

38-ая Всероссийская конференция
по космическим лучам

ВККЛ-2024

1-5 июля 2024, Москва



РАСЧЕТ ЖЕСТКОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Б.Ю.Юшков (ИИЯФ МГУ)

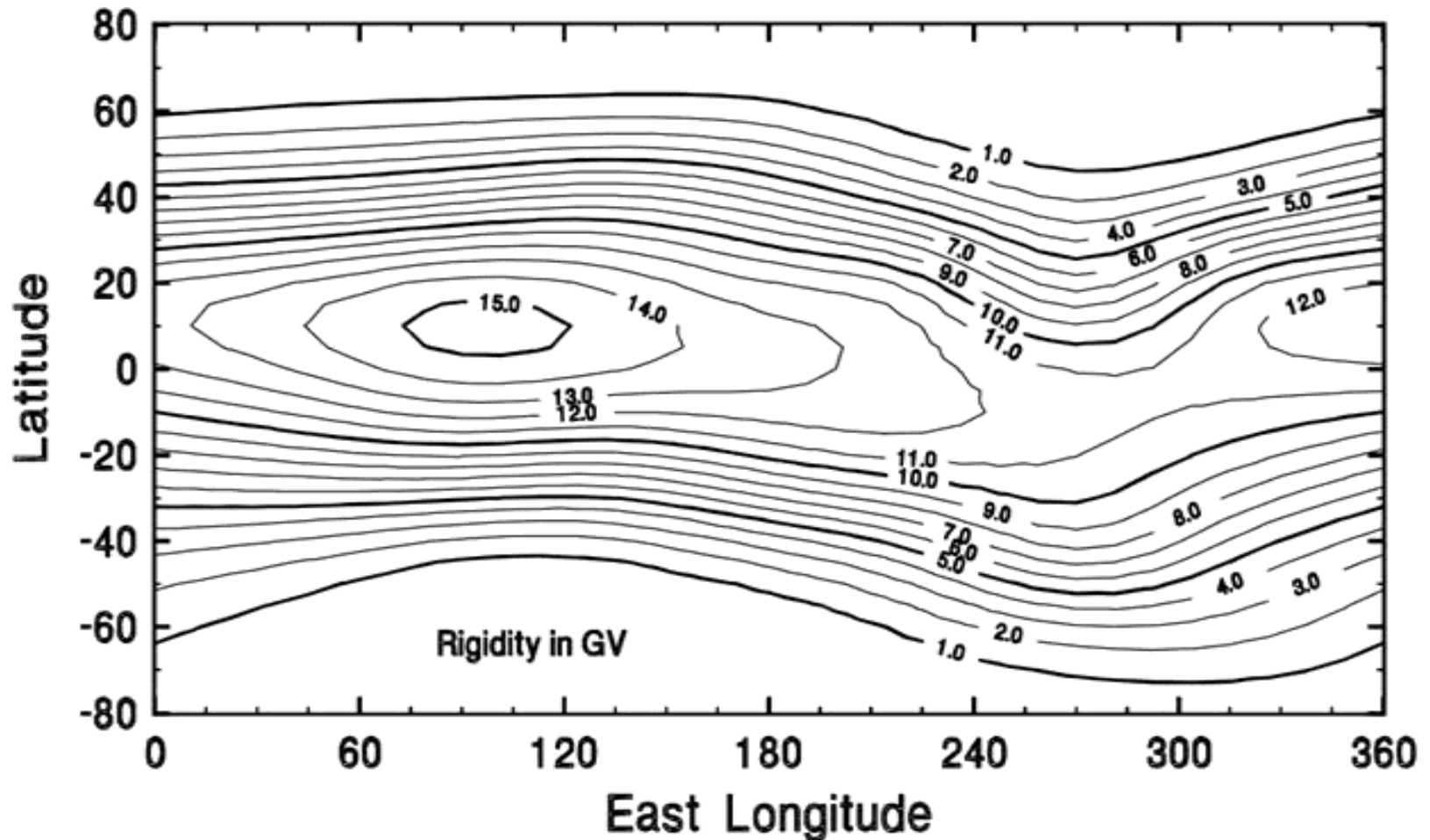
clef@srd.sinp.msu.ru

Одним из факторов, определяющих радиационную обстановку в околоземном космическом пространстве, являются галактические и солнечные космические лучи. Их потоки внутри магнитосферы во многом определяются эффектом геомагнитного обрезания. Этот эффект обычно количественно описывается величиной эффективной вертикальной жесткости обрезания. Данная величина непосредственно вычисляется численным интегрированием уравнений движения, что даже при современном быстродействии ЭВМ требует значительных затрат машинного времени и использования специальных программ. Поэтому в практических целях используются различные методы интерполяции или аппроксимации. Один из таких методов обеспечивает вычисление эффективной вертикальной жесткости в зависимости от двух параметров – локального времени и Кр-индекса, характеризующего геомагнитную возмущенность.

