



Исследование вариаций  
космических лучей по данным  
наземных установок



# Введение

Общее описание вариаций скорости счета наземного детектора:

$$\left(\frac{\Delta N}{N}\right) = \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{EX} + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{AT} + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{MAG} + \left(\frac{\Delta N}{N}\right)_{APP} + \varepsilon$$

Вариации внеземного происхождения, зависящие от солнечной активности и процессов в межпланетной среде

- Солнечно-земные связи
- Вариации первичного спектра
- Форбуш-эффекты
- 27-дневные вариации
- Анизотропия
- ...

Атмосферные вариации, связанные с взаимодействием КЛ с веществом атмосферы

- Грозы
- Ионизация воздуха
- Формирование нижней ионосферы
- Генерация космогенных нуклидов
- Атмосферные химические процессы
- ...

Вариации магнитосферного происхождения, обусловленные состоянием земной магнитосферы

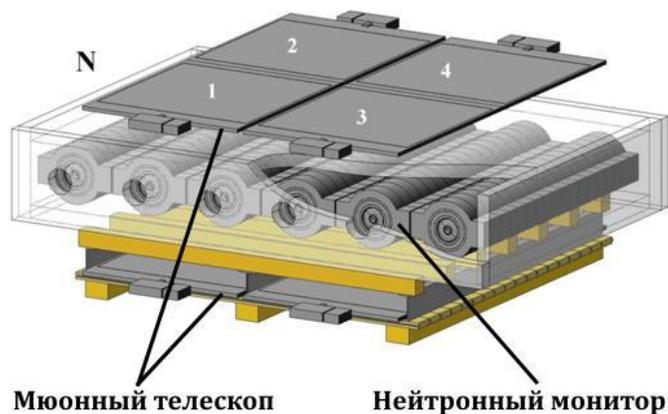
- Радиационные пояса
- Электрические токи в магнитосфере
- Процессы в ионосфере
- ...

Dorman, L. (2013). *Cosmic rays in the Earth's atmosphere and underground*. Springer Science & Business Media.

Belov, A., et al. (2018) *The global survey method applied to ground-level cosmic ray measurements*. *Solar Physics*. V. 293 P. 1-23.

# Детекторы для исследования вариаций КЛ

## Адронная компонента

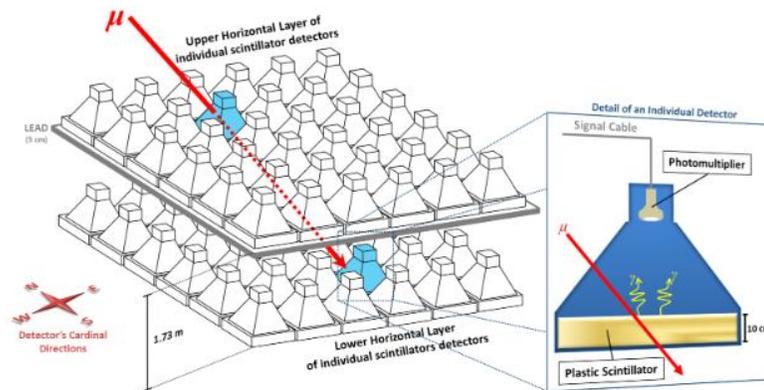


Мюонный телескоп

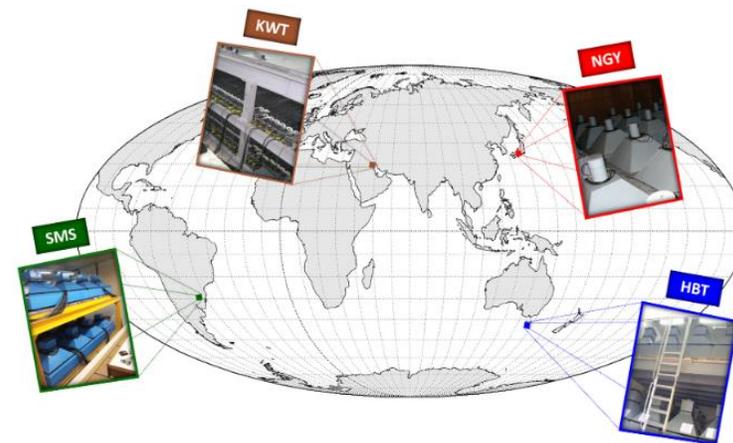
Нейтронный монитор

Типовой нейтронный монитор 24NM64  
Simpson, J. A. (2000). Space Science Reviews, 93(1/2), 11–32.

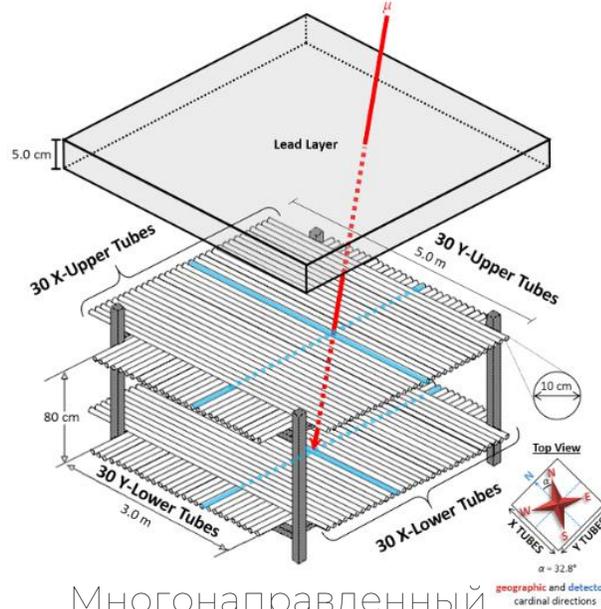
## Мюонная компонента



Мюонный телескоп Нагоя

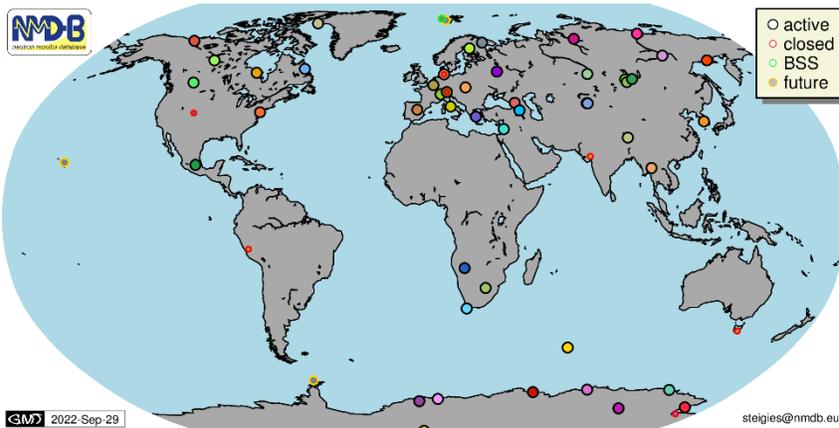


The Global Muon Detector Network: Sao Martinho da Serra (SMS), Kuwait (KWT), Nagoya (NGY), and Hobart (HBT) detectors



Многонаправленный мюонный телескоп  
Кувейт

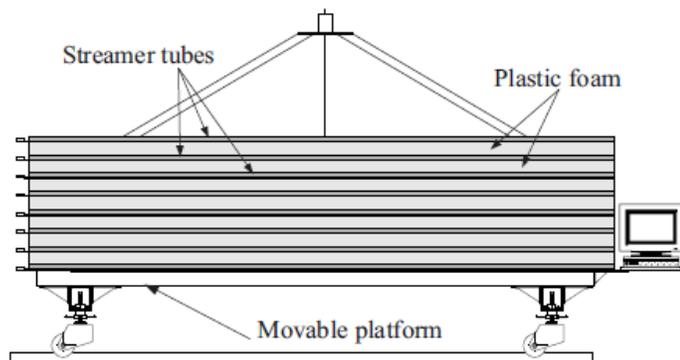
Mendonça, R. R. S. et al. (2019). Journal of Geophysical Research: Space Physics, 124, 9791–9813



