



Экспериментальный спектр вариаций космических лучей в диапазоне жесткостей от 1-20 GV по данным AMS-02 и его аппроксимация

Email: Янке В.Г. (yanke@izmiran.ru), Трефилова Л.А., Кобелев П.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т., Ерошенко Е.А., Оленева В.А. (ИЗМИРАН)

Skype: Victor Yanke

Эффективные энергии, к которым чувствительны наземные детекторы (нейтронные супермониторы и мюонные телескопы) ~ 10 GeV и более. Только отдельные детекторы на космических аппаратах достигают такого диапазона энергий. Это магнитные спектрометры PAMELA и AMS-02.

Задача настоящей работы - экспериментально по данным AMS-02 **определить спектр вариаций** космических лучей, который до настоящего момента задавался только эмпирически.

Спектр вариаций и его аппроксимация

В простейшем случае изотропных вариаций непосредственно наблюдаемые на наземных детекторах относительные вариации $v_i = (N - N_0) / N_0$ скорости счета могут быть представлены в следующем виде

$$v_i = \int_{R_c^i}^{\infty} W^i(R, R_c^i, h_0^i) \cdot \frac{\delta J}{J_B}(R) \cdot dR$$

Задачей анализа наземных измерений является определение спектра вариаций $\delta J/J_B(R)$. Математически задача сводится к решению обратной задачи, т.е. интегрального уравнения Фредгольма I рода, где в качестве ядра уравнения выступает функция связи

$$W^i(R, R_c^i, h_0^i)$$

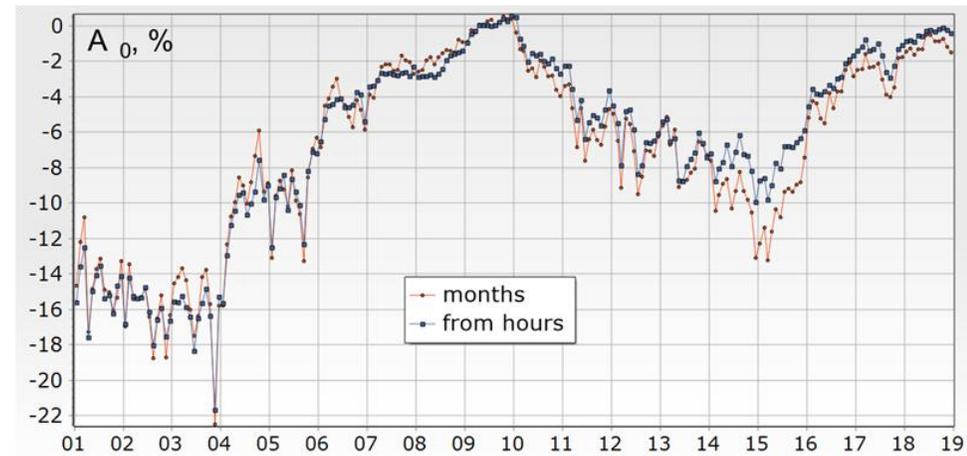
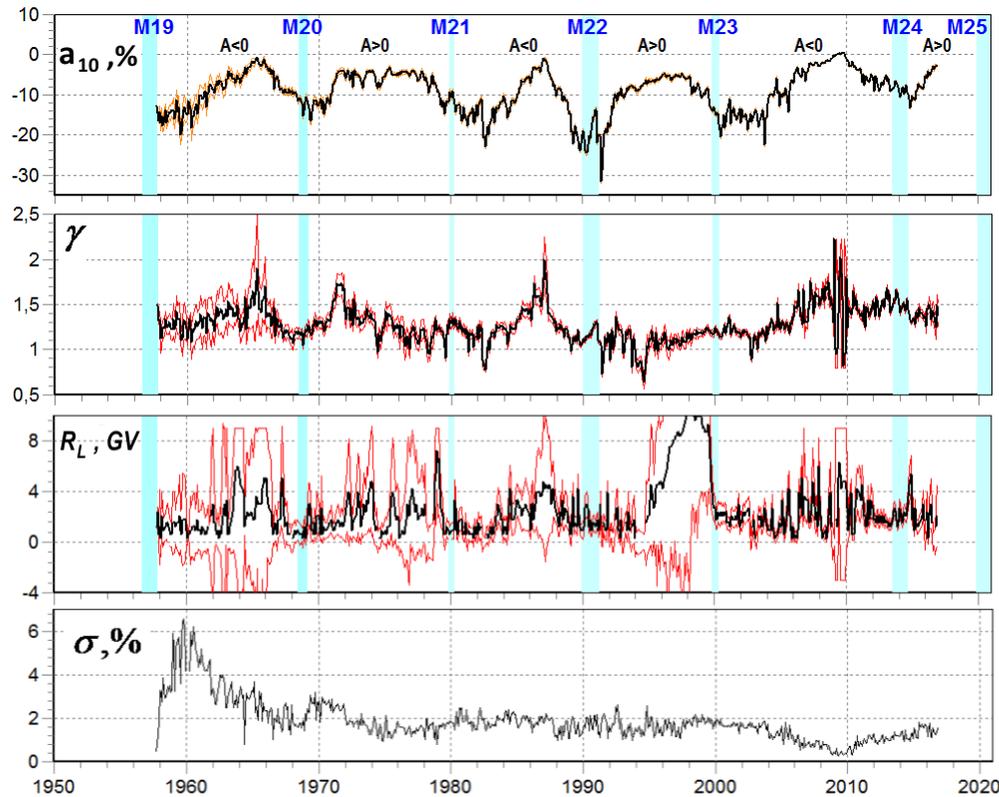
Один из вариантов решения такой системы – задать вид спектра вариаций, например, в виде

$$\delta J/J_B(R) = a_1 / (R_L + R)^\gamma$$

и определить параметры для такого представления. Но вид спектра задается эмпирически и поэтому вопрос о форме спектра вариаций остается открытым.

Это адекватный выбор спектра вариаций?

Что мы измеряем и определяем на Земле?

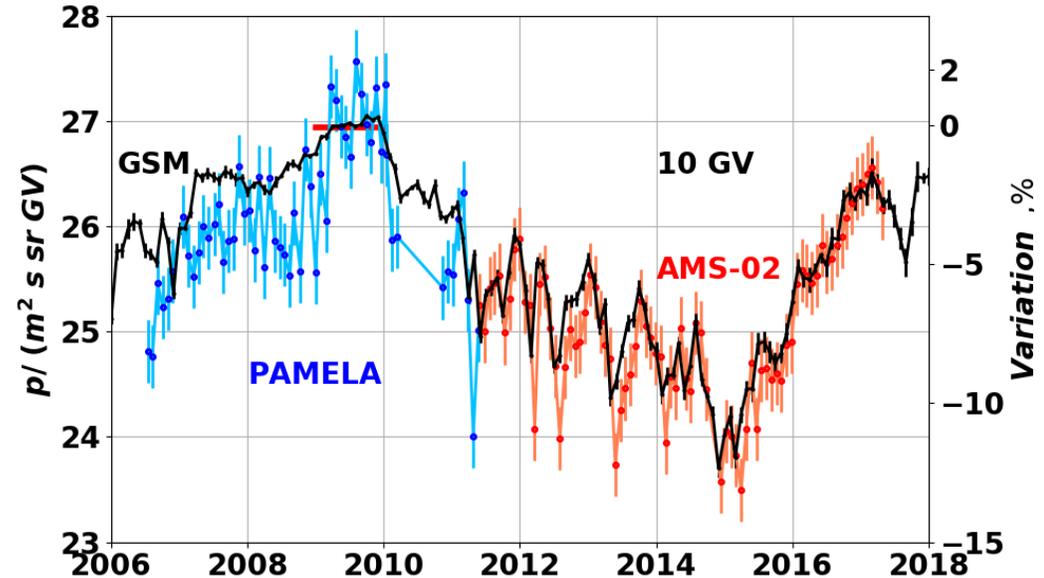
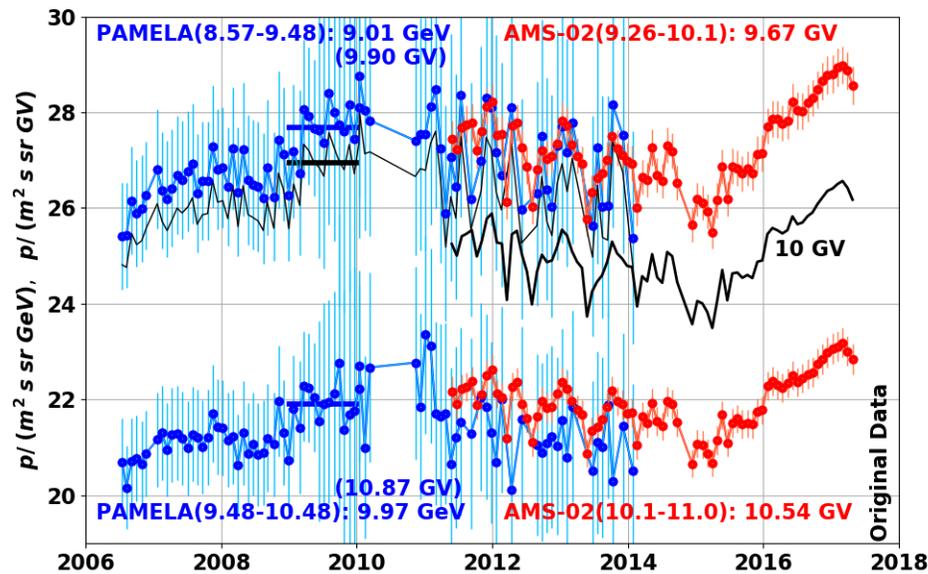


Результат GSM анализа данных Мировой сети детекторов для двух независимых моделей: изотропной (по среднемесячным данным) и анизотропной модели (по часовым данным).