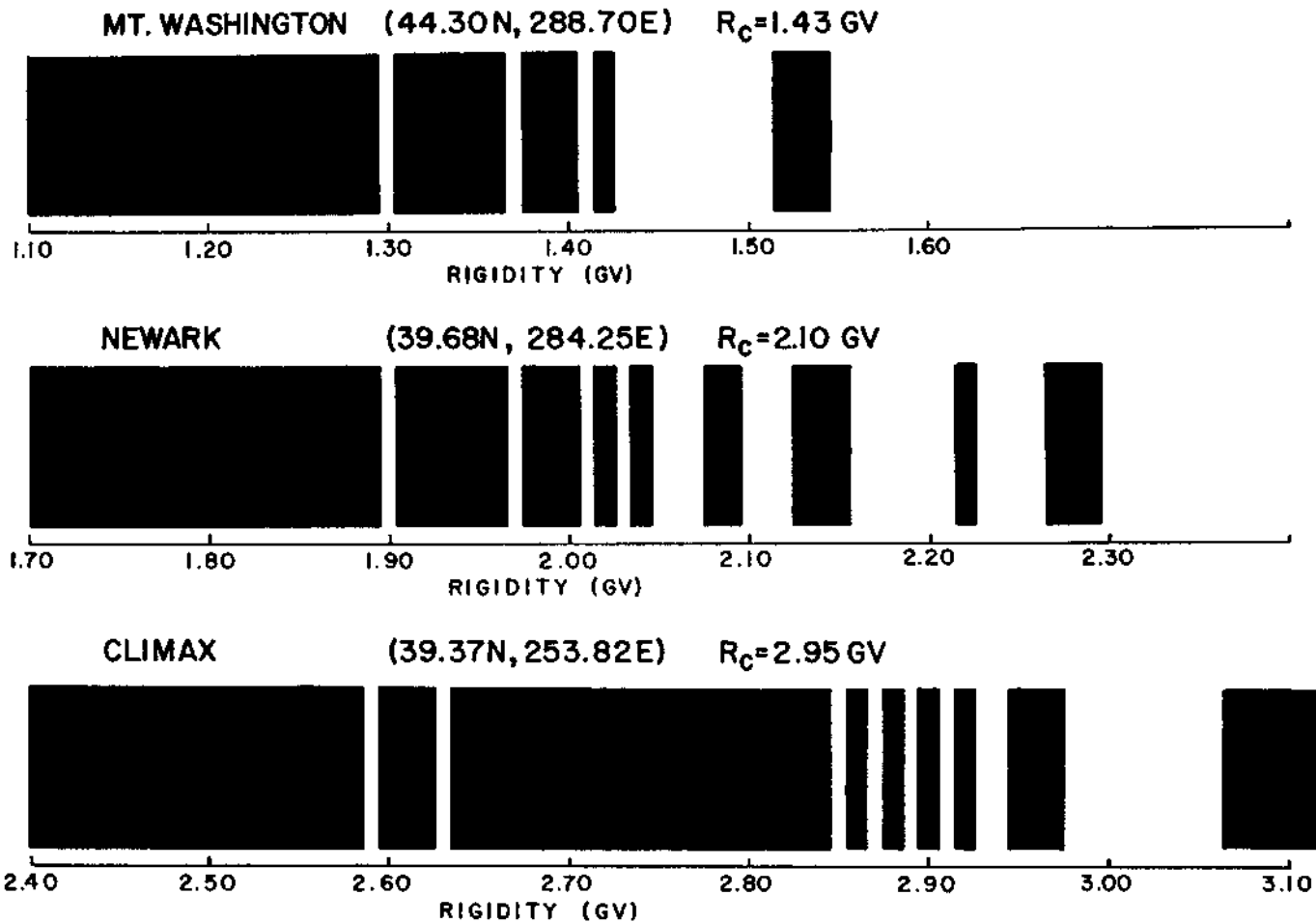
Модели магнитного поля

- IGRF2020
- Цыганенко-89
- Цыганенко-95
- Цыганенко-2002
- параболоидная (Алексеев, 2001)

Планетарное распределение вертикальной жесткости обрезания



Пенумбра



R. A. Nymmik, M. I. Panasyuk, V. V. Petrukhin, B. Yu. Yushkov, Proc. of 30th ICRC, (Merida, Mexico, 2007), V.1 p.701-704 (2008).

