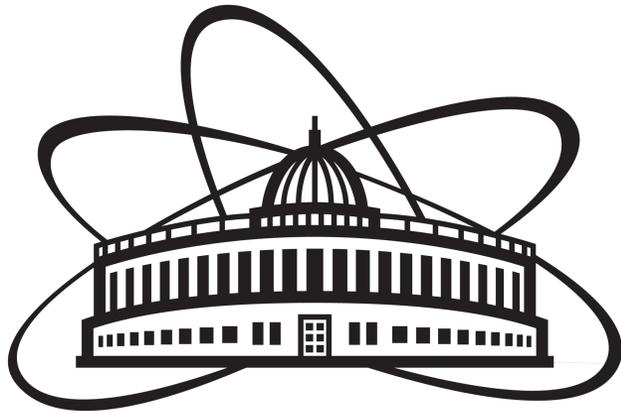
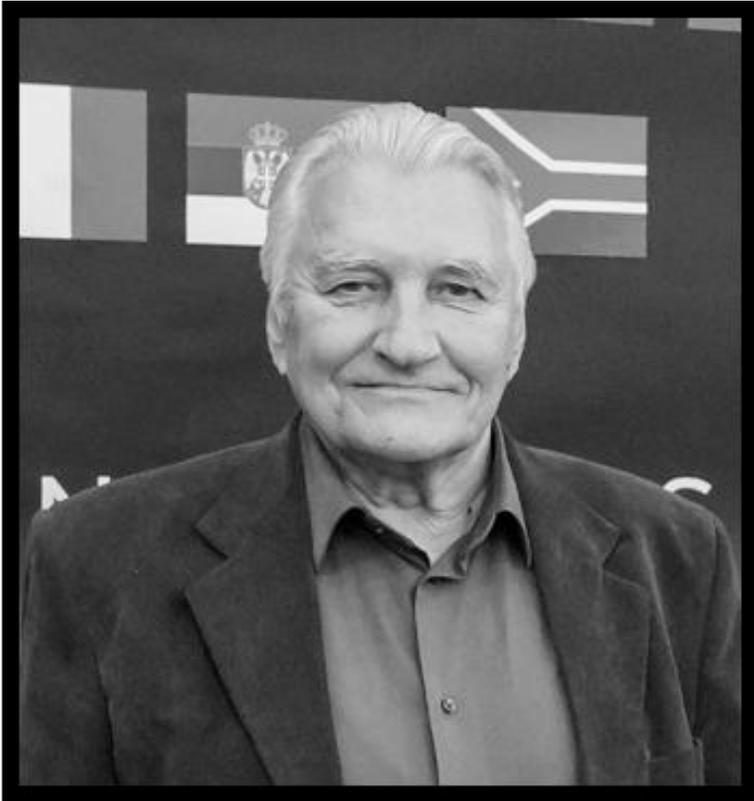


Моделирование смешанных радиационных полей в космических аппаратах и на ускорителях заряженных частиц

Гордеев И. С.





**Тимошенко Геннадий
Николаевич**

27.10.1946 — 03.11.2022

Научный руководитель

- Дозиметрия для нужд радиобиологии и спектрометрия ионизирующих излучений для обеспечения радиационной безопасности, физика защиты
- Прогнозирование радиационной обстановки для комплекса NICA
- Участник ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС
- Принимал участие в разработке и испытании прибора ДАН для марсохода Curiosity (НАСА), с целью определения содержания в грунте водяного льда (поверхностный нейтронный каротаж)

Солнечный ветер

П о с т о я н н о е низкоэнергетическое излучение Солнца, представленное потоком гелиево-водородной плазмы