Параметры спектра вариаций галактических космических лучей

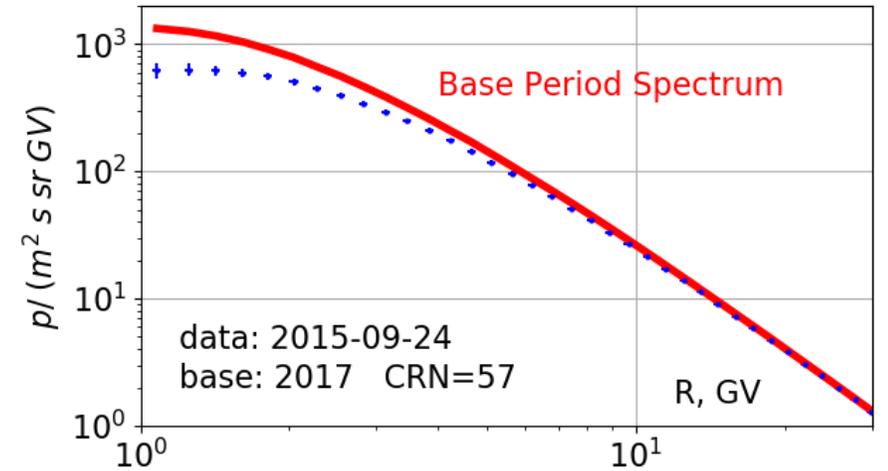
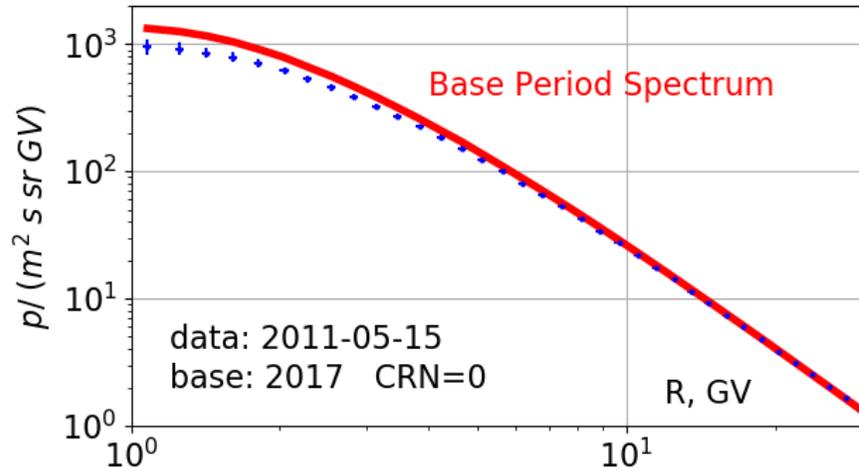
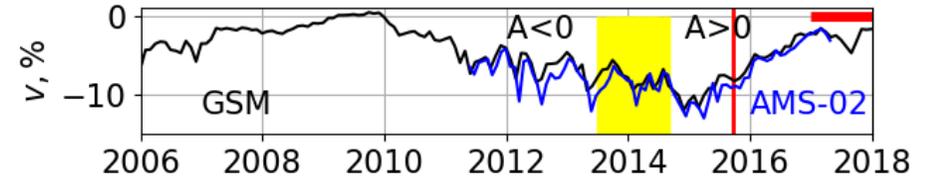
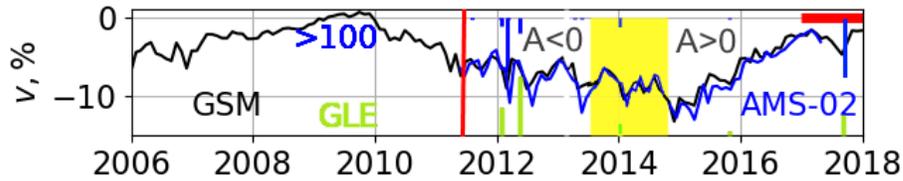
$$\delta J / J(R) = a_1 / (R_L + R)^\gamma$$

Что мы можем определить по данным AMS-02?



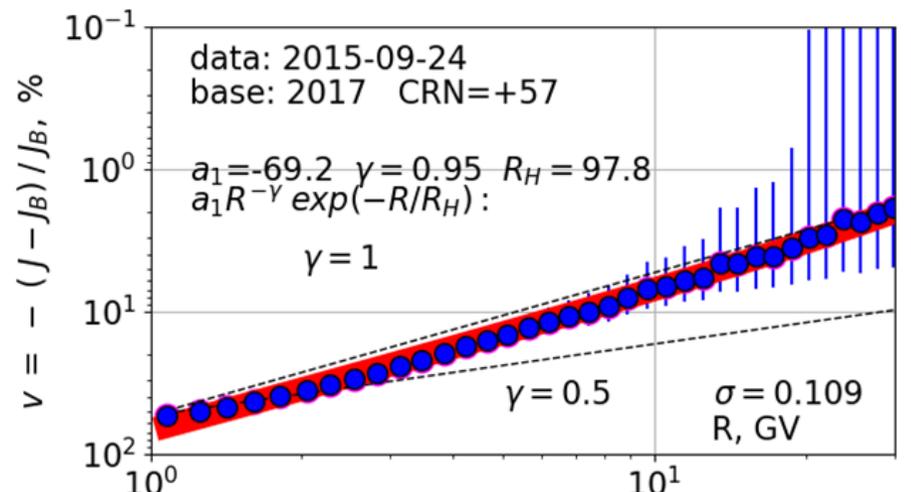
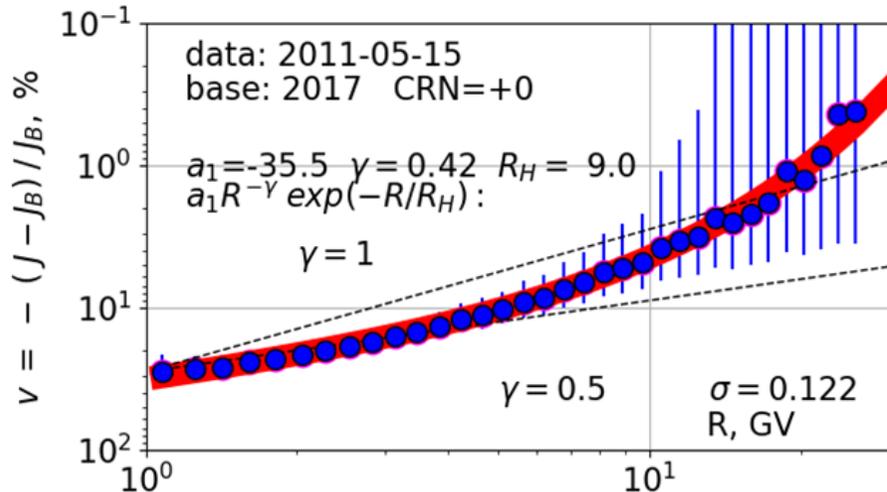
Определение спектра вариаций $\delta J/J_v(R)$ произведено по данным AMS-02, [Aguilar et al., 2015; 2018]. Статистическая точность данных магнитного спектрометра AMS-02 существенно выше, поскольку геометрический фактор магнитного спектрометра AMS-02- около $0.5 \text{ m}^2\text{sr}$, а спектрометра PAMELA только $21.5 \text{ cm}^2\text{sr}$. Точность данных PAMELA около 4%, а точность данных AMS-02 1.5% для жесткостей $\sim 10 \text{ GV}$.

Что мы можем определить по данным AMS-02?



$$v(R) = J/J_{base} - 1$$

[Анимация](#)



Линеаризация задачи аппроксимации и решение

Возможные представления спектра вариаций

$$\frac{\delta J}{J} = a_1 R^{-\gamma} \quad a_1 (R_L + R)^{-\gamma} \quad a_1 R^{-\gamma} \exp(-R/R_H)$$

Система уравнений

$$y_i = a_1 R_i^{-\gamma} \exp(-R_i/R_H)$$

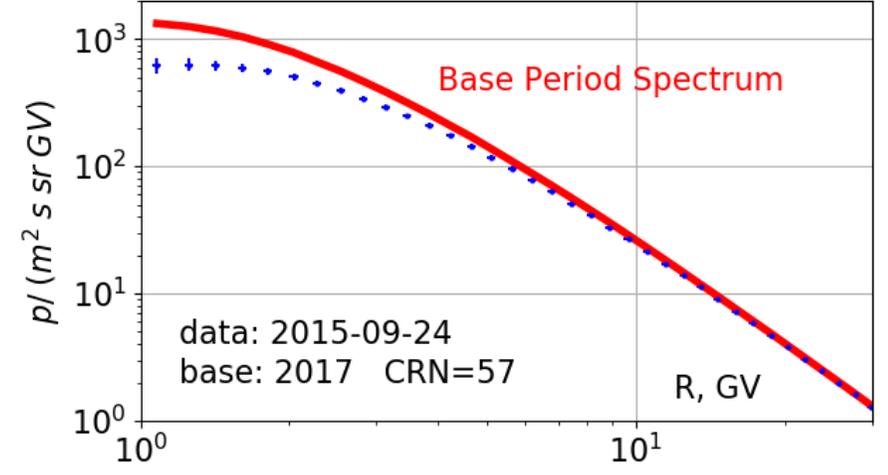
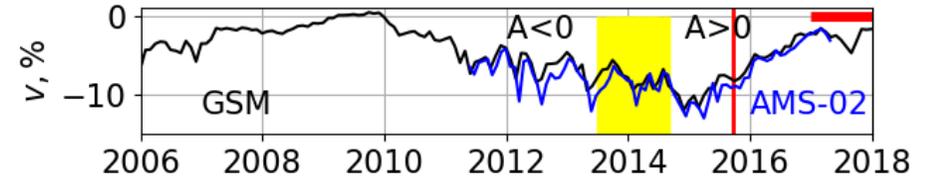
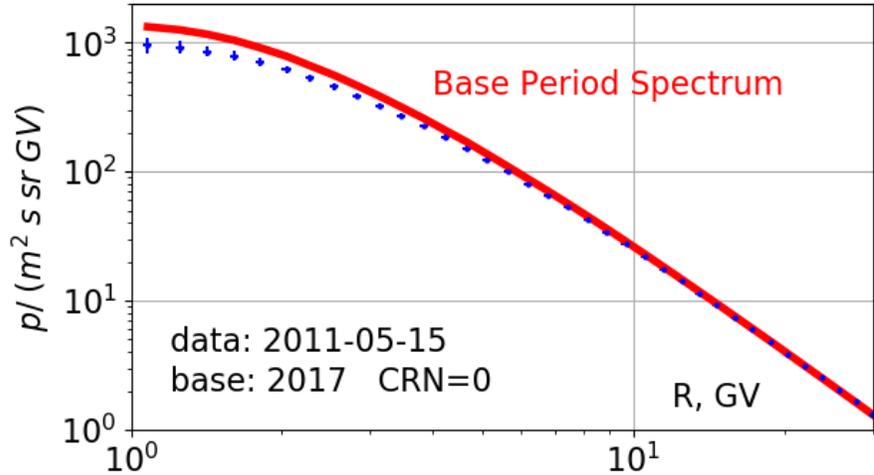
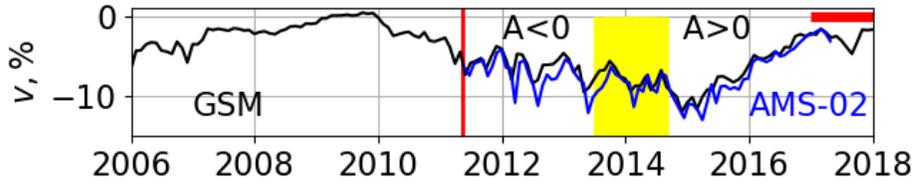
нелинейная относительно трех параметров a_1 , γ и R_H , но логарифмированием может быть приведена к линейной. В результате получим систему *линейных* уравнений относительно параметров $\ln a_1$, γ и $1/R_H$:

