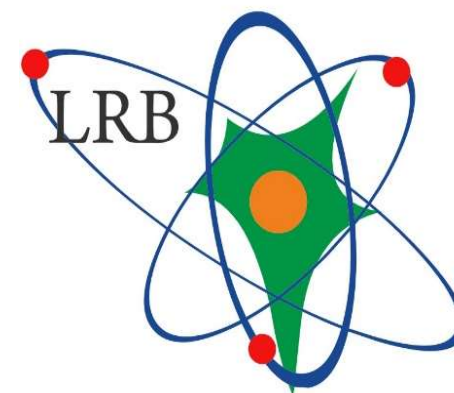


Моделирование смешанных радиационных полей на комплексе NICA

Гордеев И. С., Тимошенко Г. Н.



- Прогнозирование радиационной обстановки на комплексе NICA
- Моделирование смешанного поля излучения для радиобиологических экспериментов: существующие подходы и предлагаемый подход



Задача:

определение радиационной обстановки вокруг здания корпуса №1 ЛФВЭ ОИЯИ при работе бустера и нуклотрона на вывод в коллайдер

Был произведён расчёт радиационной обстановки с применением транспортного кода FLUKA



Публикации:

Timoshenko, G.N., Gordeev, I.S. Forecasting Radiation Environment around the NICA Booster. *Phys. Part. Nuclei Lett.* **17**, 379–388 (2020).

<https://doi.org/10.1134/S1547477120030152>

Butenko, A.V., Gordeev, I.S., Kovalenko, A.D. et al. Prediction of Radiation Environment around NICA Complex. *Phys. Part. Nuclei Lett.* **19**, 123–128 (2022).

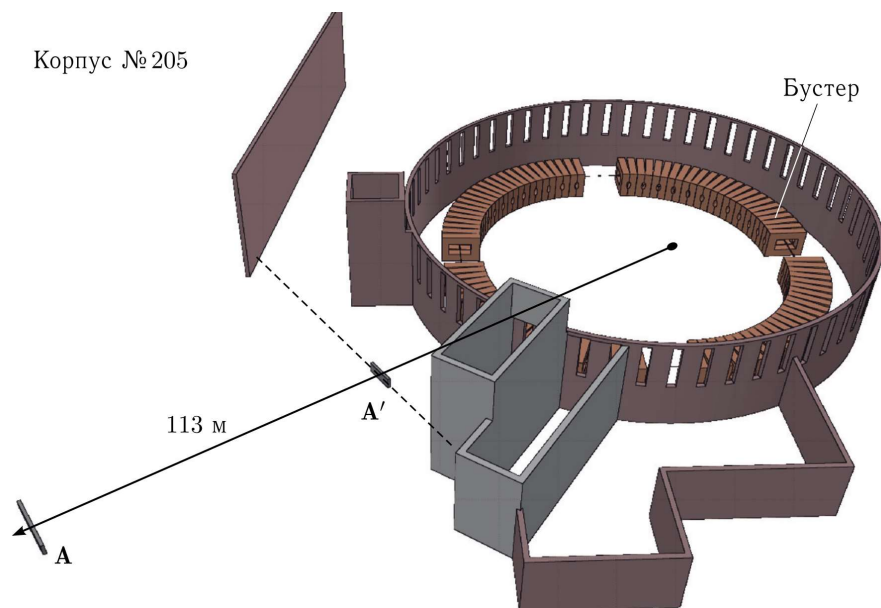
<https://doi.org/10.1134/S1547477122020042>

Локализация потерь при работе бустера и нуклотрона комплекса NICA

№	Источник потерь	Начальная энергия, ГэВ/нуклон	Конечная энергия, ГэВ/нуклон	Начальная интенсивность, цикл ⁻¹	Конечная интенсивность, цикл ⁻¹	Потери, цикл ⁻¹	Источник потерь	Распределение потерь по энергии
1	Начальный этап ускорения в бустере	0,0032	0,065	$2,0 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ³¹⁺)	$1,9 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ³¹⁺)	$1 \cdot 10^8$ (5%)	Поровну в центрах четырех арок и секциях инжекции и вывода	Равномерно 0,0032–0,065 ГэВ/нуклон
2	Бустер, комбинация ионов в СЭО	0,065	0,065	$1,9 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ³¹⁺)	$1,7 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ³¹⁺)	$2 \cdot 10^8$ (10,5%)	В арке квадранта 4	0,065 ГэВ/нуклон
3	Адиабатический захват	0,065	0,065	$1,7 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ³¹⁺)	$1,53 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ³¹⁺)	$1,7 \cdot 10^8$ (10%)	Поровну в центрах четырех арок и секциях инжекции и вывода	0,065 ГэВ/нуклон
4	Ускорение в бустере	0,065	0,578	$1,53 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ³¹⁺)	$1,45 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ³¹⁺)	$8 \cdot 10^7$ (5,2%)	Поровну в центрах четырех арок и секциях инжекции и вывода	0,065–0,578 ГэВ/нуклон
5	Канал транспортировки из бустера в нуклотрон	0,572	0,572	$1,3 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ⁷⁹⁺)	$1,27 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ⁷⁹⁺)	$3 \cdot 10^7$ (2,3%)	Линза QC2	0,572 ГэВ/нуклон
6	Канал транспортировки из бустера в нуклотрон	0,572	0,572	$1,27 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ⁷⁹⁺)	$1,23 \cdot 10^9$ (¹⁹⁷ Au ⁷⁹⁺)	$4 \cdot 10^7$ (3,1%)	Обдирочный септум №3	0,572 ГэВ/нуклон
7	Канал транспортировки из бустера в ловушку	0,572	0,572	$1,5 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	$1,465 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	$3,5 \cdot 10^6$ (2,3%)	Линза QC2	0,572 ГэВ/нуклон
8	Канал транспортировки из бустера в ловушку	0,572	0,572	$1,465 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	$1,42 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	$4,5 \cdot 10^6$ (3,1%)	Обдирочный септум №3	0,572 ГэВ/нуклон
9	Ловушка ионов нецелевой зарядности	0,572	0,572	$1,42 \cdot 10^8$ (ионы нецелевой зарядности)	0	100%	Ловушка	0,572 ГэВ/нуклон

В нуклотроне потери происходят на двух локальных участках в секции инжекции пучка и секции вывода ускоренного пучка из нуклотрона, а также равномерно по кольцу за счет адиабатического захвата ионов с энергией 572 МэВ/н. Потери при ускорении ионов за счет остаточного газа, внутрикулоновского рассеяния пучка и бетатронных колебаний считаются пренебрежимо малыми.

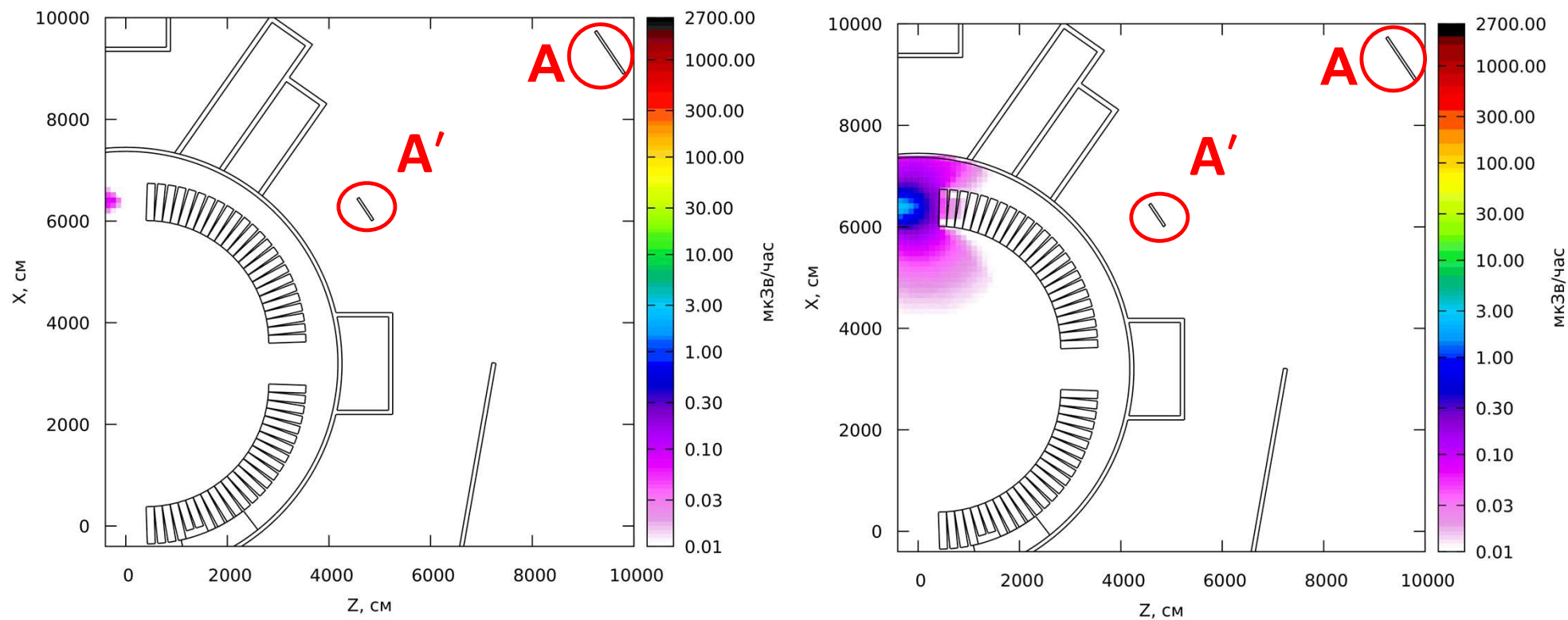
Интенсивности пучков (ионов/цикл), темпы потерь (ионов/цикл) и энергии ядер ¹⁹⁷Au на различных этапах ускорения в бустере



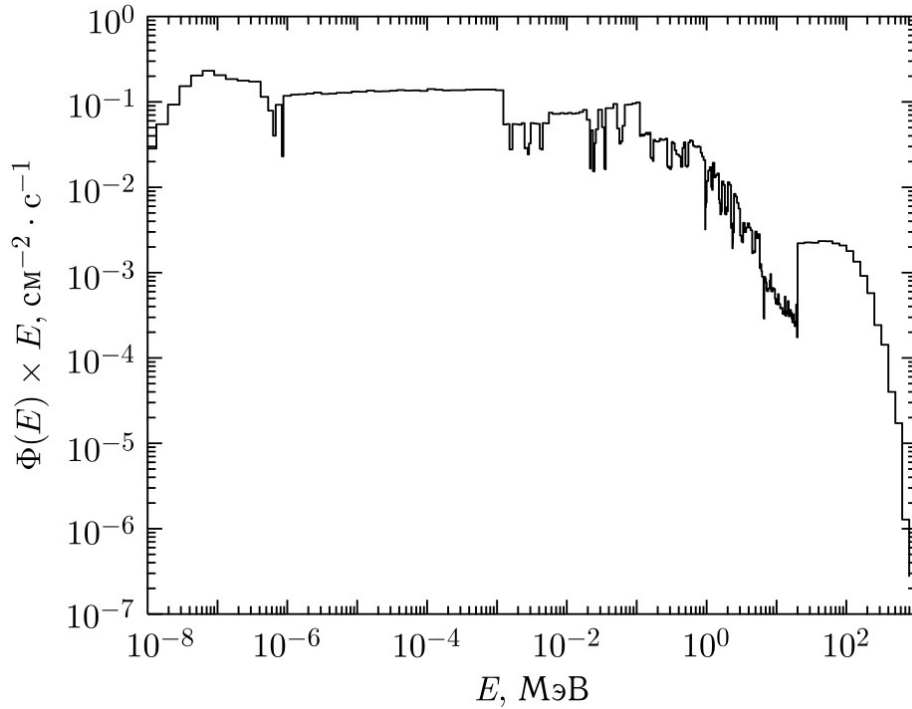
Геометрия бустера и нуклотрона комплекса NICA, а также строений вокруг корпуса № 1, использованная для расчёта радиационной обстановки. А — критическая точка на ограждении техплощадки ЛФВЭ ОИЯИ, А' — точка на границе зоны спецдопуска персонала.