Радиационный пояс Земли

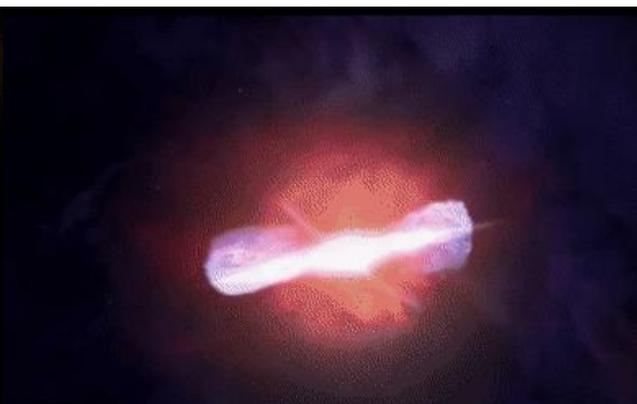
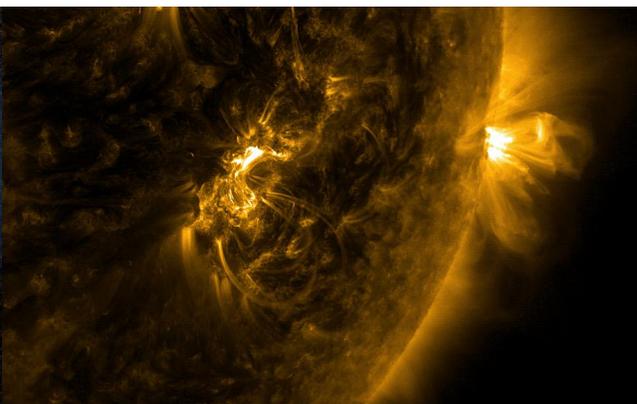
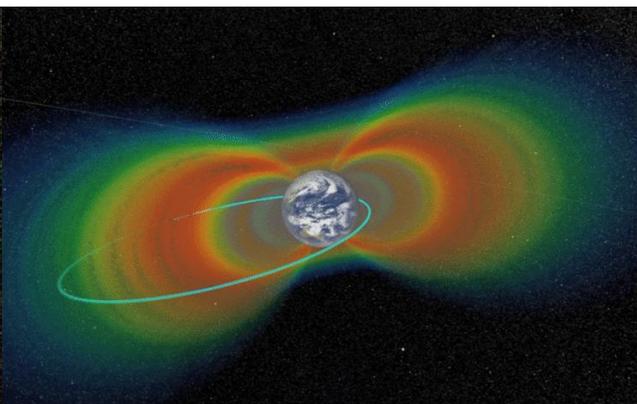
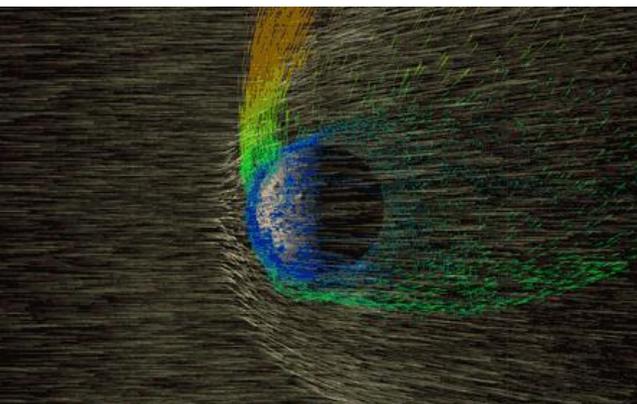
Тороидальные области магнитосферы Земли, в которых удерживаются проникшие в магнитосферу заряженные частицы галактических и солнечных космических лучей

Солнечные протонные события

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

Галактические космические лучи

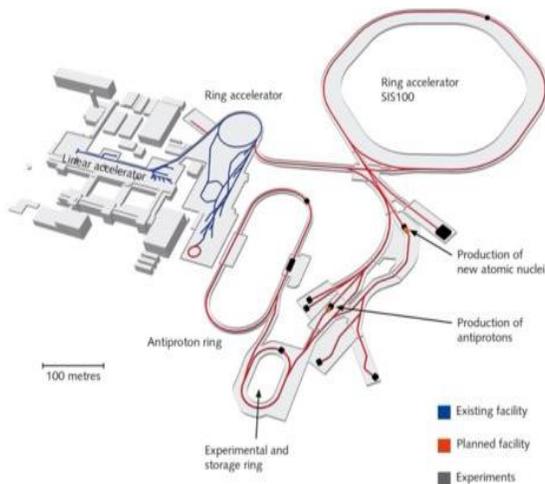
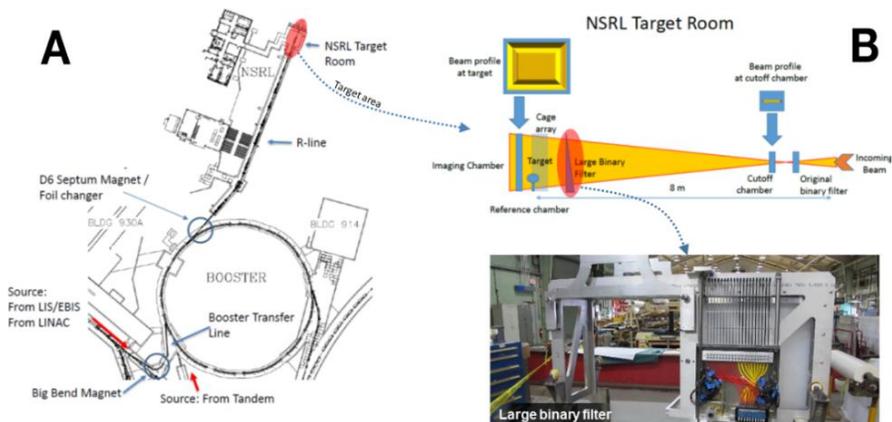
Состоят из ядер различных хим. элементов с широким диапазоном по энергии, постоянно действующее излучение, в межзвездной среде распространяется изотропно