$$\ln y_i = \ln a_1 - \gamma \ln(R_i) - R_i / R_H$$

или в матричной форме с учетом веса каждого измерения $Y=AX$, где столбец данных, основная матрица системы, веса и столбец решения определены как

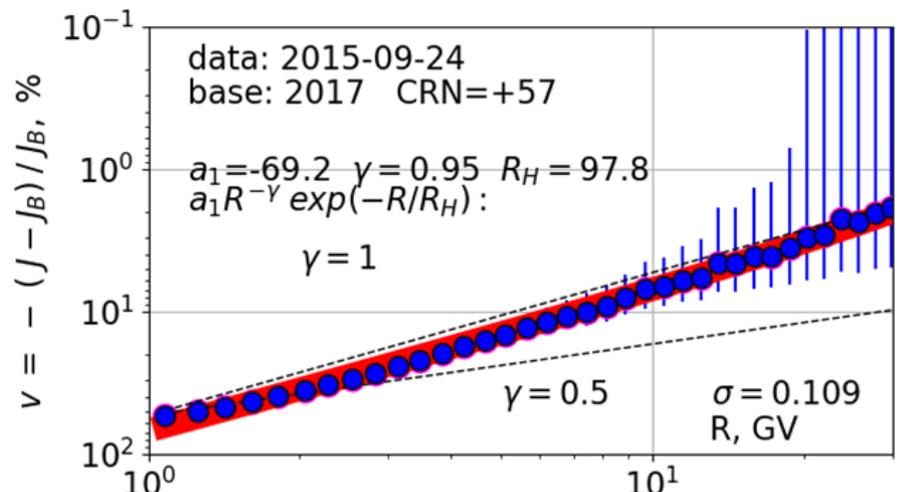
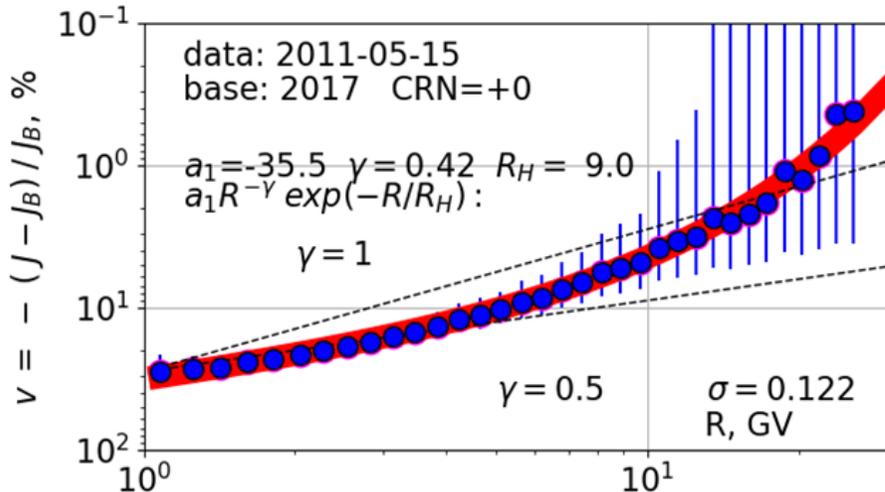
$$Y = \begin{pmatrix} \ln y_1 \\ \dots \\ \ln y_m \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} 1 & -\ln R_1 & -R_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & -\ln R_m & -R_m \end{pmatrix} \quad P = (\sigma_1^{-1}, \dots, \sigma_m^{-1})$$
$$X^T = (\ln a_1, \gamma, 1/R_H)$$

Что мы можем определить по данным AMS-02?



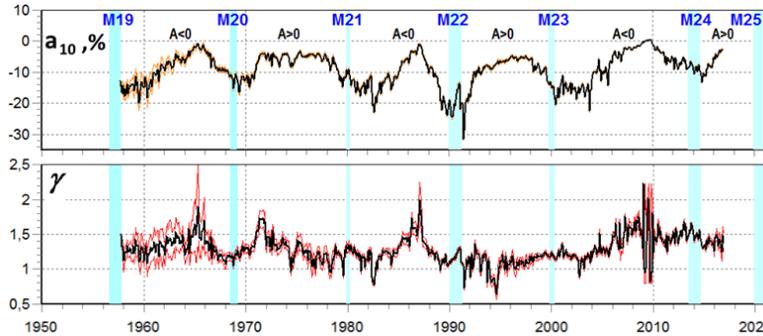
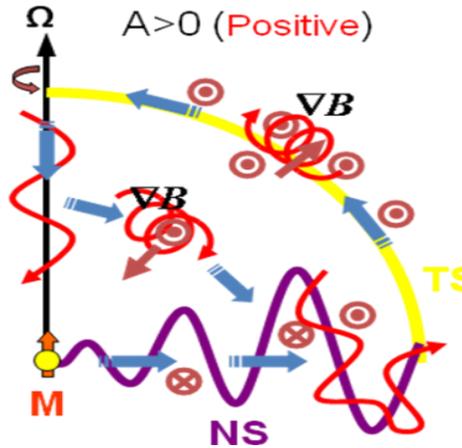
*** $v(R) = J/J_{Base}$

[Анимация](#)

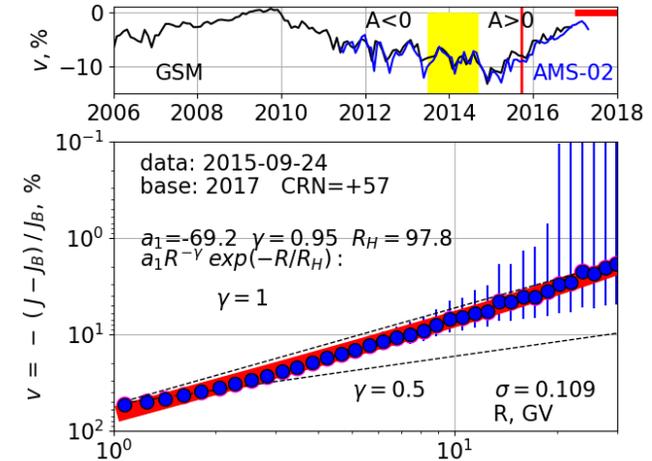


Спектр вариаций : $A > 0$

[Jokipii et al., 1977]



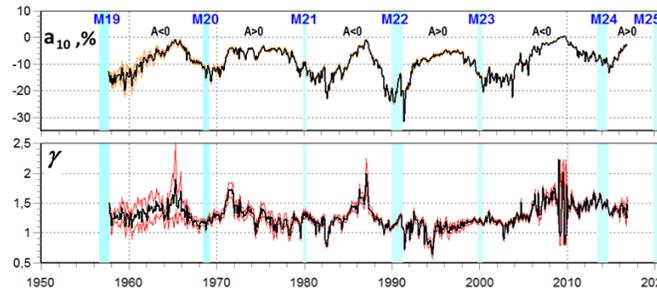
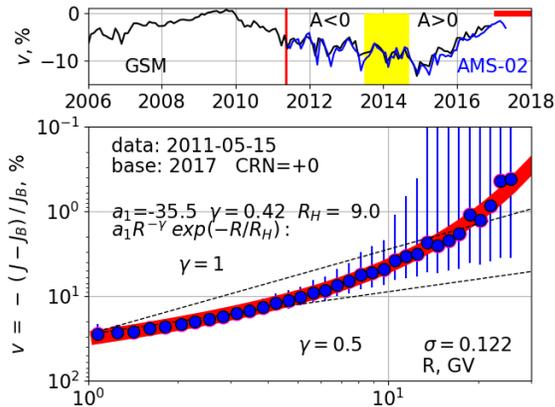
~~$$\Delta E = |q\Phi| + p \int_r^R \frac{u}{\lambda} dr$$~~



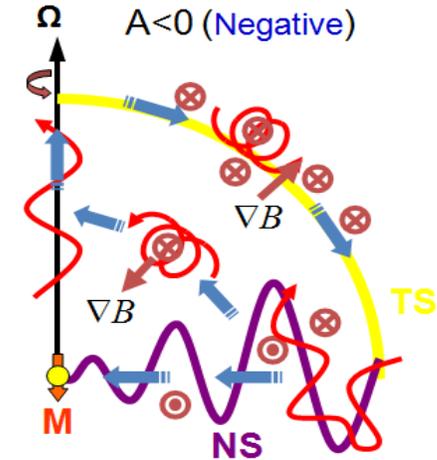
В периоды положительной магнитной полярности ($A > 0$) протоны галактических КЛ попадают в гелиосферу из полярных областей, затем дрейфуют в неоднородном магнитном поле по широте к экватору, и уходят из гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя. Детектор находится вблизи (.) M. При дрейфе по широте от полюса к экватору частицы теряют энергию, соответствующую разности потенциалов Φ , равной потенциалу гелиосферы $\Phi_0(u, V_e)$. То есть при ($A > 0$) значительная часть потерь энергии связана с дрейфом от полюсов к экватору (первое слагаемое). Так как потенциал Φ слабо зависит от возмущенности магнитного поля - в минимуме СА максимум амплитуды изотропной вариации **плоский**. Интенсивность вариаций пропорциональна $\Delta\Phi/R$ [], т.е. показатель $\gamma \approx 1$.

