

Гелиосферная модуляция космических лучей в эпоху нейтронного монитора

id78

Кобелев П.Г., Трефилова Л.А., Белов А.В., Зиракашвили В.Н., Гущина Р.Т., Янке В.Г.

ИЗМИРАН

Email: yanke@izmiran.ru ; abelov@izmiran.ru ; zirak@izmiran.ru ; rgus@izmiran.ru ; kosmos061986@yandex.ru (Кобелев П.Г.); qinv84@mail.ru (Трефилова Л.А.)

Skype: Victor Yanke

Выполнена реконструкция гелиосферного потенциала модуляции галактических космических лучей для эры нейтронных мониторов. В основе лежит современная модель межзвездного спектра галактических космических лучей и спектр вариаций плотности космических лучей. Спектр вариаций космических лучей получен в результате обработки глобально-спектрографическим методом данных непрерывного мониторинга детекторами мировой сети (нейтронные мониторы, стратосферное зондирование, мюонные телескопы), который откалиброван по данным прямых измерений спектра частиц на космических аппаратах и баллонах. Результат реконструкции гелиосферного потенциала за последние 70 лет в диапазоне энергий от 1 до нескольких десятков ГэВ может быть использован в исследованиях в области солнечной, гелиосферной и солнечно-земной физики.

Потенциал модуляции. Этапы

- 1968** Аппроксимация силового поля [[Gleeson & Axford, 1968](#); [Caballero-Lopez and Moraal, 2004](#)].
- 1975** Локальный межзвездный спектр предложен в [[Garcia-Munoz et al., 1975](#)].
- 2000** Локальный межзвездный спектр предложен в [[Burger et al., 2000](#)].
- 2005** Оценка нулевой гармоники вариаций космических лучей по 6 NM и вычисление потенциала модуляции для периода 1950-2004 годов с среднемесячным разрешением [[Usoskin et al., 2005](#)].
- 2009** Аппроксимация дифференциального энергетического спектра галактических космических лучей вблизи Земли [[Vainio et al., 2009](#)].
- 2015** Локальный звездный спектр предложен в [[Vos and Potgieter, 2015](#)], который пересмотрел LIS, используя точные измерения на детекторах PAMELA и AMS-02 и учитывая также данные Voyager за пределами гелиосферы.
- 2017** Оценка нулевой гармоники вариаций космических лучей по данным 6 NM и и вычисление потенциала для периода 1951-2016 годов [[Usoskin et al., 2017](#)].

Введение

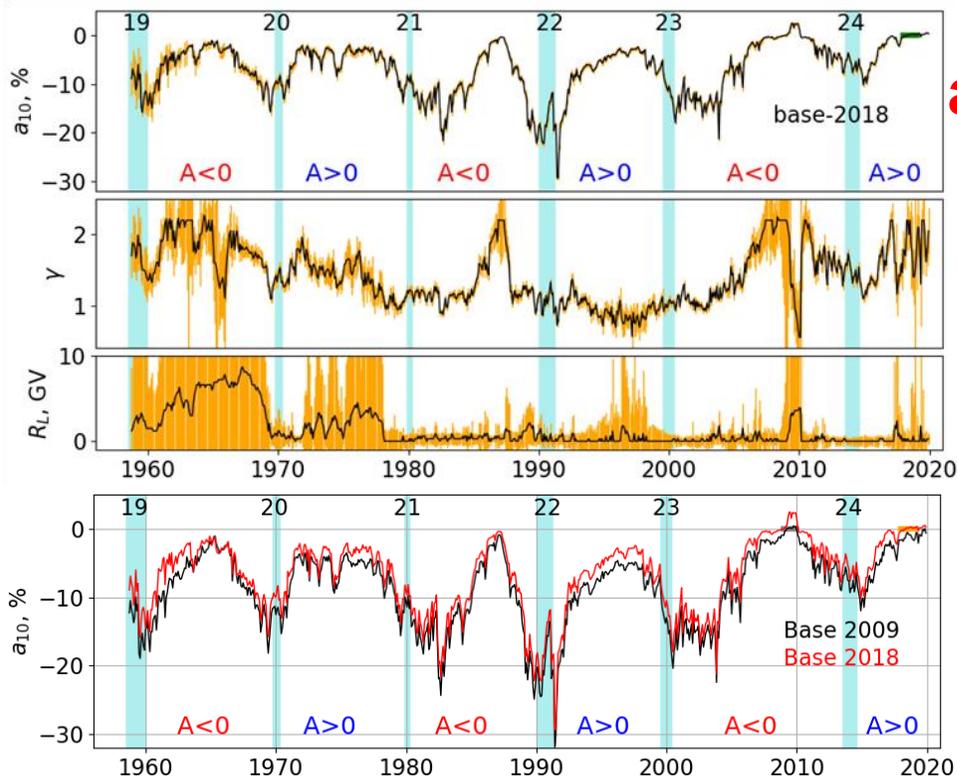
Для многих практических целей полезно описать энергетический спектр галактических космических лучей вблизи Земли с помощью аппроксимации силового поля [например, [Gleeson & Axford, 1968](#); [Caballero-Lopez and Moraal, 2004](#)] с единственным формальным параметром - потенциалом модуляции ϕ . Отметим, что приближение силового поля не подтверждается как физическая модель модуляции GCR, и потенциал модуляции не имеет четкого физического значения (часто используемая интерпретация средней адиабатической потери энергии не совсем верна [например, [Caballero-Lopez & Moraal, 2004](#)]). С другой стороны, он дает удобное эмпирическое описание фактической формы энергетического спектра GCR вблизи Земли, которая, хотя и не претендует на объяснение процесса модуляции, предлагает простую однозначную параметризацию спектра GCR для многих практических целей. Это оценка радиационной опасности, моделирование климата, радиация окружающей среды и т.д..