Из всего экспериментального корпуса № 205 в расчёт дозы излучения «skyshine» в точке А принималась только ближняя его стена

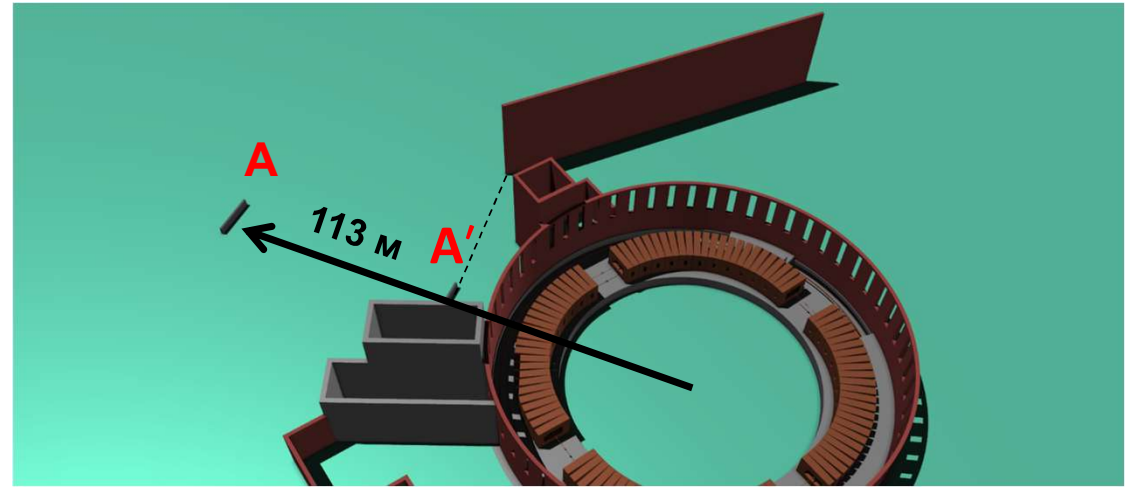
Результаты (бустер)



Распределение мощности эффективной дозы от всех положительно заряженных частиц (слева) и нейтронов (справа), обусловленное потерями ионов в бустере



Результирующий спектр нейтронов в критической точке А на периметре техплощадки ЛФВЭ



Источник	Годовая эффективная доза в точке А, мкЗв	Мощность эффективной дозы в точке А', мкЗв/ч
Бустер	26	0.07
Нуклотрон	467	1.21
Итого	493	1.28

Моделирование смешанного поля излучения на ускорителях заряженных частиц

Солнечный ветер

Постоянное низкоэнергетическое излучение Солнца, в основном представленное потоком гелиево-водородной плазмы

Радиационный пояс Земли (пояс Ван Аллена)

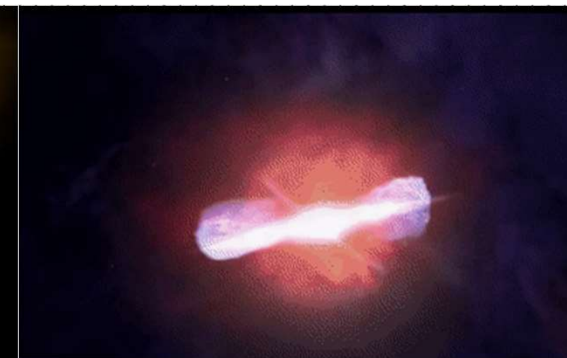
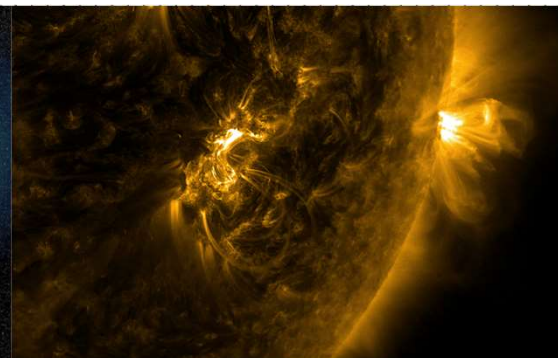
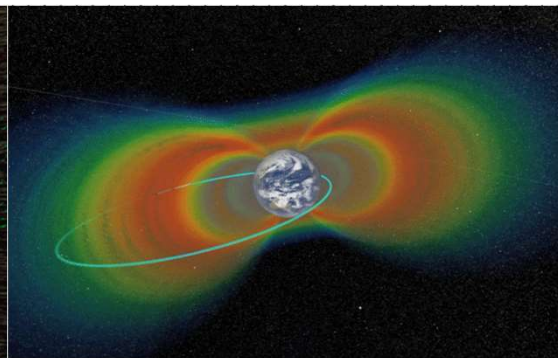
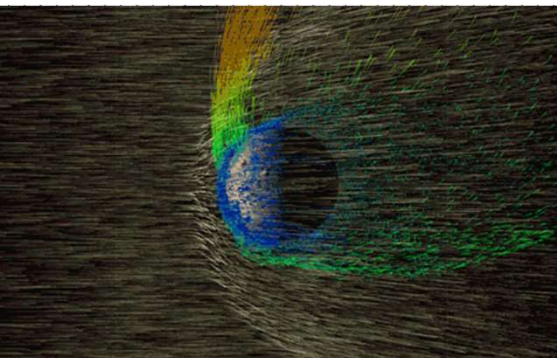
Тороидальные области магнитосферы Земли, в которых удерживаются проникшие в магнитосферу заряженные частицы галактических и солнечных космических лучей

Солнечные протонные события

Появляются вследствие солнечных вспышек или корональных выбросов масс, представлены высокоэнергетичными потоками протонов, электронов и ионов

Галактические космические лучи

Состоят из ядер различных хим. элементов с широким диапазоном по энергии, постоянно действующее излучение, в межзвездной среде распространяется изотропно

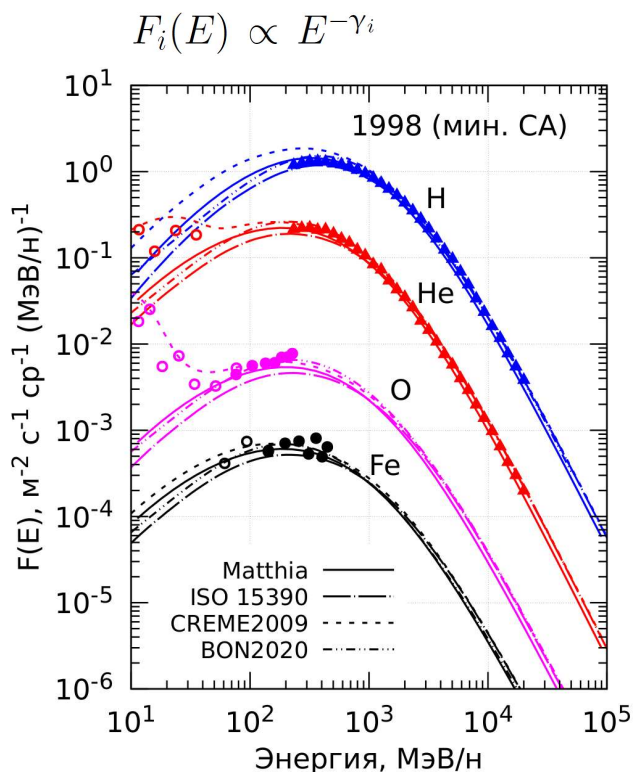


Оценка радиационного риска для космонавтов, связанного с воздействием космической радиации, в частности, с ГКЛ является важнейшей задачей космической радиобиологии

ГКЛ состав и энергии

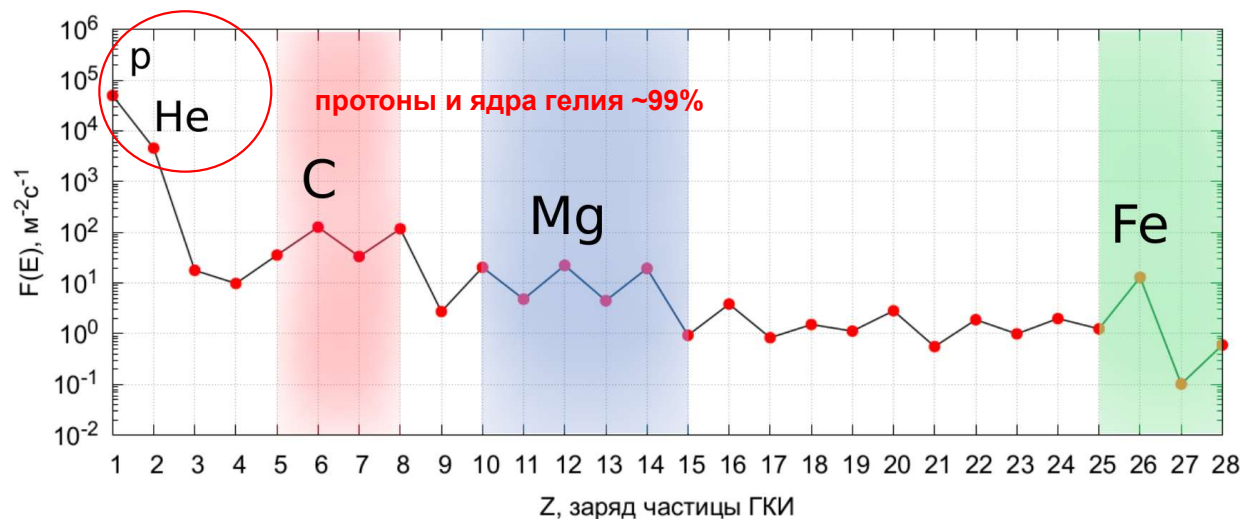
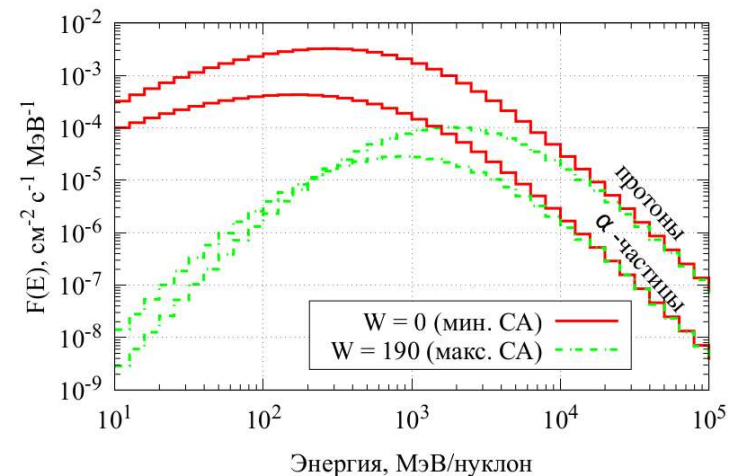
ГКЛ
 галактические
 космические лучи

Высокая энергия
 вплоть до ТэВ и выше!



$$W = k(10g + s)$$

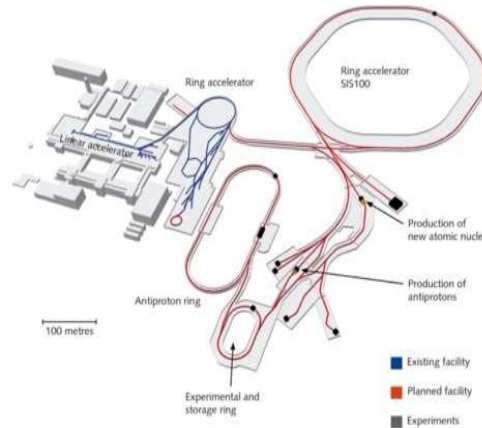
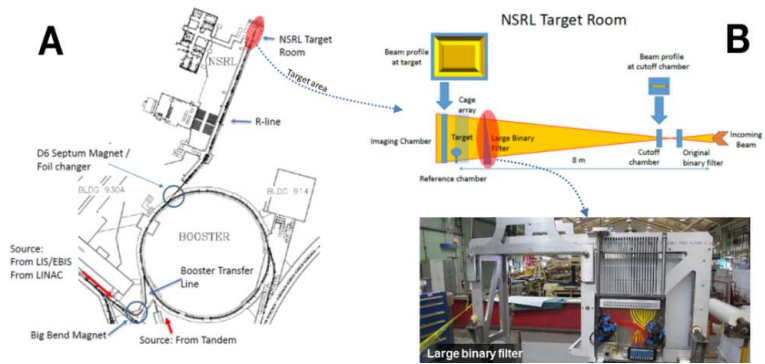
Числа Вольфа отражают текущую солнечную активность (СА)



Энергетические спектры частиц ГКЛ во время минимума СА 1998 года

Состав ГКЛ по заряду

Наземные эксперименты



Лаборатория космической радиации НАСА (NSRL) при ускорителе RHIC в Брукхейвене (США)

GSI/FAIR в Дармштадте (Германия)

ОИЯИ комплекс NICA

Большинство экспериментов
 p , He-4, C, Fe, ...