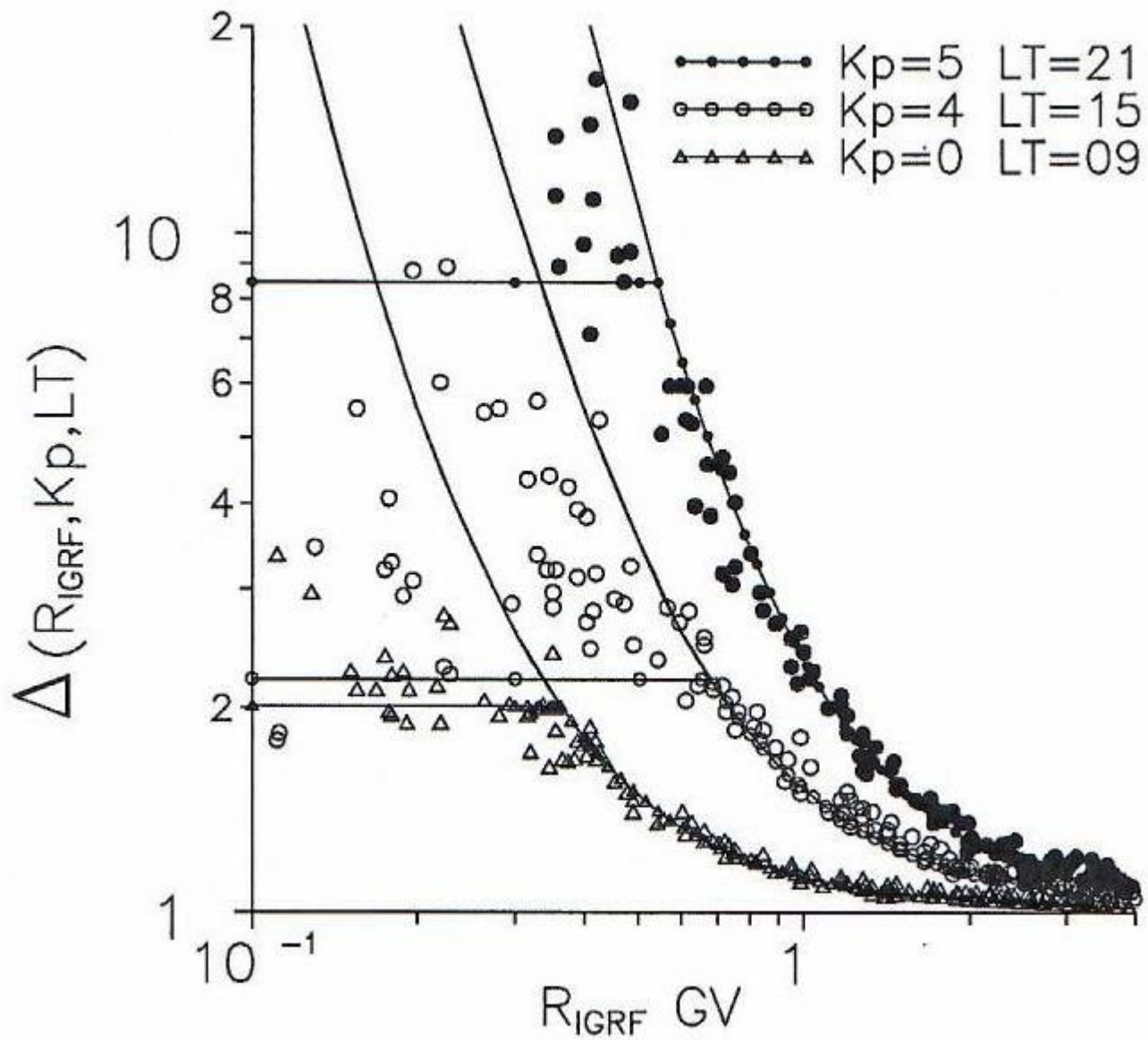
Ныммик Р.А., Панасюк М.И., Петрухин В.В., Юшков Б.Ю. // Косм. Иссл. 2009. Т. 47. С. 211–218

R.A. Nymmik, B.Yu. Yushkov, M.I. Panasyuk, V.V. Petrukhin, Adv. Space Res. V.46, P.303-309 (2010)

IGRF + T89

$$R_{eff}(R_0, Kp, T) = \frac{R_0}{\Delta(R_0, Kp, T)}$$

$$\Delta(R_0, Kp, T) = 1 + 0.001 \cdot \exp(a \cdot R_0^b - 1)$$



$$a = A_a \cdot K_p + B_a, \quad b = A_b \cdot K_p + B_b, \quad c = A_c \cdot K_p^2 + B_c,$$

