Экспериментальное определение эффективной жесткости космических лучей Мировой сети нейтронных мониторов по данным AMS-02.

Кобелев П.Г., Янке В.Г.

ИЗМИРАН
kobelev@izmiran.ru
yanke@izmiran.ru

ВККЛ-2026, Дубна, 29.06- 03.07. 2026

Введение

Вычисление эффективных жесткостей регистрируемых вариаций космических лучей для отдельных детекторов сети станций проведено во многих работах [Сирук и др., 2023, 2025; Юлбарисов и др., 2021; Alanko et al., 2023; Asvestari et al., 2017]. При анализе различных типов вариаций удобно представить сеть как единый многонаправленный прибор, позволяющий после применения разработанного а ИЗМИРАН метода GSM [Белов и др., 2009] определить изотропные вариации и вектор первой гармоники КЛ.

Цель: исследование модуляционных процессов космических лучей в гелиосфере с решением основных задач:

1) экспериментальная оценка параметров степенного спектра вариаций КЛ по данным AMS-02 для периода 2011-2019 годов;
2) вычисление эффективной жесткости различных типов регистрируемых вариаций КЛ сети станций космических лучей (долговременных, 27-дневных, ФЭ) .

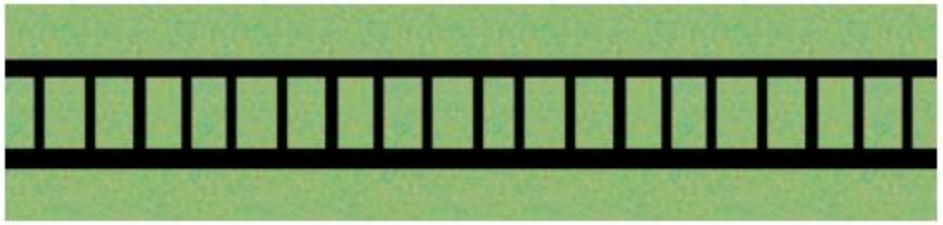
Привлекаемые данные измерений

	dR=>R_1 R_2-	Rm, GV
1	1.00 - 1.16	1.08
2	1.16 - 1.33	1.24
3	1.33 - 1.51	1.42
4	1.51 - 1.71	1.61
5	1.71 - 1.92	1.81
6	1.92 - 2.15	2.03
7	2.15 - 2.40	2.27
8	2.40 - 2.67	2.53
9	2.67 - 2.97	2.82
10	2.97 - 3.29	3.13
11	3.29 - 3.64	3.46
12	3.64 - 4.02	3.83
13	4.02 - 4.43	4.22
14	4.43 - 4.88	4.65
15	4.88 - 5.37	5.12
16	5.37 - 5.90	5.63
17	5.90 - 6.47	6.18
18	6.47 - 7.09	6.78
19	7.09 - 7.76	7.42
20	7.76 - 8.48	8.12
21	8.48 - 9.26	8.87
22	9.26 - 10.1	9.67
23	10.1 - 11.0	10.54
24	11.0 - 13.0	11.98
25	13.0 - 16.6	14.74
26	16.6 - 22.8	19.58
27	22.8 - 33.5	27.90
28	33.5 - 48.5	40.68
29	48.5 - 69.7	58.66
30	69.7 - 100.0	84.24

В настоящей работе использованы данные:
- суточные данные потоков протонов AMS-02 [Aguilar et al, 2021], полученные в период 2011–2019, и среднемесячные данные на их основе. За базовый интервал взят период минимальной солнечной активности 2019 года. Непрерывный диапазон значений для группировки данных разбит на дискретные интервалы - бины. По определению, средняя жесткость в случае степенного спектра для спектрального индекса γ на интервале [R1, R2] определяется как [Lafferty et al., 1995]

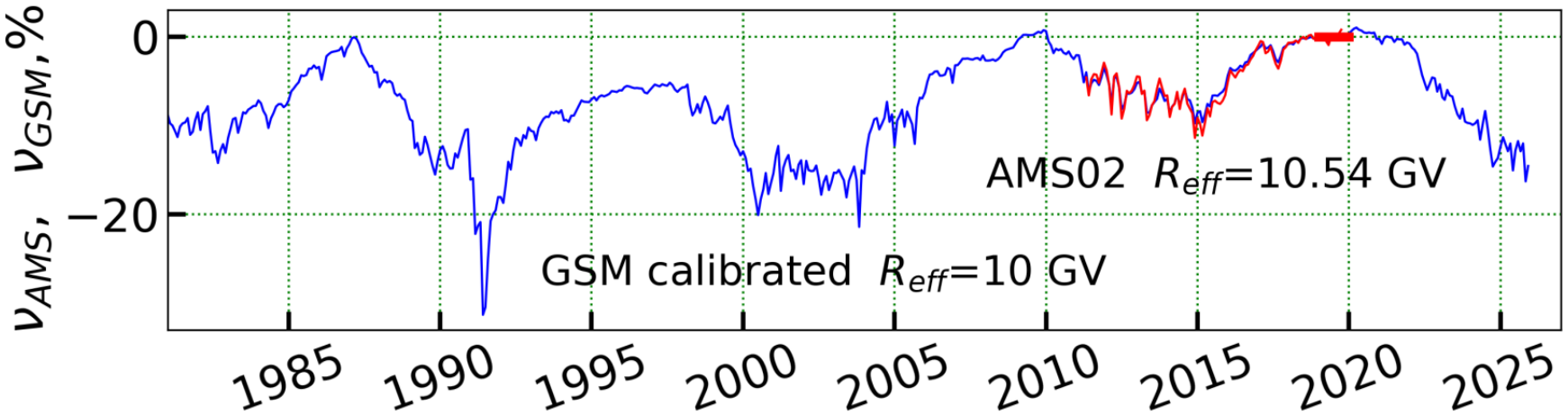
$$a \cdot \overline{R}^{-\gamma} = \frac{a}{(R_2 - R_1)} \int_{R_1}^{R_2} R^{-\gamma} dR$$

Решение уравнения для каждого интервала жесткостей дает среднее значение жесткости для показателя γ=2.7.