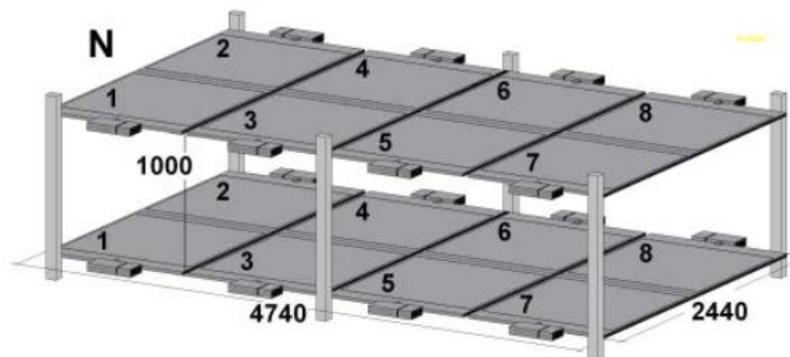
<https://www.nmdb.eu/station/>

# Детекторы для исследования вариаций КЛ

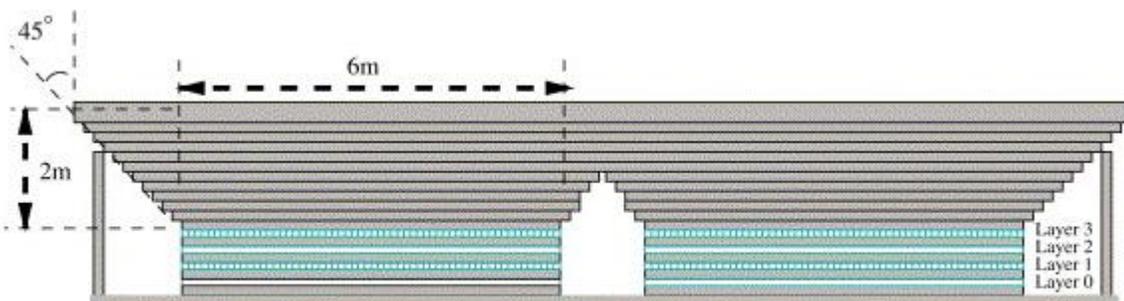
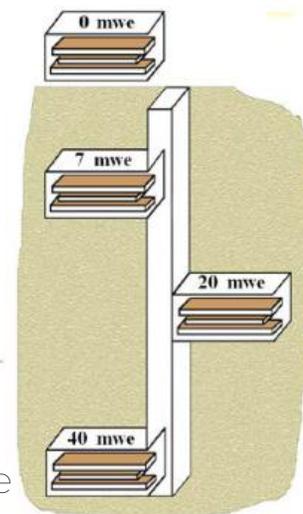
## Мюонная компонента



Мюонный годоскоп УРАГАН  
Barbashina, N. S. et al. (2008).  
Instruments and Experimental  
Techniques, 51(2), 180–186



Якутские скрещенные сцинтилляционные  
мюонные телескопы  
Стародубцев С. А. Флуктуации  
интенсивности космических лучей в 11-  
летнем цикле солнечной активности : дис. –  
Ин-т солнечно-земной физики СО РАН, 2014.



Мюонный годоскоп GRAPES-3  
Hayashi, Y. et al (2005). Nuclear  
Instruments and Methods in  
Physics Research Section A, 545(3),  
643-657.

# Понятие функций связи

Интенсивность потока вторичных частиц на поверхности Земли:

$$I(R_c(t), h_0(t), t) = \int_{R_c(t)}^{\infty} J(R, t) \cdot m(R, h(t), g(t), T(h, t), E(h, t)) dR$$

Проварьировав по параметрам, зависящим от времени, получим:

$$\begin{aligned} \delta I(R_c(t), h_0(t), t) = & \int_{R_{c0}}^{\infty} J_0(R) \cdot \delta m(R, h_0(t), g(t), T(h, t), E(h, t)) dR - \delta R_c(t) \cdot J_0(R_{c0}) \cdot m_0(R_{c0}, h_0, g_0, T_0(h), E_0(h)) + \\ & \text{Вариации атмосферного происхождения} \quad \text{Вариации геомагнитного} \\ & \text{происхождения} \\ & + \int_{R_{c0}}^{\infty} \delta J(R, t) \cdot m_0(R_{c0}, h_0, g_0, T_0(h), E_0(h)) dR \\ & \text{Вариации первичного излучения} \end{aligned}$$

В относительных единицах, после эквивалентных преобразований:

$$\frac{\delta I(R_c(t), h_0(t), t)}{I_0} = \int_{R_{c0}}^{\infty} \frac{\delta m(R, h_0(t), g(t), T(h, t), E(h, t))}{m_0} \cdot \frac{J_0(R) \cdot m_0}{I_0} dR - \delta R_c(t) \cdot \frac{J_0(R_{c0}) \cdot m_0}{I_0} + \int_{R_{c0}}^{\infty} \frac{\delta J(R, t)}{J_0(R)} \cdot \frac{J_0(R) \cdot m_0}{I_0} dR$$

Тогда относительная вариация интенсивности потока мюонов:

$$\frac{\delta I(R_c(t), h_0(t), t)}{I_0} = \int_{R_{c0}}^{\infty} \frac{\delta m(R, h_0(t), g(t), T(h, t), E(h, t))}{m_0} \cdot W(R_{c0}, R) dR - \delta R_c(t) \cdot W(R_{c0}, R_{c0}) + \int_{R_{c0}}^{\infty} \frac{\delta J(R, t)}{J_0(R)} \cdot W(R_{c0}, R) dR$$

В свою очередь,  $\mathbf{W}(\mathbf{R}_{c0}, \mathbf{R})$  - функция связи между вторичными частицами и первичными космическими лучами

# Методы расчета функций связи

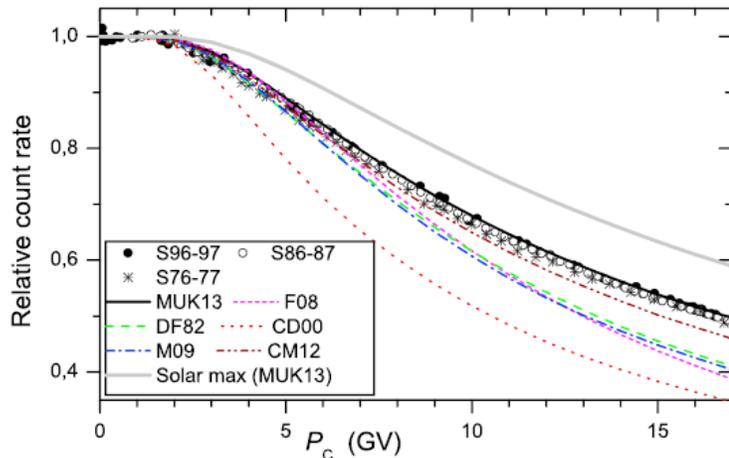
## Параметризация широтных наблюдений

$$N(R) = N(0) (1 - \exp(-\alpha P_c^{-\kappa+1}))$$

$$W(P_c) = \frac{-dN}{N(0) dP_c} = \alpha(\kappa - 1) \exp(-\alpha P_c^{-\kappa+1}) P_c^{-\kappa}$$

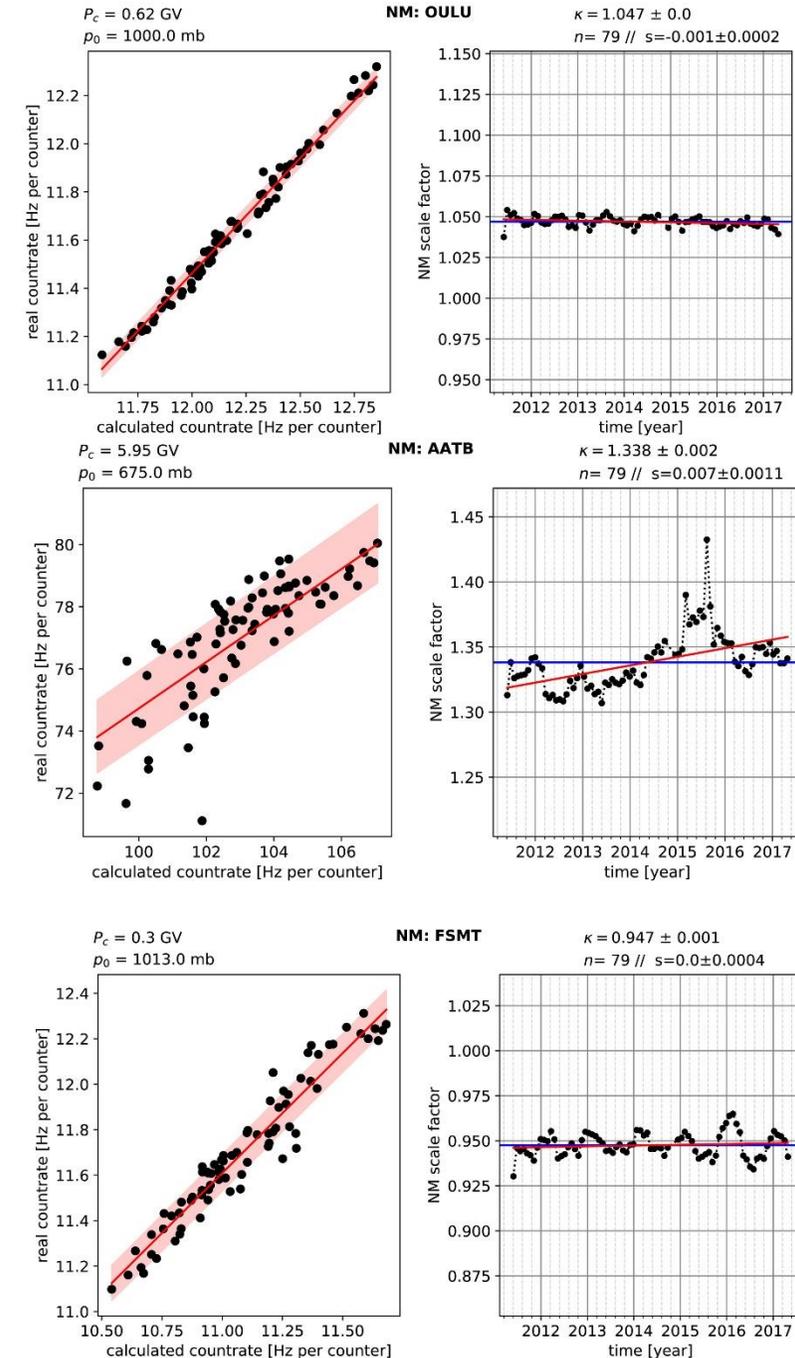
Функция Дормана

Clem, J. M. (2000). Neutron monitor response functions. *Space Science Reviews*, 93(1/2), 335–359