Пучок → ?

Один тип частиц в пучке за сеанс облучения с **моноэнергией**, **кратковременное** и **однаправленное**

Биологические объекты

Более точным подходом было бы...

«Симулятор ГКЛ»

Использовать смешанное поле:
 p , He-4, $Z=3...28$ + вторичные (n , e^- , гамма и т.д.)

Пучок

Многокомпонентное поле с широким энергетическим спектром, хроническое облучение, изотропное

Биологические объекты



METHODS AND RESOURCES

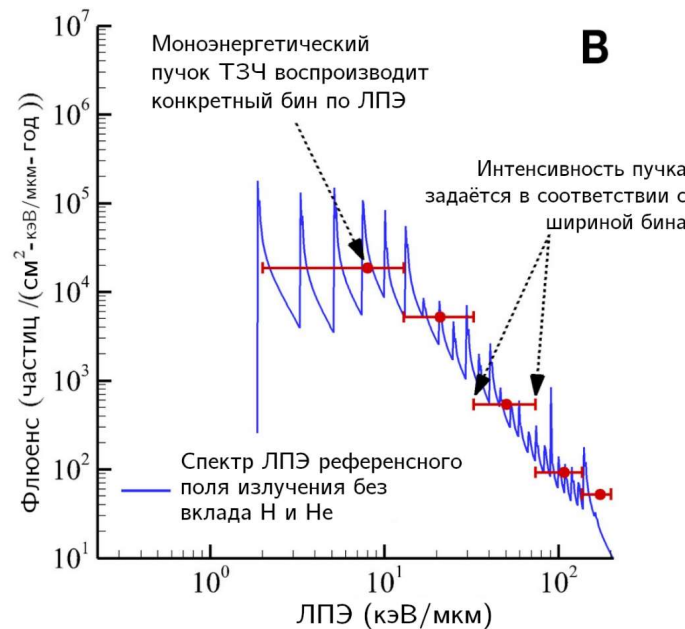
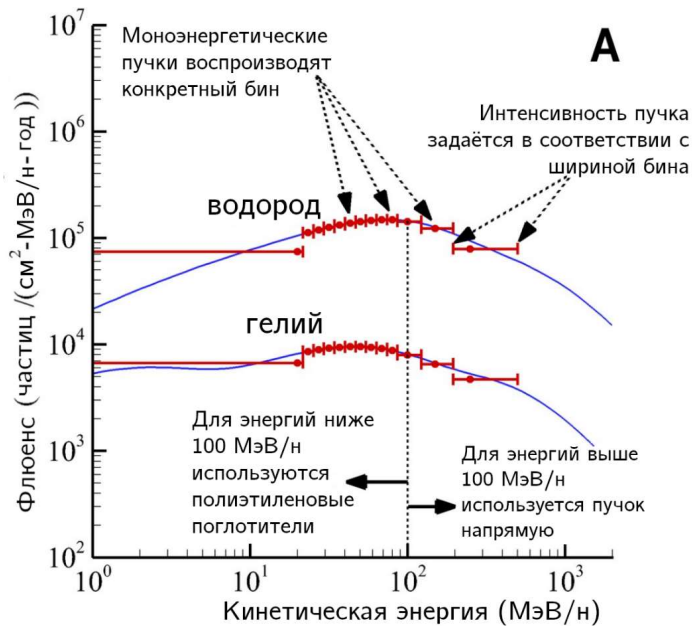
NASA's first ground-based Galactic Cosmic Ray Simulator: Enabling a new era in space radiobiology research

Lisa C. Simonsen^{1*}, Tony C. Slaba¹, Peter Guida², Adam Rusek²

¹ NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, United States of America, ² Brookhaven National Laboratory, Brookhaven, New York, United States of America

* lisa.c.simonsen@nasa.gov

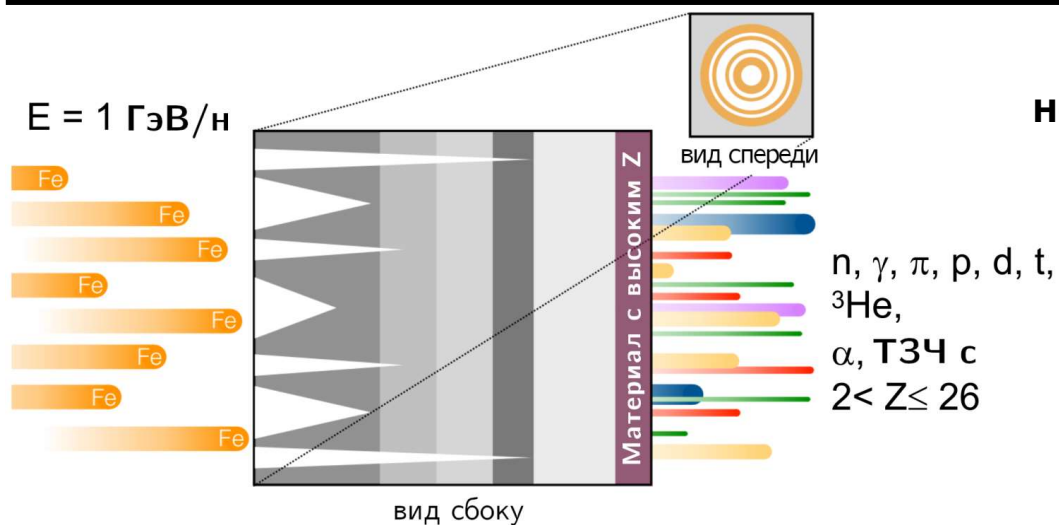
Активный подход - параметры пучка меняются за время облучения



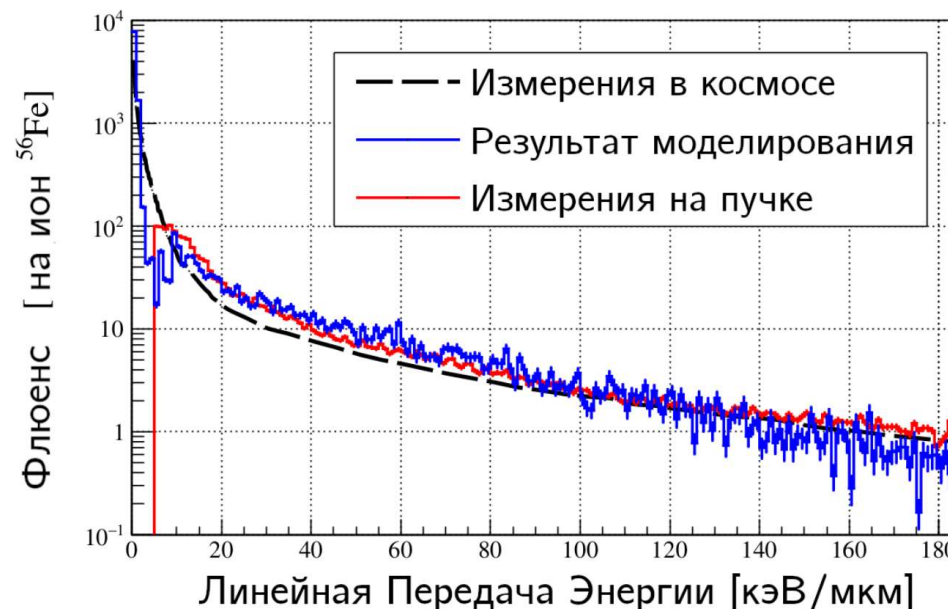
Ключевые проблемы

- Сложно реализовать на других ускорителях
- Спектры квазинепрерывные
- Облучение является скорее последовательным, нежели одновременным
- Подход в целом довольно сложный

Идея, лежащая в основе данного подхода, заключается в воспроизведении комплексного поля излучения при помощи быстро переключающихся пучков, быстро изменяющих как тип, так и энергию частиц в пучке



Пассивный подход - пучок остаётся неизменным в течение всего сеанса облучения



Ключевые проблемы

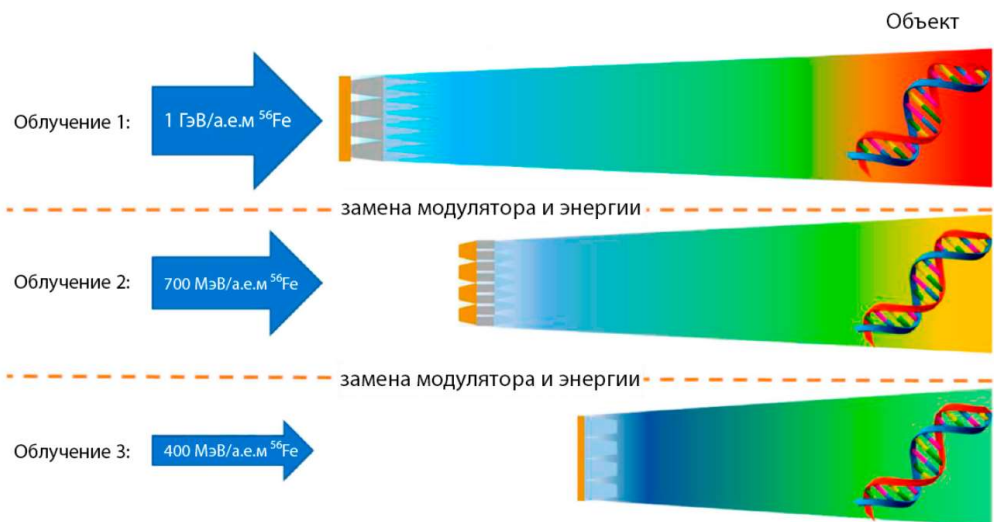
- Конкретная конструкция «модерирующего блока» (конвертера) не раскрывается (запатентована)
- Авторы заявляют об успешном воспроизведении лишь спектра ЛПЭ
- Могут включаться не все частицы и не со всеми энергиями
- Поле вторичных частиц за конвертером может быть неоднородно

В данном подходе необходимое смешанное поле излучения, имитирующее радиационную обстановку в космосе, создается одним моноэнергетическим пучком Fe, бомбардирующим специальный «модерирующий блок» (конвертер)

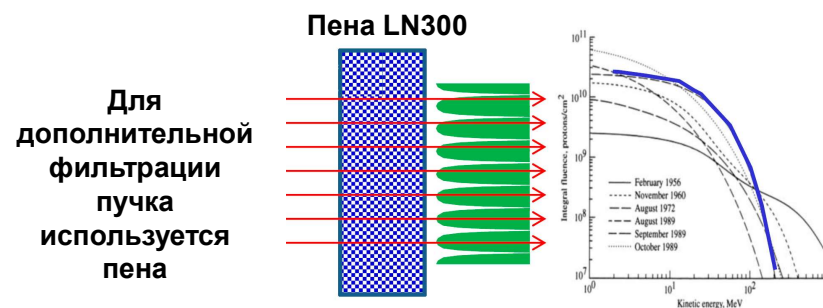
В принципе, спектр ЛПЭ может быть воспроизведен только протонами и ядрами гелия с широкими энергетическими спектрами

Гибридный активно-пассивный симулятор ГКЛ ESA/GSI

14

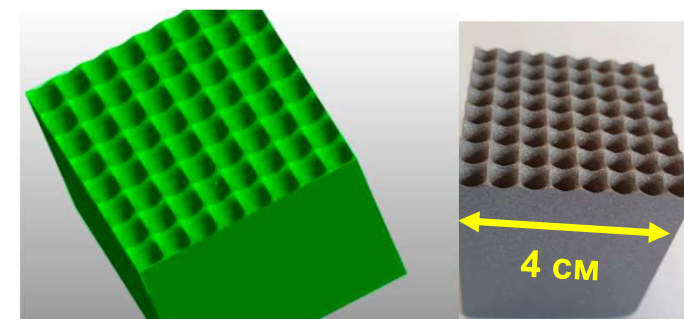


Гибридный активно-пассивный подход заключается в изменении параметров пучка и модулятора за время облучения