Обширные и систематические оценки потенциала модуляции космических лучей проведены в серии работ [[Usoskin et al., 2005](#); [2011](#); [2017](#)] по данным некоторых ключевых детекторов (нейтронные мониторы и мюонные телескопы) с реконструкцией ежемесячных значений потенциала с 1950-х годов. Для оценки потока частиц за пределами атмосферы и магнитосферы была предложена собственная оригинальная модель [[Usoskin et al., 2017](#)] и выполнены собственные расчеты функций выхода [[Mishev et al., 2013](#)].

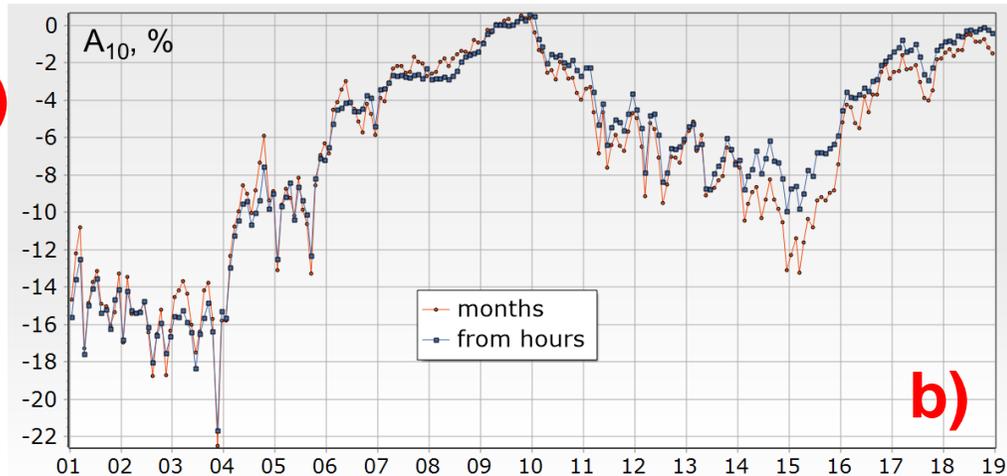
Задача

Выполнить оценки потенциала модуляции исходя из спектров, полученные по данным Мировой сети нейтронных мониторов и мюонных телескопов и калиброванные по прямым измерениям детекторов PAMELA и AMS-02. Учесть современные данные о межзвездном спектре. Учесть химический состав космического излучения.

Результат GSM анализа вариаций



a)



b)

- a) Амплитуда нулевой гармоник и параметры γ и R_L в изотропной модели.
- b) Сравнение амплитуды нулевой гармоник для анизотропной (hours) и изотропной модели (months).
- c) Сравнение амплитуд нулевой модели, полученных для двух базовых периодов: 2009 и 2018 год (минимум, видимо, в феврале 2020).

Исходными данными для оценки потенциала модуляции является спектр частиц, который определялся глобально спектрографическим методом (GSM) по данным Мировой сети станций космических лучей [Belov et al., 2019]. В работе привлекался спектр, приведенный на рис. c) для базового периода 2009 года, поскольку для базового периода 2020 модельные расчеты полностью еще не проведены. Следующим этапом должно быть тестирование спектра, полученный для анизотропной модели (рис.b) для базового периода 2020.