$$A_a = -0,037 \cdot \sin\left[\frac{\pi}{12}(T - 5,844)\right] + 0,357,$$

$$B_a = -0,267 \cdot \sin\left[\frac{\pi}{12}(T - 5,198)\right] + 6,073,$$

$$A_b = 0,0022 \cdot \sin\left[\frac{\pi}{12}(T - 6,448)\right] + 0,00177,$$

$$B_b = 0,0091 \cdot \sin\left[\frac{\pi}{12}(T - 6,390)\right] - 0,30538,$$

$$A_c = 0,768 \cdot \sin\left[\frac{\pi}{12}(T + 6,082)\right] + 0,0769,$$

$$B_c = 2,3564 \cdot \sin\left[\frac{\pi}{12}(T + 5,785)\right] + 3,5876.$$

Базовая таблица IGRF2020

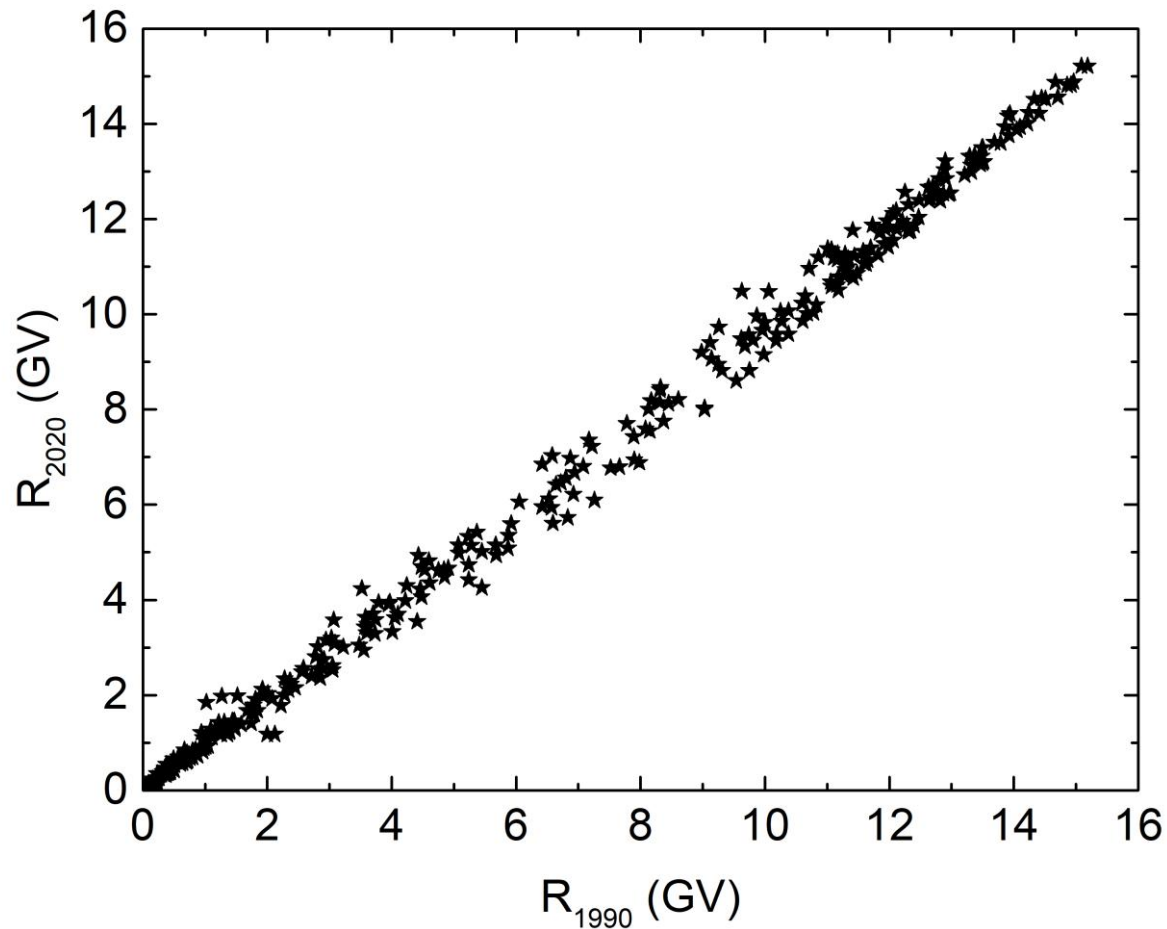
450 км

$\lambda, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
85	0,004	0,004	0,007	0,007	0,010	0,010	0,010	0,013	0,000	0,013	0,007	0,007
80	0,004	0,004	0,004	0,024	0,030	0,016	0,004	0,007	0,010	0,010	0,007	0,004
75	0,039	0,106	0,150	0,174	0,191	0,174	0,124	0,004	0,007	0,007	0,004	0,004
70	0,215	0,308	0,364	0,411	0,443	0,458	0,343	0,165	0,004	0,004	0,004	0,077
65	0,476	0,653	0,726	0,794	0,871	0,932	0,741	0,400	0,141	0,018	0,074	0,276
60	0,971	1,179	1,304	1,398	1,548	1,672	1,380	0,829	0,349	0,171	0,259	0,603
55	1,746	1,959	2,059	2,255	2,480	2,692	2,330	1,386	0,745	0,429	0,571	1,139
50	2,841	3,080	3,227	3,539	3,828	4,045	3,458	2,361	1,266	0,739	1,035	2,071
45	4,249	4,453	4,595	4,994	5,249	5,521	4,639	3,091	2,025	1,289	1,758	3,415
40	5,916	6,128	6,492	7,138	7,742	7,914	6,522	4,698	3,517	2,048	2,684	4,687
35	8,228	8,349	9,111	9,414	9,837	9,585	8,017	6,461	4,288	2,933	3,899	7,087
30	9,717	10,068	10,951	11,503	11,953	11,381	9,877	8,267	5,713	3,791	5,268	9,002
25	11,192	11,743	12,495	13,355	13,265	12,483	11,319	9,925	7,782	5,218	7,211	10,328
20	12,104	12,854	13,646	14,318	14,077	13,165	12,052	10,964	8,995	6,231	8,892	11,201
15	12,633	13,345	14,247	14,929	14,588	13,636	12,613	11,675	10,130	7,720	10,246	11,761
10	12,684	13,486	14,508	15,209	14,828	13,896	13,014	12,202	10,992	9,467	10,849	11,941
5	12,413	13,295	14,448	15,159	14,799	13,957	13,245	12,526	11,622	10,429	11,139	11,821
0	11,881	12,814	14,067	14,778	14,478	13,786	13,265	12,693	11,953	11,039	11,209	11,490
-5	11,110	12,082	13,385	14,087	13,866	13,347	13,075	12,663	12,052	11,241	11,109	10,938
-10	10,158	11,139	12,423	13,045	12,944	12,608	12,586	12,423	11,972	11,221	10,829	10,247
-15	9,001	9,905	11,030	11,461	11,132	11,242	11,846	11,981	11,721	11,070	10,408	9,434
-20	7,543	8,329	9,053	9,363	9,122	9,044	10,269	11,300	11,319	10,778	9,885	8,328
-25	6,343	6,867	7,210	6,623	6,563	7,219	8,369	9,648	10,740	10,278	9,174	7,282
-30	5,165	5,378	5,013	4,617	4,485	5,002	6,562	7,606	9,988	9,725	8,350	6,154
-35	4,259	3,952	3,641	3,070	2,944	3,601	4,778	6,705	8,480	8,983	7,464	5,492
-40	3,414	3,071	2,543	1,892	1,756	2,341	3,464	4,657	6,977	8,087	6,455	4,780
-45	2,682	2,220	1,663	1,109	0,992	1,338	2,264	3,589	5,382	7,089	5,908	3,837
-50	2,113	1,623	1,061	0,622	0,521	0,724	1,380	2,447	3,920	5,312	4,666	3,114
-55	1,684	1,175	0,673	0,288	0,184	0,320	0,790	1,649	2,787	3,847	3,615	2,520
-60	1,272	0,812	0,397	0,109	0,006	0,109	0,397	1,018	1,901	2,795	2,798	1,951
-65	0,929	0,535	0,218	0,001	0,006	0,006	0,191	0,588	1,232	1,829	1,941	1,435
-70	0,627	0,345	0,098	0,004	0,004	0,007	0,045	0,322	0,742	1,163	1,268	0,985
-75	0,403	0,199	0,021	0,004	0,004	0,004	0,004	0,164	0,412	0,645	0,732	0,604
-80	0,223	0,106	0,001	0,004	0,004	0,004	0,004	0,062	0,217	0,337	0,378	0,331
-85	0,103	0,036	0,001	0,004	0,004	0,004	0,004	0,021	0,085	0,135	0,170	0,147