## Монте-Карло моделирование

- CORSIKA (FLUKA) Clem, J. M. (2000). Neutron monitor response functions. *Space Science Reviews*, 93(1/2), 335–359
- CORSIKA (FLUKA + QGSJET) Yakovleva, E. I et al (2009). Coupling functions for muon hodoscopes. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 73, 357-360.
- GEANT4 PLANETOCOSMICS Mishev, A. L. et al.(2013). Neutron monitor yield function: New improved computations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(6), 2783-2788.

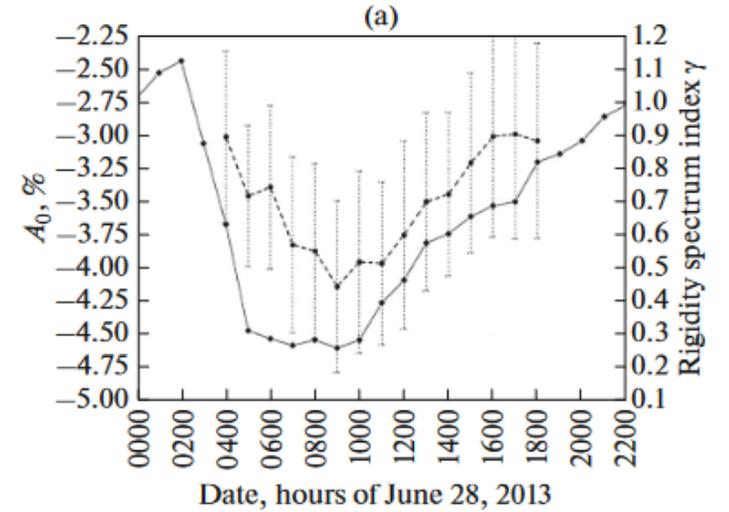
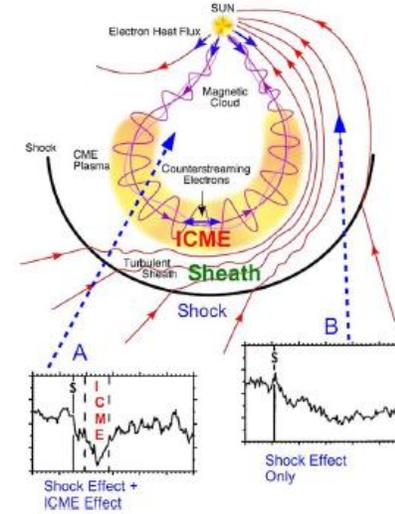
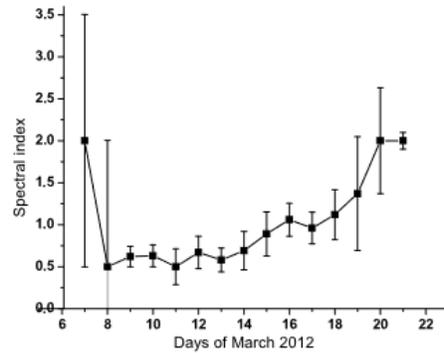
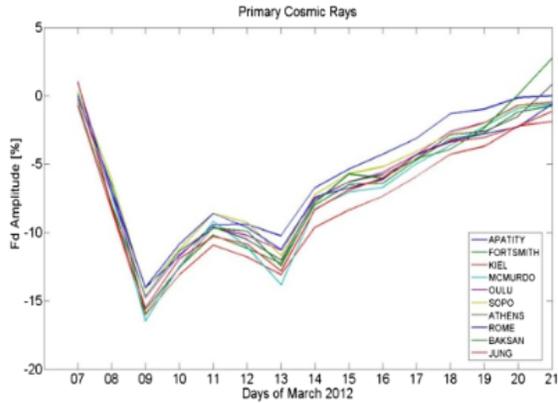


# Функции связи для исследований модуляционных явлений

$$\frac{\delta N^l}{N_0^l} = A_0 C_0^l(\gamma) + (C_x^l A_x + C_y^l A_y + C_z^l A_z) + \delta_{\text{err}}^l,$$

$$C_0^l(\gamma) = \int_{R_c}^{R_0} R^{-\gamma} W^l(R_c, h_l, R) dR,$$

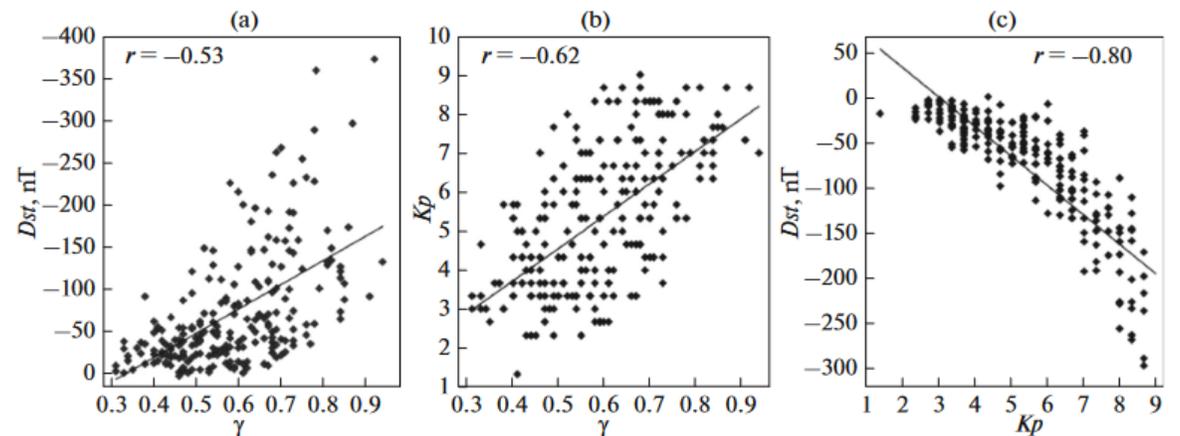
## Форбуш-эффекты



$$\frac{\delta D(R)}{D(R)} = \begin{cases} A \left( \frac{R}{R_0} \right)^{-\gamma}, & R \leq R_{\text{max}} \\ 0, & R > R_{\text{max}} \end{cases}$$

$$J_i^k = \int_{R_1}^{R_{\text{max}}} \left( \frac{\delta D(R)}{D(R)} \right)_k W_i(R_i h_i) dR,$$

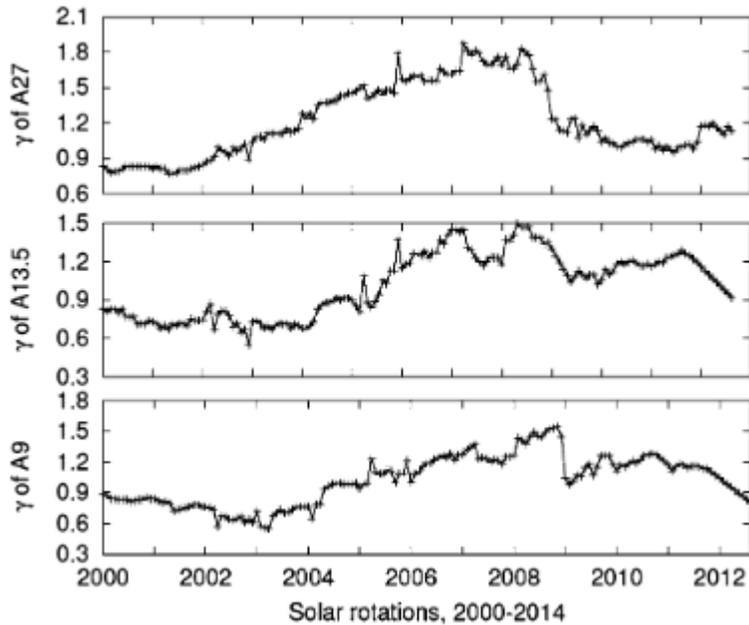
Метод относительных вариаций  
Livada, M. et al (2018). Galactic cosmic ray spectral index: the case of Forbush decreases of March 2012. *Astrophysics and Space Science*, 363, 1-9.