Методика восстановления потенциала модуляции

Для аппроксимации дифференциального энергетического спектра галактических космических лучей вблизи Земли использовалось приближение [Vainio et al., 2009]:

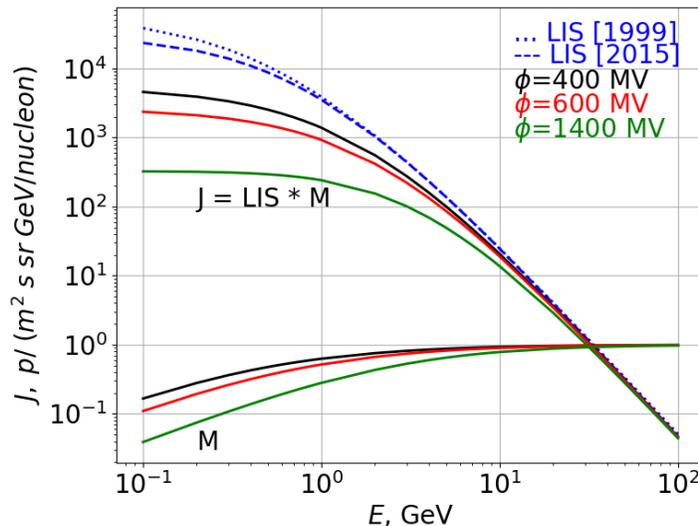
$$J_i(K, \phi) = J_{LIS,i}(K + \Phi_i) \frac{K(K + 2m)}{(K + \Phi_i)(K + \Phi_i + 2m)} \quad (1)$$

где K кинетическая энергия на нуклон, Φ_i - средние потери энергии частиц в гелиосфере, определяемые потенциалом модуляции ϕ . Средние потери энергии частиц с зарядом Z_i и массовым числом A_i равны $\Phi_i = (eZ_i/A_i)\phi$. Локальный звездный спектр $J_{LIS,i}$ взят из работы [Vos and Potgieter, 2015]

$$J_{LIS}(K) = 2.7 \cdot 10^3 \frac{K^{1.12}}{\beta^2} \left(\frac{K + 0.67}{1.67} \right)^{-3.93} \dots [(m^2 s \cdot sr \cdot GeV / nucl)^{-1}] \quad (2)$$

где безразмерная скорость $\beta = v/c$ определяется через кинетическую K энергию как $\beta = (1 - m^2/(K+m)^2)^{1/2}$.

Дифференциальный энергетический спектр J галактических космических лучей и функция модуляции M вблизи Земли для трех значений потенциала модуляции. Показан также локальный звездный спектр J_{LIS} .



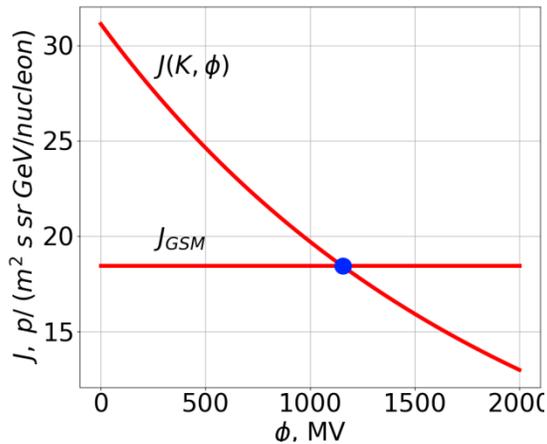
Следовательно, дифференциальный энергетический спектр галактических космических лучей можно записать также как

$$J_i(K, \phi) = J_{LIS,i}(K + \Phi_i) \cdot M_i(K, \Phi_i) \quad (3)$$

где функция модуляции $M_i(K, \Phi_i)$ равна

$$M_i(K, \Phi_i) = \frac{K(K + 2m)}{(K + \Phi_i)(K + \Phi_i + 2m)} \quad (4)$$

Методика восстановления потенциала модуляции



Пример сходимости решения уравнения (5)

Потенциал модуляции определяется из трансцендентного уравнения, которое решалось методом бисекции

$$J_{GSM}(K) = J_i(K, \phi) \quad (5)$$

где $J_i(K, \phi)$ определяется выражением (3), а $J_{GSM}(t, 10GV)$ для каждого момента времени определяется в результате GSM анализа.

