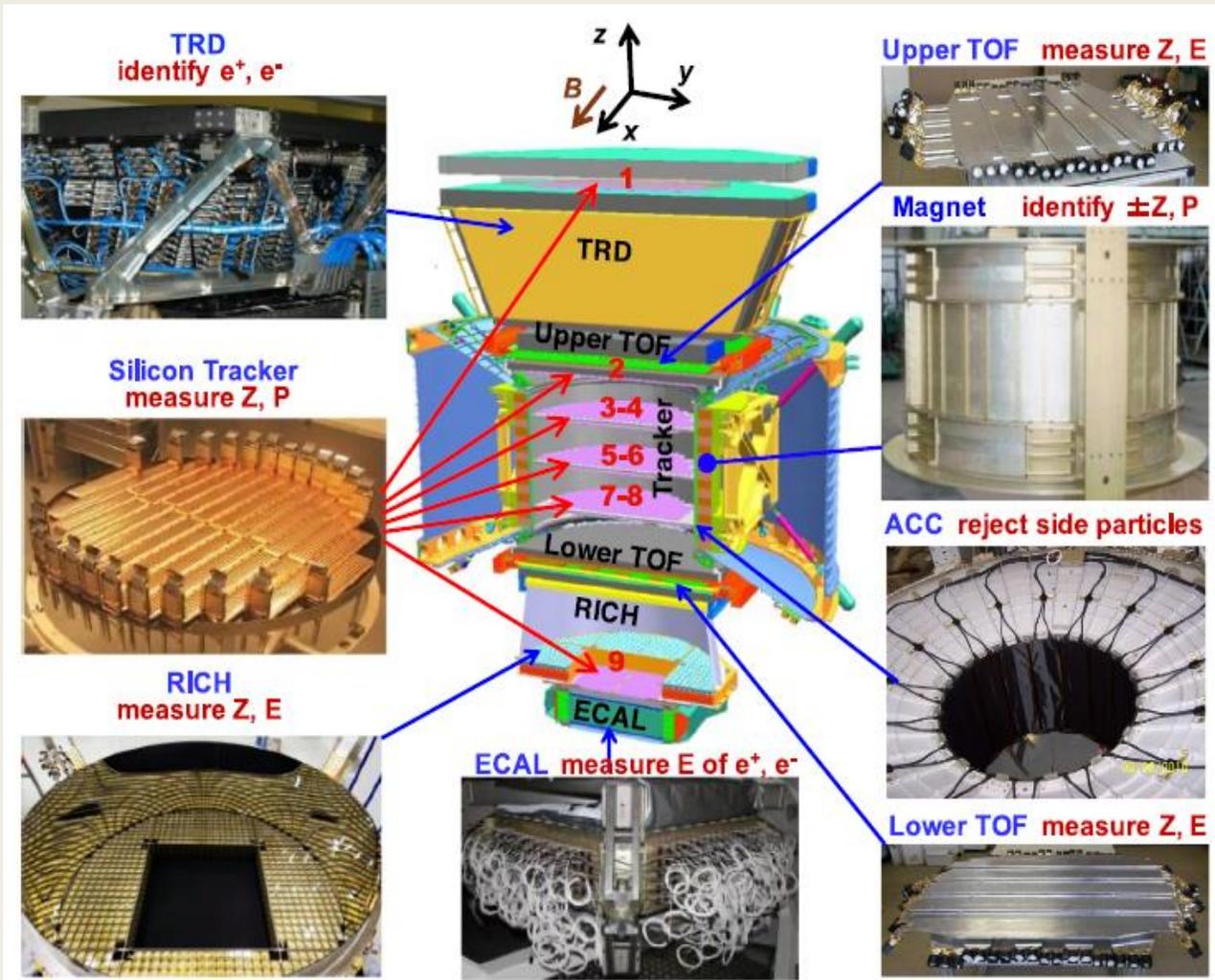
Дорошева Д.Н., Архангельская И.В., Бороз В.В.

В работе представлены результаты анализа данных о потоках протонов и ядер гелия первичных космических лучей (ПКЛ) по результатам космического эксперимента АМС-02 в период с 2011 по 2019 гг.

Исследовались характеристики проявлений эффекта Форбуша для событий, вызванных корональными выбросами массы (ICME).

Наиболее детально рассматривались события типа «Гало».

Эксперимент AMS-02



1. Постоянный магнит;
2. Трекерная система;
3. Детектор переходного излучения (TRD);
4. Времяпролетная система (TOF);
5. Система антисовпадений (ACC);
6. Черенковский кольцевой детектор (RICH);
7. Электромагнитный калориметр (ECAL).

Описание данных

- В работе использовались среднесуточные данные о потоках протонов и ядер гелия за период с 20.05.2011 по 29.10.2019.
- Для отбора Форбуш понижений использовались каталоги солнечных протонных событий. В результате отобраны 10 значимых ФП, которым предшествовали КВМ **типа Гало**.

Дата начала	Дата минимума	Дата прихода ICME	Энергия ICME, эрг
25.09.2011	27.09.2011	24.09.2011	3×10^{32}
07.03.2012	09.03.2012	07.03.2012	6.2×10^{32}
14.07.2012	15.07.2012	12.07.2012	2.7×10^{31}
16.03.2013	19.03.2013	15.03.2013	7.5×10^{31}
11.09.2014	13.09.2014	10.09.2014	1.7×10^{32}
21.12.2014	24.12.2014	21.12.2014	1.2×10^{30}
15.03.2015	18.03.2015	15.03.2015	7.7×10^{31}
22.06.2015	25.06.2015	22.06.2015	3.2×10^{31}
15.07.2017	17.07.2017	06.09.2017	3.6×10^{32}
06.09.2017	08.09.2017	14.07.2017	1.6×10^{32}

Свойства временных рядов отобранных ФП

Построены временные ряды в диапазоне жесткостей $1 < R < 20$ ГВ.