Привлекаемые данные измерений

Привлекались результаты обработки данных мировой сети нейтронных мониторов методом GSM [Белов и др., 2009]. Результаты GSM доступны на ресурсе Yandex Disk [https://disk.yandex.ru/d/mKHMM2dztqNoHw (раздел GSM)].



Калибровка данных GSM (ν_{PAMELA} = J/J_{2009}-1) проведена по данным PAMELA для базового периода 2009.

Аппроксимация спектров вариаций

Для аппроксимации спектров частиц часто используется аппроксимация, предложенная Эллисоном и Рамати [Ellison & Ramaty, 1985]. Мы этот вид аппроксимации применили для **спектра вариаций** $v=(J-J_B)/J_B$

$$dJ/J_B = v = aR^{-\gamma}\exp(-R/R_L)$$

для параметров a, γ, R_L. При небольших значений характеристической жесткости R_L ($R_L \ll R_{eff}$) наблюдается степенной спектр с сильным экспоненциальным затуханием, для больших значений параметра R_L ($R_L \gg R_{eff}$) спектр стремится к степенному спектру.
Данный спектр линеаризуется простым логарифмированием.

$$\ln v = \ln a - \gamma \ln R - 1/R_L R$$

для параметров ln a, γ, $1/R_L$.

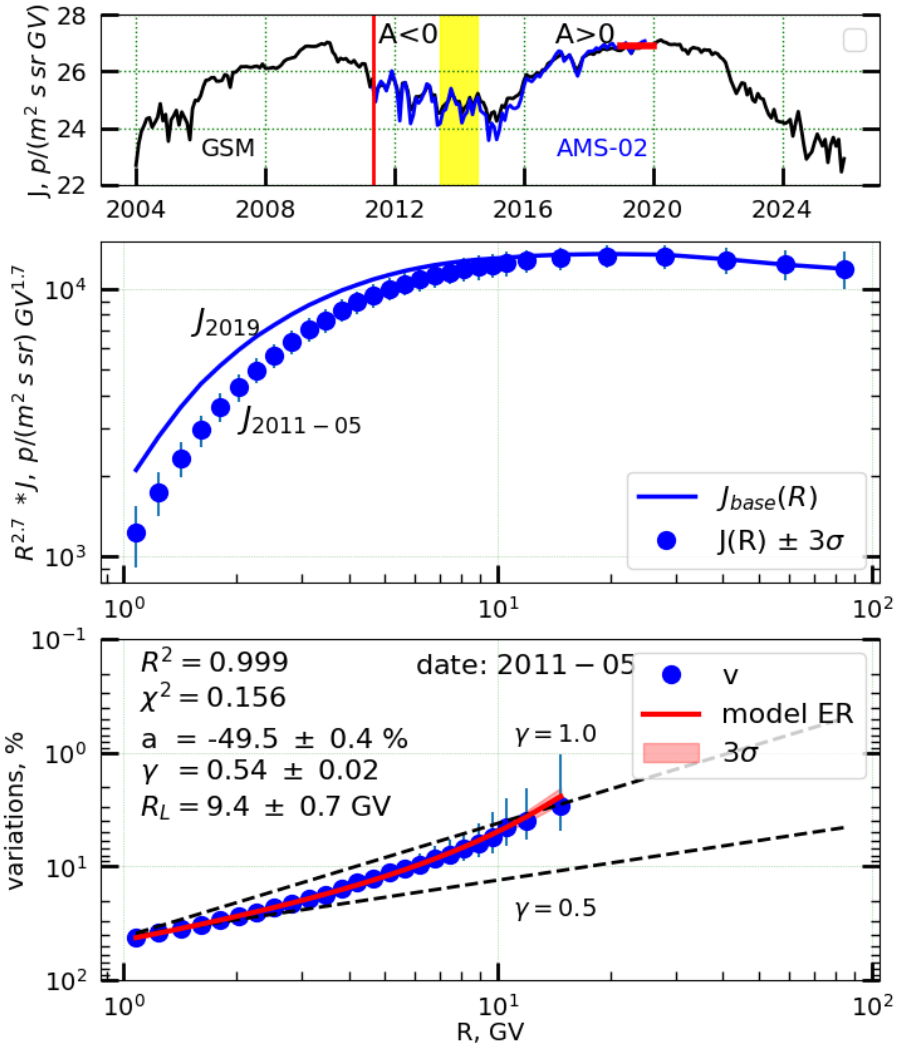
(В планах) Также в работе [Liu et al., 2020] предложен другой вариант спектра

$$dJ/J = aR^{-\gamma_1}\left[1+\left(\frac{R}{R_L}\right)^{\alpha}\right]^{\frac{\gamma_1-\gamma_2}{\alpha}}$$