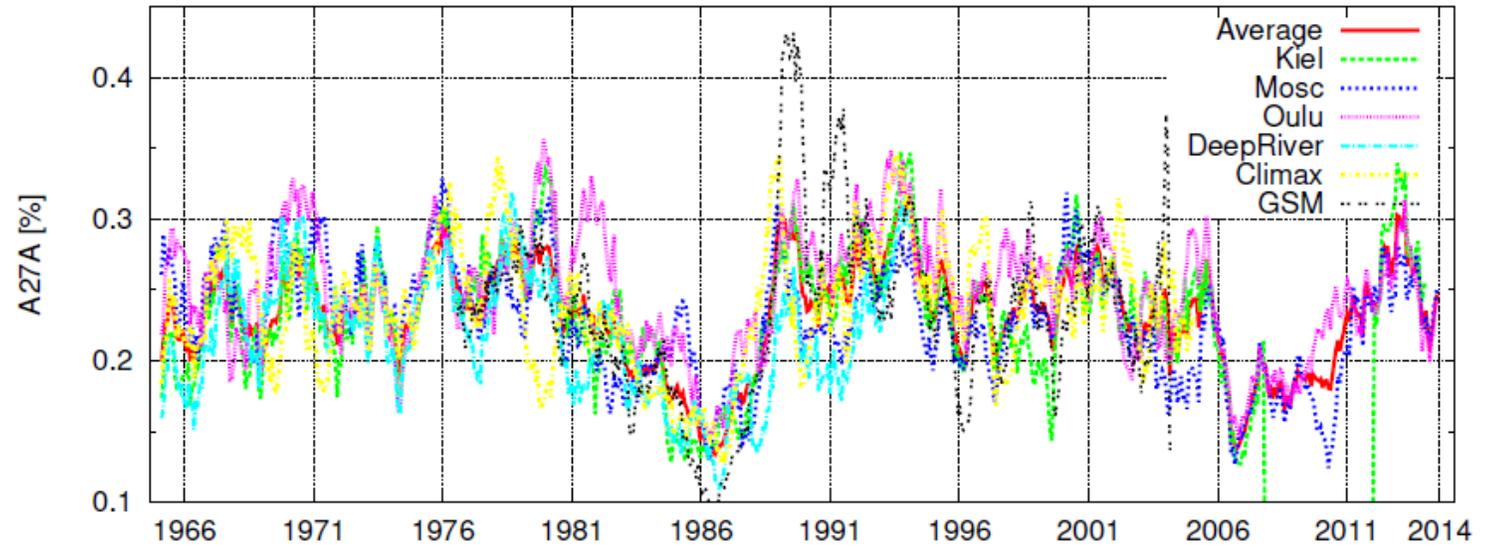
Анализ изотропных вариаций по данным метода глобальной съемки + корреляционные связи с межпланетной средой  
Klyueva, A. I. et al (2017). Specific features of the rigidity spectrum of Forbush effects. *Geomagnetism and Aeronomy*, 57(2), 177-189.

# Функции связи для исследований модуляционных явлений

## 27-дневные вариации



Gil, A., & Alania, M. V. (2016). Energy spectrum of the recurrent variation of galactic cosmic rays during the solar minimum of cycles 23/24. *solar physics*, 291(6), 1877-1886.



Modzelewska, R., & Alania, M. (2014). 27-day Variation of the Three Dimensional Solar Anisotropy of Galactic Cosmic Ray: 1965-2013. 40th COSPAR Scientific Assembly, 40, D1-3.

# Метод глобальной съемки

Распределение интенсивности космических лучей по небесной сфере  $I(\theta, \varphi)$  может быть представлено в виде разложения по сферическим гармоникам:

$$I(\theta, \varphi) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (a_n^m \cos m\varphi + b_n^m \sin m\varphi) P_n^m(\sin \theta)$$

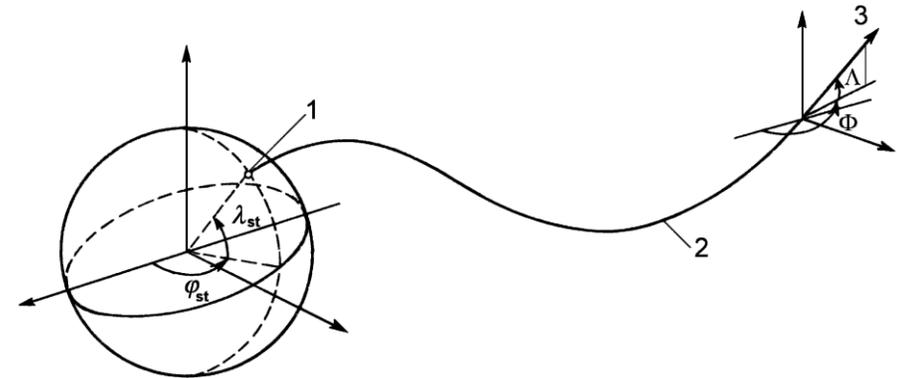
где  $P_n^m$  – присоединенные функции Лежандра,  $\theta$  и  $\varphi$  – широта и долгота соответственно. В векторном виде:

$$I(\theta, \varphi) = \mathbf{A}\mathbf{R}$$

где  $\mathbf{A} = \{a_n^m, b_n^m\}$  – анизотропия,  $\mathbf{R} = \{P_n^m(\sin \theta) \cos m\varphi, P_n^m(\sin \theta) \sin m\varphi\}$  – приемный вектор.

Метод приемных векторов объединяет:

- Метод функций связи (Dorman, 2004)
- Метод траекторных расчетов (Dorman, 2009)
- Метод сферического анализа (Крымский, 1981)



1 – наземный детектор космических лучей; 2 – траектория частицы; 3 – асимптотическое направление (Dorman, 2009)

# Расчет приемных векторов

Расчет компонент приемных векторов осуществлялся согласно выражению (Belov et al, 2018) :

$$V_k = \frac{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} F_k(\Phi(\theta, \varphi, R), \Psi(\theta, \varphi, R)) \cdot f_n(R, \beta) \cdot J_0(R) \cdot m_0(R_c, \theta) \cdot S(\theta) \cdot \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \, dR}{\int_{R_c}^{\infty} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} J_0(R) \cdot m_0(R_c, \theta) \cdot S(\theta) \cdot \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \, dR}$$

$f_n(R, \beta)$  - спектральная функция  $n$ -ой гармоники. Для первой гармоники  $f_1(R, \beta) = \begin{cases} \left(\frac{R}{10}\right)^\beta, & R \leq R_u, \\ 0, & R > R_u \end{cases}$   $R_u = 100$  ГВ,  $\beta = 0$