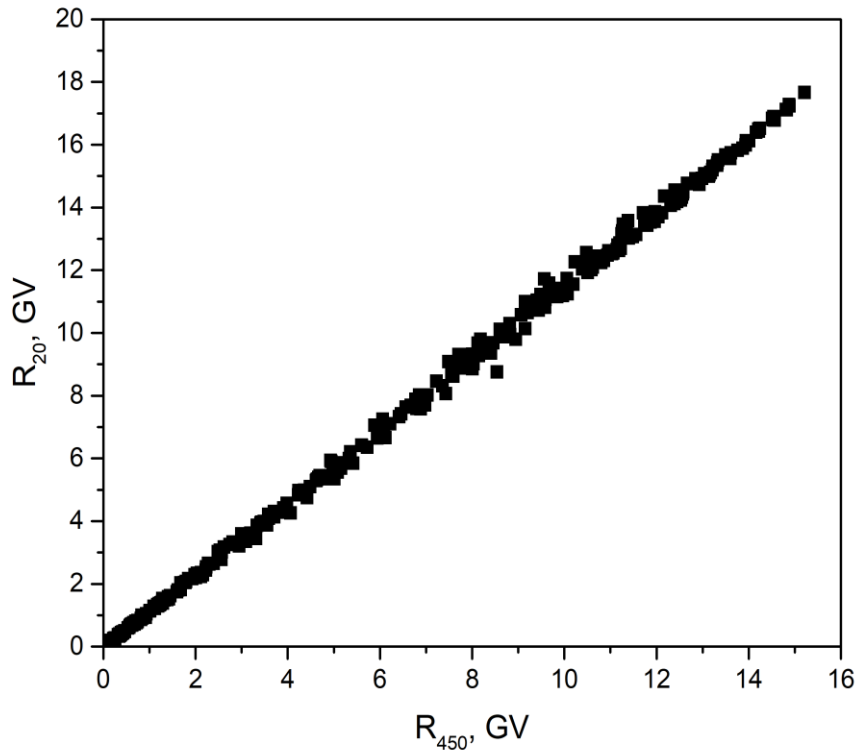
Comparison with calculations by Shea and Smart

“Calculated cosmic ray cutoff rigidities at 450 km for epoch 1990.0”,
Proc. 25th ICRC (Durban), V.2, P.197-200, 1997.

$r = 0.998$. $k = 0.981$



Gerontidou, M., N. Katzourakis, H. Mavromichalaki,
V. Yanke, E. Eroshenko, World grid of cosmic ray vertical
cut-off rigidity for the last decade // Adv. Space Res.
(2021). V.67 , P. 2231–2240.