Рассчитаны амплитуды ФП:

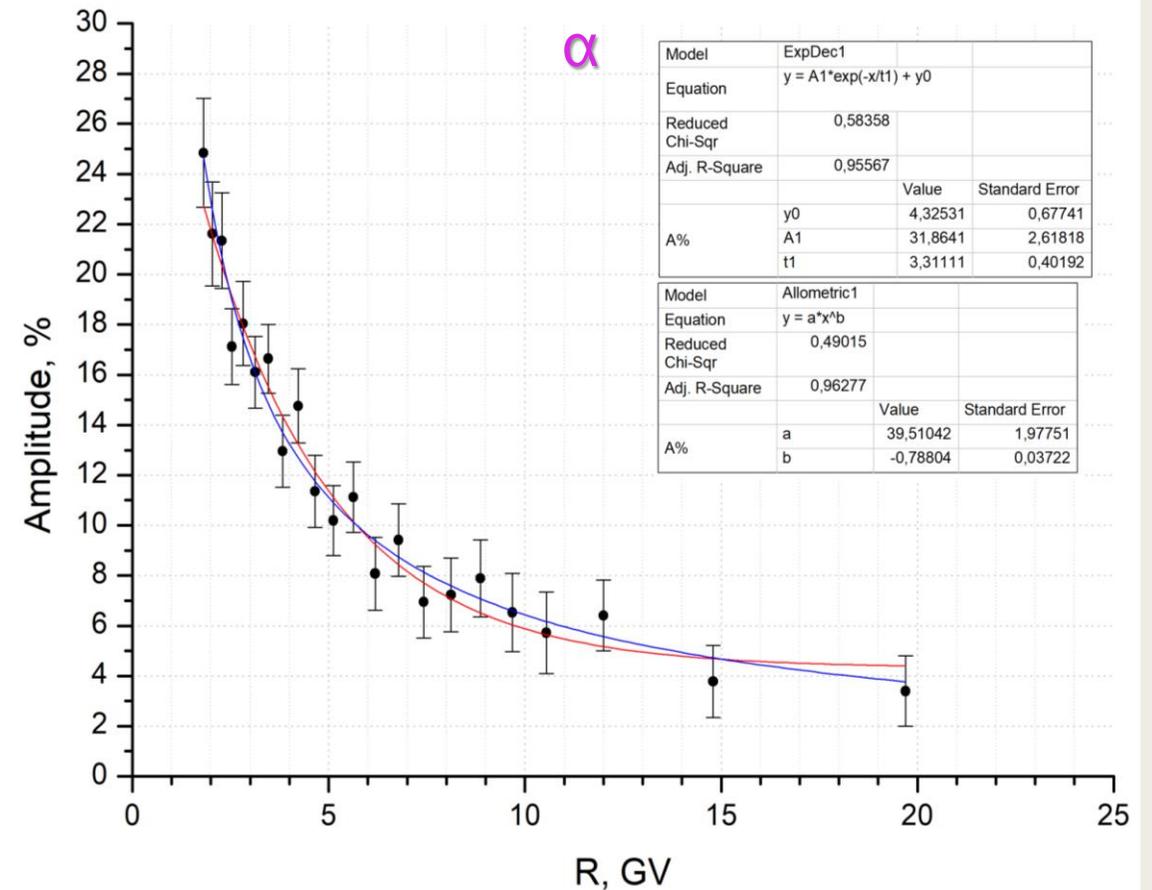
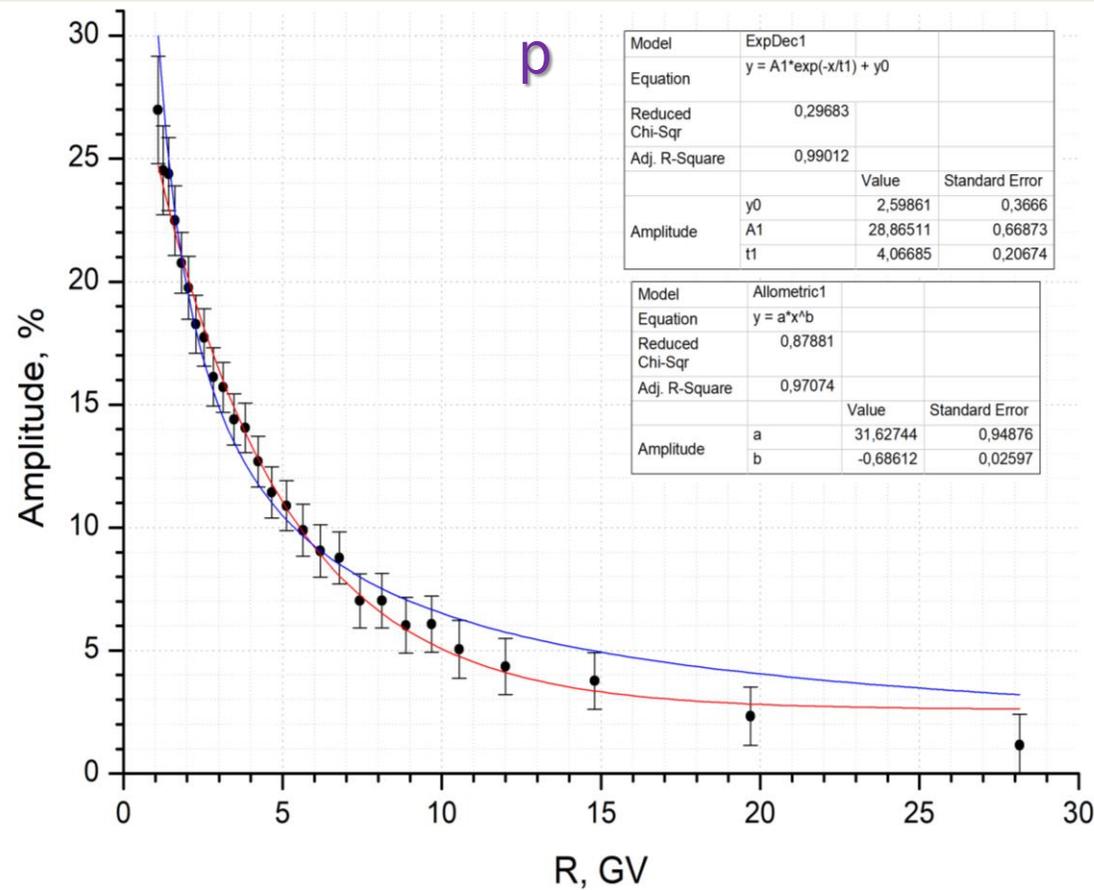
$$A = \frac{\Phi_0 - \Phi}{\Phi_0} \times 100\%$$