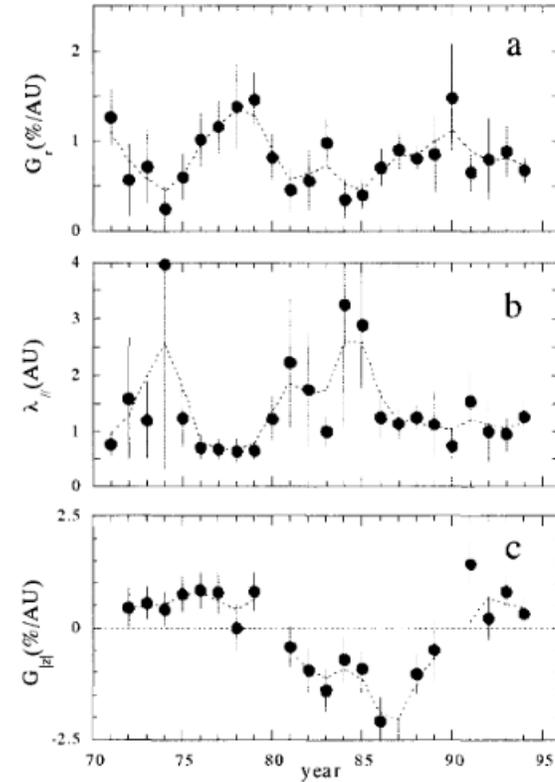
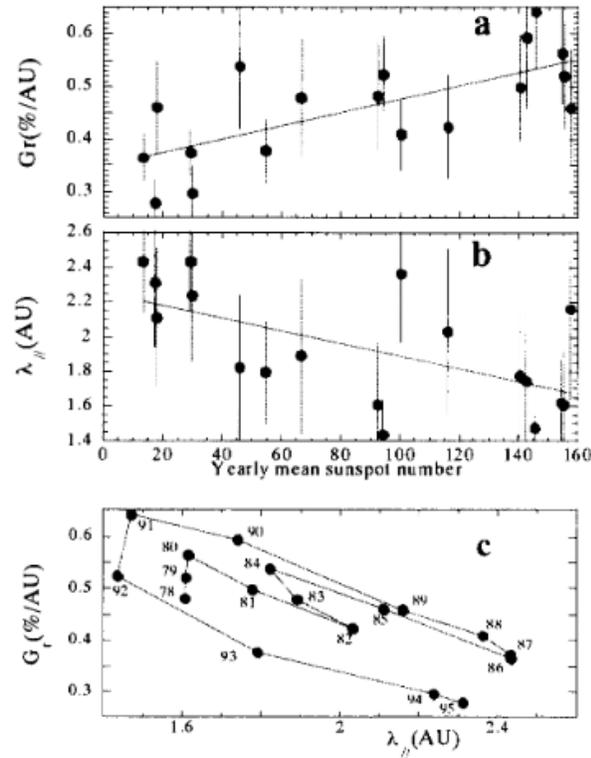
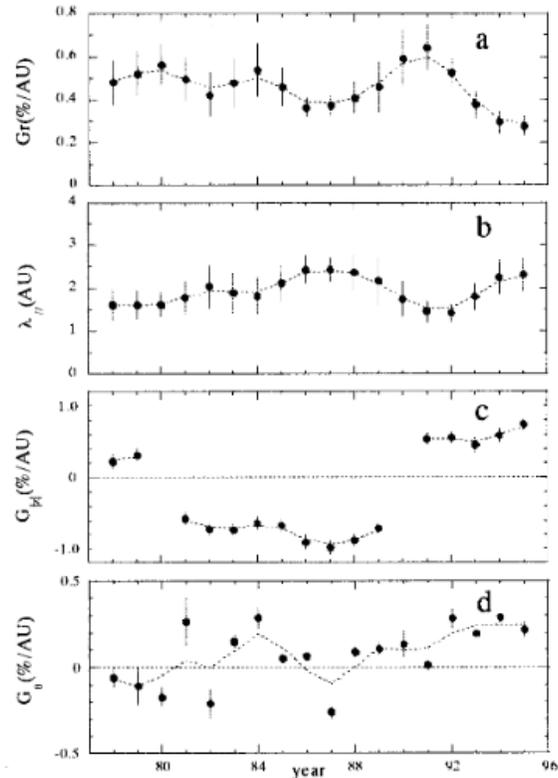
$$F_k(\Phi(\theta, \varphi, R), \Psi(\theta, \varphi, R)) = \begin{cases} P_0^0(\sin \Phi) = 1, & k = 0 \leftrightarrow \text{нулевая гармоника, изотропная составляющая} \\ P_1^0(\sin \Phi) = \sin \Phi, & k = 1 \leftrightarrow \text{вклад первой гармоники в изотропную составляющую} \\ P_1^1(\sin \Phi) \cos \Psi = \cos \Phi \cos \Psi, & k = 2 \leftrightarrow \text{радиальная компонента первой гармоники} \\ P_1^1(\sin \Phi) \sin \Psi = \cos \Phi \sin \Psi, & k = 3 \leftrightarrow \text{азимутальная компонента первой гармоники} \\ \dots & \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_{xi} = C_{11} \cos(\phi_s + \phi_{11}), \\ C_{yi} = C_{11} \sin(\phi_s + \phi_{11}), \\ C_{zi} = C_{10}, \end{cases} \quad \delta_i = A_0 C_{0i}(\gamma) + C_{xi} A_x + C_{yi} A_y + C_{zi} A_z.$$

Есть также ряд других методов, отличающихся видом спектральной функции, условием нормировки Fujimoto, K., Nagashima, K., & Morishita, I. (1990). Cosmic-ray sidereal daily variation of galactic origin to be observed with existing underground muon telescopes. Planetary and Space Science, 38(10), 1267–1293

Kovalev, I. I., Olemskoy, S. V., & Sdobnov, V. E. (2022). A proposal to extend the spectrographic global survey method. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 235, 105887

# Анизотропия космических лучей

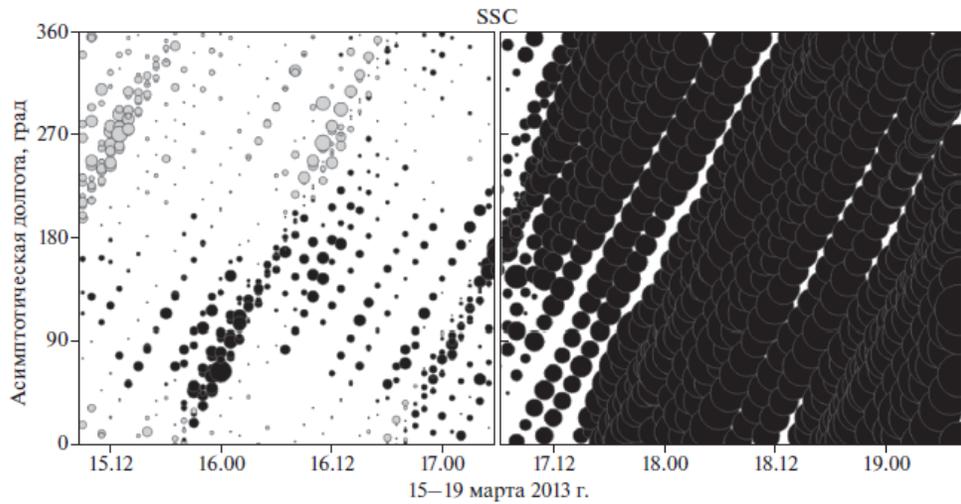


а) Среднегодовые значения модуляционных параметров, приведённых для 60 ГВ

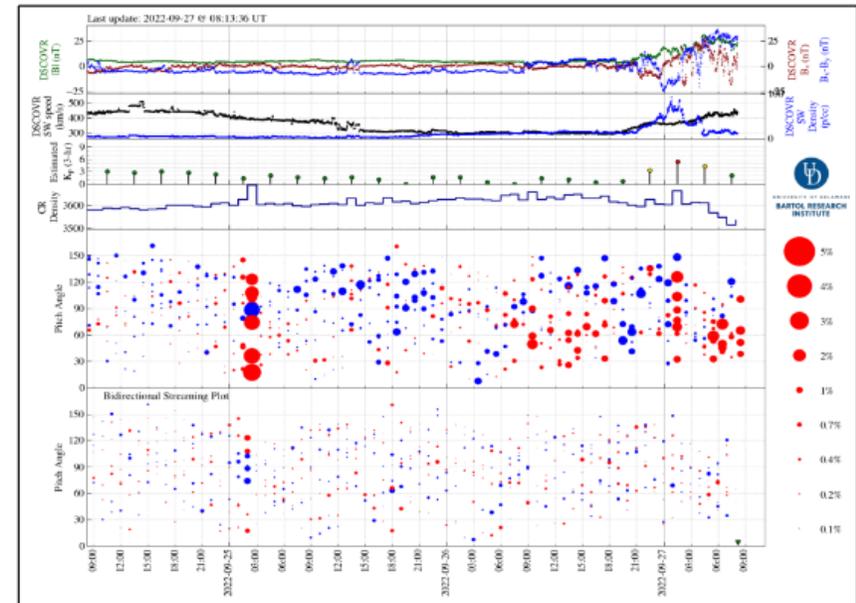
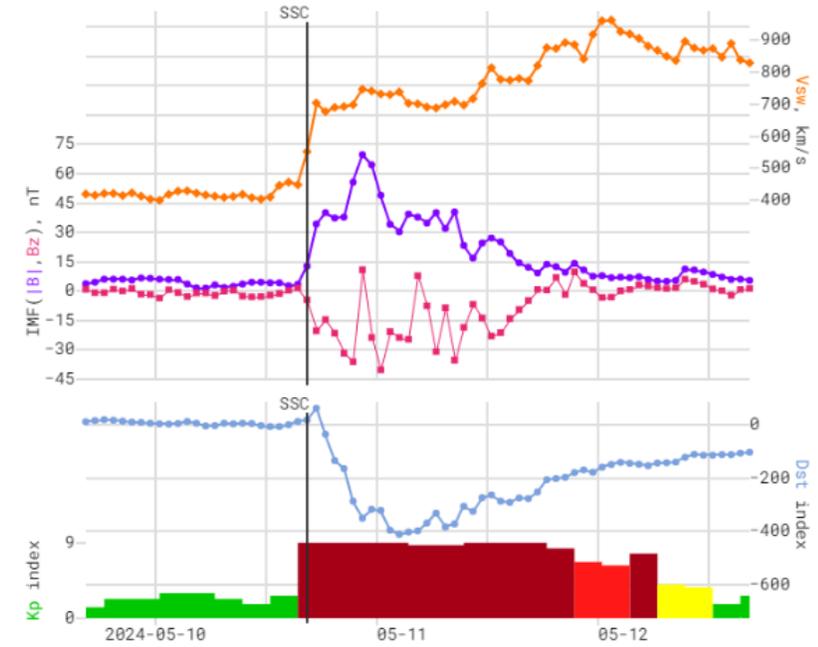
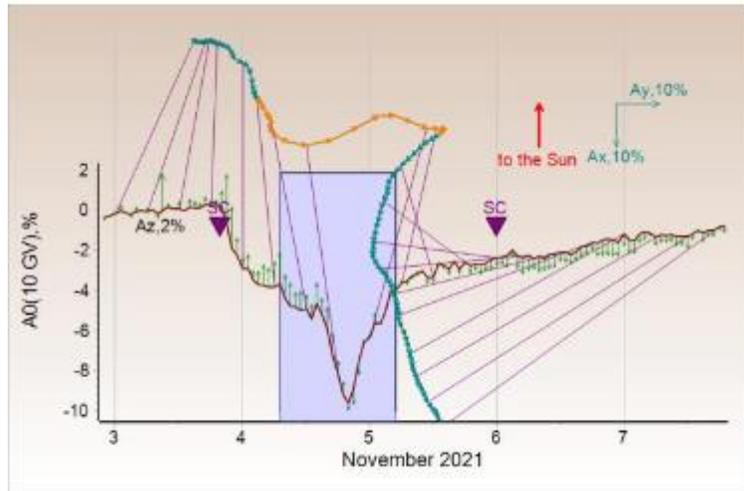
б) Корреляции со среднегодовым числом солнечных пятен.