который после логарифмирования имеющий нелинейный вид

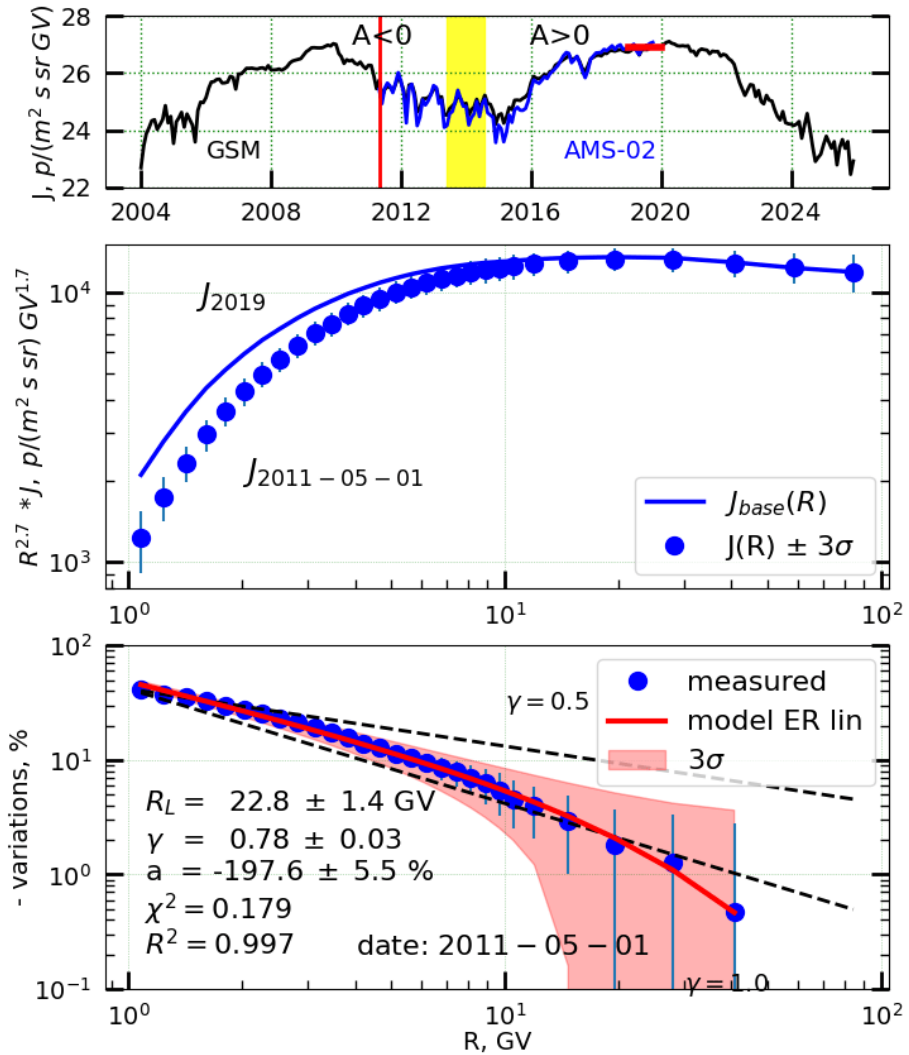
$$\ln v = \ln a - \gamma_1 \ln R + \frac{\gamma_1-\gamma_2}{\alpha}\ln\left[1+\left(\frac{R}{R_L}\right)^{\alpha}\right]$$