Построены зависимости амплитуды ФП от жесткости (R) для протонов и ядер гелия. Зависимости аппроксимированы двумя функциями:

$$A = C \cdot R^{-\gamma}$$

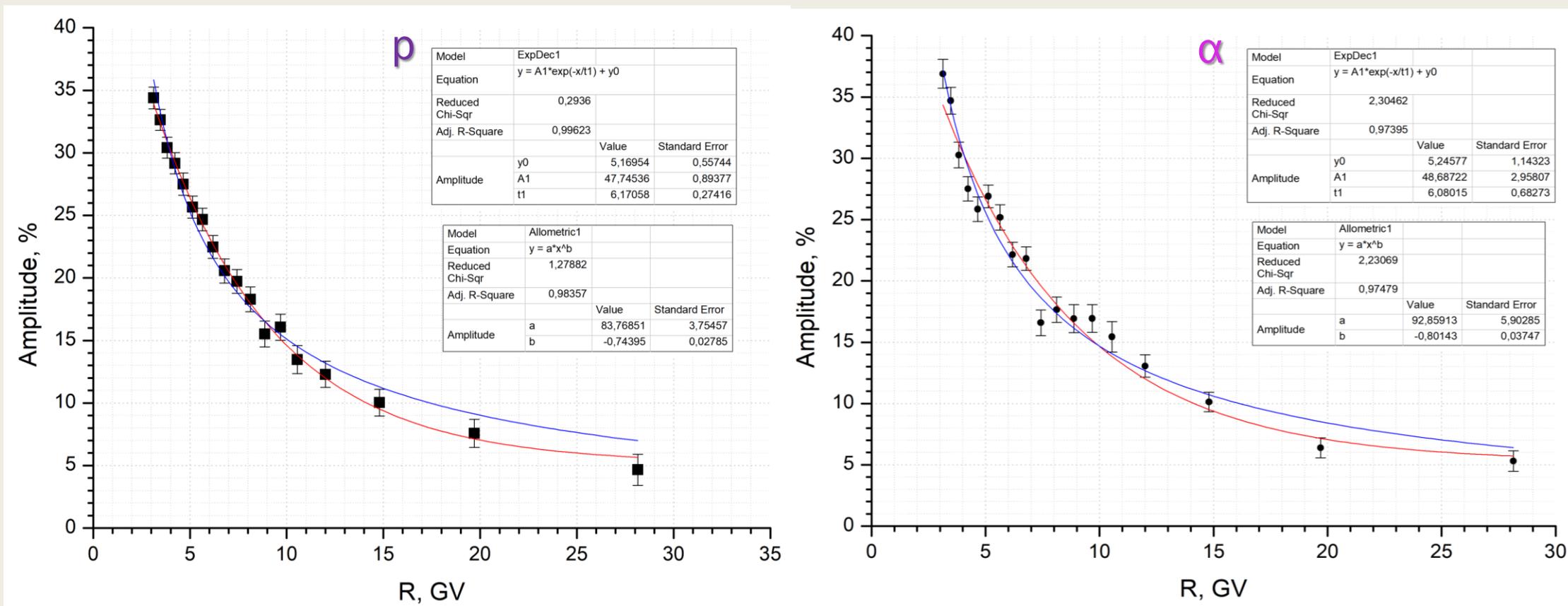
$$A = A_0 + C_{exp} \cdot \exp\left(-\frac{R}{b}\right)$$

Событие 25.09.2011



Зависимость амплитуды ФП от жесткости для **протонов (слева)** и **ядер гелия (справа)**; фитирование: синяя – степенной закон, красная линия – экспоненциальная зависимость, который ранее использовался для аппроксимации данных ПАМЕЛА до 10-12 ГВ.

Событие 07.03.2012



Зависимость амплитуды ФП от жесткости для протонов (слева) и ядер гелия (справа);
 фитирование: синяя – степенной закон, красная линия – экспоненциальная зависимость,
 который ранее использовался для аппроксимации данных ПАМЕЛА до 10-12 ГВ.