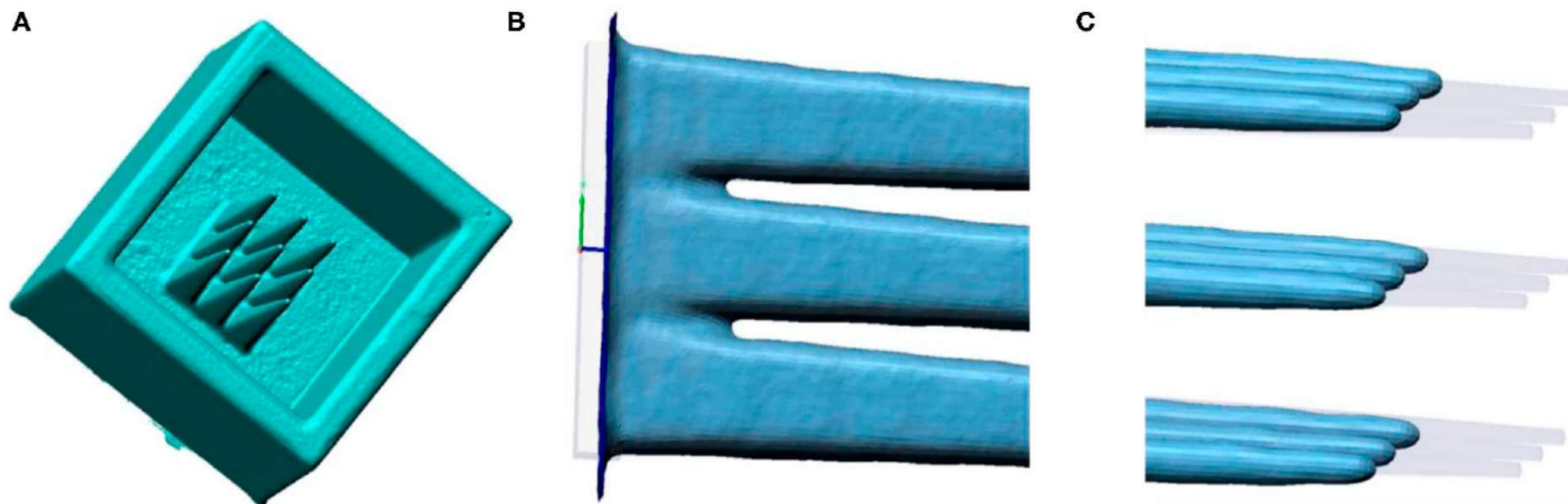
Ключевые проблемы

- Облучение происходит скорее последовательно, чем одновременно
- Сложность в создании однородного поля вторичных частиц за модуляторами
- Тестирование проводилось только для спектра протонов во время СПС, поэтому до сих пор неясно, подходит ли этот подход для успешного моделирования ГКЛ
- Изготовление модуляторов является сложным и требует высокой точности (используется 3D-принтер)



Первая версия симулятора воспроизводит только спектр протонов СПС

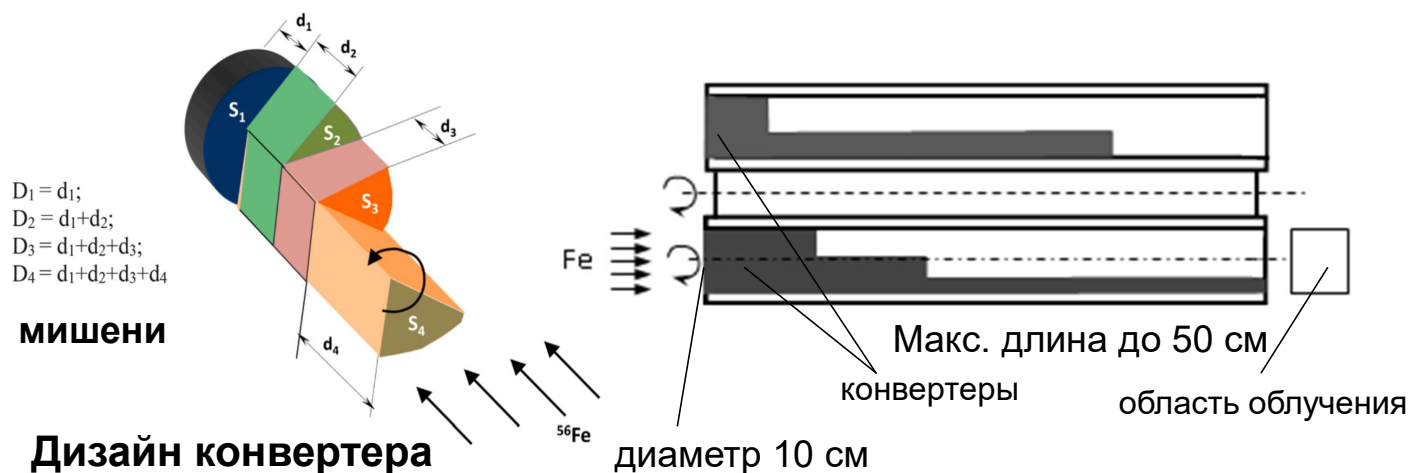
Для создания необходимого смешанного поля излучения планируется использовать комбинацию геометрически сложных, периодических, пассивных модуляторов пучка и менять энергию пучка



3D-печатная структура конвертера (А). Два проблемных участка — наплывы материала у основания (В) и недостаток материала на наконечниках (С)

Новый тип симулятора ГКЛ ЛРБ ОИЯИ

16



3D визуализация

Установка по типу револьверного барабана

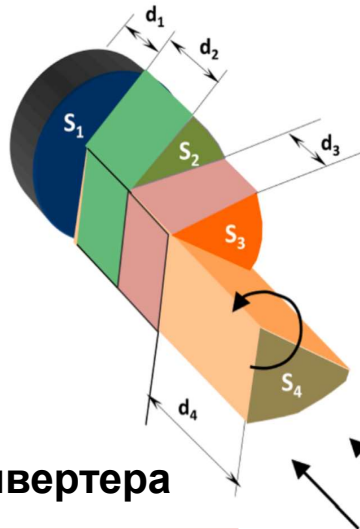
Ключевые особенности

- Предлагаемый метод позволяет воспроизвести за симулятором все ядра ГКЛ с Z в диапазоне от 1 до 27
- Симулятор правильно воспроизводит как распределение частиц по ЛПЭ, так и энергетические спектры частиц
- Однородность полей вторичных частиц за конвертерами обеспечивается вращением
- Облучение происходит одновременно смешанным полем излучения с различными типами частиц
- Установка имеет относительно простую конструкцию и может быть выполнена на ускорителях, способных выдавать равномерный пучок железа с энергией 1 ГэВ/н

Нуклотрон будет способен выдавать пучок ядер железа в радиобиологический канал с интенсивностью 10^8 ионов на импульс с частотой следования 0.1 Гц

Статья с описанием симулятора:

I. S. Gordeev and G. N. Timoshenko, "A new type of ground-based simulator of radiation field inside a spacecraft in deep space," *Life Sci. Space Res.* **30**, 66–71 (2021).



$D_1 = d_1;$
 $D_2 = d_1 + d_2;$
 $D_3 = d_1 + d_2 + d_3;$
 $D_4 = d_1 + d_2 + d_3 + d_4$

мишени

Дизайн конвертера

$$P_{D_i} = \sum_{j=1}^K t'_{C_j} a'_{C_j, D_i}$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{a_{C_j, D_i}}{A_{tot}} = \sum_{i=1}^N a'_{C_j, D_i} = 1, \sum_{j=1}^K \frac{t_{C_j}}{T_{tot}} = \sum_{j=1}^K t'_{C_j} = 1.$$

Параметр,
 отвечающий за
 площади сегментов
 мишеней конвертеров
 и время облучения



Неоднородная СЛАУ

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{f_{1,D_1}} P_{D_1} + \underline{f_{1,D_2}} P_{D_2} + \dots + \underline{f_{1,D_N}} P_{D_N} \approx F_{1,inside}, \\ \underline{f_{2,D_1}} P_{D_1} + \underline{f_{2,D_2}} P_{D_2} + \dots + \underline{f_{2,D_N}} P_{D_N} \approx F_{2,inside}, \\ \vdots \\ \underline{f_{26,D_1}} P_{D_1} + \underline{f_{26,D_2}} P_{D_2} + \dots + \underline{f_{26,D_N}} P_{D_N} \approx F_{26,inside}. \end{array} \right.$$

Решение NNLS:

$$\arg \min_p \|fP - F\|_{2,p} \geq 0$$

Значения флюенса вторичных частиц за
 мишенями симулятора. Данные получены
 по PHITS 3.20 (JQMD + GEM и JAMQMD +
 GEM)

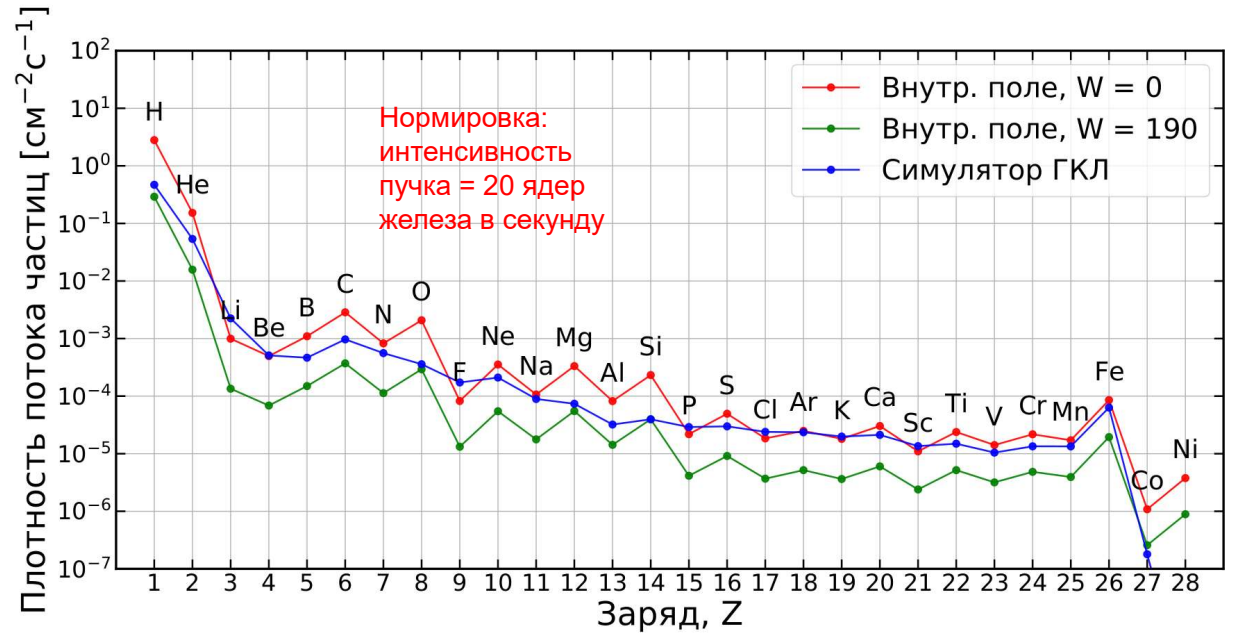
Например, могут использоваться расчётные спектры
 внутри межпланетного корабля:

Референсные
 значения - которые
 необходимо
 получить за
 установкой



Timoshenko, G.N., Gordeev, I.S., 2020. Simulation of radiation field inside
 interplanetary spacecraft. J. Astrophys. Astr. 41, 5. <https://doi.org/10.1007/s12036-020-9620-3>.