Учет вклада ядер

Можно предположить, что немодулированный спектр гелия составляет 0.14 от спектра протонов. Тогда учет альфа-частиц, потенциал для которых в 2 раза меньше, чем для протонов, проводится добавлением в уравнение (5) второго слагаемого с коэффициентом 0.14 в котором используется $\phi/2$

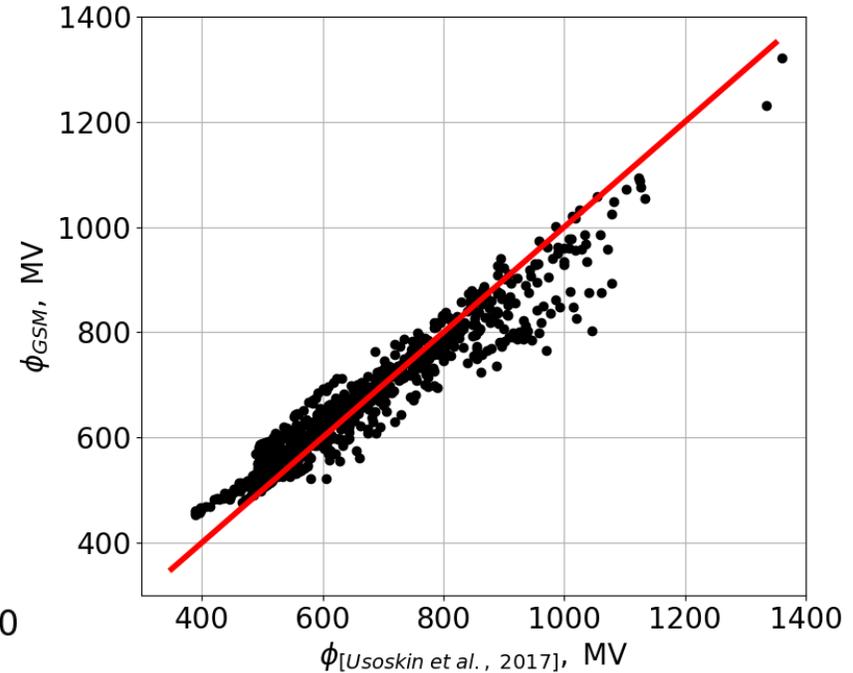
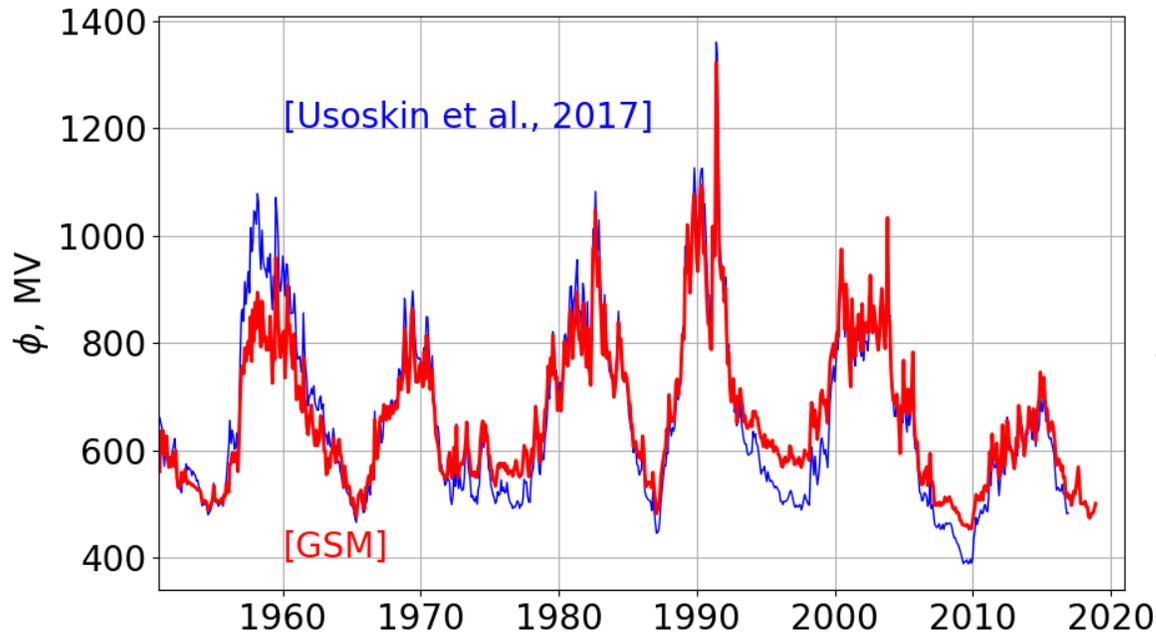
$$J_{GSM}(K) = J_{LIS}(K, \phi)M(K, \phi) + 0.14 \times J_{LIS}(K, \phi/2)M(K, \phi/2) \quad (6)$$