Свойства временных рядов отобранных ФП

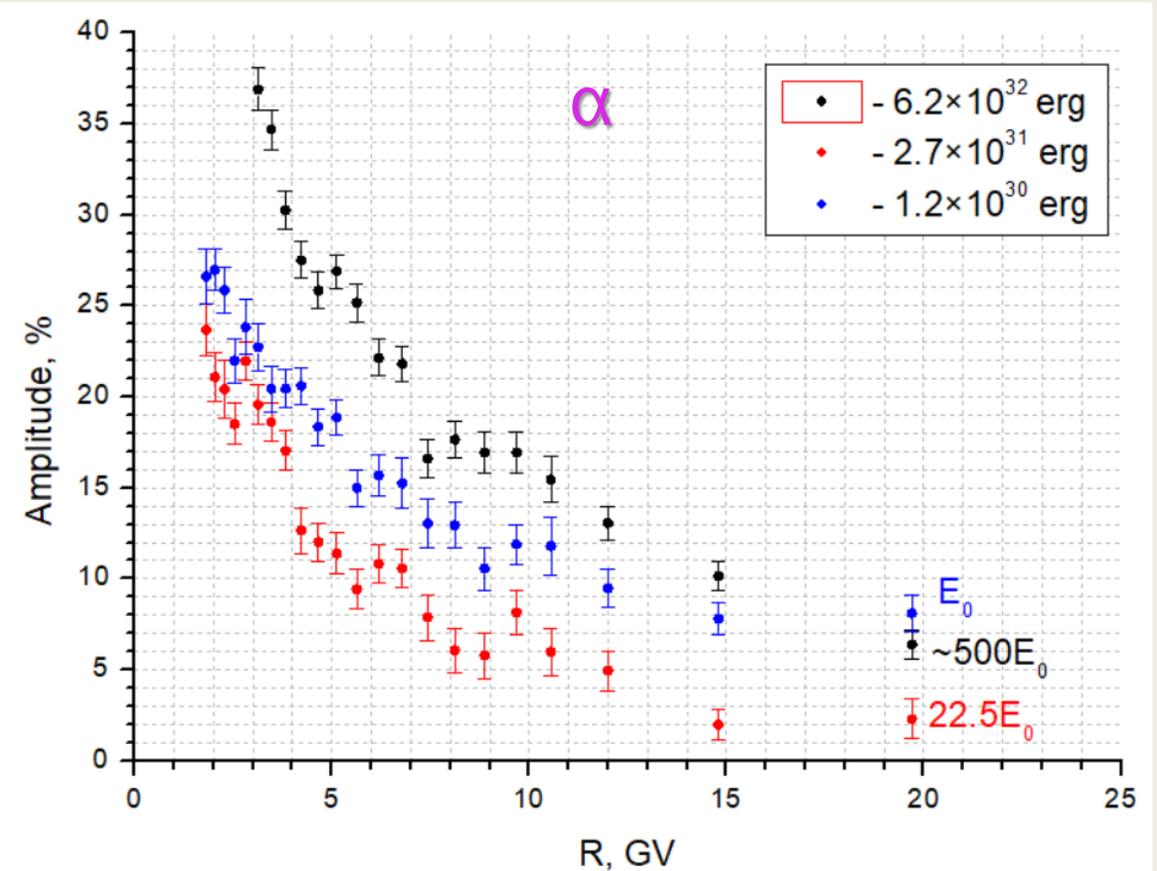
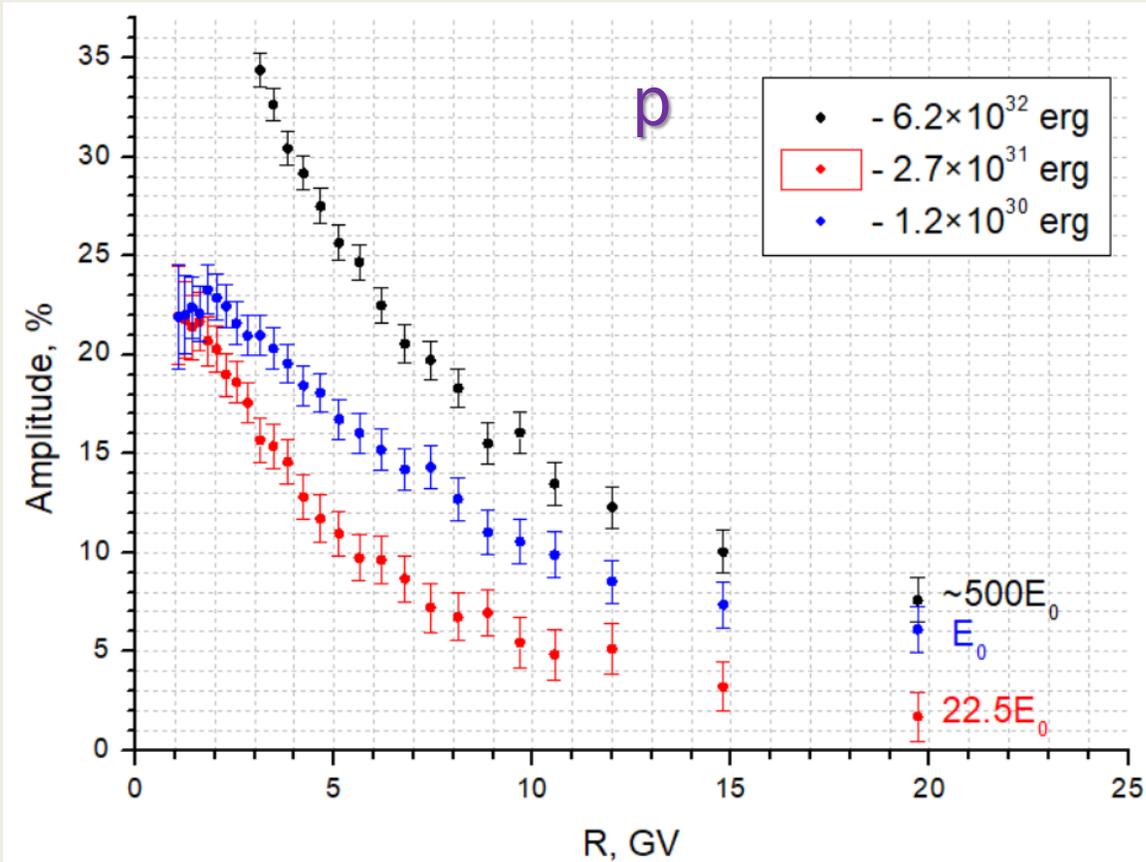
$$A = C \cdot R^{-\gamma} \quad (1)$$

$$A = A_0 + C_{exp} \cdot \exp\left(-\frac{R}{b}\right) \quad (2)$$

Получено, что до жесткости 10-12 ГВ в потоках протонов можно использовать степенную аппроксимацию (1), однако при учете полного диапазона жесткости вплоть до ~20 ГВ такая аппроксимация применима только на уровне значимости 90%, и уже необходимо использовать экспоненциальную функцию (2), которая дает 99% уровень значимости.

В потоках ядер гелия зависимости амплитуд событий от жесткости также описываются степенным и экспоненциальными законами. Уровень значимости составляет 95%. Аппроксимация экспоненциальной функцией с параметром дает 96% уровень значимости.

Амплитуды ФП для протонов и гелия при разных энергиях КВМ



Зависимость амплитуды ФП от жесткости для протонов (слева) и ядер гелия (справа) для различных энергий

Время восстановления ФП

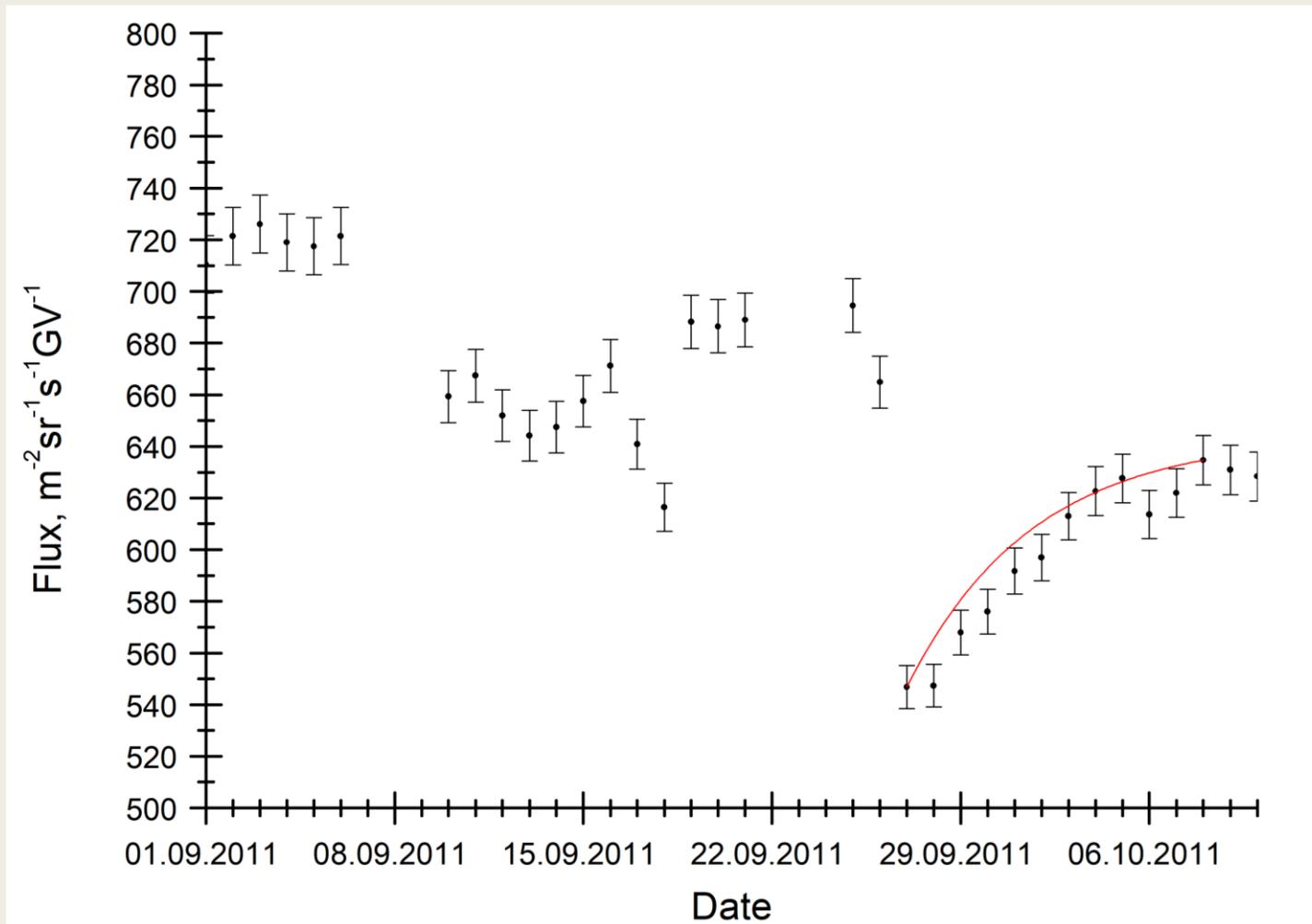
Фазы восстановления событий ФП, зарегистрированных в потоках космических протонов, были аппроксимированы с помощью экспоненциальной зависимости вида:

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

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, τ - время восстановления ФП.

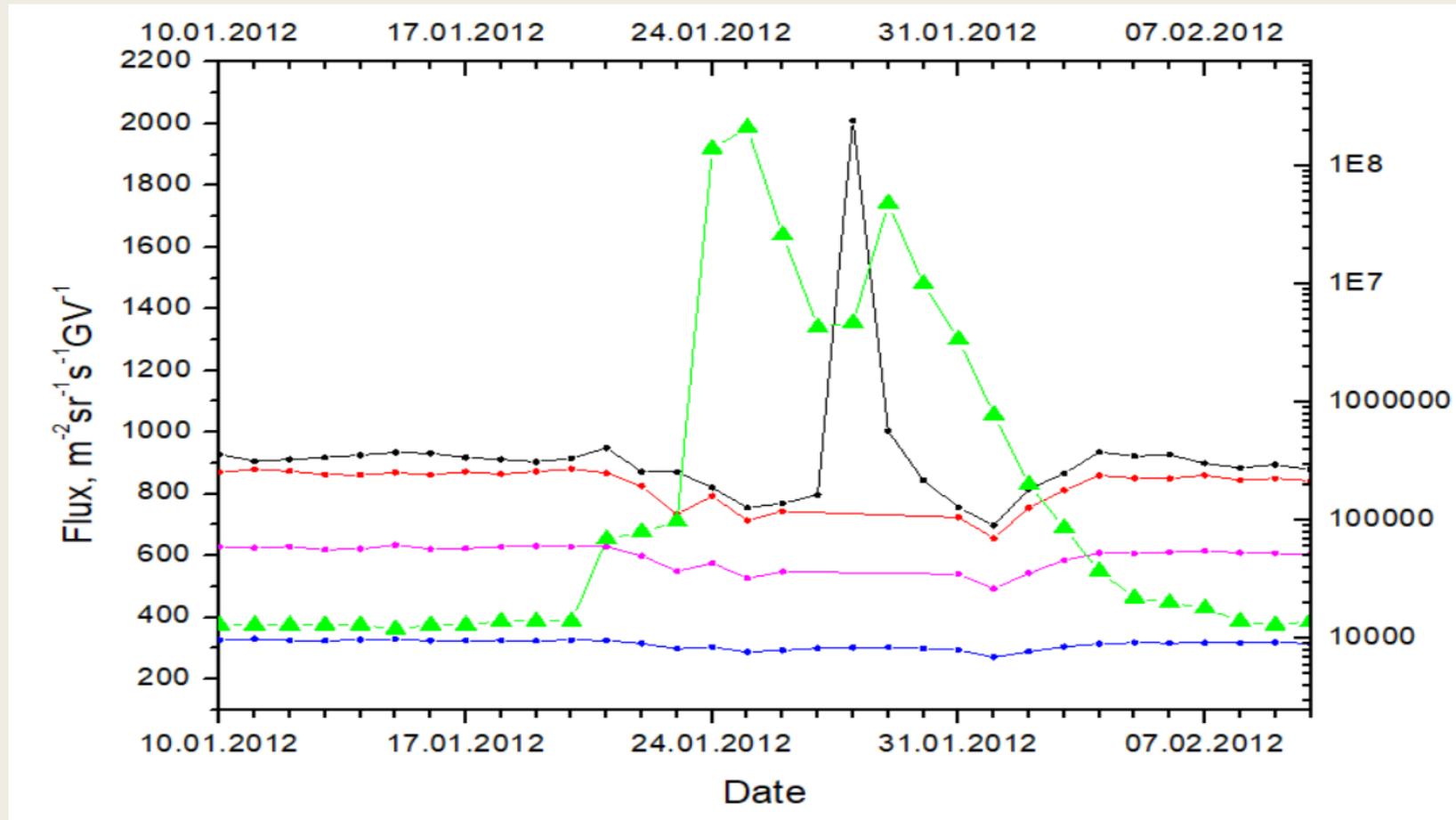
По результатам предварительного анализа не выявлено зависимости между жесткостью КЛ и временем восстановления.