Почему это ведет к чисто степенному спектру вариаций? - Если второе слагаемое с длиной свободного пробега и другой зависимостью от энергии дает малый вклад, что реалистично, так как на полюсах рассеяние частиц слабое и длина пробега большая.

Спектр вариаций: $A < 0$



~~$$\Delta E = |q\Phi| + p \int_r^R \frac{u}{\lambda} dr$$~~



[Jokipii et al., 1977]

При отрицательной полярности ($A < 0$) протоны дрейфуют из внешней гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя, затем по широте к полярным областям и покидают гелиосферу за счет положительной дрейфовой скорости на полюсах ($\Phi = 0$). Таким образом, модуляция протонов определяется **только потерями энергии при распространении в экваториальной области**. Эти потери зависят в основном от длины свободного пробега частиц. То есть наблюдаемый на Земле спектр хорошо коррелирует с уровнем возмущенности магнитного поля. Поэтому в минимуме СА максимум **острый**. Показатель спектра вариаций определяется зависимостью длины свободного пробега от энергии. Для высоких энергий ожидается рассеяние мелкомасштабными (меньшими гирорадиуса частиц) неоднородностями магнитного поля. В этом случае $\lambda \sim p^2$ (Долгинов и Топтыгин) и показатель $\gamma \approx 2$, т.е. спектр вариаций $\sim R^{-\gamma}$. Это в приближении **слабой** модуляции (т.е. высоких энергий).

В приближении **сильной** модуляции (т.е. малых энергий) появляется еще экспоненциальный фактор типа

$$J \propto \exp\left(-\int u / D dr\right)$$

Если делится на текущее значение интенсивности J , тогда $\Delta J / J \sim 1/D$ (без экспоненты).

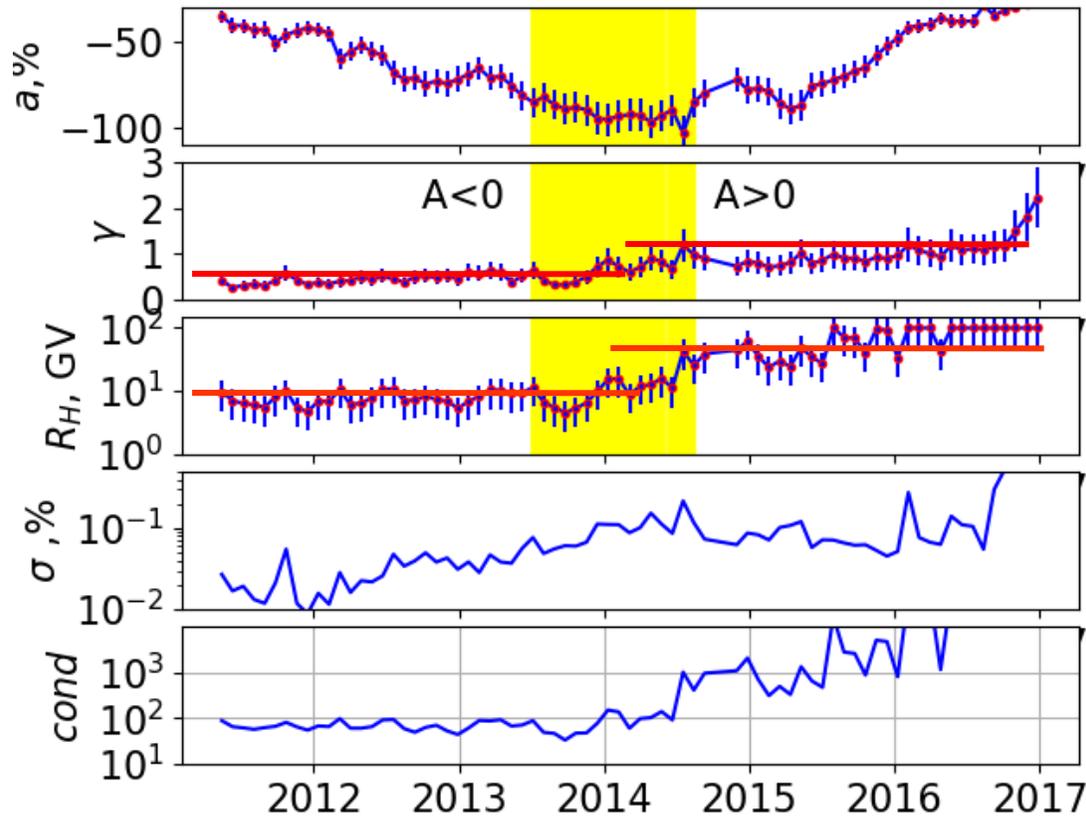
Если делится на базовое значение

$$\delta J / J_0 \propto \exp\left(\int \frac{u}{D} dr\right) / D$$

то появится экспоненциальный множитель вида

$$\exp(R^{-\gamma})$$

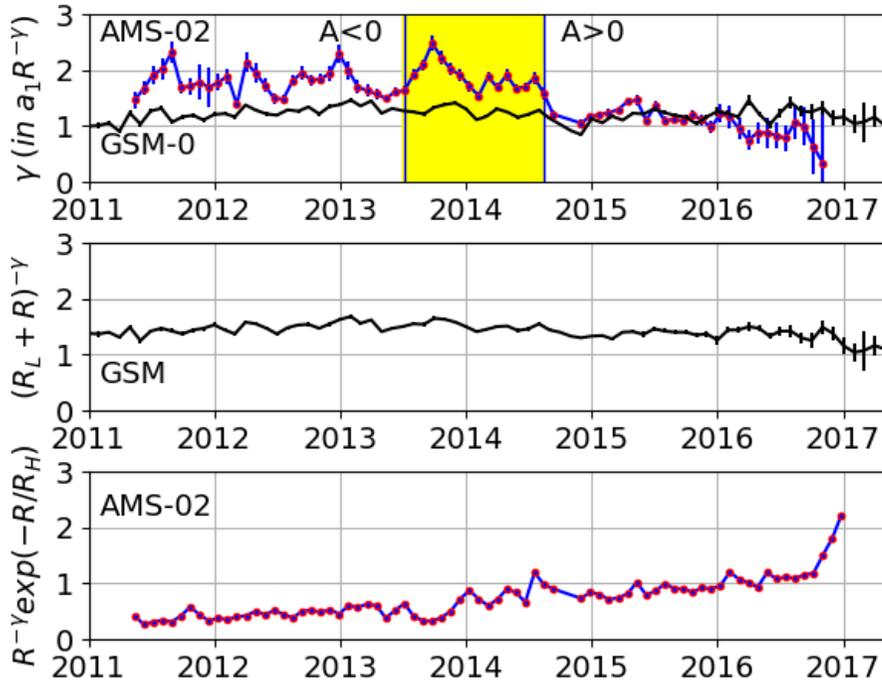
Временная зависимость параметров спектра вариаций.



Хорошо видны особенности поведения параметров γ и R_H в периоды разной полярности магнитного поля Солнца. Показатель γ линейно растет за рассматриваемый период, а параметр R_H скачкообразно увеличивается от среднего значения 8 GV до сотни после периода реполюсовки магнитного поля, что свидетельствует о переходе к степенному спектру вариаций космических лучей.

Временная зависимость параметров спектра вариаций космических лучей по данным AMS-02.

Временная зависимость показателя спектра вариаций для 10 GV.

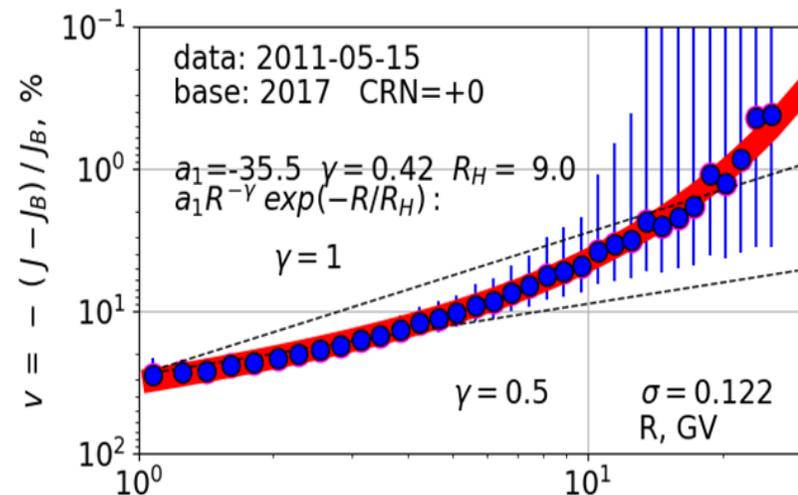


Временная зависимость показателя степенного спектра γ для 10 GV по данным AMS-02 и показателя спектра для изотропных вариаций методом GSM-0 для спектра вариаций