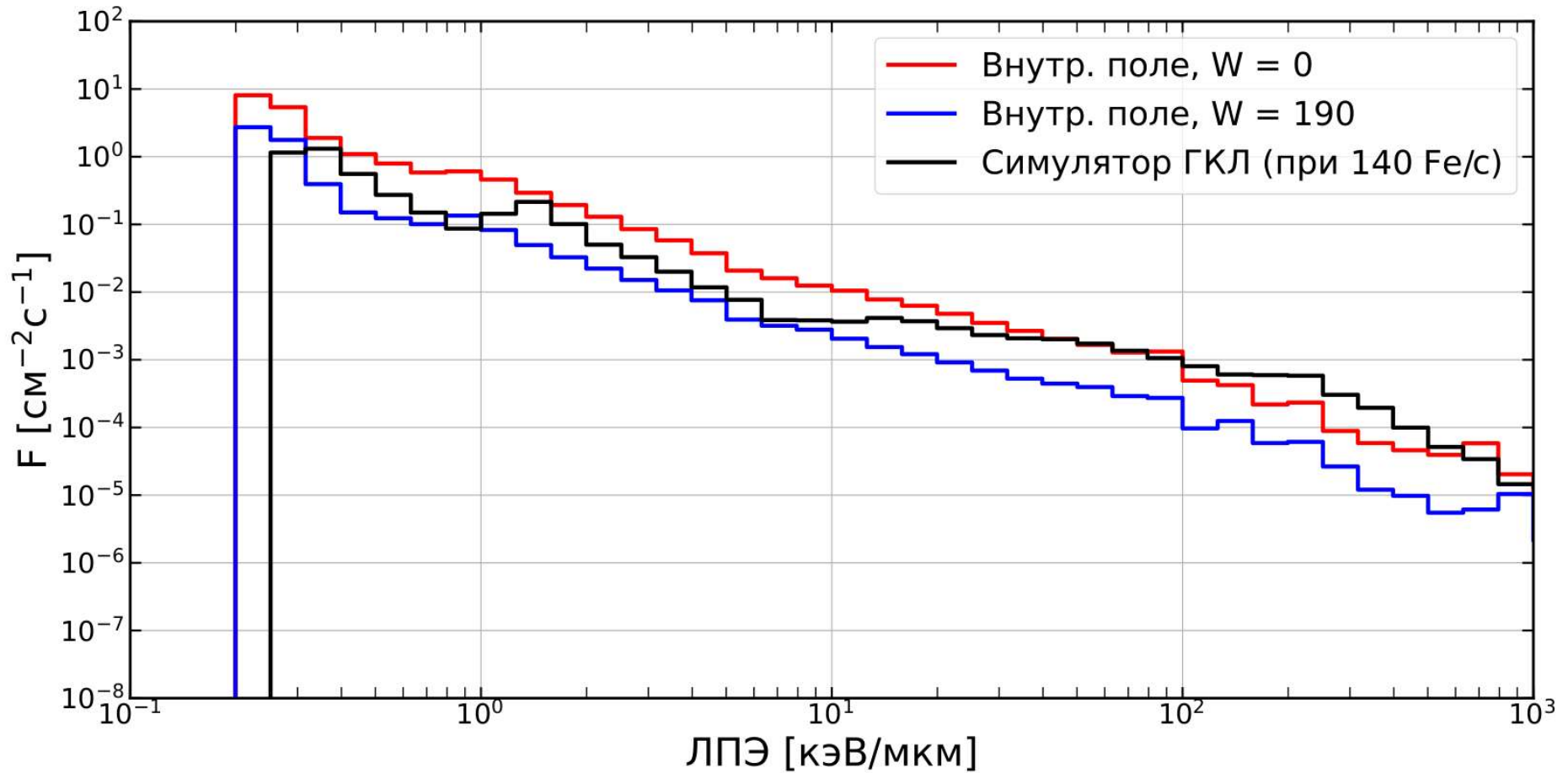
№ конвертера C_j	Кол-во мишеней	Толщина мишени, D_i (см)	Коэффициент площади, a'_{C_j, D_i}	Коэффициент времени, t'_{C_j}	Группа фрагментов				
1	10	1	0.028	0.0018185	17–27				
		8	0.056						
		15	0.112						
		17	0.112						
		20	0.131						
		23	0.150						
		24	0.112						
		25	0.112						
		25.5	0.0935						
		26	0.0935						
		2	2			50	0.8	0.0163636	9–16
						30	0.2		
3	1	50	1	0.16363	3–8				
4	1	30 (C ₂ H ₄) _n + 20 (Fe)	1	0.81818	1–2				



Характеристики мишеней и конвертеров симулятора ГКЛ

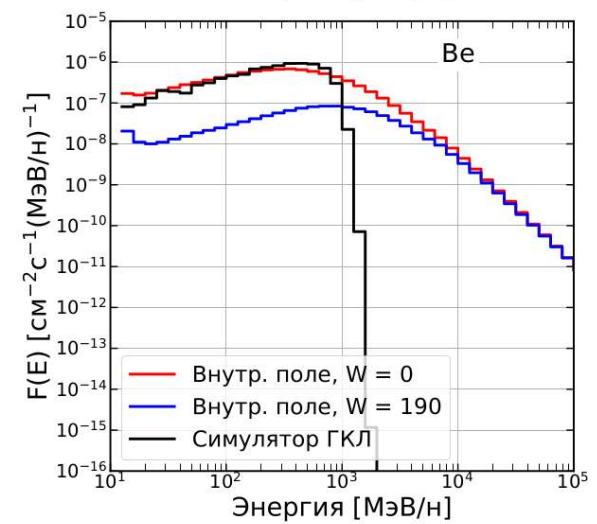
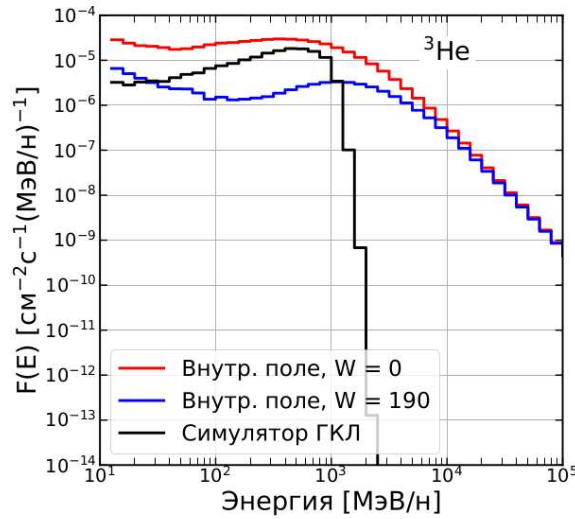
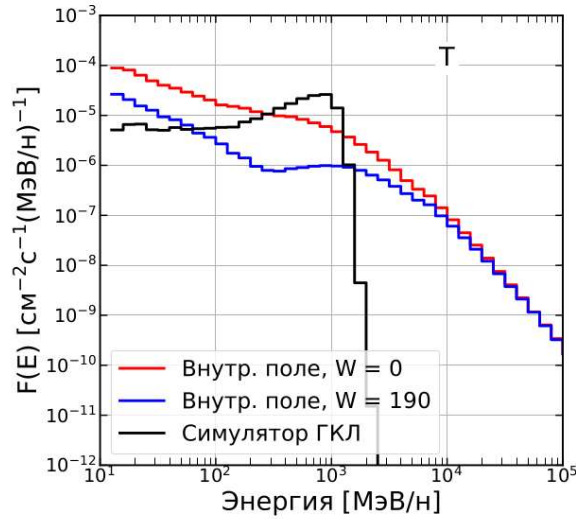
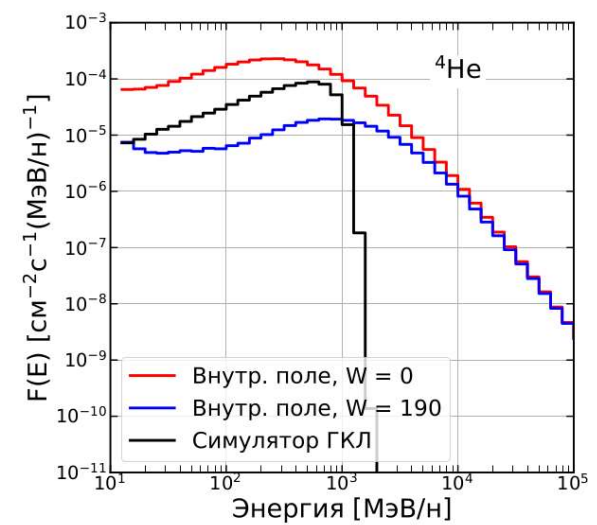
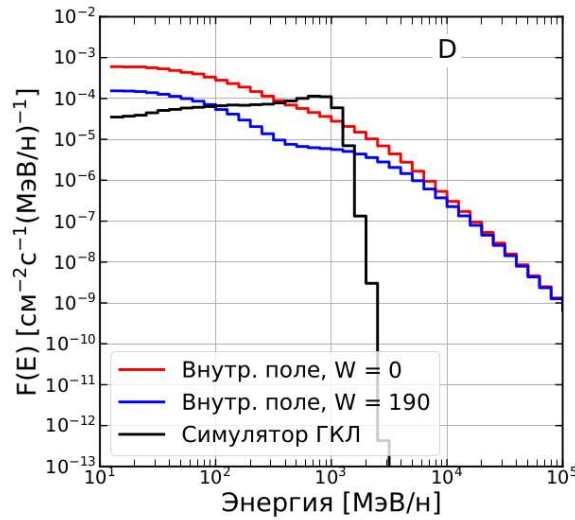
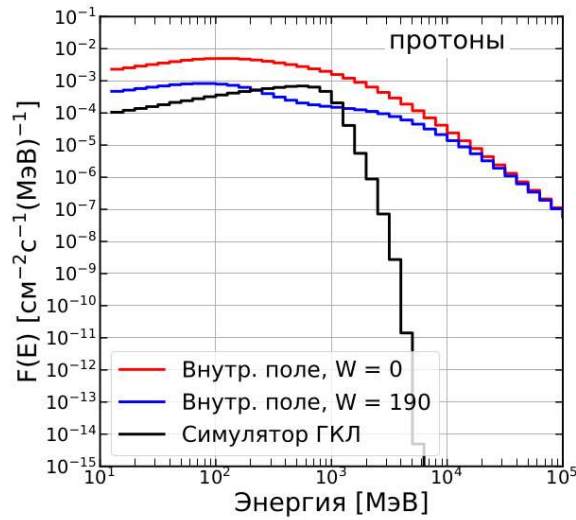
Сравнение зарядового распределения компонентов внутреннего радиационного поля космического аппарата при минимуме ($W = 0$) и максимуме ($W = 190$) СА с распределением от симулятора ГКЛ

Результаты

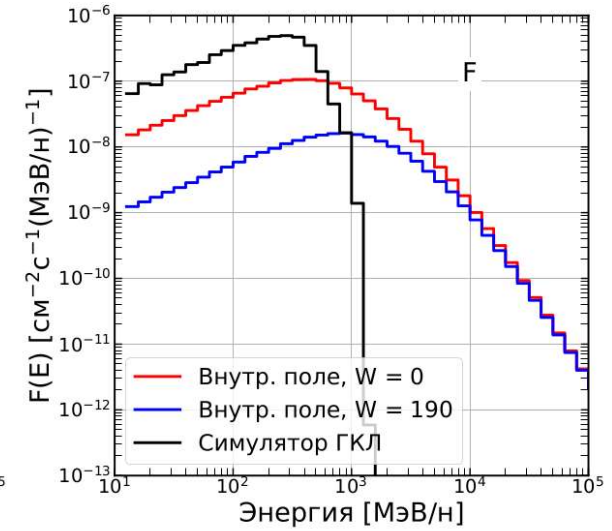
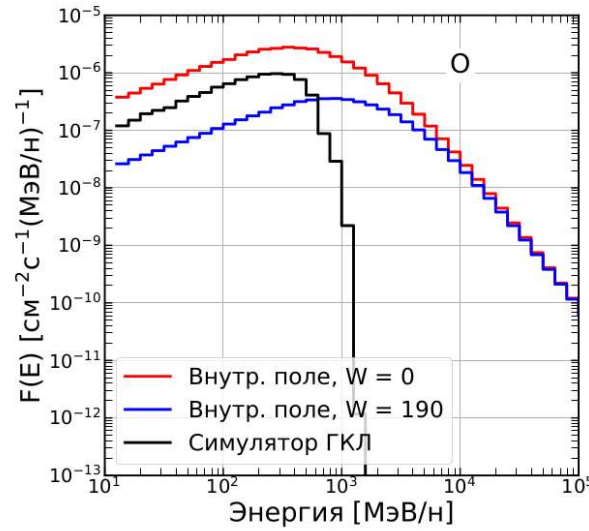
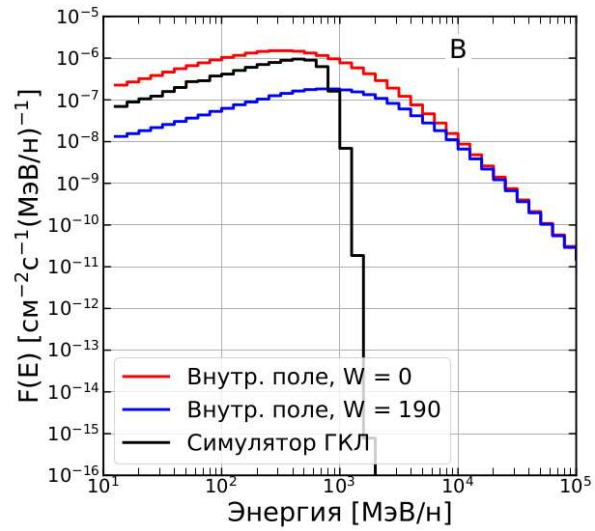
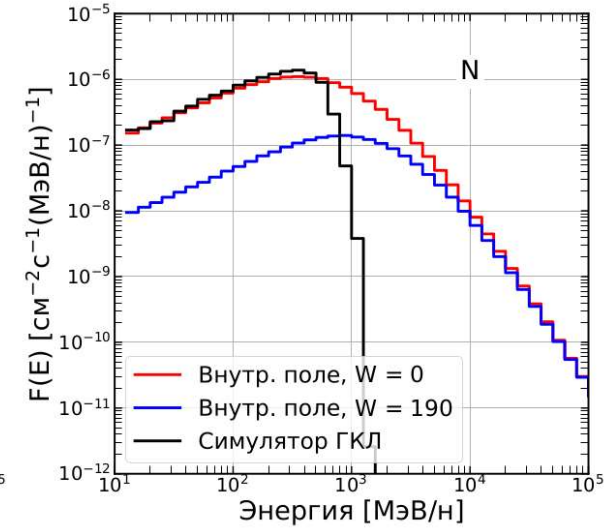
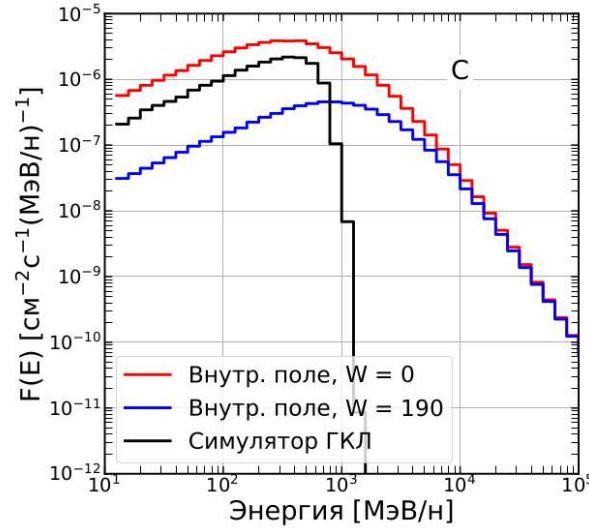
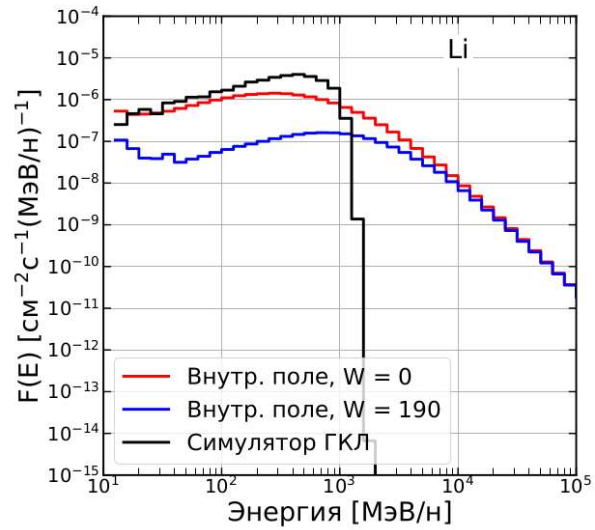