$$R(20\text{km}) = 1.15 \times R(450\text{km})$$

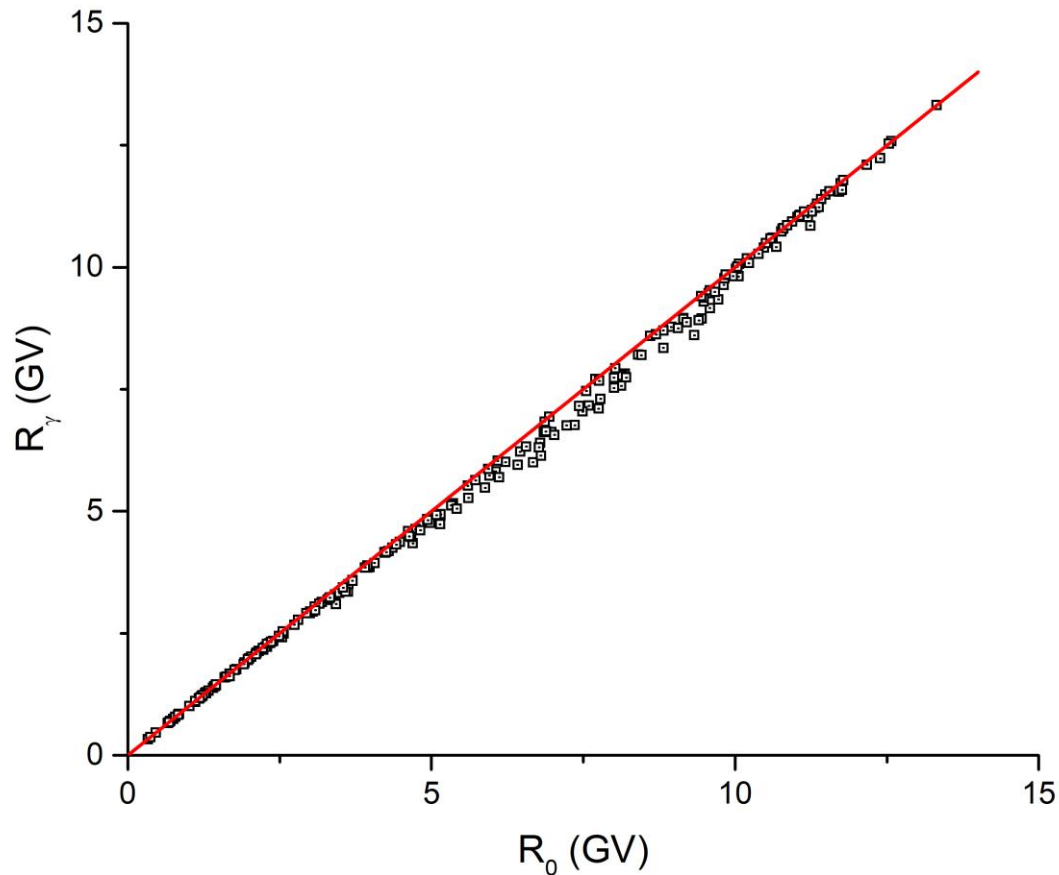
$$r = 1.0$$

$$R(H) = R_{450} \cdot \left(\frac{r_E + 450}{r_E + H} \right)^2$$

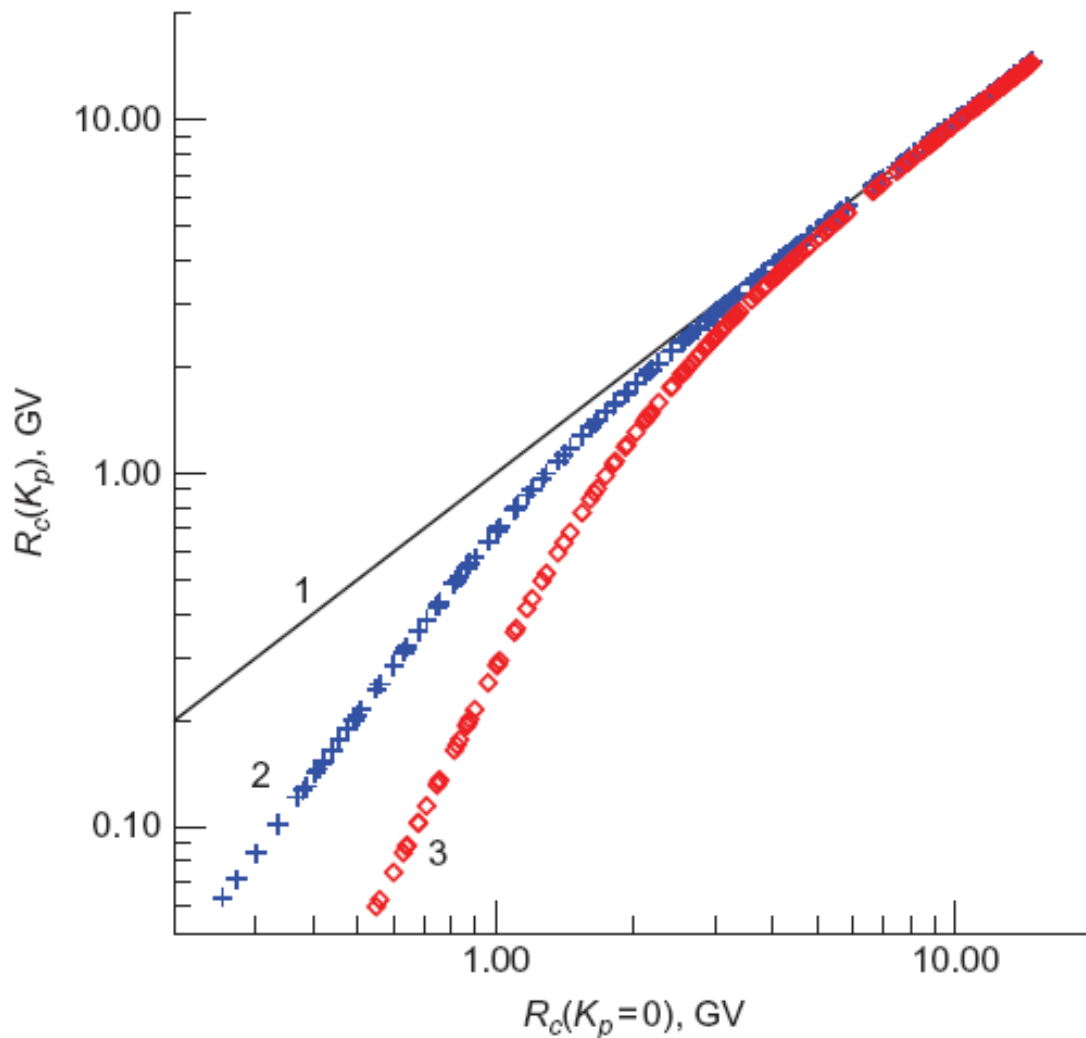
$$R(20\text{km}) = 1.14 \times R(450\text{km})$$