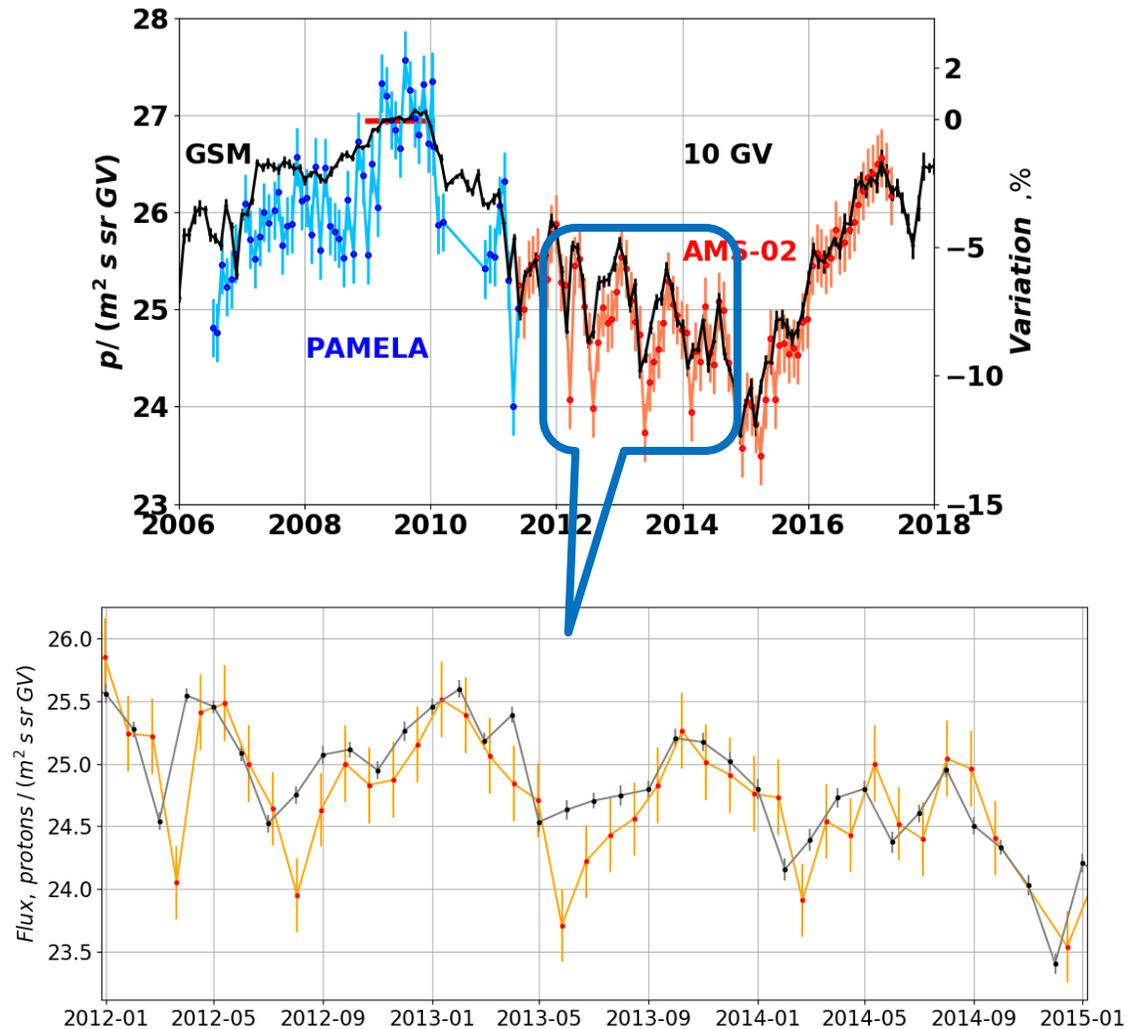
$$v = a_1 (R_L + R)^{-\gamma}$$

$$a_1 R^{-\gamma} \exp(-R/R_H)$$

Прямое сравнение результатов невозможно, но можно использовать промежуточный эталон – степенной спектр. Для этого в каждом случае в небольшом интервале жесткостей, например, $(10-\Delta r, 10+\Delta r)$ GV, проводилась аппроксимация степенным спектром.

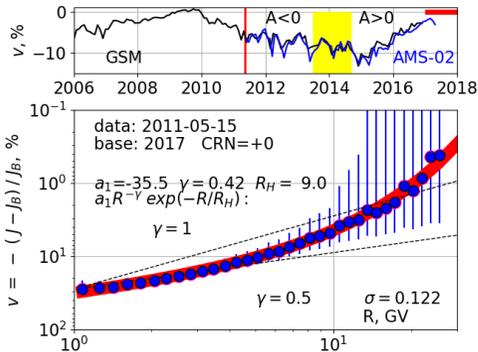


Вариации в период $A < 0$ и период переполюсовки



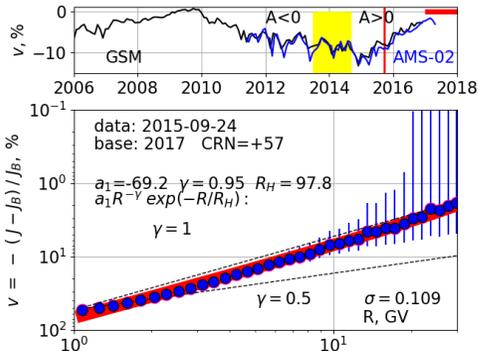
Потоки частиц по данным AMS-02 (оранжевая кривая) и по данным GSM (черная кривая). Вариации AMS-02 в два раза превышают вариации, полученные по данным наземной сети мониторов. Приведенный период совпадает с периодом переполюсовки.

Выводы



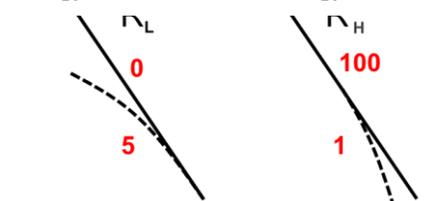
1) По данным AMS-02 спектр вариаций космических лучей в диапазоне жесткостей 1-20 GV хорошо описывается степенным спектром, модулированным экспонентой в области верхних жесткостей

$$a_1 R^{-\gamma} \exp(-R/R_H)$$

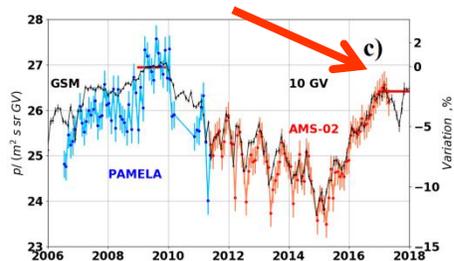


2) В период отрицательной полярности $A < 0$ магнитного поля Солнца наблюдается степенной спектр вариаций с сильным экспоненциальным затуханием. При смене полярности $A > 0$ и начала нового 24-го солнечного цикла спектр вариаций космических лучей переходит в чисто степенной спектр.

3) Модель изотропных вариаций с привлечением спектра $a_1(R_L + R)^{-\gamma}$ необходимо обновить расчетами со спектром $a_1 R^{-\gamma} \exp(-R/R_H)$



4) Для базового периода использовались данные январь-апрель 2017 года и при публикации новых данных, включающих минимум SA, необходимо обновить расчеты спектра вариаций.



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Adriani O., Barbarino G. C., Bazilevskaya G. A. et al. (PAMELA Collaboration), 2017, "Ten years of PAMELA in space", *Riv. Nuovo Cimento* **40** 473 doi:[10.1393/ncr/i2017-10140-x](https://doi.org/10.1393/ncr/i2017-10140-x), [Crossref](#), [Google Scholar](#)
- Aguilar M. et al. (AMS Collaboration), 2015, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 171103. doi: 10.1103/PhysRevLett.114.171103
- Aguilar M. et al. (AMS Collaboration), 2018, *Phys. Rev. Lett.* **121**, 051101. doi: 10.1103/physrevlett.119.251101
- Alanko K., I. G. Usoskin, K. Mursula, G. A. Kovaltsov, 2003, *Adv. Space Res.*, **32** (4), 615–620, doi:10.1016/S0273-1177(03)00348-X.
- Belov A.V., Dorman L.I. and Yanke V.G., 1983, "The simplest versions of the global-spectrographical method". Proc. of 18-th ICRC, Bangalore, Vol. 10, pp. 144-147.
- Belov A.V., Gushchina R.T., Yanke V.G., 1998, *Geomagnetism and Aeronomy*, V.38, No.4, P.131
- Belov A.V., Gushchina R.T., Shlyk N.S., Yanke V.G., "Comparison of long-term variations of the cosmic ray flux from the network of ground-based detectors, PAMELA and AMS-02 data", in NMDB@Home 2020: Virtual Symposium on cosmic ray studies with neutron detectors.
- DiFelice Valeria, Pizzolotto Cecilia, D'Urso Domenico, Dari Simonetta, Navarra Daniele, Primavera Roberto, Bertucci Bruna, 2017. "Looking for cosmic ray data? The ASI Cosmic Ray Database" 35th ICRC, [PoS 1073](#), Korea <https://pos.sissa.it/301/1073/pdf>
- Koldobskiy S.A., Kovaltsov G.A., Usoskin I.G.: [2018](#), *J. Geophys. Res.* **123**, 4479. doi: <https://doi.org/10.1029/2018JA025516>
- Koldobskiy S.A., Bindi V., Corti C., Kovaltsov G.A., Usoskin I.G.: [2019](#), *J. Geophys. Res.* **124**, 2367-2379. doi: 10.1029/2018JA026340.
- Koldobskiy S.A., Bindi V., Corti C., Kovaltsov G.A., Usoskin I.G.: [2019](#), *PoS ICRC 2019*, id 1094
- Krymskiy G.F., Altukhov A.M., Kuzmin A.I., Krivoshapkin P.A., Skripin G.V., Chirkov N.P., 1966. // *Geomagnetism and Aeronomy*, V.6., №6, P.991-996.
- Lafferty G.D., Wyatt T.R., [1995](#), "Where to stick your data points: The treatment of measurements within wide bins" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **355**, 541-547. doi: 10.1016/0168-9002(94)01112-5.
- Nagashima K., 1971 "Rep. of Ionosphere and Space Res. In Japan, Vol. 25, No 3, p. 189.
- Ting S., 2013, The Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station, *Nucl. Phys. B, Proc. Suppl.* **243-244**, 12-24.
- Usoskin, I. G., K. Alanko-Huotari, G. A. Kovaltsov, and K. Mursula, [2005](#), *J. Geophys. Res.*, **110**, A12108, doi:10.1029/2005JA011250.
- Usoskin, I. G., A. Gil, G. A. Kovaltsov, A. L. Mishev, and V. V. Mikhailov, [2017](#), *J. Geophys. Res. Space Physics*, **122**, 3875–3887, doi:10.1002/2016JA023819
- Usoskin I.G., Bazilevskaya G.A., Kovaltsov G.A., 2011, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **116**, A02104. doi: 10.1029/2010JA016105.
- CRDB (Cosmic Ray DataBase), 2020, <https://tools.ssdsc.asi.it/CosmicRays/chargedCosmicRays.jsp>
- CR Network, 2020, nmdb: <http://www01.nmdb.eu>, <http://www01.nmdb.eu/nest>, usu: <http://www.ckp-rf.ru/usu/433536>, idb: <http://cr0.izmiran.ru/mosc>

**Спасибо за
внимание**

SPARE SLIDES

Дрейфовые эффекты и зависимость модуляции от энергии.