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

**К вопросу о радиационном барьере при пилотируемых межпланетных полётах / А.И. Григорьев, Е.А. Красавин, М.А. Островский // Вестник РАН — 2017 — с. 65–69*

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



GSИ/FAIR в Дармштадте (Германия)

Комплекс NICA ОИЯИ



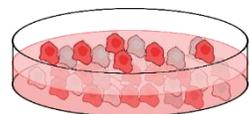
Большинство экспериментов

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

Пучок



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

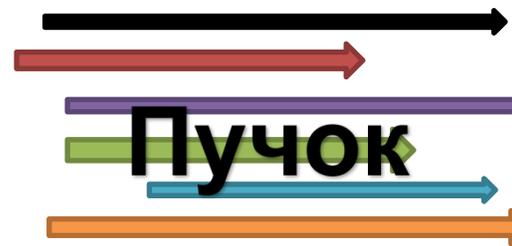


Биологические объекты

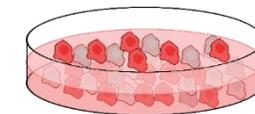
«Симулятор ГКЛ»

Необходимы новые подходы к воспроизведению смешанного радиационного поля в земных условиях на ускорителях ТЗЧ

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



Пучок

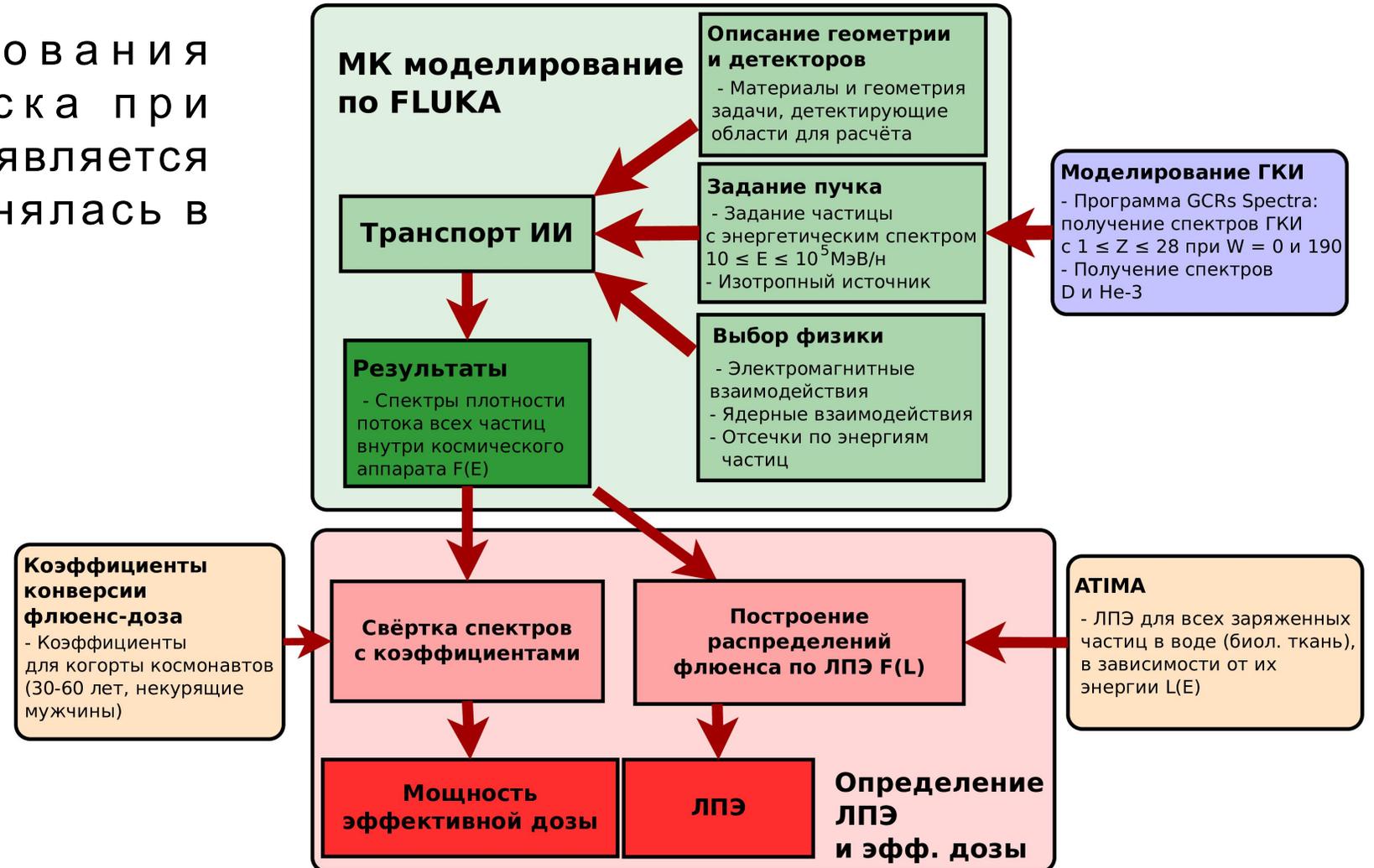


Многокомпонентное поле с широким энергетическим спектром, хроническое облучение, изотропное