Сравнение спектра ЛПЭ за симулятором ГКЛ и спектров ЛПЭ внутреннего радиационного поля космического аппарата при минимуме ($W = 0$) и максимуме ($W = 190$) СА

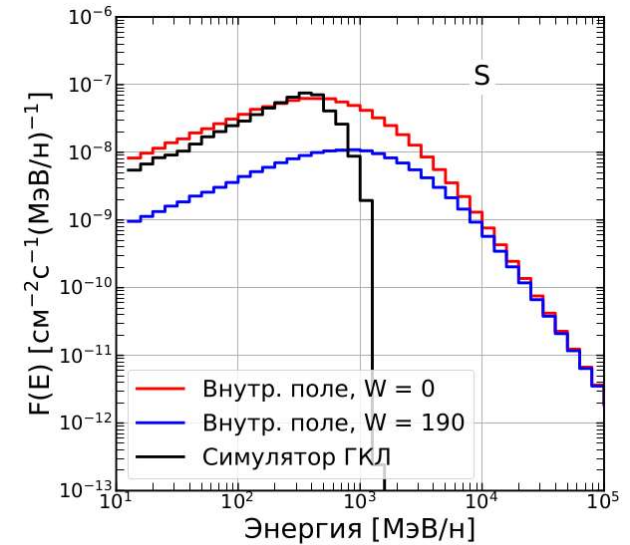
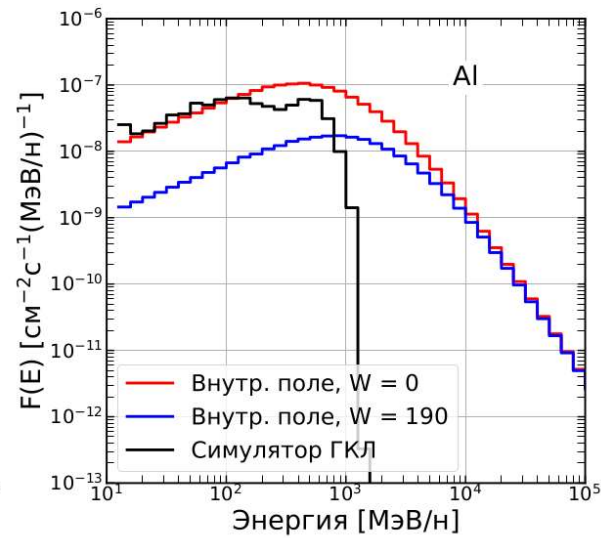
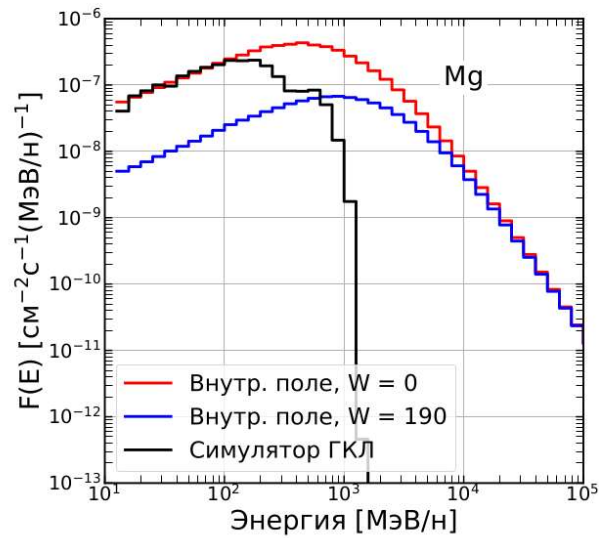
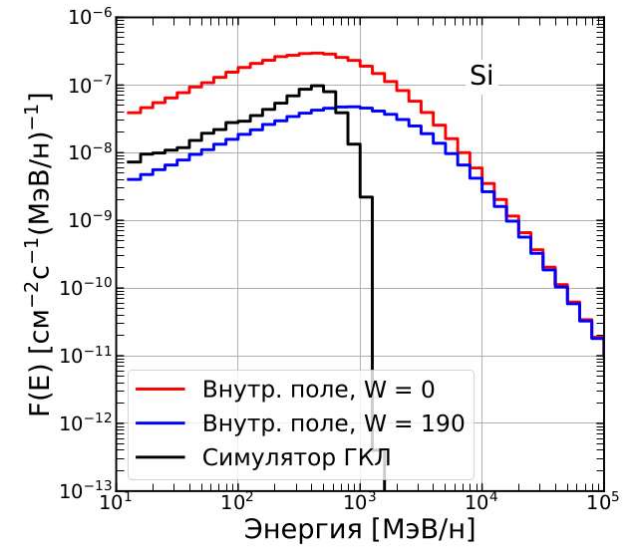
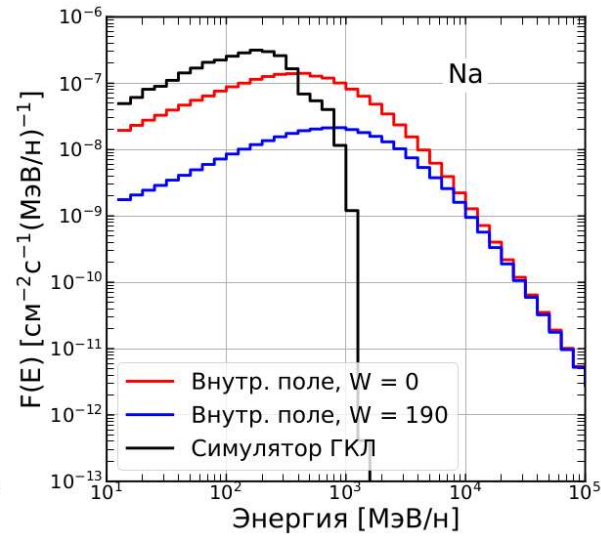
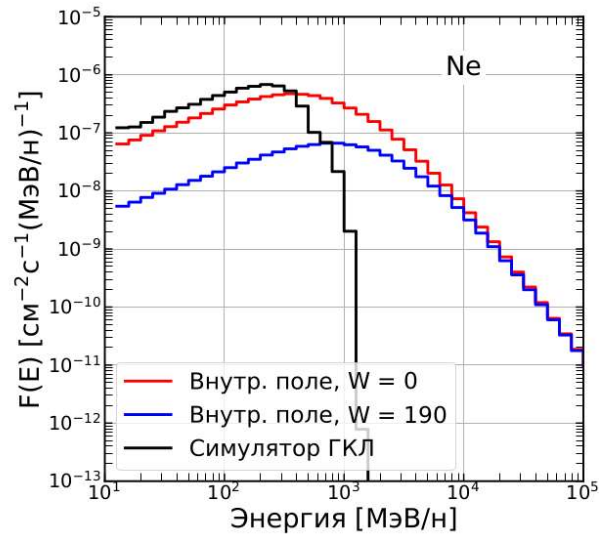
Результаты