В случае слабой модуляции, можно сделать упрощение, а именно потенциал, полученный с одним слагаемым в уравнении (5) умножить на $1 - 0.14/2 = 0.93$

$$J_{GSM}(K) = J_{LIS}(K, 0.93 \cdot \phi)M(K, 0.93 \cdot \phi) \quad (7)$$

Оценочно для степенного спектра частиц относительное падение интенсивности равно $(\gamma+2)\phi/E$. Так что изменение потенциала между минимумом и максимумом на 500 МВ дает 23 процента для 10 ГэВ-ных протонов со спектром 2.5. $((2.5+2) \cdot 0.5/10 = 0.225 = 22.5\%)$

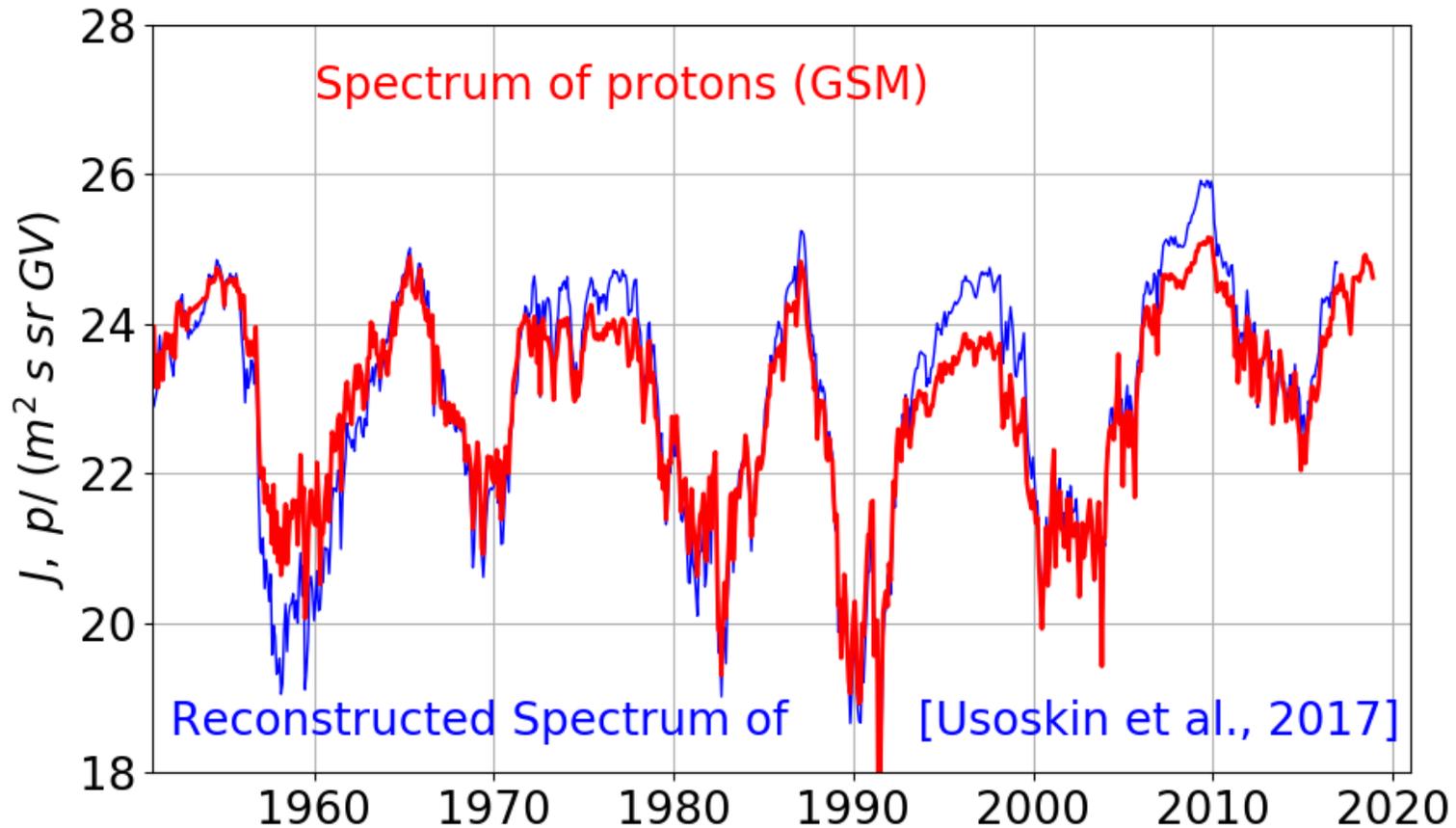
Потенциал модуляции. Результат 1



Сравнение потенциала модуляции, полученного в работе [Usoskin et al., 2017] и в настоящей работе [GSM] с учетом протонов и ядер гелия. Учет ядер гелия для слабой модуляции сделан с поправкой множителем 0.93 в уравнении (7).