Результат аппроксимации. Вариант 2019-nolin



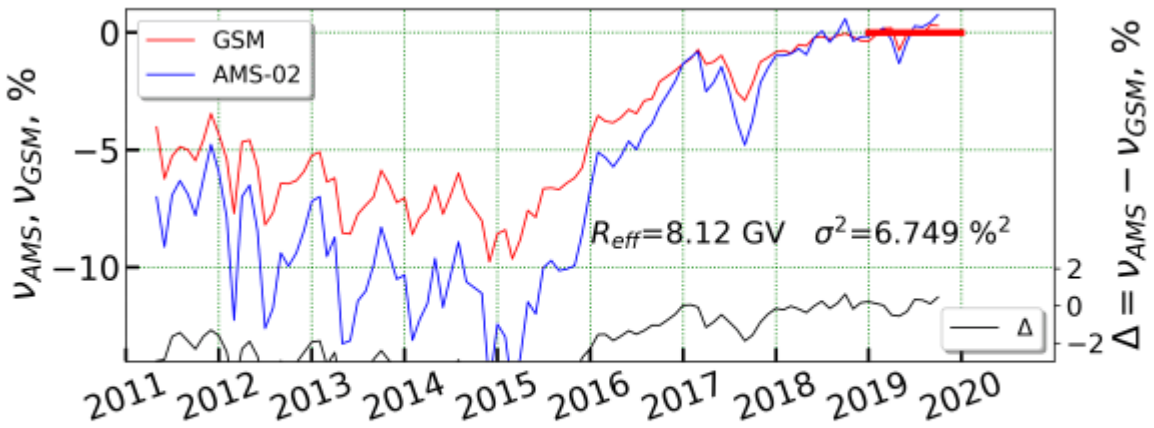
$$dJ/J = v = aR^{-\gamma}\exp(-R/R_L)$$

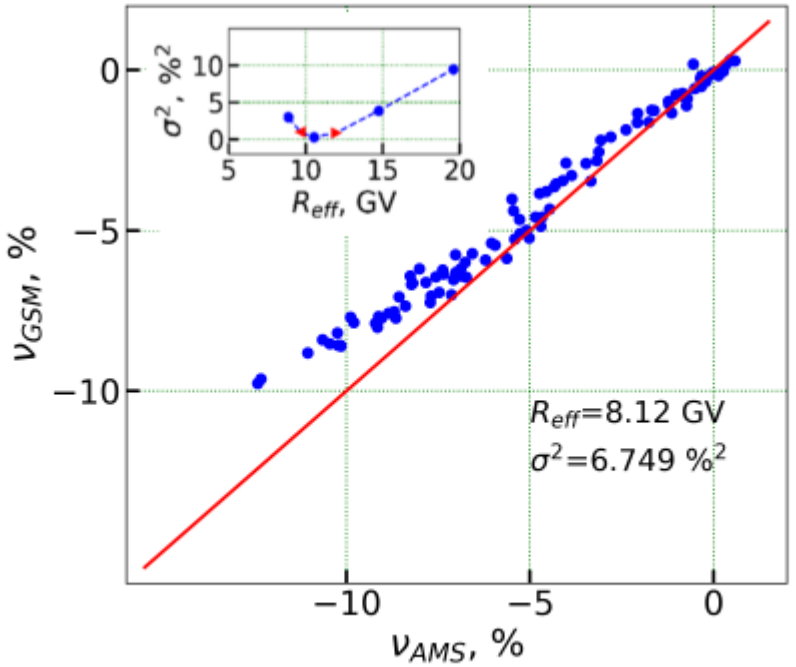
Результат аппроксимации. Вариант 2019-lin



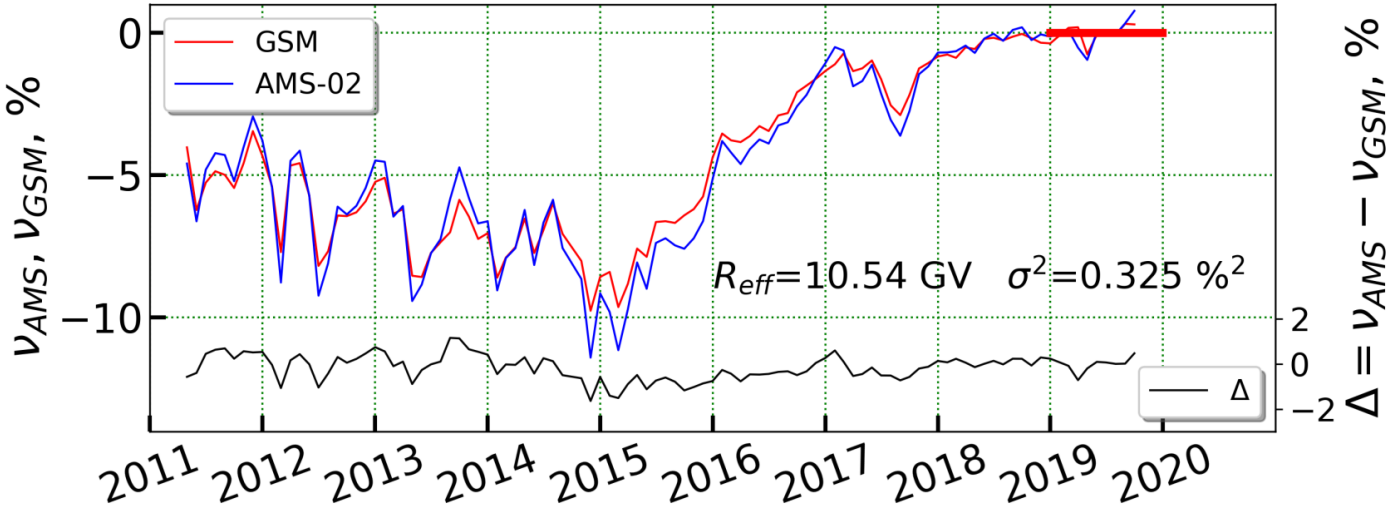
$$\ln v = \ln a - \gamma \ln R - 1/R_L R$$

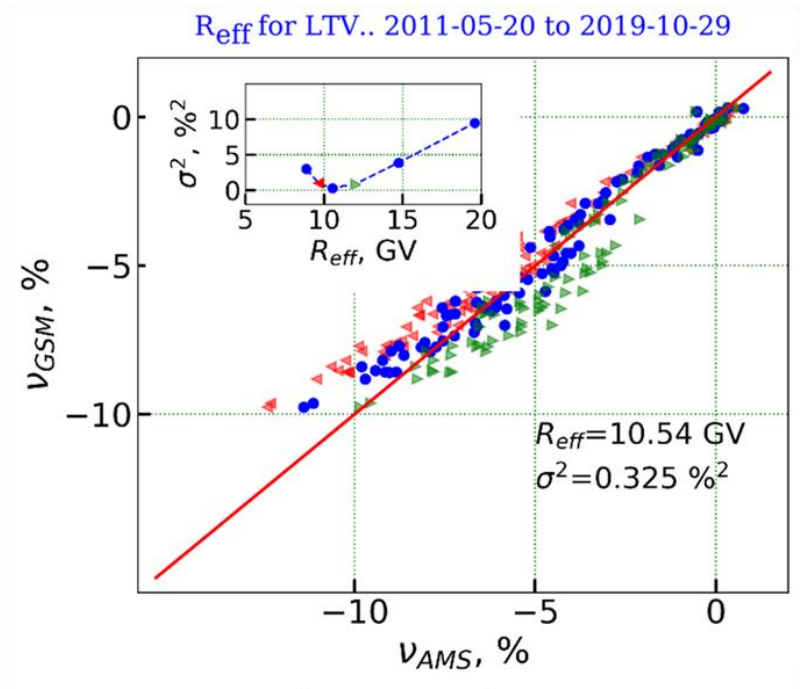
Методика определения эффективной жесткости