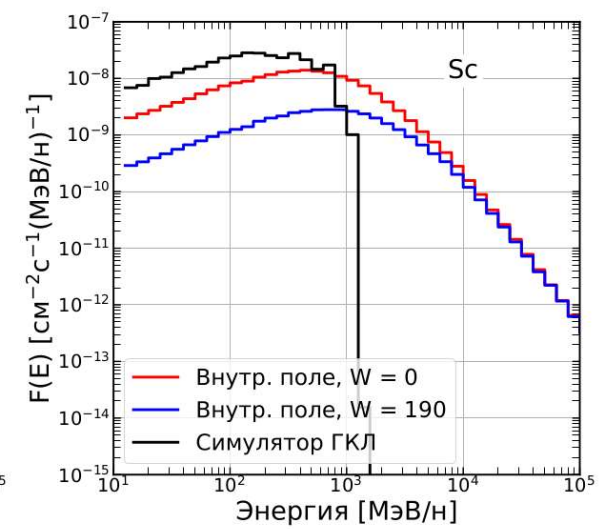
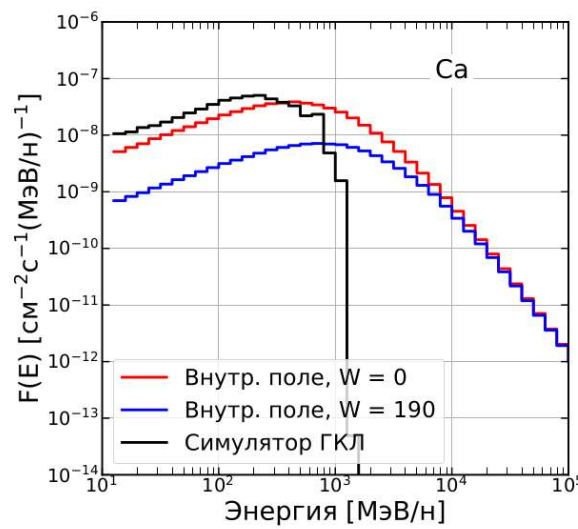
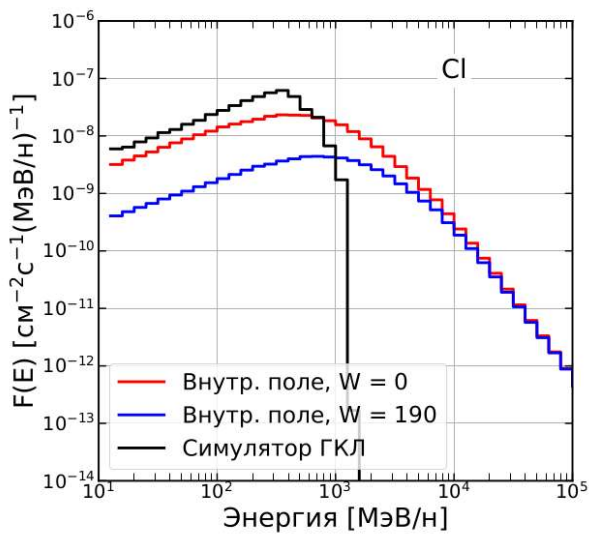
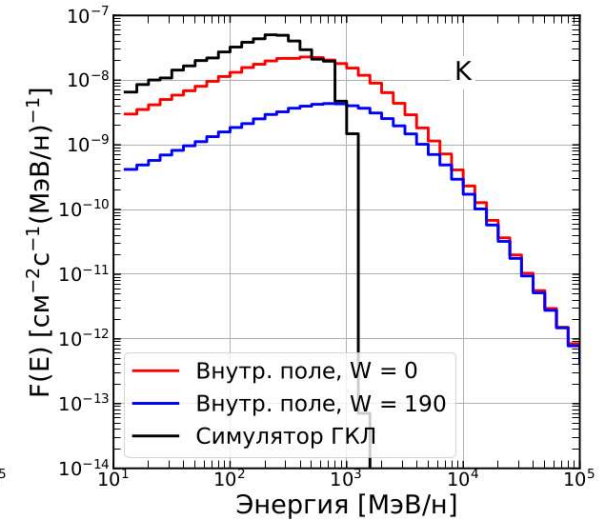
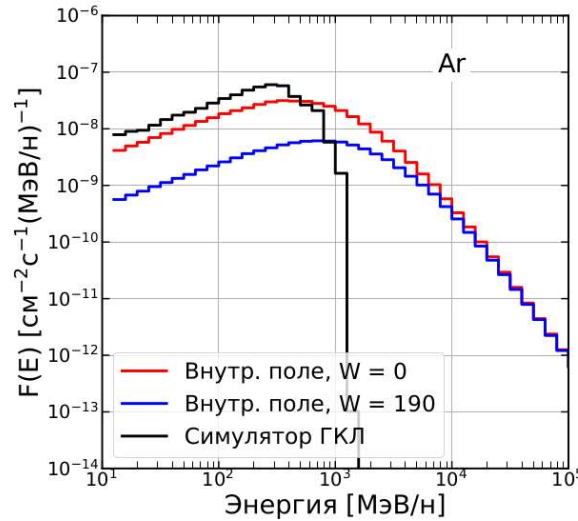
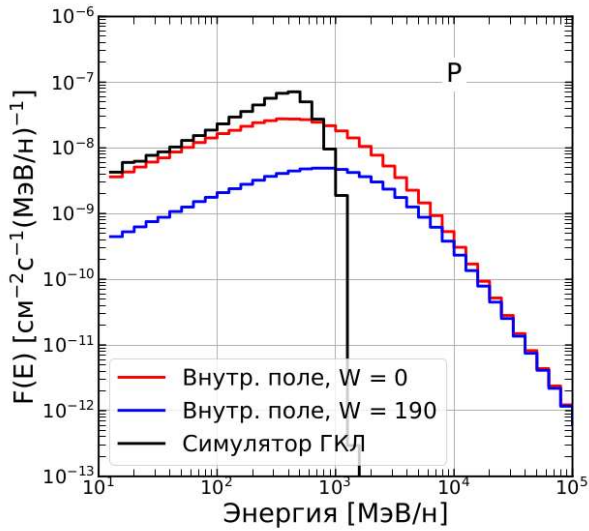
Результаты



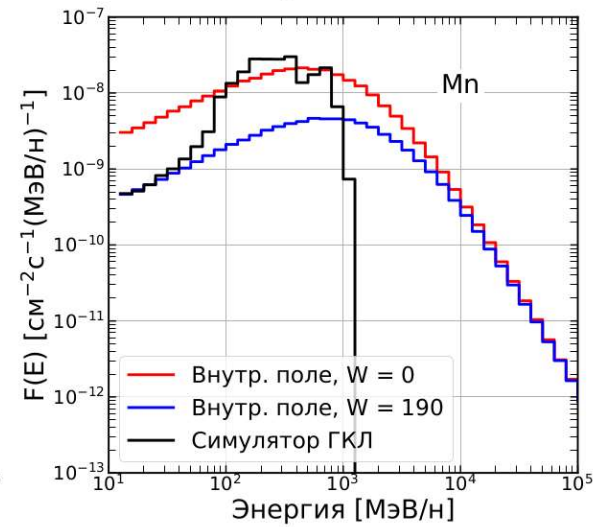
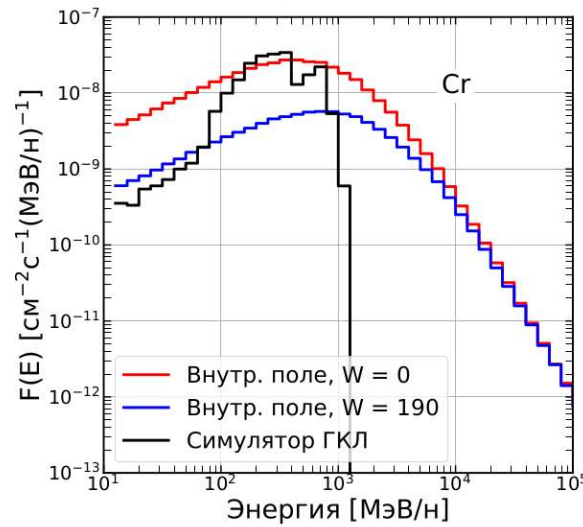
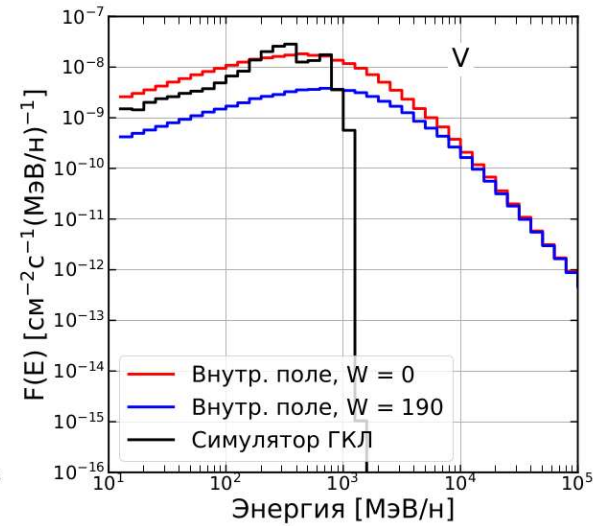
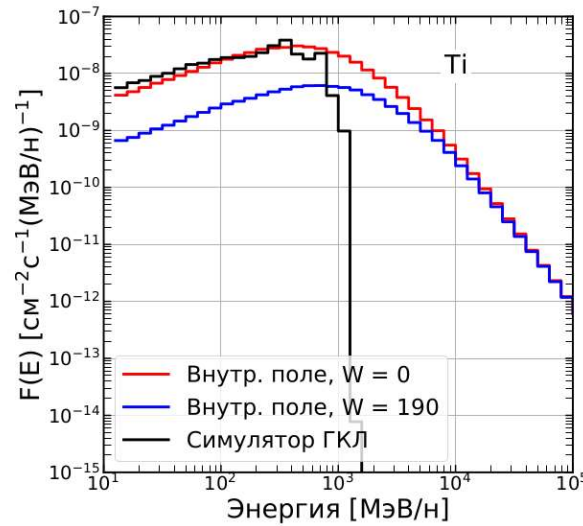
Результаты



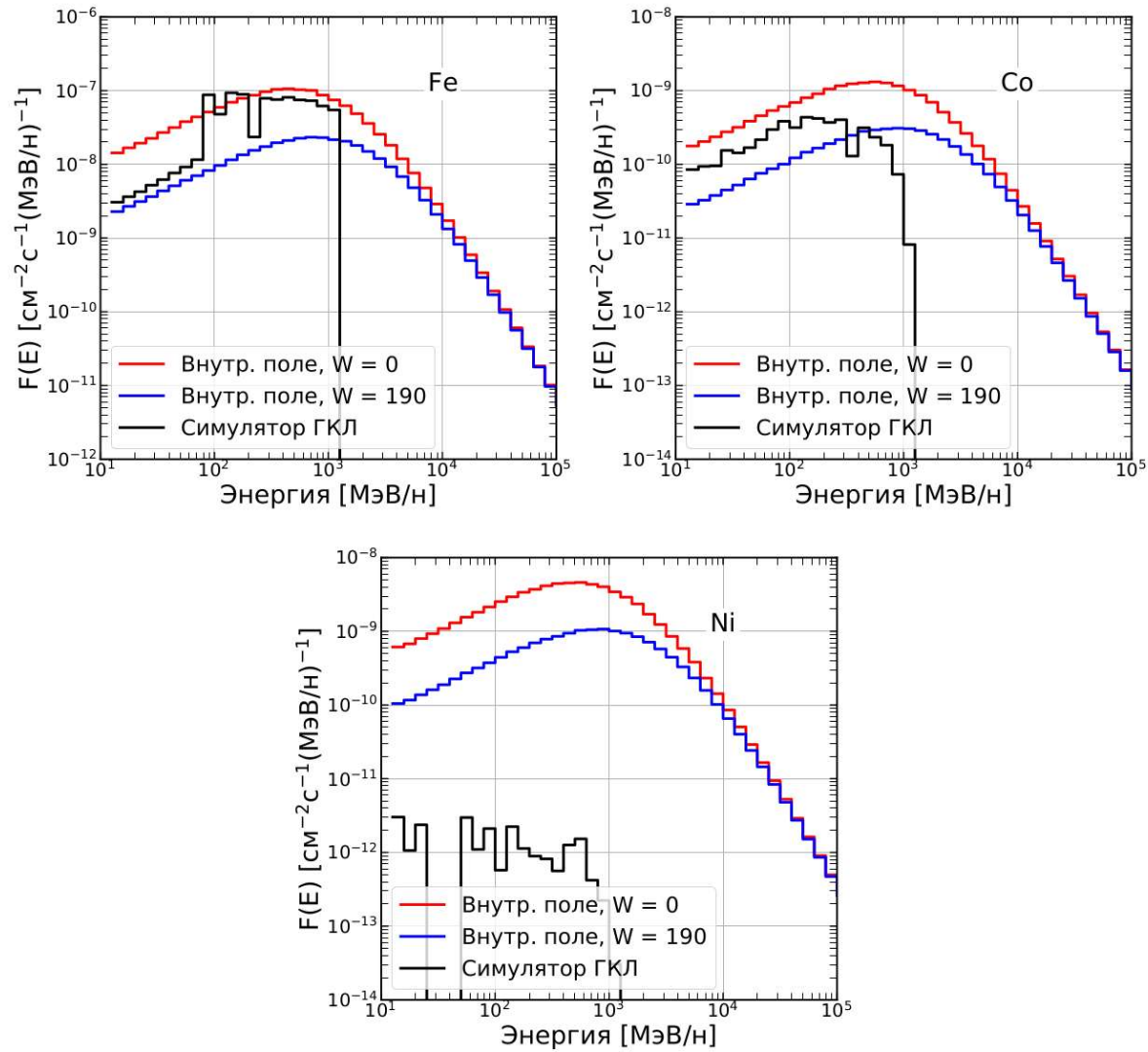
Результаты



Результаты



Результаты



Сравнение симуляторов ГКЛ

Симулятор	Спектр ЛПЭ	Энергетические спектры ГКЛ	Облучение одновременное	Простота реализации	Возможность учесть вклад от всех частиц, включая вторичные	Однородность поля	Экспериментальная проверка
NASA	+	+/-	-	-	-	+	+
Дж. Ченселлор и др.	+	?	+	+	+	-	+
GSI	?	?	-	-	?	-	+/-
ЛРБ ОИЯИ	+	+	+	+	+	+	-

Опубликовано 6 работ:

1. *A new type of ground-based simulator of radiation field inside a spacecraft in deep space*
DOI: 10.1016/j.lssr.2021.05.002
2. *Simulation of radiation field inside interplanetary spacecraft*
DOI: 10.1007/s12036-020-9620-3
3. *Estimation of the Astronaut's Doses inside the Spacecraft Habitable Module in Deep Space*
DOI: 10.1134/S106377962005007X
4. *Computation of linear energy transfer of space radiation in biological tissue analog*
DOI: 10.1016/j.pss.2021.105190
5. *Reference Radiation Field for GCR Chronic Exposure Simulation*
DOI: 10.1134/S1547477121070128
6. *Particle accelerator-based simulation of the radiation environment on board spacecraft for manned interplanetary missions*
DOI: 10.1016/j.radmeas.2017.10.006