Спектр вариаций КЛ, определенный из экспериментальных данных за длительный период (19-24 циклы СА), дает возможность проверить некоторые выводы теории гелиосферной модуляции КЛ, касающиеся роли магнитного дрейфа частиц в циклах с различным направлением глобального магнитного поля Солнца.

В приближении слабой модуляции [Kota, 1979] уменьшение интенсивности КЛ в гелиосфере δN определяется потерями энергии частиц ΔE :

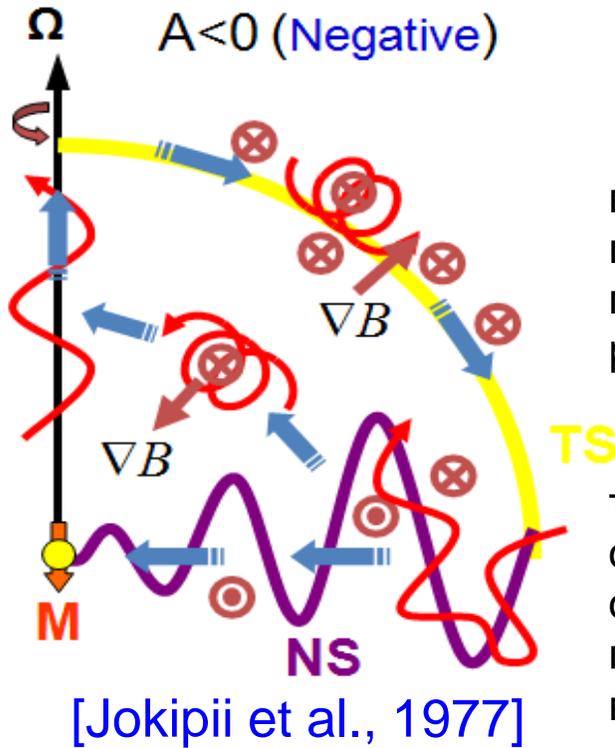
$$\delta N / N = (2 + \gamma) \Delta E / E \quad (2)$$

где γ - показатель дифференциального спектра КЛ. Потери энергии в идеализированной гелиосфере радиуса R с плоским нейтральным токовым слоем определяются выражением [21]

$$\Delta E = |q\Phi| + p \int_r^R \frac{u}{\lambda} dr \quad (3)$$

здесь u - скорость солнечного ветра, λ , q и p - длина свободного пробега, заряд и импульс частиц, Φ — некая электрическая разность потенциалов.

Дрейфовые эффекты. $A < 0$.



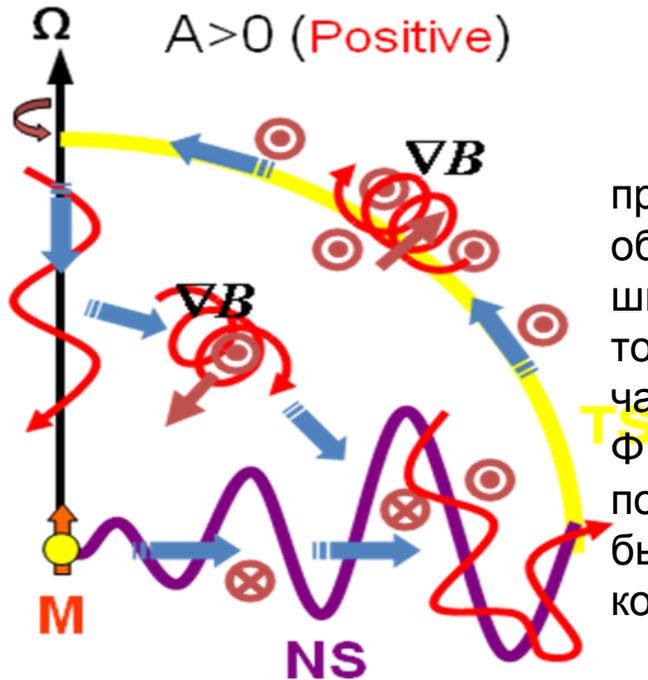
~~$$\Delta E = |q\Phi| + p \int_r^R \frac{u}{\lambda} dr \quad (3)$$~~

При отрицательной полярности ($A < 0$) протоны дрейфуют из внешней гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя, затем по широте к полярным областям и покидают гелиосферу за счет положительной дрейфовой скорости на полюсах. Следовательно, разность потенциалов Φ в выражении (3) на экваторе

$$\Phi = 0, A < 0 \quad (5)$$

Таким образом, при ($A < 0$) модуляция протонов определяется только потерями энергии при распространении в экваториальной области (второе слагаемое в выражении (3)). То что оно зависит от длины свободного пробега частиц λ не означает, что частицы приходят на Землю вдоль силовых линий магнитного поля. Во внешней гелиосфере частицы двигаются поперек силовых линий со скоростью, сравнимой со скоростью света, дрейфуя по нейтральному токовому слою. Редкие столкновения при рассеянии частиц выбивают частицы из этого режима и уменьшают среднюю скорость движения вдоль слоя. Чем больше частота столкновений, тем меньше средняя скорость и тем больше время за которое частицы достигнут Земли. Соответственно больше и потери энергии, описываемые вторым слагаемым в выражении (3).

Дрейфовые эффекты. $A > 0$.



$A > 0$ (Positive)

$$\Delta E = |q\Phi| + p \int \frac{u}{\lambda} dr \quad (3)$$

В периоды положительной магнитной полярности ($A > 0$) протоны галактических КЛ попадают в гелиосферу в полярных областях, затем дрейфуют в неоднородном магнитном поле по широте к экватору, и уходят из гелиосферы вдоль нейтрального токового слоя. При дрейфе по широте от полюса к экватору частицы теряют энергию, соответствующую разности потенциалов Φ равной потенциалу гелиосферы Φ_0 и определяется магнитным полем B_0 , радиусом r_0 и скоростью вращения Солнца Ω , но может быть выражен через скорость солнечного ветра u и азимутальную компоненту магнитного поля B_e на орбите Земли:

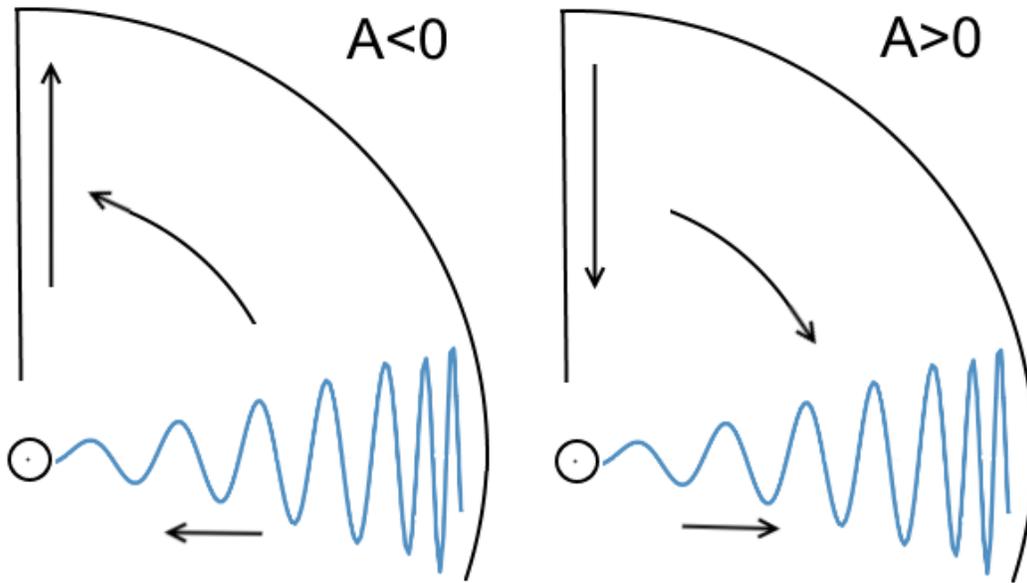
[Jokipii et al., 1977]

$$\Phi_0 = B_0 r_0^2 \Omega / c = 180 MV \frac{u}{400 km/c} \frac{B_e}{3 \cdot 10^{-5} Gauss} \quad (4)$$