в) Модуляционные параметры, приведённые к 10 ГВ, из наблюдений нейтронного монитора в Thule, McMurdo и Deep River Munakata, K. et al (2002). Solar cycle variations of modulation parameters of galactic cosmic-rays in the heliosphere. *Advances in Space Research*, 29(10), 1527-1532.

# Гелиосферные возмущения

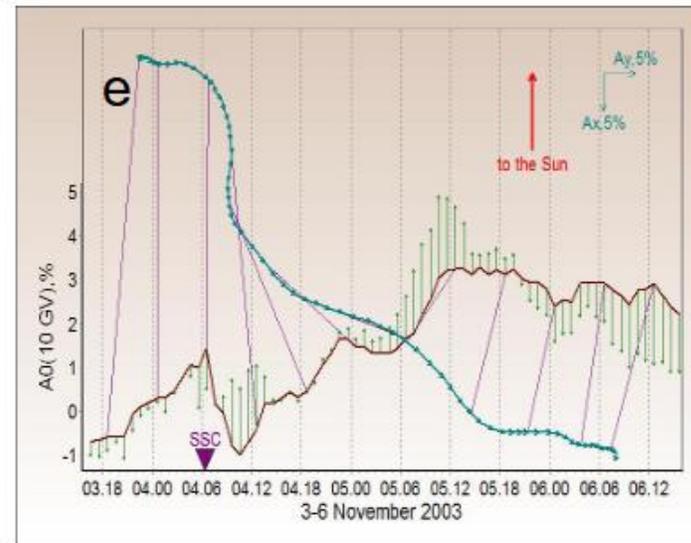
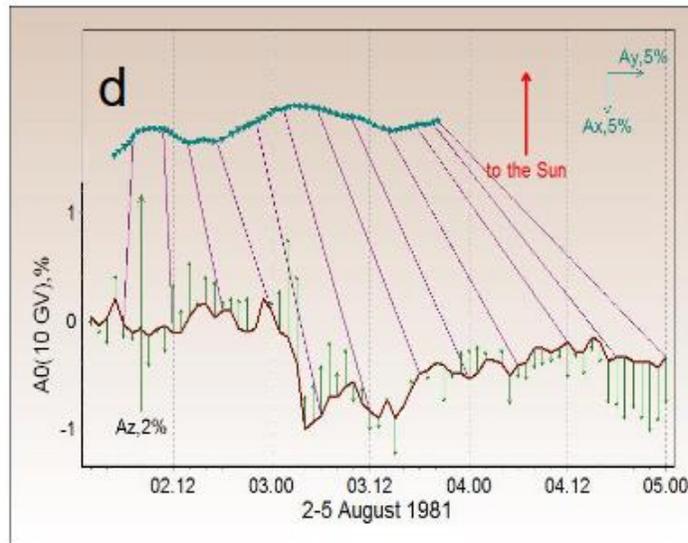
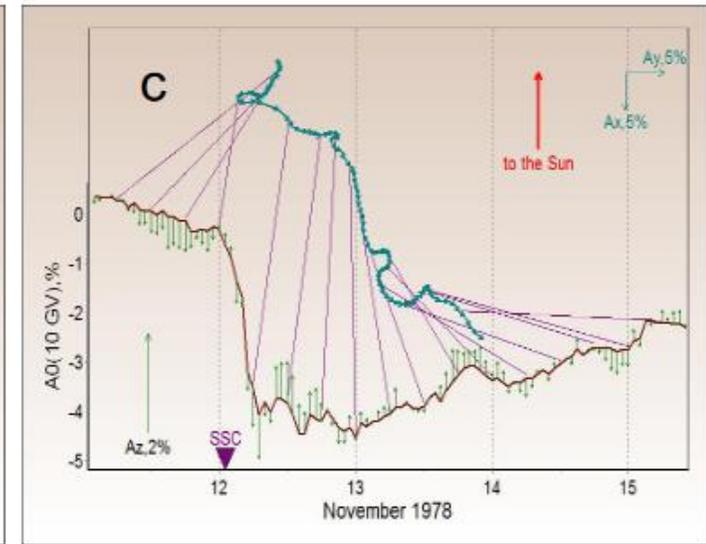
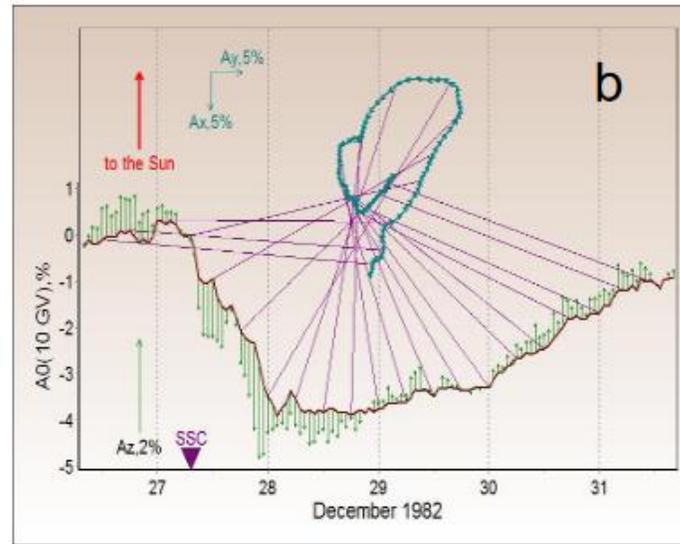
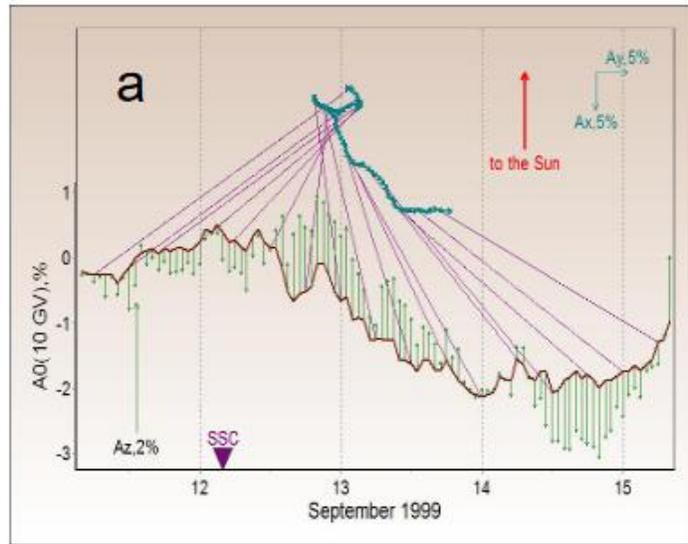


Абунина М. А. и др. Метод кольца станций в исследовании вариаций космических лучей: 1. Общее описание // Геомагнетизм и аэрономия. – 2020. – Т. 60. – №. 1. – С. 41-48.