Время восстановления



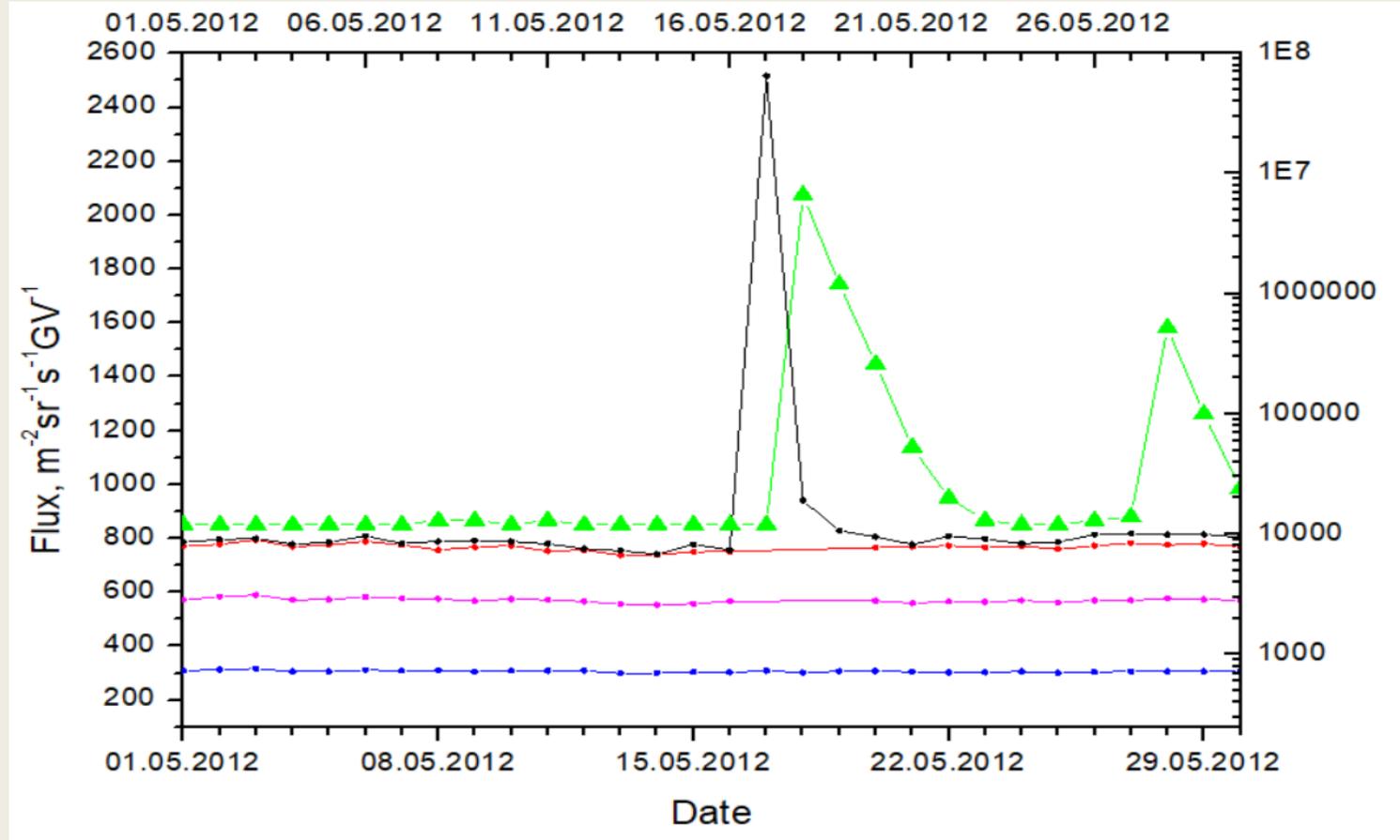
ФП, зарегистрированное экспериментом AMS-02 25.09.2011 (жесткость 1.815 ГВ).
Время восстановления составило 11 дней.

SEP 26.01.2012 по данным AMS и GOES



Временные ряды потоков протонов для различных жесткостей: **черный** – 0.9 ГВ, **красный** – 1.42 ГВ, **розовый** – 2.035 ГВ, **синий** – 3.13 ГВ по данным AMS-02 в сравнении с временным рядом протонов с энергией > 10 МэВ по данным GOES 15 для SEP 26.01.2012.