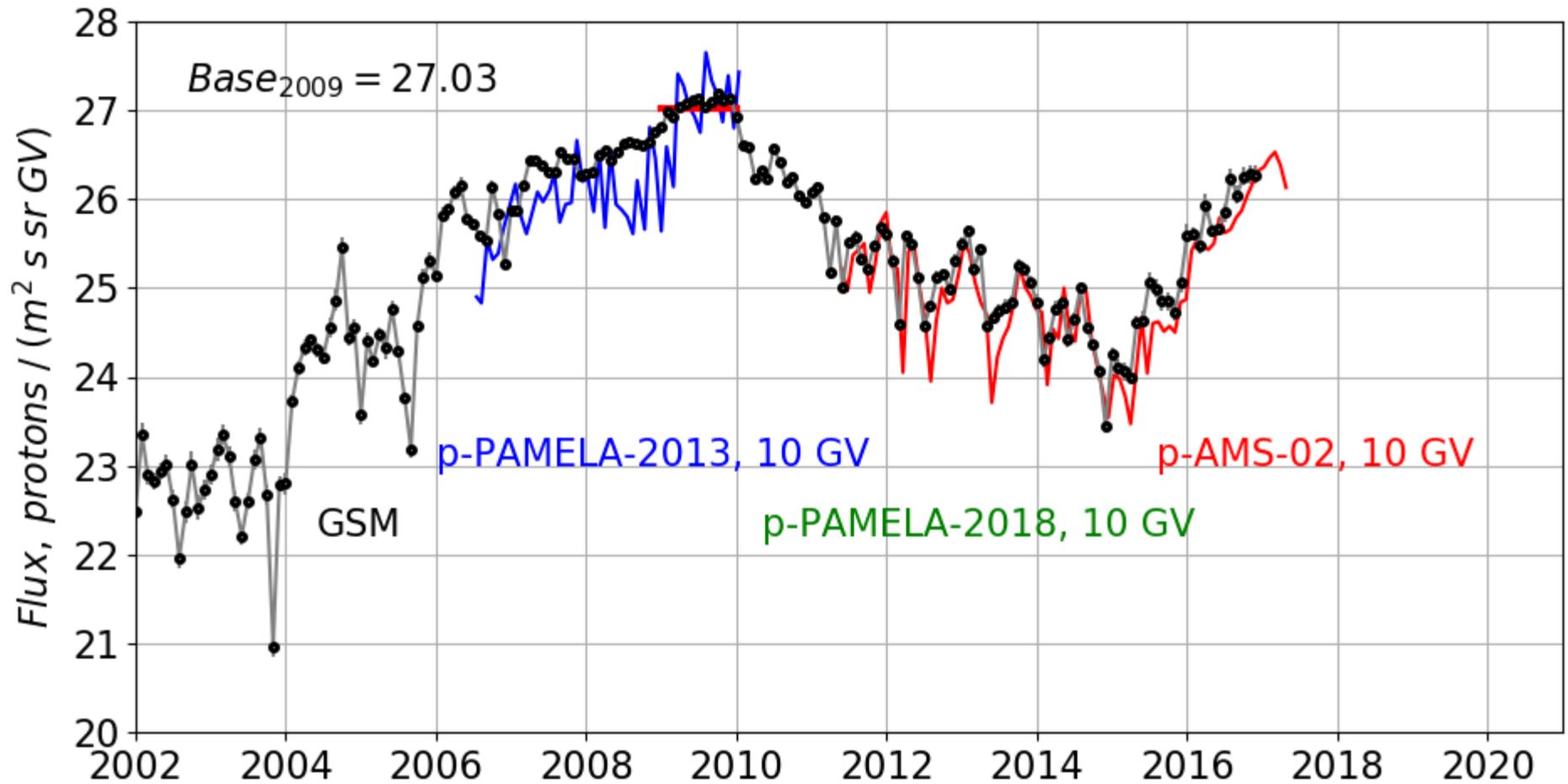
$$\Phi = \Phi_0, A > 0 \quad (5)$$

При ($A > 0$) потери энергии связаны с дрейфом от полюсов к экватору (первое слагаемое).

Дрейфовые эффекты

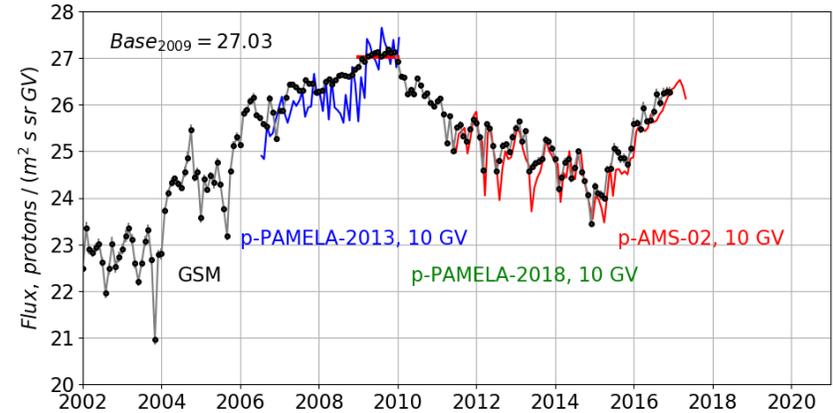
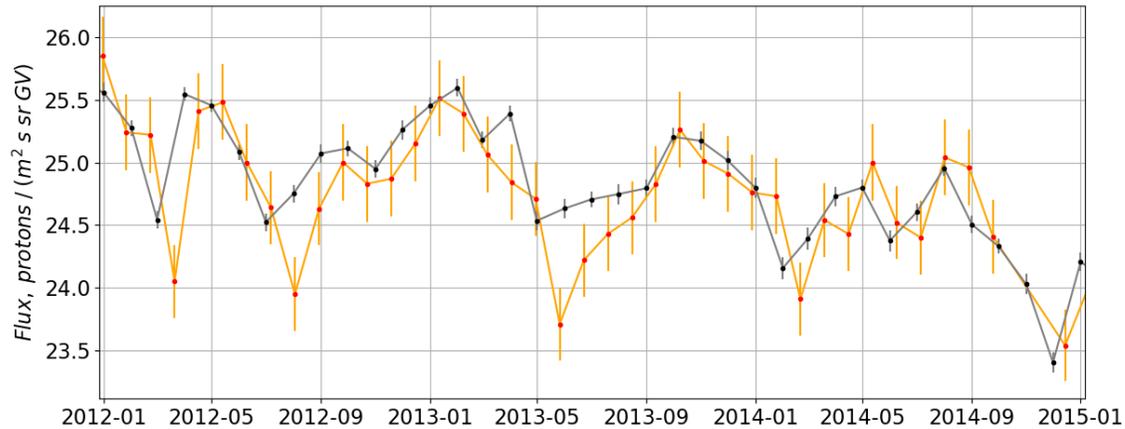


Обсуждение полученных результатов

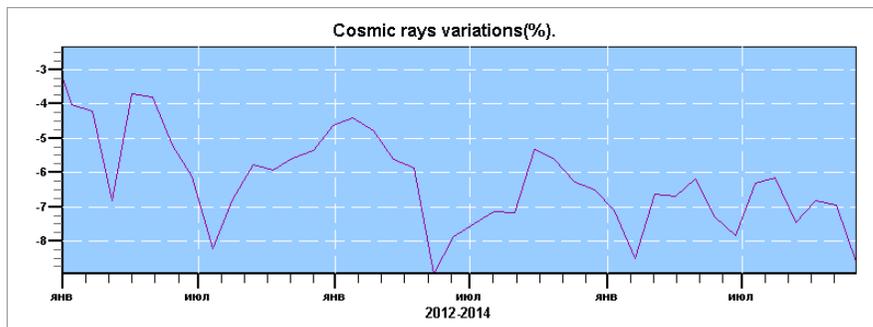


Поток частиц без PAMELA-2

Вариации в период переполюсовки

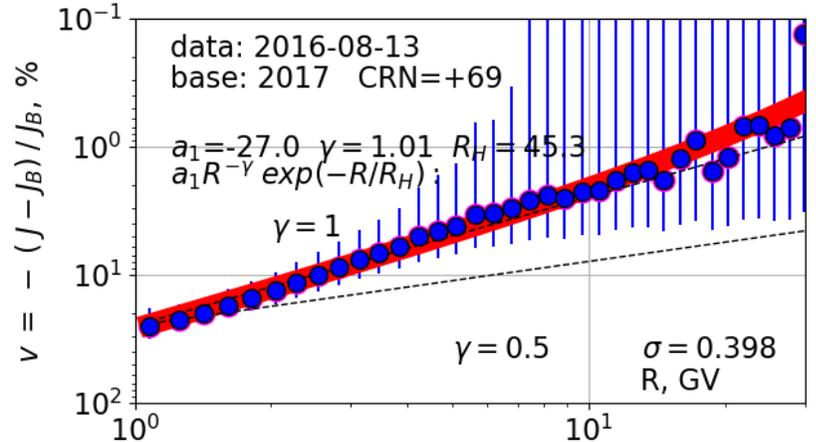
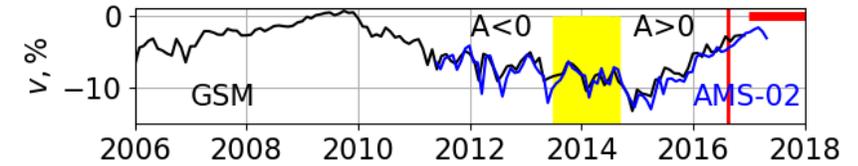
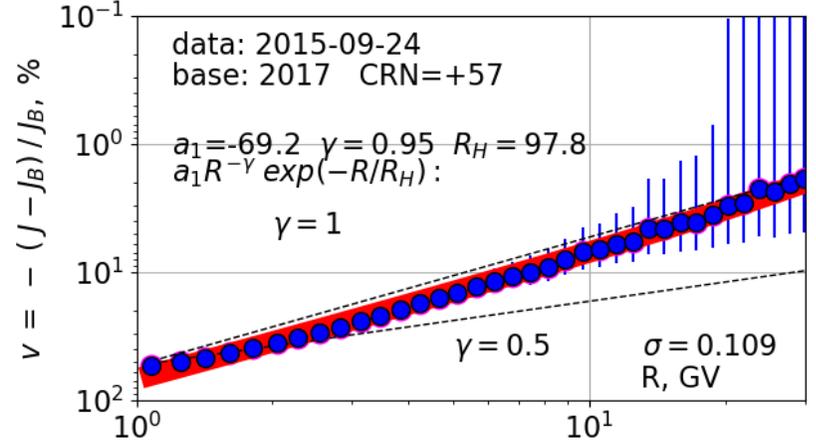
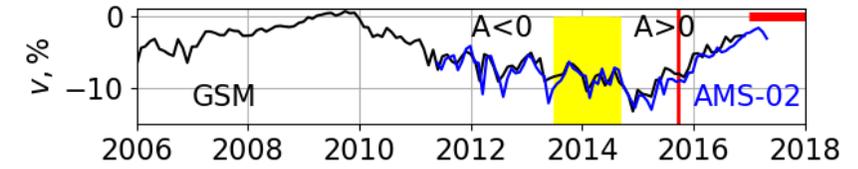
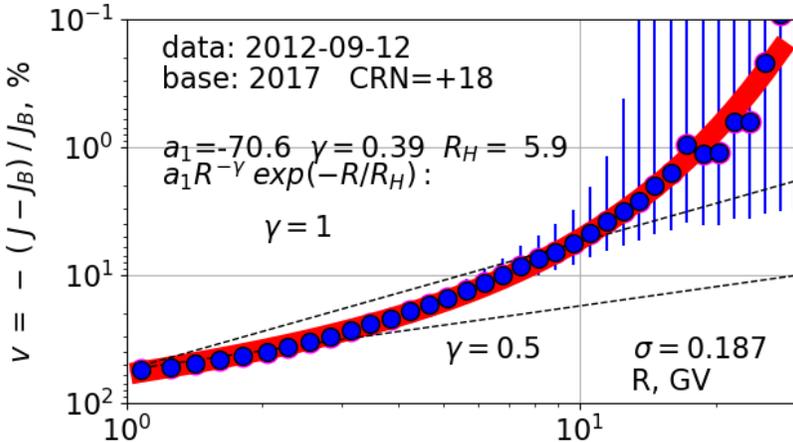
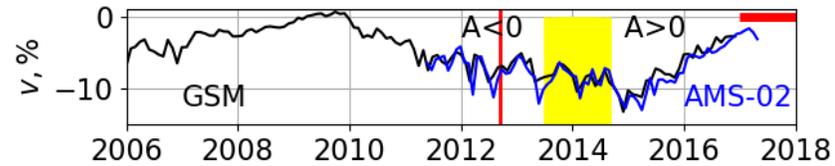
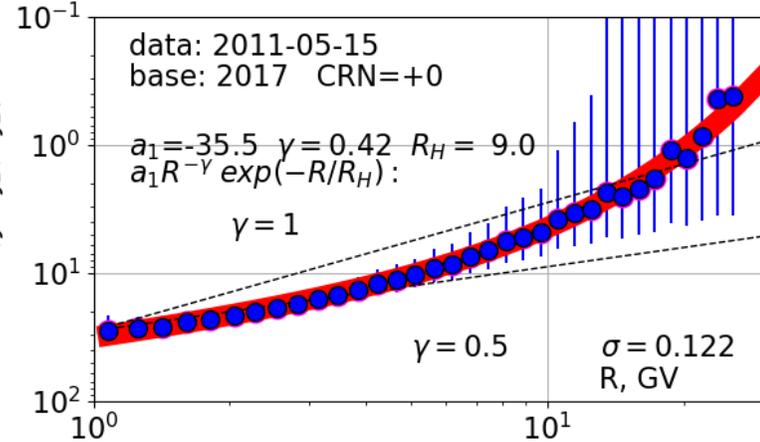
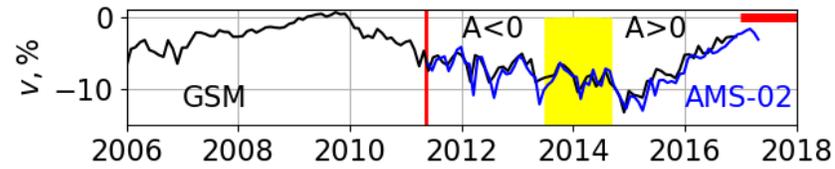