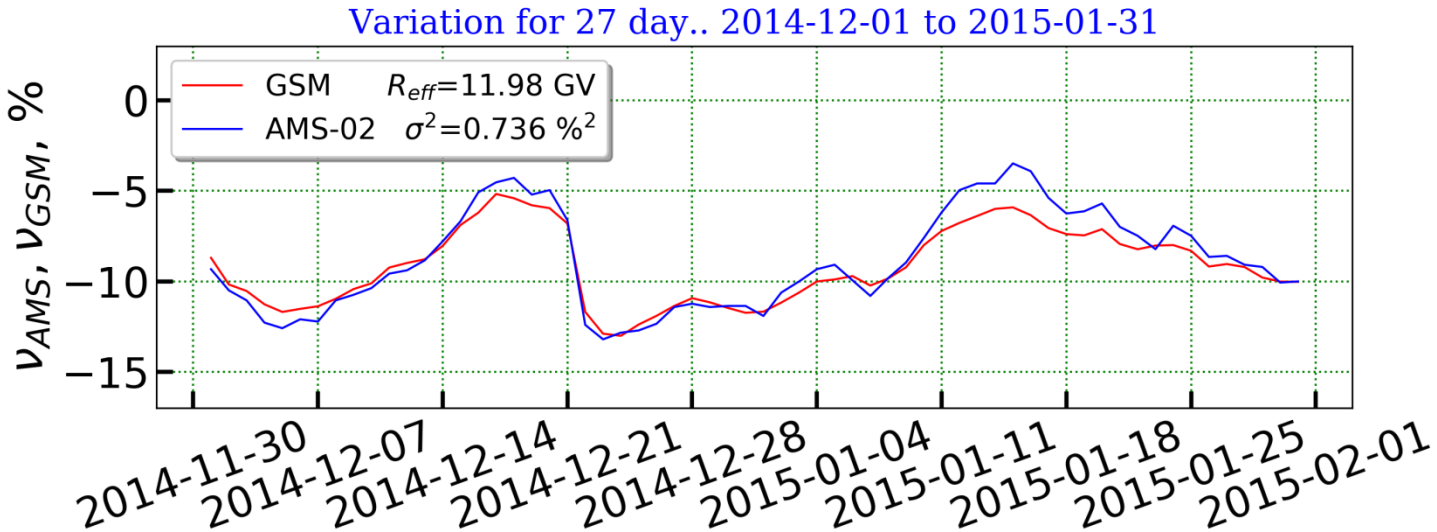
Эффективная жесткость сети NM КЛ (LTV)

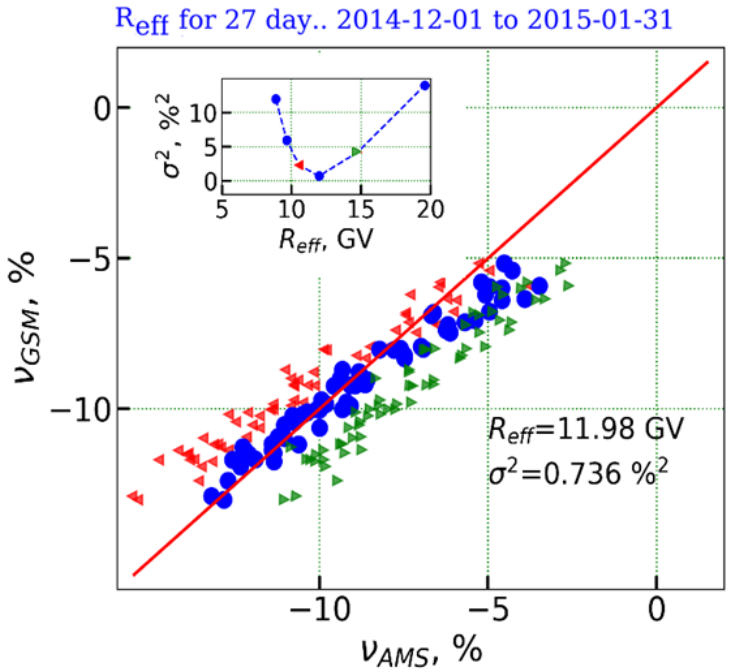




R_{eff} =10.5±0.3 GV

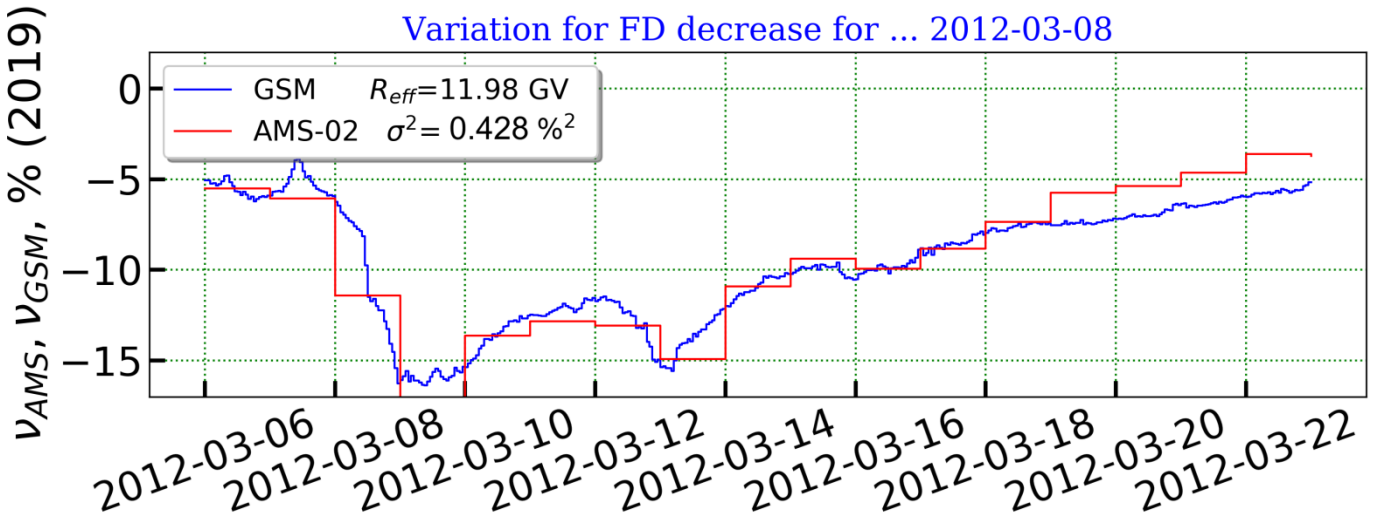
Эффективная жесткость сети NM КЛ (27 days - special)