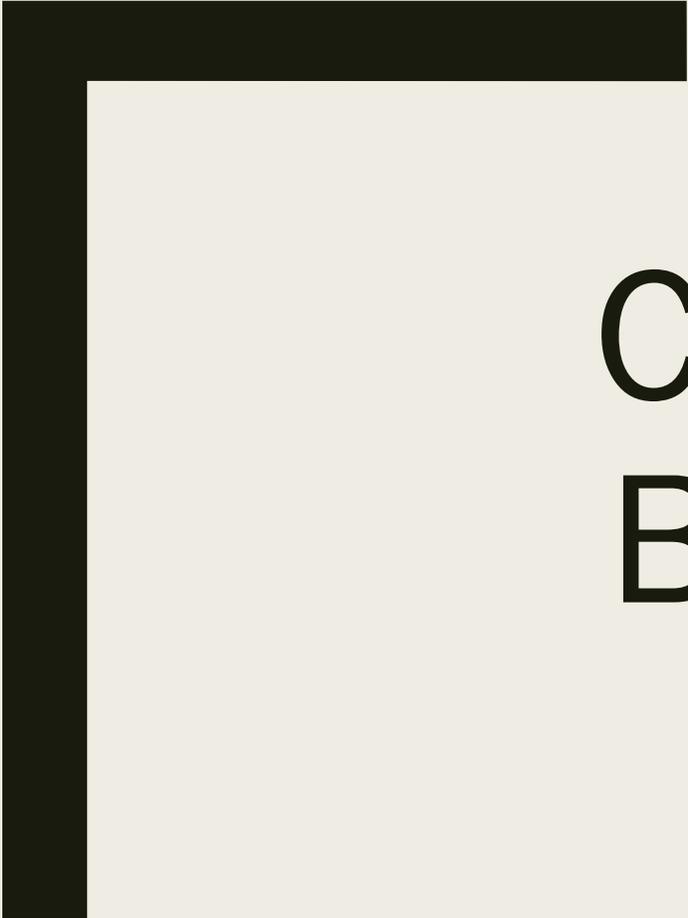
SEP 17.05.2012 по данным AMS и GOES



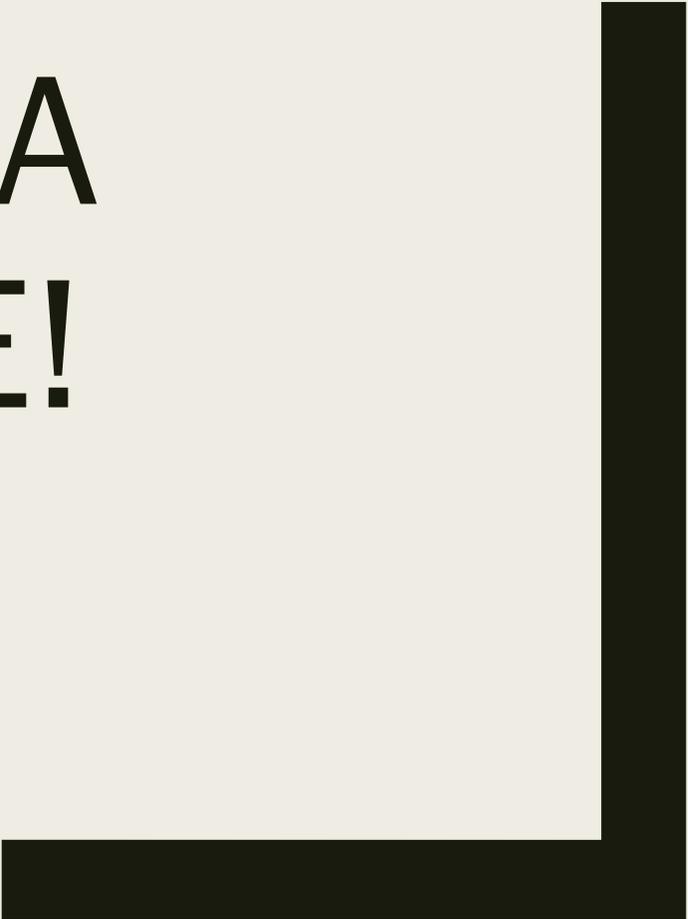
Временные ряды потоков протонов для различных жесткостей: **черный** – 0.9 ГВ, **красный** – 1.42 ГВ, **розовый** – 2.035 ГВ, **синий** – 3.13 ГВ по данным AMS-02 в сравнении с временным рядом протонов с энергией > 10 МэВ по данным GOES 15 для SEP 17.05.2012.

Заключение

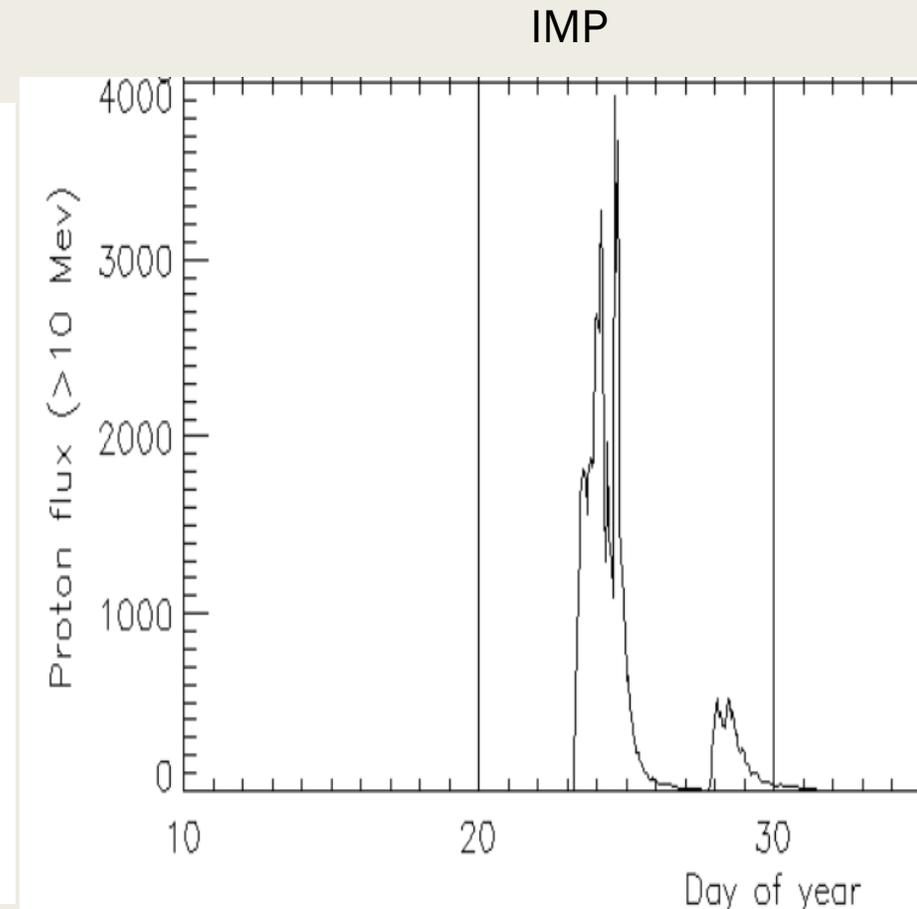
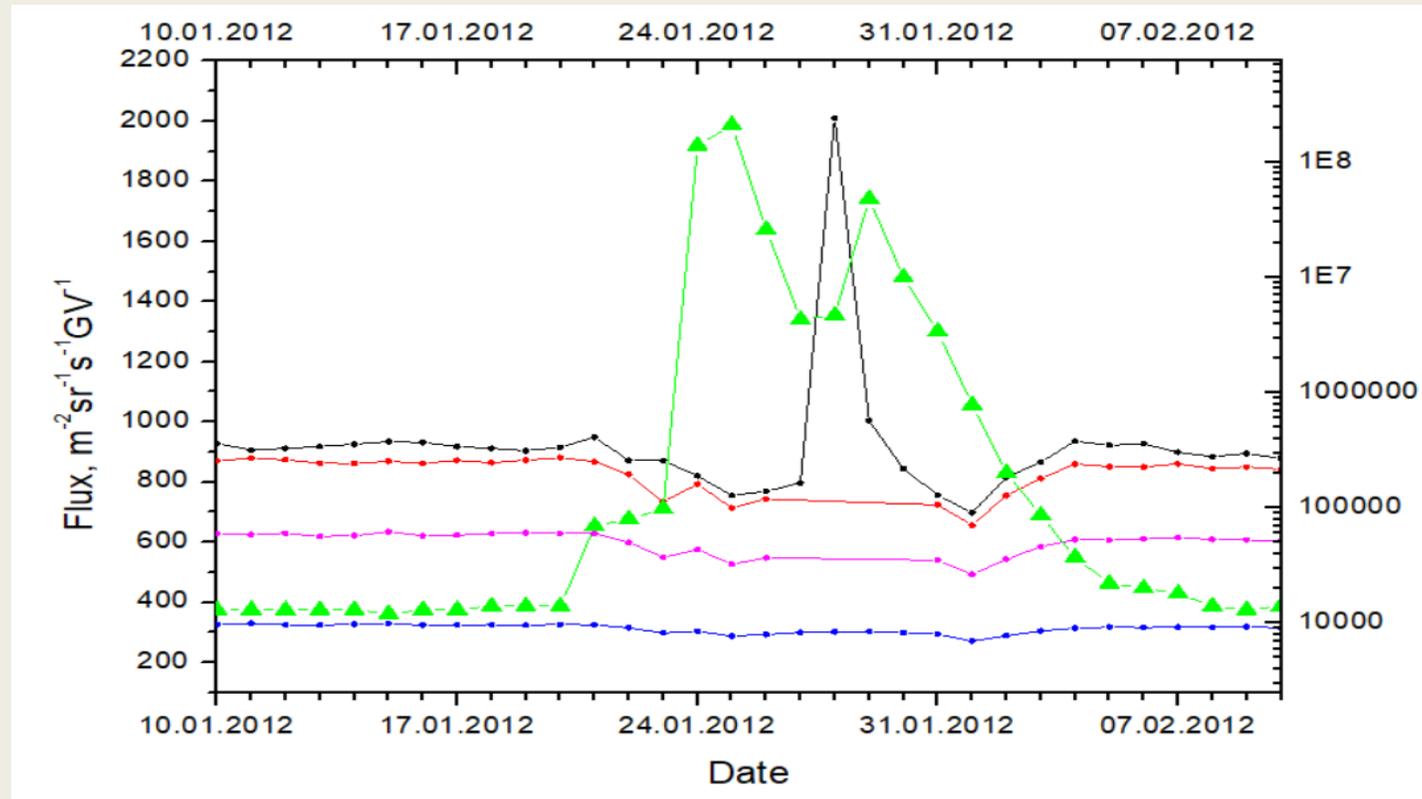
- Проанализированы зависимости амплитуд Форбуш понижений (ФП) от жесткости частиц (протонов и ядер гелия) для нескольких значений энергии КВМ;
- Получено, что до жесткости 10 – 12 ГВ в потоках протонов можно использовать степенную аппроксимацию $A = C \cdot R^{-\gamma}$ с показателем, однако при учете полного диапазона жесткости вплоть до ~ 20 ГВ, такая аппроксимация применима только на уровне значимости 90 %. Использование экспоненциальной функции $A = A_0 + C_{exp} \cdot \exp(-\frac{R}{b})$ даёт 99 % уровень значимости.
- Времена восстановления потока ПКЛ после ФП для протонов и ядер гелия составляют несколько дней.
- По данным AMS и GOES были рассмотрены SEP ($R \leq 1$ ГВ), которые хорошо регистрируются даже в присутствии ФП.