Патент на изобретение



Первая премия ОИЯИ

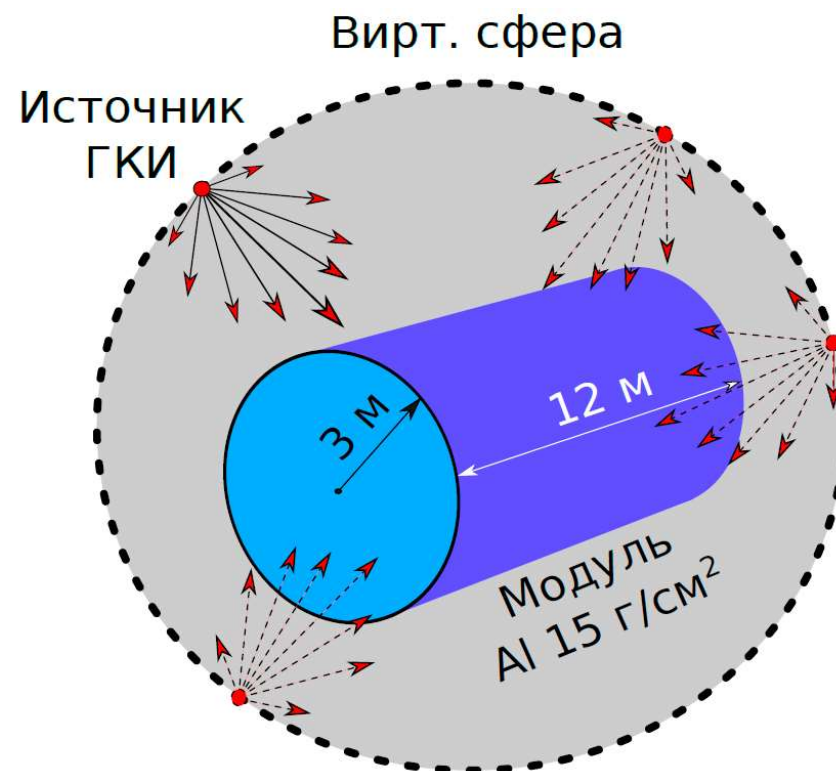
Спасибо за внимание!

Доп. слайды

Моделирование облучения корабля

На рисунке справа: простейшая модель обитаемого модуля космического корабля, изотропно облучаемая частицами ГКИ

Геометрия обитаемого модуля космического аппарата проста: цилиндр со стенками из алюминия толщиной 15 г/см^2 , заполненный воздухом



Облучение происходит частицами ГКИ изотропно, а внутри модуля подсчитывается радиационное поле от всех частиц ГКИ

Рассчитанные дозы Земля-Мартс-Земля

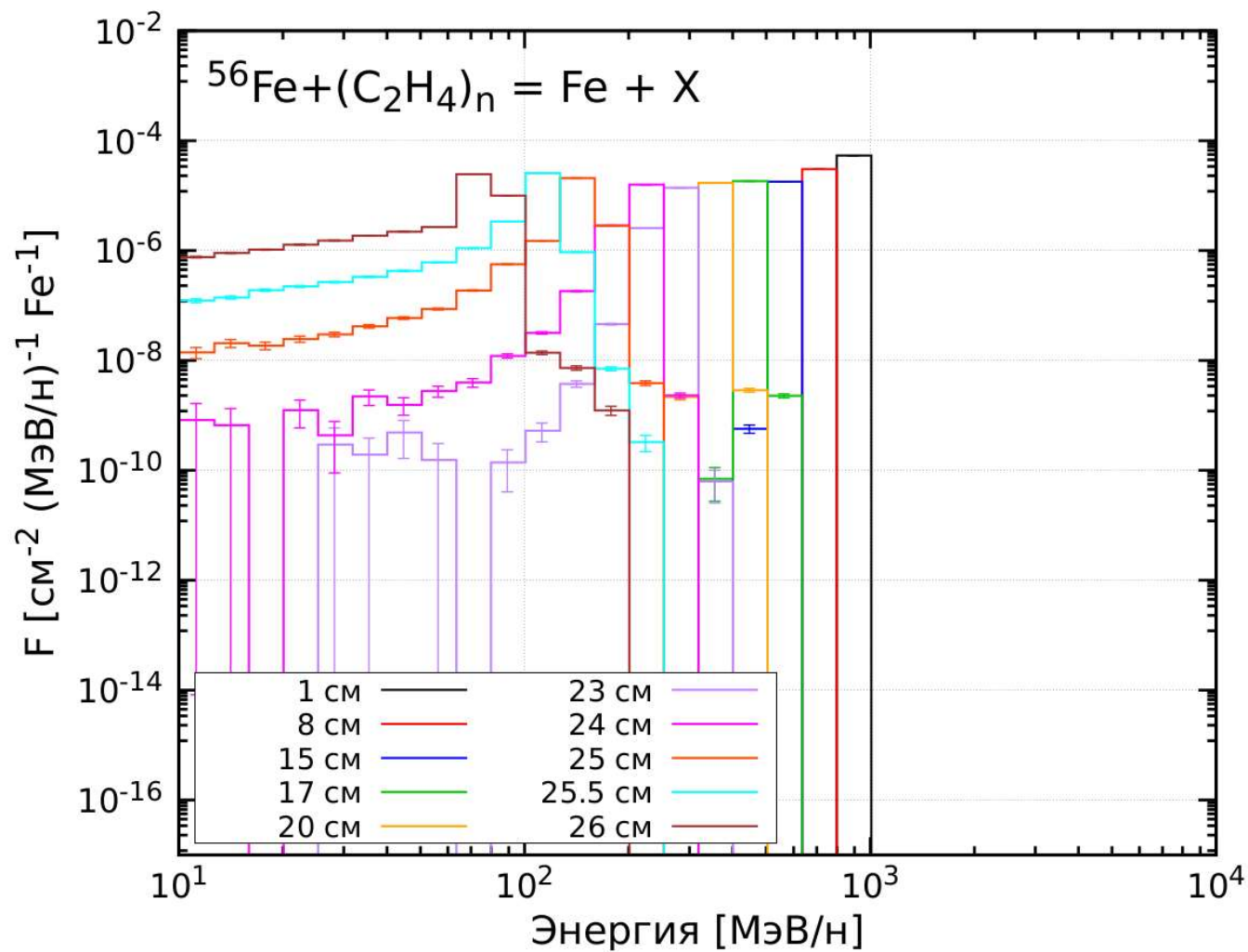


~40 мкЗв/ч

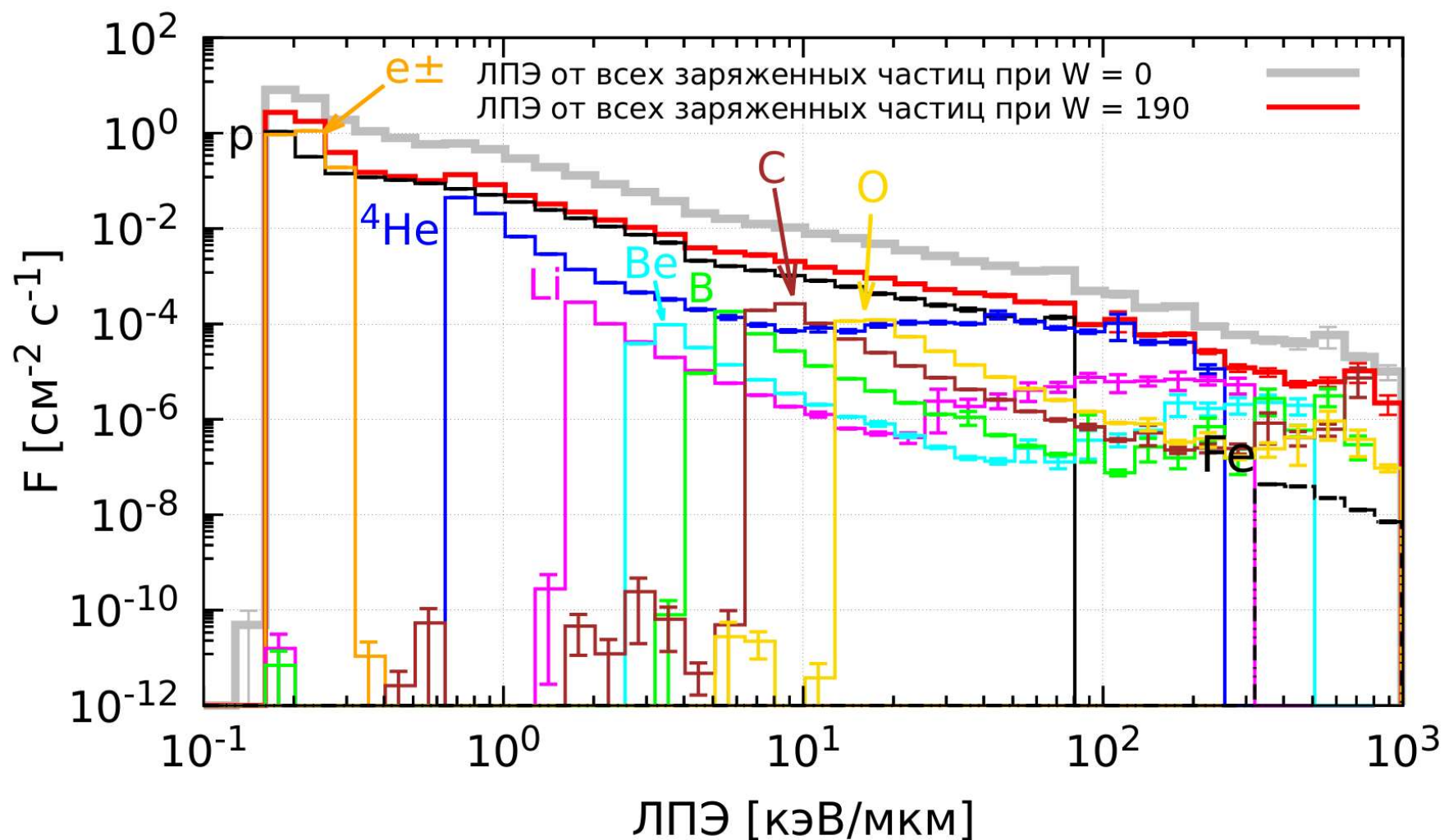
~10 мкЗв/ч

	$W = 0$	$W = 190$
1 сценарий (260 дней)	0.24 – 0.28 Зв	0.062 – 0.071 Зв
2 сценарий (460 дней)	0.43 – 0.5 Зв	0.11 – 0.13 Зв

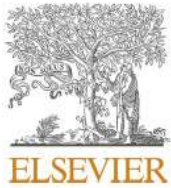
*Жирным шрифтом выделены приблизительные значения для возможной верхней оценки дозы с добавлением неучтённых факторов



Дифференциальные энергетические спектры плотности потока ядер железа при взаимодействии равномерного пучка ядер железа с энергией 1 ГэВ/н с полиэтиленовой мишенью различной толщины



Суммарные спектры ЛПЭ в воде плотности потока всех заряженных частиц внутреннего радиационного поля космического аппарата при минимуме ($W = 0$) и максимуме ($W = 190$) СА, с парциальными вкладами p , e^\pm , ${}^4\text{He}$, Li , Be , B , C , O , Fe в общий спектр при максимуме СА



Review article

Galactic cosmic ray simulation at the NASA space radiation laboratory – Progress, challenges and recommendations on mixed-field effects

Janice L. Huff^{a,*}, Floriane Poignant^b, Shirin Rahmanian^b, Nafisah Khan^b, Eleanor A. Blakely^c, Richard A. Britten^d, Polly Chang^e, Albert J. Fornace^f, Megumi Hada^g, Amy Kronenberg^c, Ryan B. Norman^a, Zarana S. Patel^{h,i,1}, Jerry W. Shay^j, Michael M. Weil^k, Lisa C. Simonsen^l, Tony C. Slaba^a

**Цитирование в обзорной статье
(сентябрь 2022 год) от ведущих
специалистов в области моделирования
космического излучения**

[Timoshenko \(2017\)](#) proposed an idea based on using 12 GeV protons with multiple absorbers placed at distinct locations along the beam line. Biological targets are placed off-axis from the beam to capture a superposition of secondary nucleons produced in each of the absorbers at different angles. The method yields continuous nucleon spectra that were qualitatively compared to simulations of the space environment. In a companion study, ([Gordeev 2021](#)), considered a 1 GeV/n ⁵⁶Fe beam incident on an axially rotating cylindrical absorber. The cylinder is constructed by sets of circular targets that each cover only partial sectors of the full circular cross section. Simulation results showed that this approach can produce heavy ions with broad energy distributions.