Поле корреляций между потенциалами, полученными в работе [Usoskin et al., 2017] и в настоящей работе по данным о потоке для метода GSM.

Потенциал вариаций. Результат 2



Сравнение потока космических лучей:

1) полученного нами методом GSM [[id-70 36 RCRC 2020](#)] и

2) восстановленного по данным о потенциале модуляции работы [[Usoskin et al., 2017](#)] в соответствии с выражением (1).

Потенциал модуляции. Результат 3

Потенциал модуляции (ϕ , MV), полученный из (1) для потока, найденного по данным мониторинга мировой сети нейтронных мониторов методом GSM и откалиброванного по измерениям PAMELA 2009 года.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1951		561	636	596	637	603	591	627	584	568	586	570
1952	586	594	570	599	550	531	531	533	559	544	544	564
1953	548	538	542	539	539	535	536	533	531	529	526	526
1954	526	517	503	508	504	506	502	489	494	495	502	508
1955	534	509	508	507	502	505	504	511	502	518	515	538
1956	522	523	574	575	594	596	579	580	596	561	622	697
1957	750	757	743	791	766	783	803	781	849	766	862	803
1958	875	827	894	875	836	793	878	843	803	812	787	798
1959	788	850	807	725	801	769	959	935	848	791	773	799
1960	819	822	735	786	908	832	834	795	769	752	817	756
1961	694	701	719	714	678	672	773	698	682	643	629	662
1962	668	684	649	630	609	637	608	615	621	664	654	650
1963	599	599	555	557	585	568	594	598	623	599	577	598
1964	592	621	597	586	562	531	570	550	534	529	533	513
1965	501	511	497	484	476	498	518	519	526	513	500	490
1966	530	530	544	552	539	571	573	546	657	604	585	601
1967	646	663	654	661	685	681	656	678	681	659	683	669
1968	669	688	684	677	684	733	723	713	732	747	827	797
1969	740	708	728	779	855	864	806	756	727	732	728	757
1970	763	742	719	784	733	814	793	750	714	720	749	692
1971	681	631	621	610	597	563	563	556	555	546	552	552
1972	583	596	564	548	569	606	561	645	554	550	574	575
1973	573	582	591	612	653	605	596	577	553	558	560	551
1974	559	550	568	577	617	642	654	615	648	634	624	591
1975	589	567	562	544	543	533	548	571	575	569	576	574
1976	568	576	562	571	556	562	559	561	552	563	572	581
1977	564	555	550	553	557	580	609	599	599	573	551	558
1978	590	603	586	637	682	653	635	581	578	629	618	629
1979	675	677	705	757	727	771	740	814	769	733	737	674
1980	688	708	673	715	750	803	773	761	757	814	862	853
1981	771	819	840	857	895	828	806	802	778	867	874	801
1982	755	828	758	744	721	860	977	977	1048	960	905	958
1983	889	846	783	777	873	818	771	782	783	756	739	739
1984	699	714	743	769	839	796	808	768	733	729	744	736
1985	721	690	687	651	647	606	616	616	599	594	586	597

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1986	582	627	601	554	533	538	541	540	535	530	559	529
1987	504	482	489	496	513	552	567	584	599	605	639	630
1988	704	668	654	657	654	674	725	733	703	729	732	788
1989	817	807	940	931	1020	960	893	931	1002	1058	1077	1024
1990	957	933	986	1072	1094	1088	967	985	928	876	836	838
1991	790	788	1017	962	962	1322	1230	1054	950	929	918	941
1992	877	902	827	761	781	716	691	715	733	685	700	651
1993	700	696	715	692	681	654	664	649	641	644	645	655
1994	645	673	673	673	661	661	645	633	623	621	607	629
1995	614	605	619	609	609	607	619	598	601	606	602	593
1996	590	581	570	569	583	587	578	580	581	608	605	587
1997	588	573	581	580	575	586	580	568	576	587	600	593
1998	592	588	581	645	689	671	645	675	646	621	640	667
1999	705	712	696	685	694	666	651	713	763	778	788	798
2000	773	795	819	811	880	922	975	912	888	825	910	873
2001	809	753	719	882	819	789	774	828	830	854	831	786
2002	873	786	832	838	827	819	859	926	873	819	868	847
2003	831	803	787	810	862	900	861	815	790	853	1033	841
2004	840	751	716	694	687	697	705	674	646	594	683	673
2005	768	684	673	667	714	668	683	713	783	660	627	612
2006	615	561	559	542	536	538	560	562	569	534	553	594
2007	542	542	528	498	502	498	501	503	497	498	503	502
2008	513	507	505	511	513	505	500	492	490	494	484	484
2009	483	470	470	462	462	461	459	462	460	454	457	454
2010	467	484	494	518	513	509	507	517	523	508	532	534
2011	528	523	550	598	563	630	596	590	581	614	577	548
2012	554	593	647	569	571	599	656	647	602	601	599	586
2013	567	584	623	604	683	669	643	620	616	590	608	636
2014	643	681	664	663	637	677	656	617	667	683	698	746
2015	717	699	736	698	675	676	637	636	644	654	645	629
2016	602	573	581	584	576	563	572	550	550	519	513	519
2017	510	515	498	508	523	518	531	550	569	536	501	502
2018	500	500	505	495	494	476	474	480	484	484	493	501