**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**

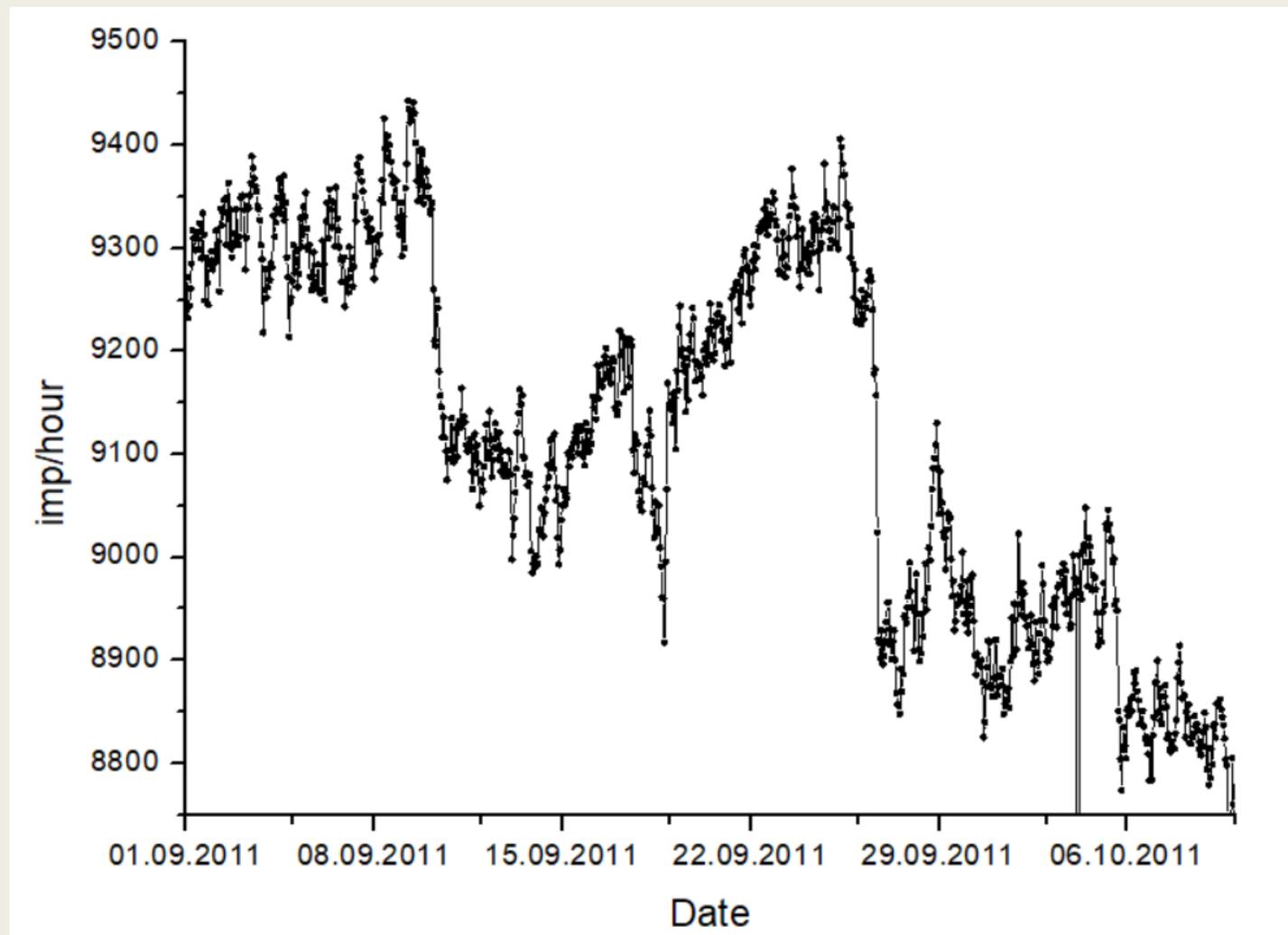


SEP 26.01.2012 по данным AMS и GOES



Временные ряды потоков протонов для различных жесткостей: **черный** – 0.9 ГВ, **красный** – 1.42 ГВ, **розовый** – 2.035 ГВ, **синий** – 3.13 ГВ по данным AMS-02 в сравнении с временным рядом протонов с энергией > 10 МэВ по данным GOES 15 для SEP 17.05.2012.

Время восстановления



ФП, зарегистрированное московским нейтронным монитором 25.09.2011.