Зависимость эффективной жесткости обрезания от показателя спектра

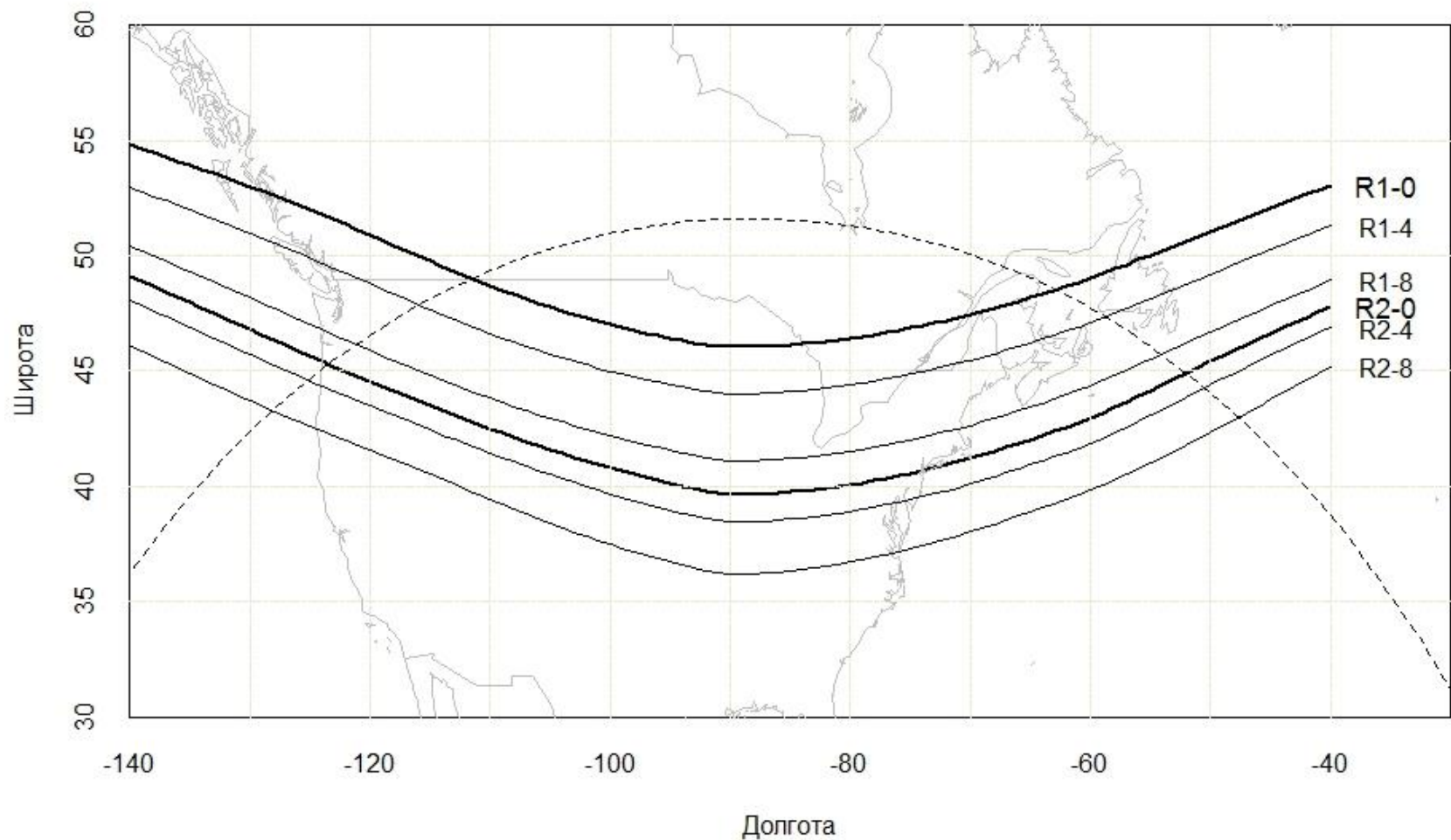
$$R_{eff} = R_L + \frac{\delta R}{F(R_L)} \sum_{R_L}^{R_U} F(R_i) G(R_i) \quad R_{eff} = R_L + n \delta R,$$



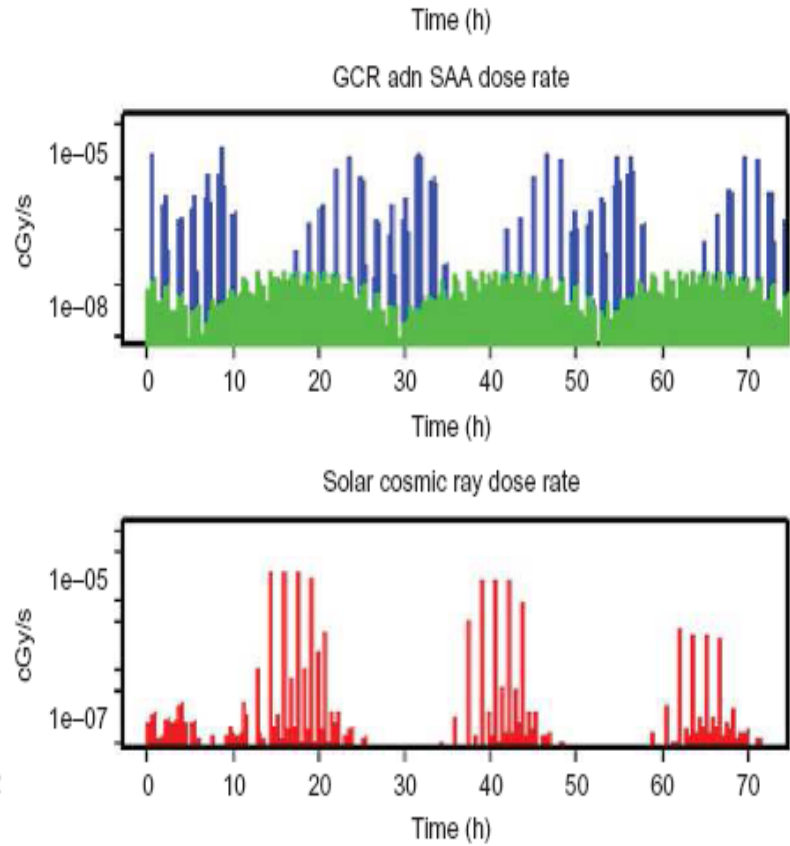
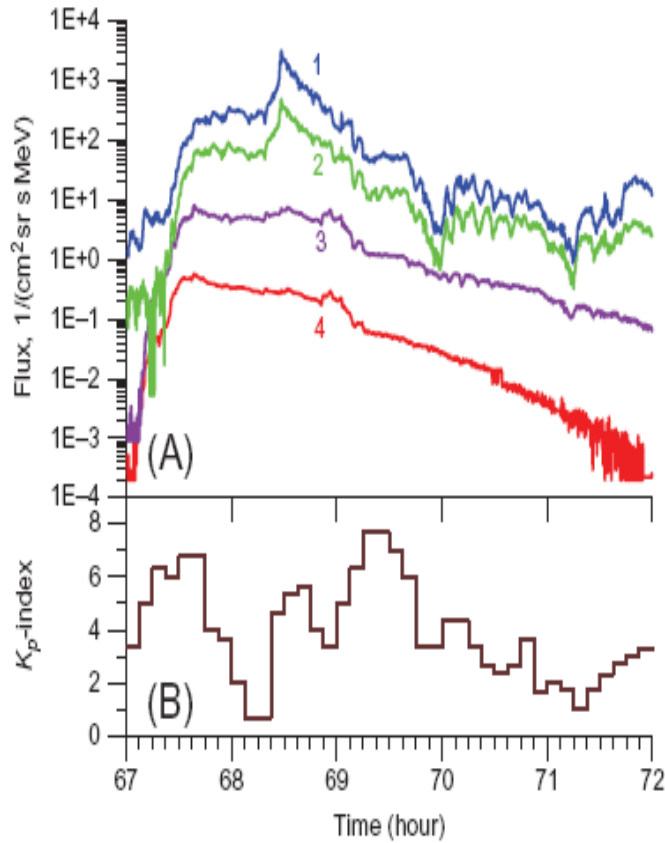
Зависимость вертикальной жесткости геомагнитного обрезания от K_p