Потоки частиц по данным PAMELA(оранжевая кривая) и по данным GSM (черная кривая). Вариации PAMELA в два раза превышают вариации, полученные по данным наземной сети мониторов. Приведенный период совпадает с периодом переполюсовки.

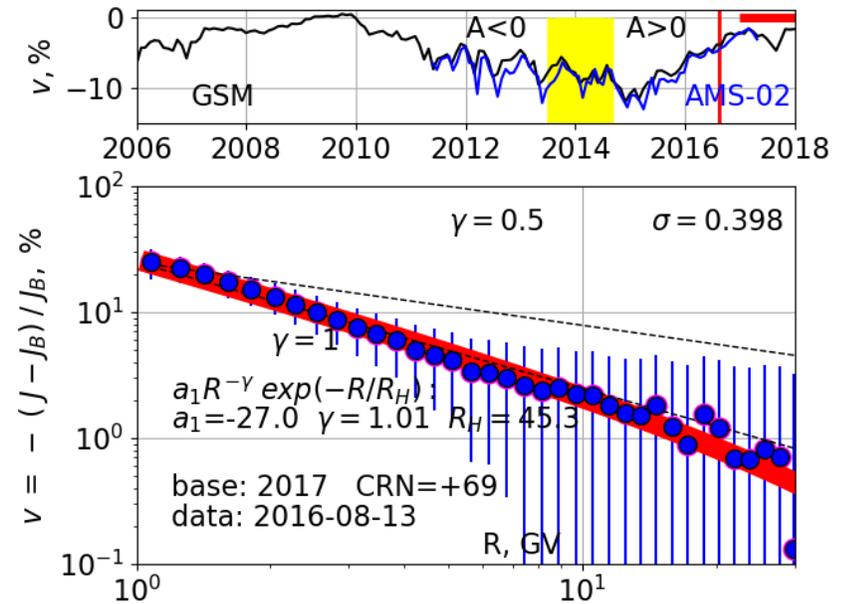
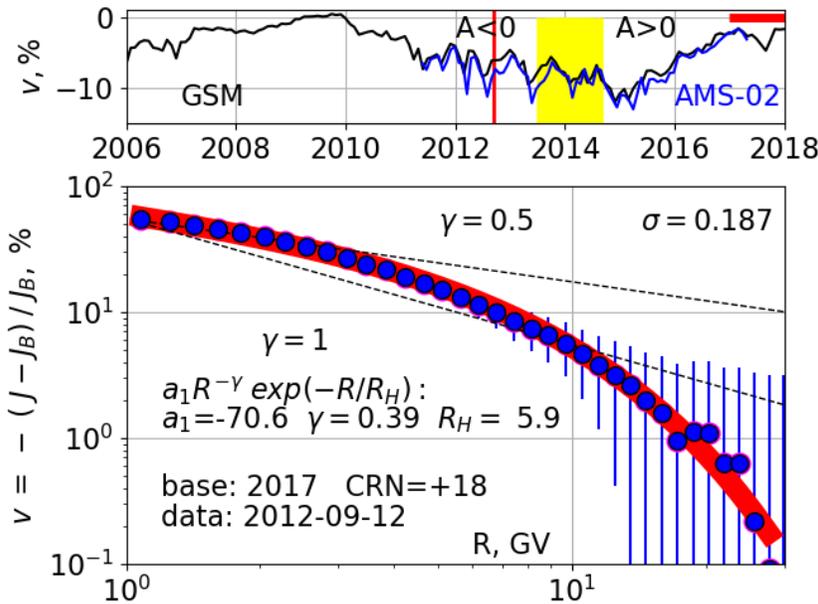
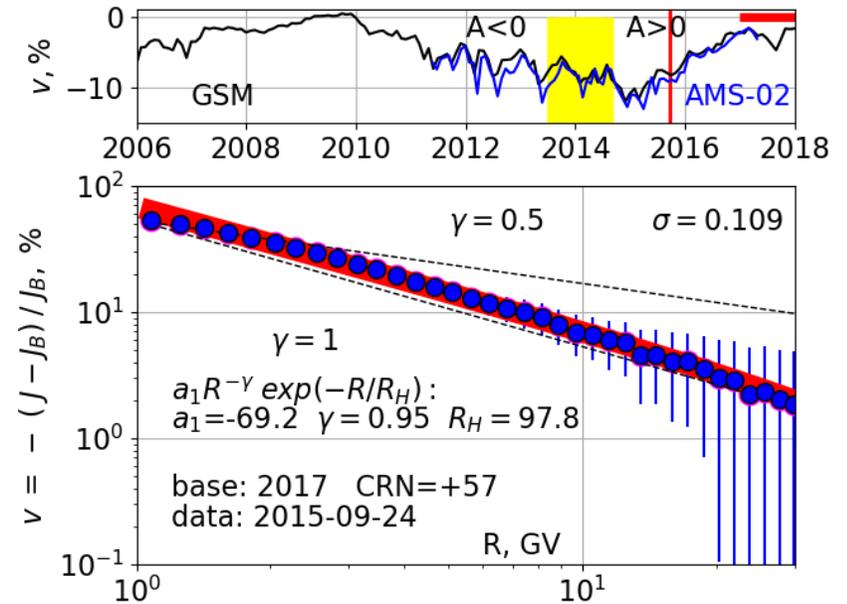
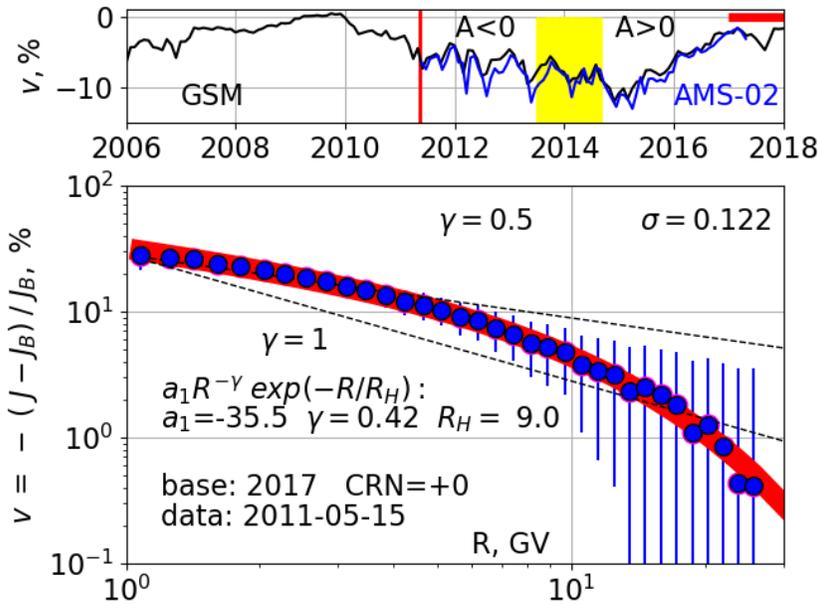


Для станции Москва для того же периода.

Результаты аппроксимации спектров вариаций (+)



Результаты аппроксимации спектров вариаций (-)





© Michele Famiglietti / AMS Collaboration

Что значит большой форм-фактор! ($21.5 \text{ cm}^2\text{sr}$ и $0.5 \text{ m}^2\text{sr}$)



PAMELA



AMS-02