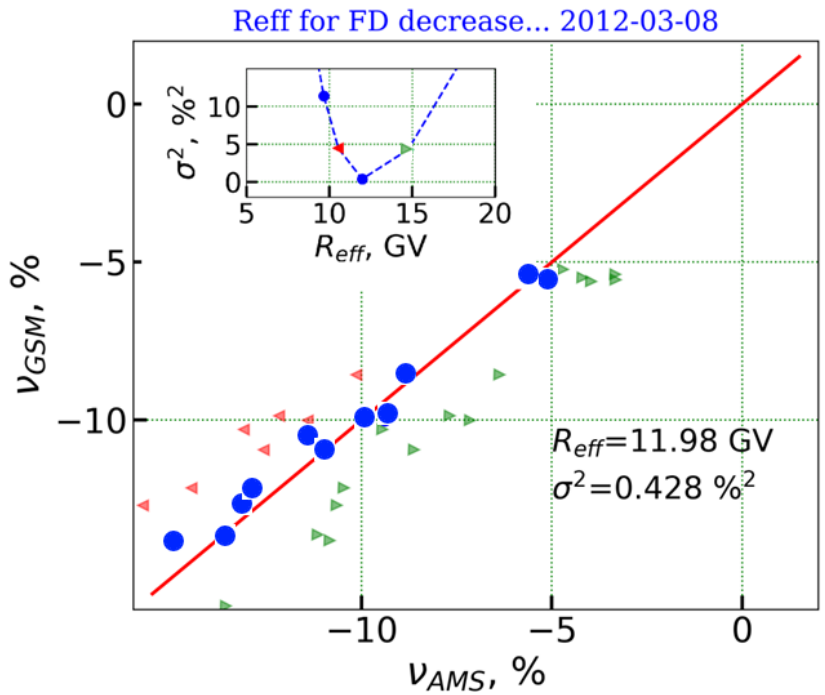




R_{eff} =11.8 ± 0.4 GV

Эффективная жесткость сети NM КЛ (FD)





R_{eff} =12.0± 0.4 GV

Выводы Итоги и перспектива

1) Аппроксимация спектра вариаций трехпараметрической функцией Эллисона и Рамати [Ellison & Ramaty, 1985] недооценивает вариации при жесткостях больше 20 GV. Линеаризация функции Эллисона и Рамати практически не улучшает результат аппроксимации.

2) Эффективная жесткость сети нейтронных мониторов как единого многонаправленного детектора :

- для долговременных вариаций КЛ равна **10.5±0.3** GV (2011-2019),
- для 27 дневных вариаций – **11.8± 0.4** GV (декабрь 2014 – январь 2015)
- для Форбуш – понижения 2012-03-08 – **12.0 ± 0.4** GV (FD 2012-03-08).
- Планируется:

Спасибо за внимание

A

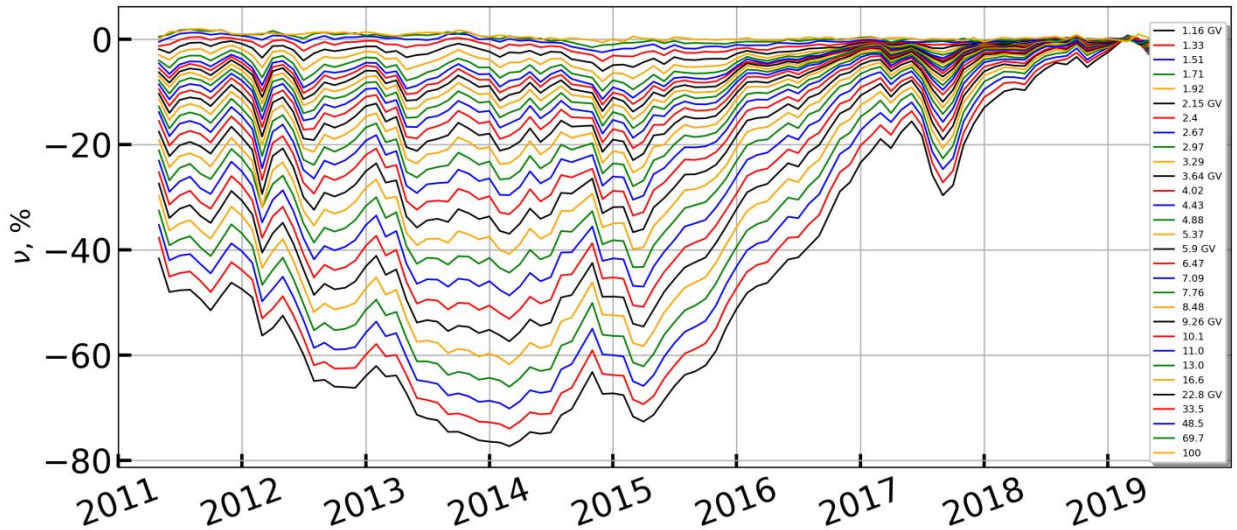


Рис.6. Временная зависимость интенсивности протонов различных жесткостей по среднемесячным данным магнитного спектрометра AMS-02. Базовый период – 2019 год.