<https://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather/lossconeograph.html>

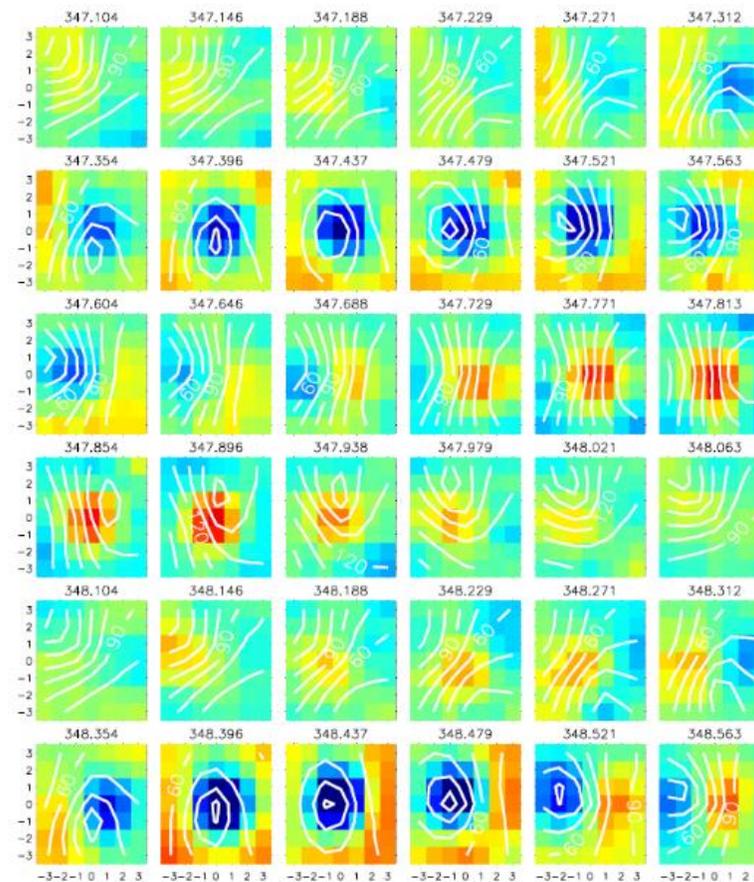
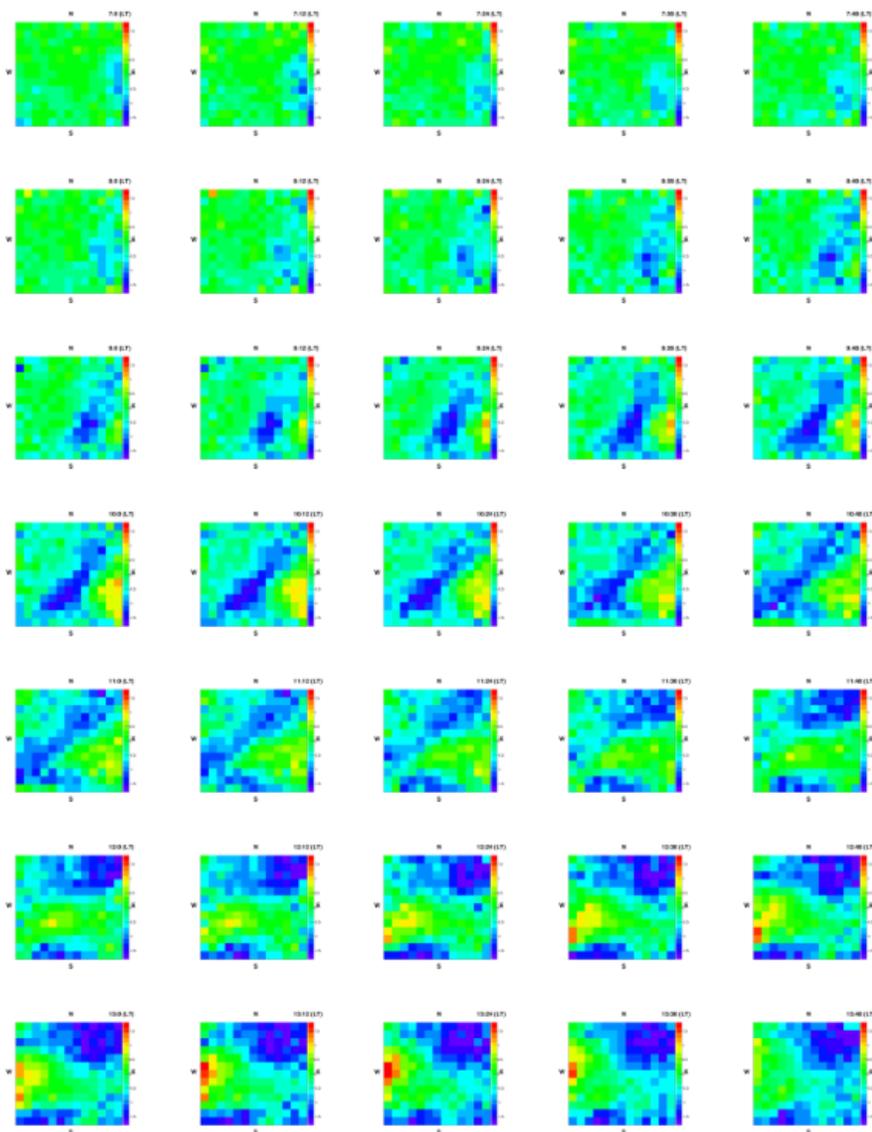
# Гелиосферные возмущения



Поведение плотности КЛ ( $A_0$ ) и векторной анизотропии ( $A_x$ ) в ФЭ от солнечных источников с долготой:

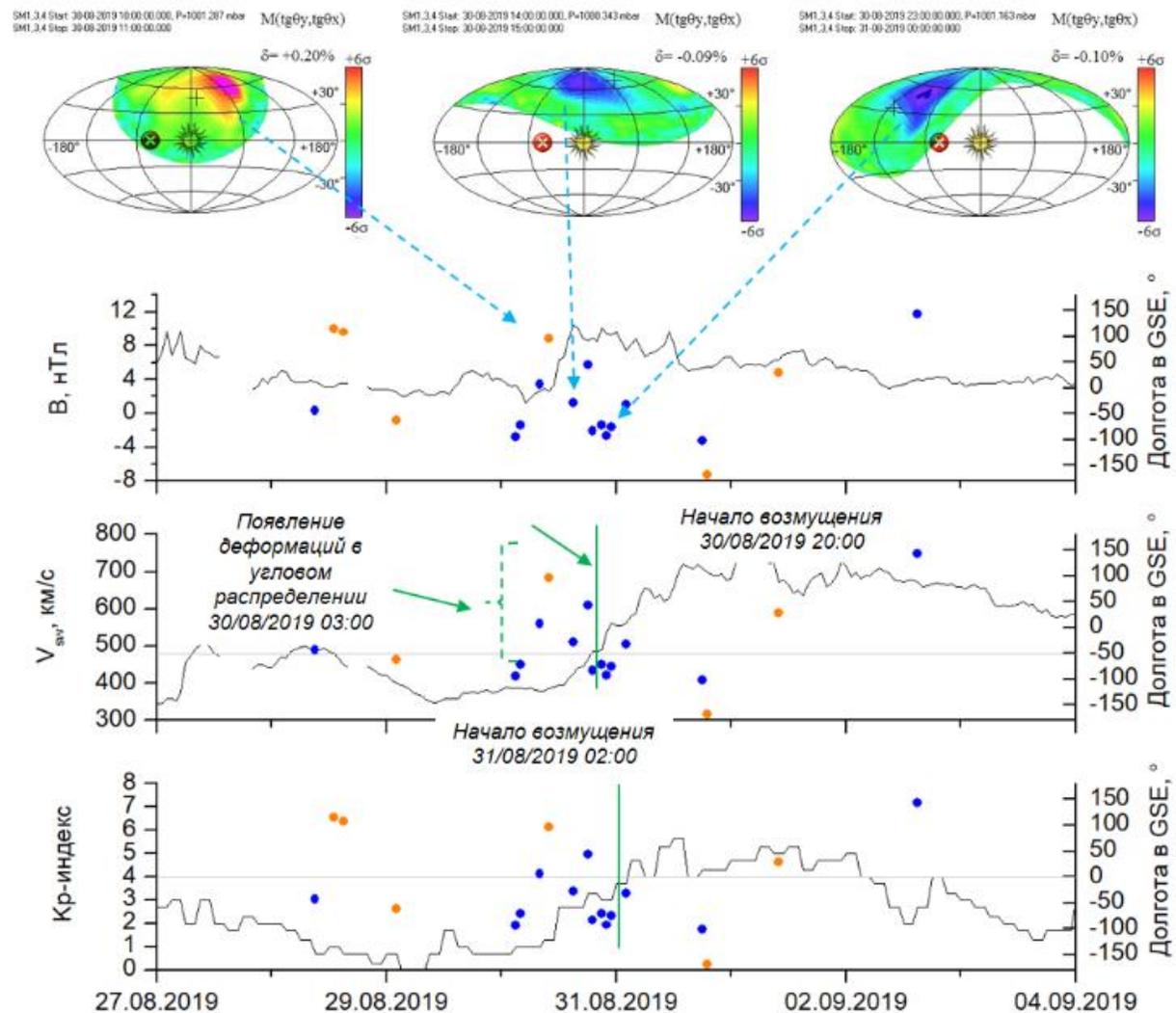
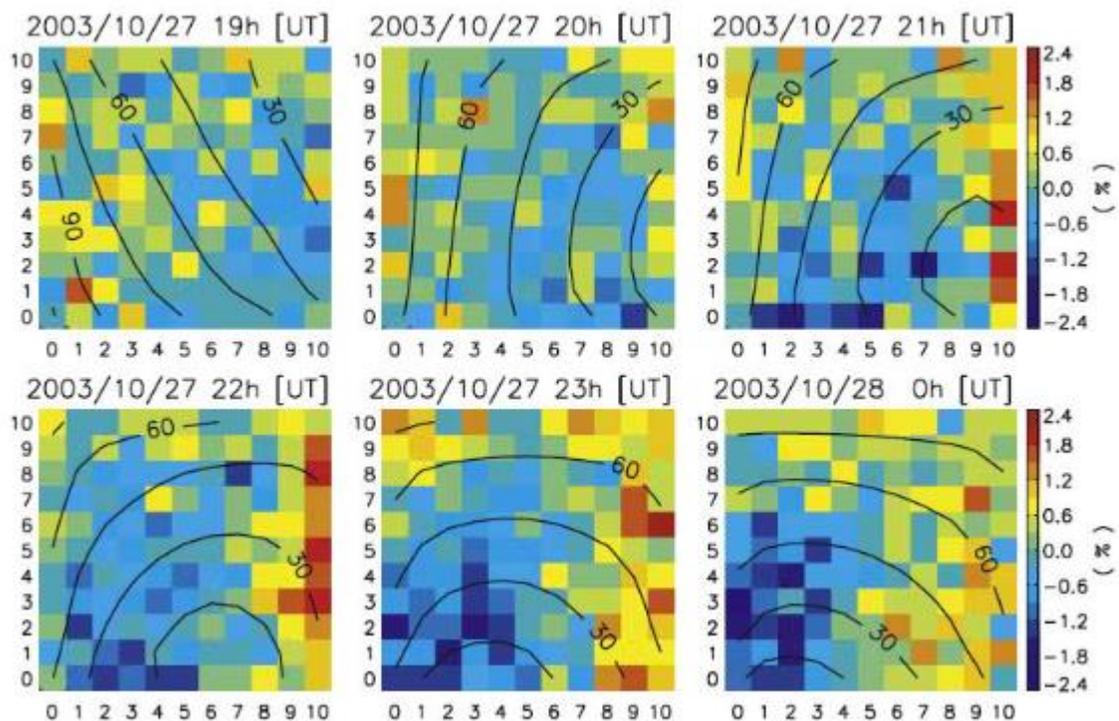
- (a) E90-E45;
- (b) E44-E16;
- (c) E15-W15;
- (d) W16-W45;
- (e) W46-W90.