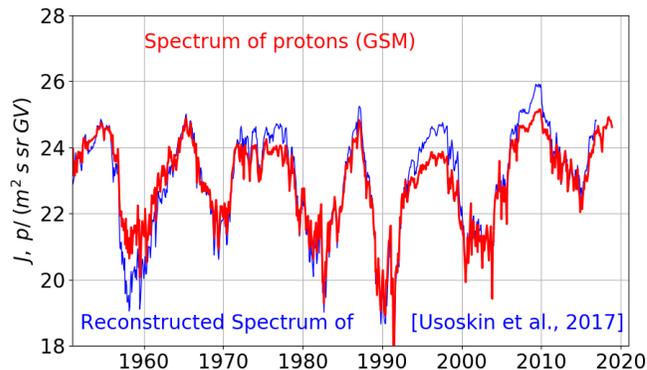
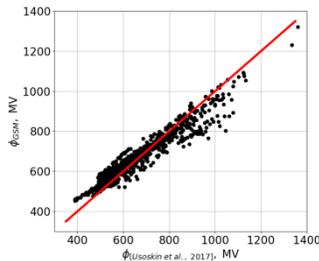
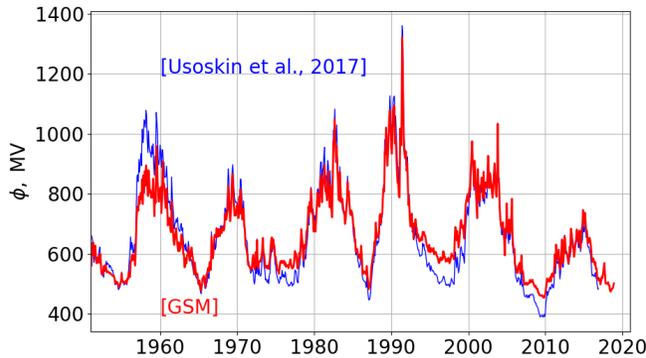
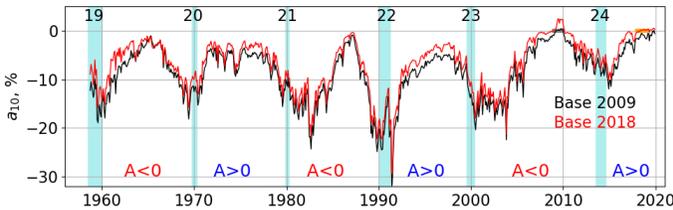
Выводы

1) Выполнена реконструкция гелиосферного потенциала модуляции галактических космических лучей для эпохи непрерывного наземного мониторинга.

2) Реконструкция потенциала модуляции основана на данных мировой сети нейтронных мониторов с выделением нулевой гармоники глобально-спектрографическим методом (GSM).

3) Для полученного спектра проведена калибровка по прямым измерениям в минимуме SA 2009 года по данным магнитного спектрометра PAMELA.

4) Потенциал модуляции приведен в графическом и цифровом виде.