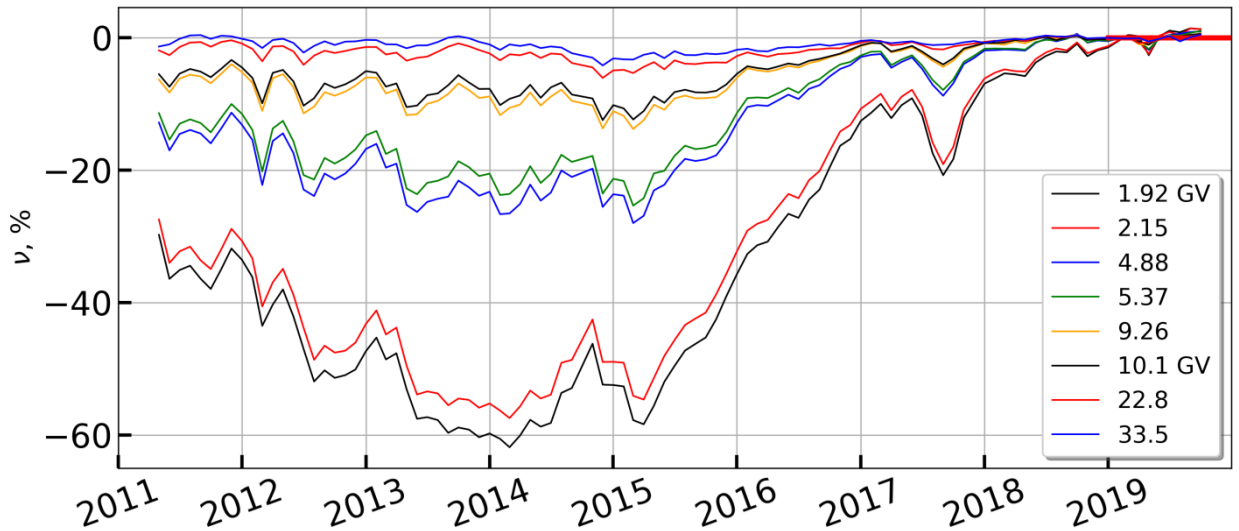
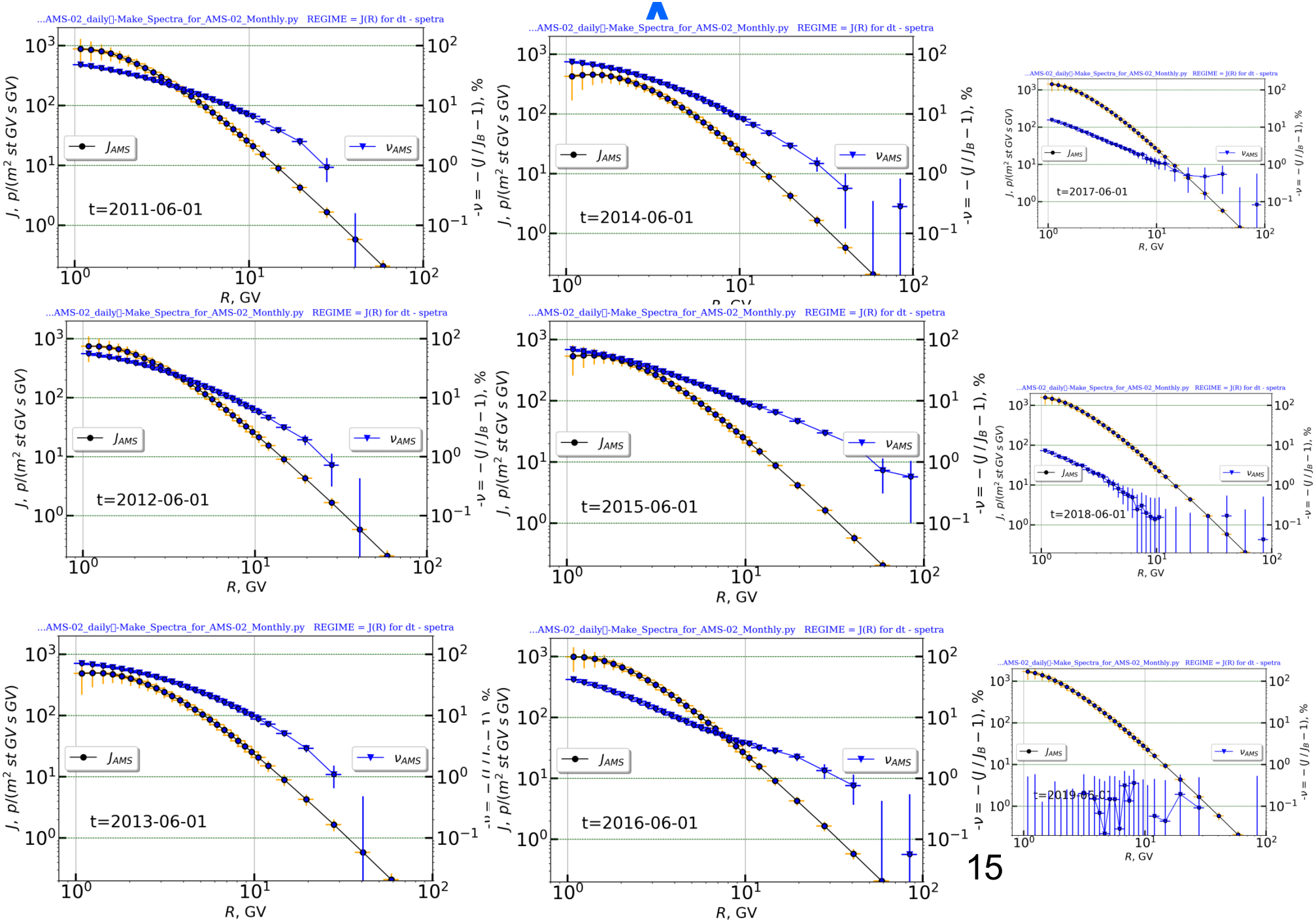
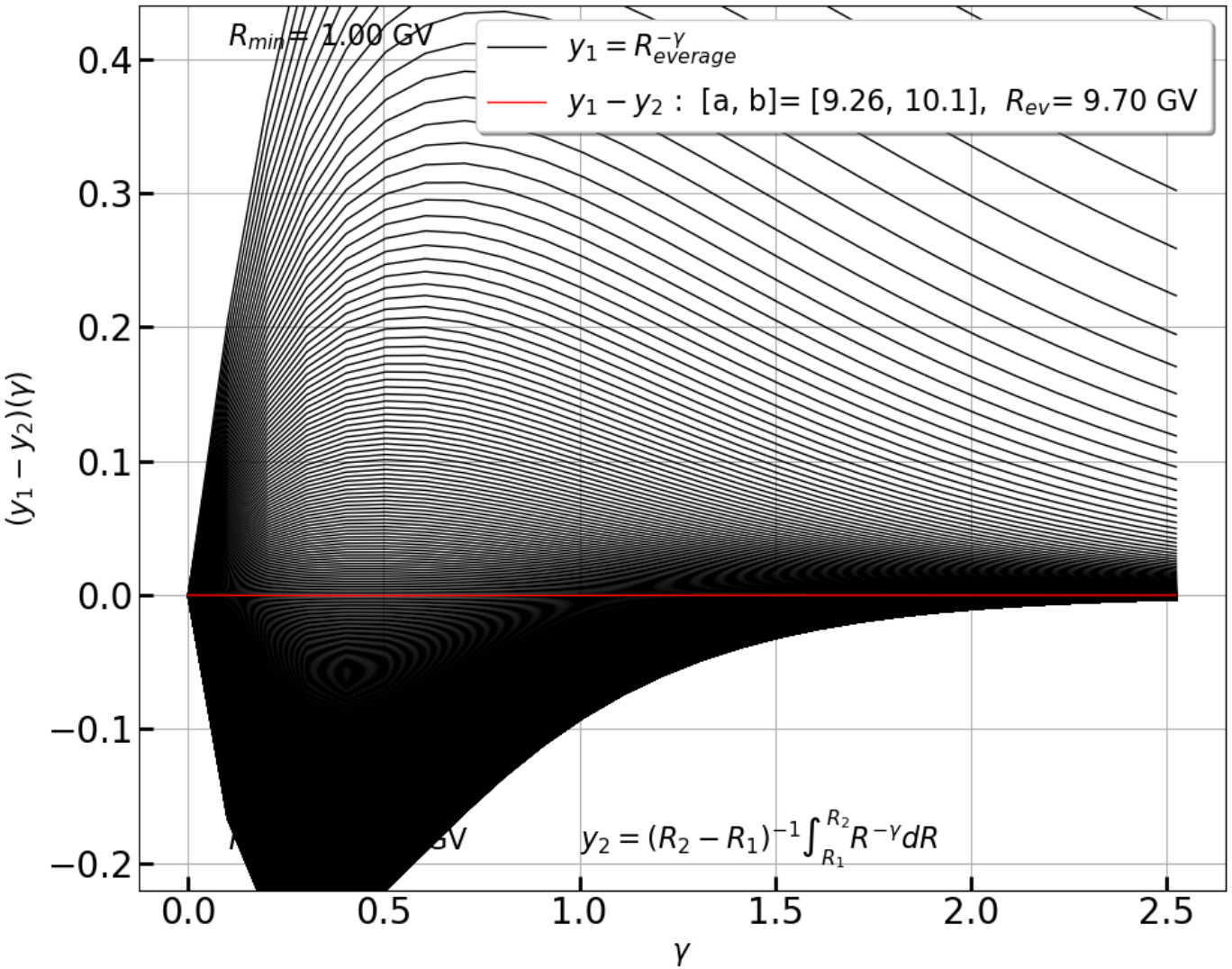


Рис.7. Временная зависимость интенсивности протонов различных жесткостей по среднемесячным данным магнитного спектрометра AMS-02. Базовый период 2019 года показан горизонтальным отрезком.


...AMS-02_daily-Make_Spectra_for_AMS-02_Monthly.py REGIME = J(R) for dt - spetra
t=2011-06-01
t=2012-06-01
t=2013-06-01
t=2014-06-01
t=2015-06-01
t=2016-06-01
t=2017-06-01
t=2018-06-01
t=2019-06-01
J_{AMS}
ν_{AMS}
J, $p/(m^2\ st\ GV\ s\ GV)$
$-\nu = -(J/J_B - 1)$, %
R, GV

Calculation Revarage