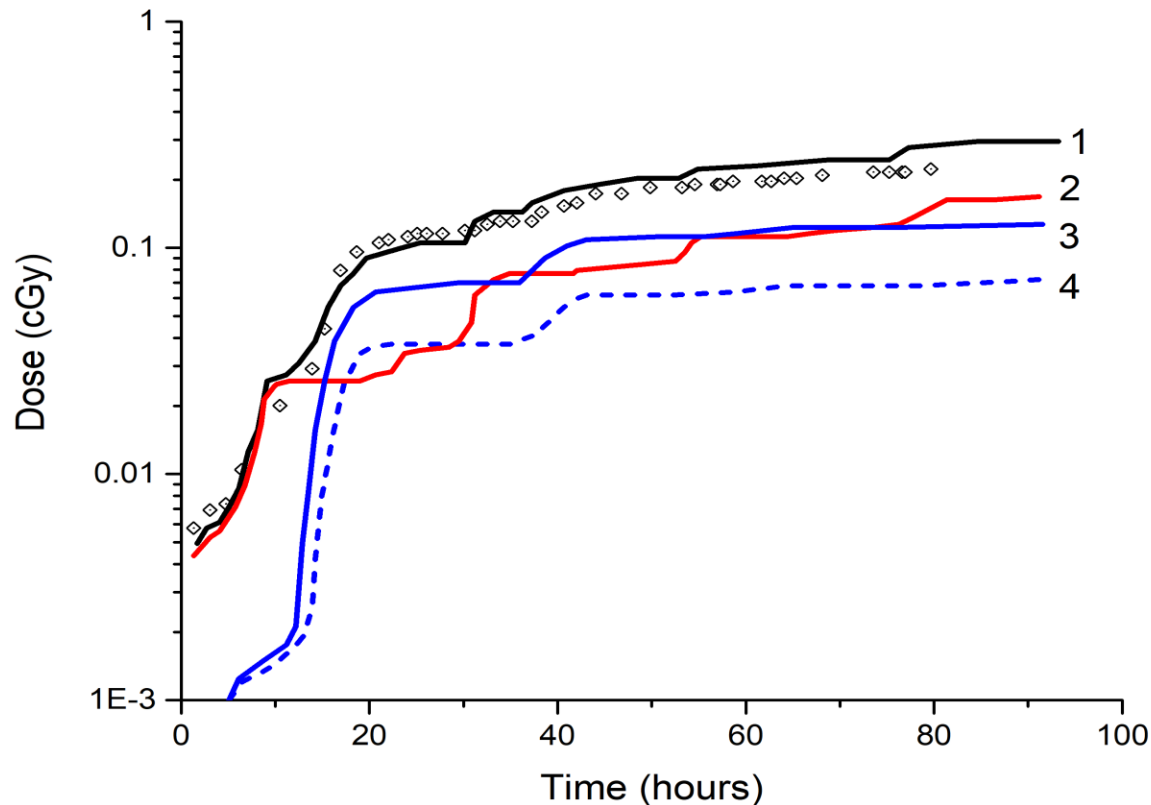
Изолинии вертикальной жесткости геомагнитного обрезания



7 мая 2012



7 мая 2012



Кузнецов и др. Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру (2015) № 2, с. 20

Panasyuk et al. In: Extreme Events in Geospace (2017) P. 349

ВЫВОДЫ

1. Разработанный метод расчета эффективной вертикальной жесткости геомагнитного обрезания позволяет правильно оценивать радиационное воздействие галактических и солнечных космических лучей в околоземном космическом пространстве.
2. В данной задаче можно пренебречь вековым изменением поля IGRF и показателем спектра протонов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