References

- Vainio R., Desorgher L., Heynderickx D., Flückiger E., Horne R.B., Kovaltsov G.A., Kudela K., Laurenza M., Storini M., McKenna-Lawlor S., Rothkaehl H., Usoskin I.G. (2009), Dynamics of the Earth's particle radiation environment, *Space Sci. Rev.*, 147, 187–231, [doi:10.1007/s11214-009-9496-7](https://doi.org/10.1007/s11214-009-9496-7).
- Usoskin, I. G., K. Alanko, K. Mursula, G. A. Kovaltsov, Heliospheric modulation strength during the neutron monitor era, *Solar Phys.*, 207, 389-399, 2002.
- Gleeson L.J. & Axford W.I. "Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays", 1968 *ApJ*, 154, 1011, doi: 10.1086/149822
- Vos E.E., M.S. Potgieter, New Modeling of Galactic Proton Modulation during the Minimum of Solar Cycle 23/24, *Astrophys. J.*, 815, 119, 2015. doi:10.1088/0004-637X/815/2/119.
- Potgieter, M. S., E. E. Vos, M. Boezio, N. De Simone, V. Di Felice, and V. Formato (2014), Modulation of Galactic Protons in the Heliosphere During the Unusual Solar Minimum of 2006 to 2009, *Solar Phys.*, 289, 391–406, doi:10.1007/s11207-013-0324-6.
- Cummings, A. C., E. C. Stone, B. C. Heikkila, N. Lal, W. R. Webber, G. Jóhannesson, I. V. Moskalenko, E. Orlando, and T. A. Porter (2016), Galactic Cosmic Rays in the Local Interstellar Medium: Voyager 1 Observations and Model Results, *Astrophys. J.*, 831, 18, doi:10.3847/0004-637X/831/1/18.
- Corti, C., V. Bindi, C. Consolandi, and K. Whitman (2016), Solar Modulation of the Local Interstellar Spectrum with Voyager 1, AMS-02, PAMELA, and BESS, *Astrophys. J.*, 829, 8, doi:10.3847/0004-637X/829/1/8.
- M. Buchvarova, P. Velinov, An Empirical Model for Determination of the Cosmic Ray Spectra, *Sun and Geosphere*, 2006; 1(2): 28-31
- R.A. Burger, M.S. Potgieter, B. Heber, *J. Geophys. Res.* 105, 27447 (2000)
- Bieber, J. W., R. L. Mace, and W. H. Matthaeus, Perpendicular diffusion of charged test particles in magnetostatic slab turbulence, *Proc. Int. Conf. Cosmic Ray 26th*, 7, 61-64, 1999.
- Buchvarova M., Velinov P.I.Y., Buchvarov I., Model approximation of cosmic ray spectrum, *Space and Solar, Planetary and Space Science* 59 (2011) 355–363, doi:10.1016/j.pss.2011.01.001
- Koldobskiy, S.A., Kovaltsov, G.A., Usoskin, I.G.: 2018, A solar cycle of cosmic ray fluxes for 2006 – 2014: comparison between PAMELA and neutron monitors. *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, Validation of the neutron monitor yield function using data from AMS-02 experiment 2011 – 2017. *J. Geophys. Res.* 124, 2367-2379. doi: 10.1029/2018JA026340.
- Koldobskiy, S.A., Bindi, V., Corti, C., Kovaltsov, G.A., Usoskin, I.G.: Validation of the neutron monitor yield functions using data from AMS-02 and PAMELA experiments, 2006–2017. 2019, PoS ICRC 2019, id 1094
- Martucci M., Munini R., Boezio, M., et al., "Proton fluxes measured by the PAMELA experiment from the minimum to the maximum solar activity for the 24th solar cycle" *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 854, Number 1 published 2018 February 5, doi:10.3847/2041-8213/aaa9b2
- Usoskin I.G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G.A., Mursula K., "Heliospheric Modulation of Cosmic Rays: Monthly Reconstruction for 1951-2004". *J. Geophys. Res.*, Vol.110, doi:10.1029/2005JA011250, 2005, A12108.
- Webber, W. R., R. L. Golden, S. J. Stochaj, J. F. Ormes, and R. E. Strittmatter (1991), A measurement of the cosmic-ray H-2 and He-3 spectra and H-2/He-4 and He-3/He-4 ratios in 1989, *Astrophys. J.*, 380, 230–234, doi:10.1086/170578.
- Gleeson L.J. & Axford W.I. "Solar Modulation of Galactic Cosmic Rays", 1968 *ApJ*, 154, 1011, doi: 10.1086/149822
- Golden R.L. et al. 1991 *Nucl.Inst. Meth.*
- Boezio M., Bonvicini V., Schiavon P., A. Vacchi, N. Zampa, D. Bergstroem, P. Carlson, T. Francke, P. Hansen, E. Mocchiutti, M. Suffert, M. Hof, J. Kremer, W. Menn, M. Simon, M. Ambriola, R. Bellotti, F. Cafagna, F. Ciacio, M. Circella, C. N. De Marzo, N. Finetti, P. Papini, S. Piccardi, P. Spillantini, E. Vannuccini, S. Bartalucci, M. Ricci, M. Casolino, M. P. De Pascale, A. Morselli, P. Picozza, R. Sparvoli, J. W. Mitchell, J. F. Ormes, S. A. Stephens, R. E. Streitmatter, U. Bravar, S. J. Stochaj. "The cosmic-ray proton and helium spectra measured with the CAPRICE98 balloon experiment" *Astroparticle Physics* 19(5):583-604 · 2002 doi: 10.1016/S0927-6505(02)00267-0, arXiv

SPARE SLIDES