# Анализ угловых распределений

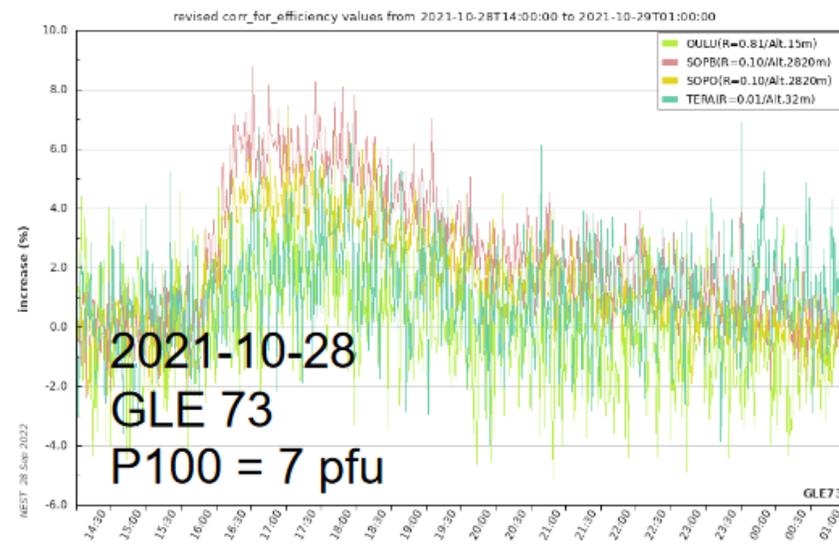
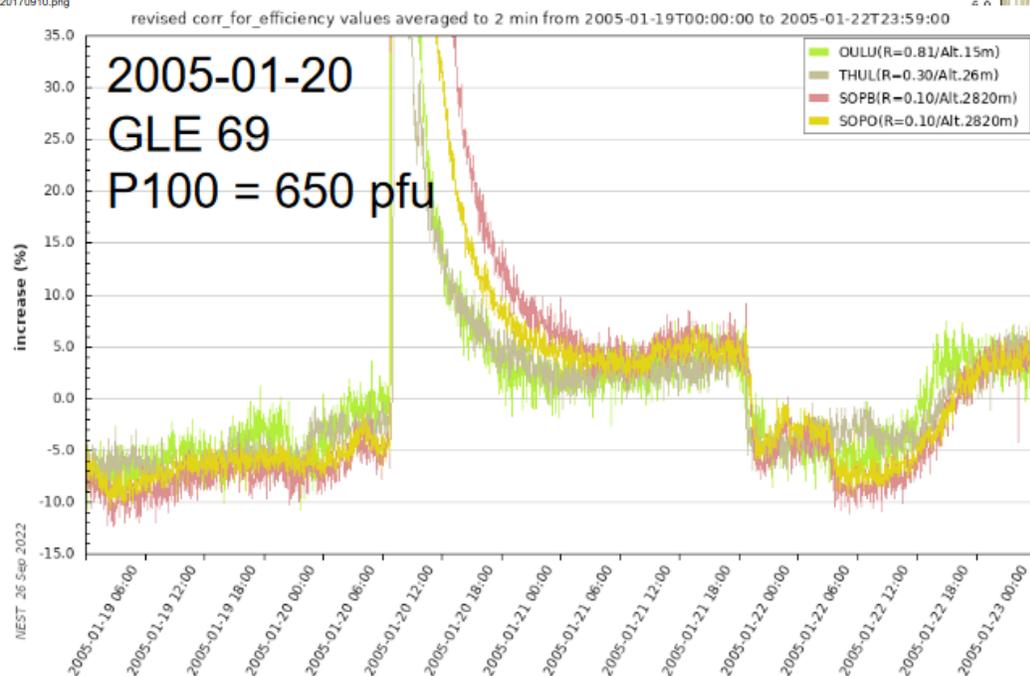
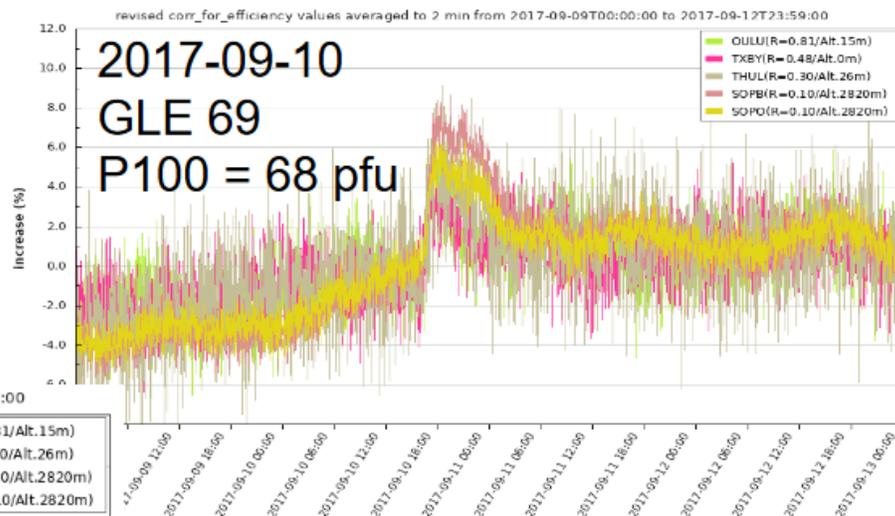
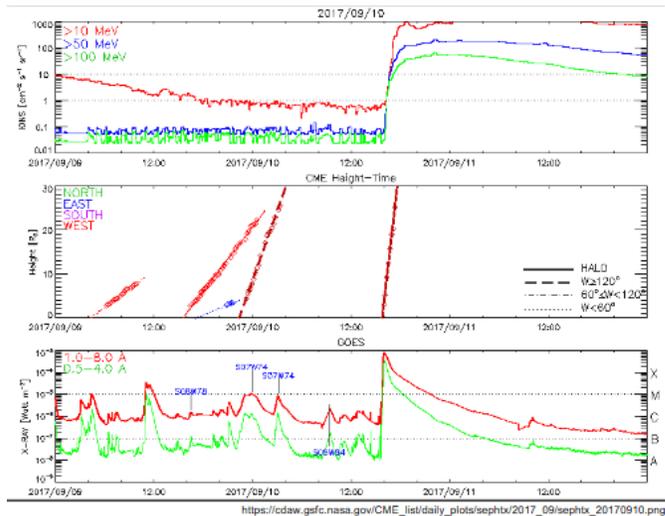


GMDN (SMS), кривой показана линия питч-угла, измеренного от направленного к Солнцу ММП и расчетного направления космических лучей медианной энергии в каждом пикселе

# Анализ угловых распределений



# Наземные возрастания



Спасибо за внимание!