Биологические объекты

Исследовать методами компьютерного моделирования внутреннее радиационное поле космического аппарата при полётах вне магнитосферы Земли для прогнозирования радиационного риска космонавтов и развить на этой основе новые методы к воспроизведению схожего по характеристикам смешанного радиационного поля в земных условиях на ускорителях ТЗЧ, что позволит проводить уникальные экспериментальные исследования в области космической радиобиологии.

Задача прогнозирования радиационного риска при межпланетном полете является комплексной и выполнялась в несколько этапов



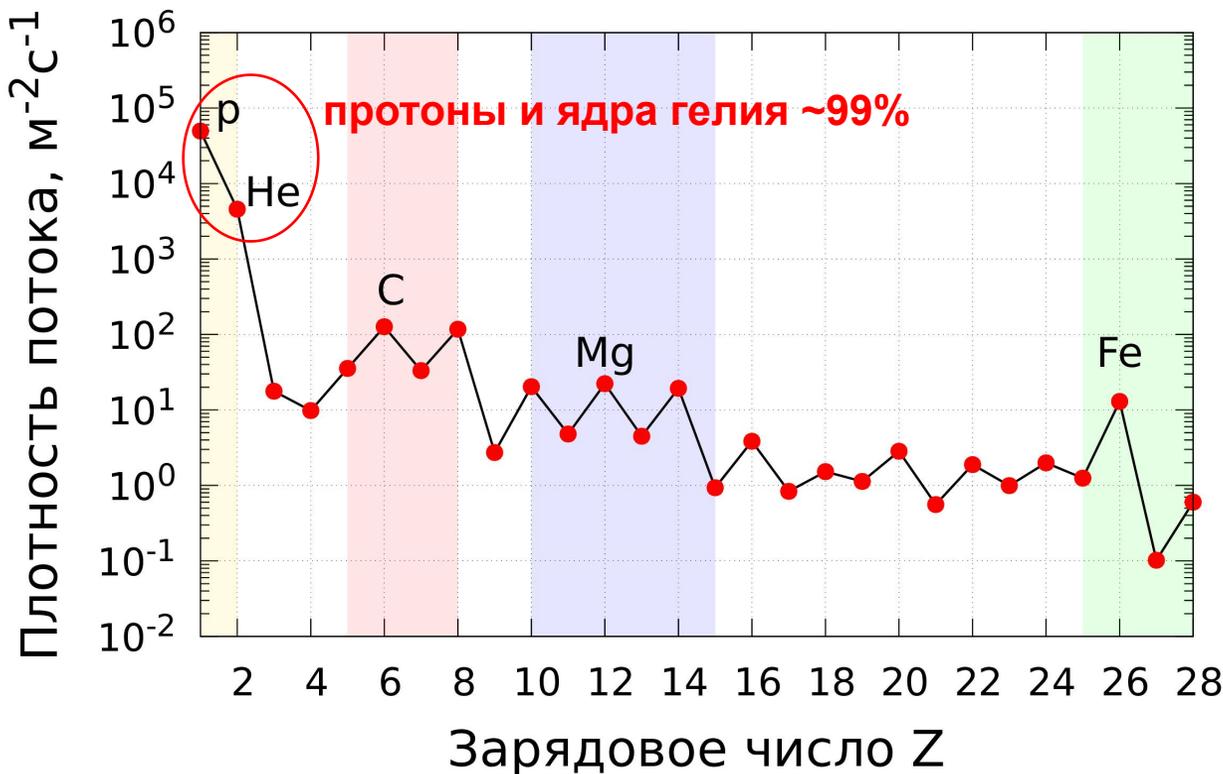
Общая блок-схема методики расчёта внутреннего радиационного поля космического аппарата для прогнозирования радиационного риска

Галактические космические лучи

ГКЛ галактические космические лучи

Три наиболее интенсивные группы ядер:

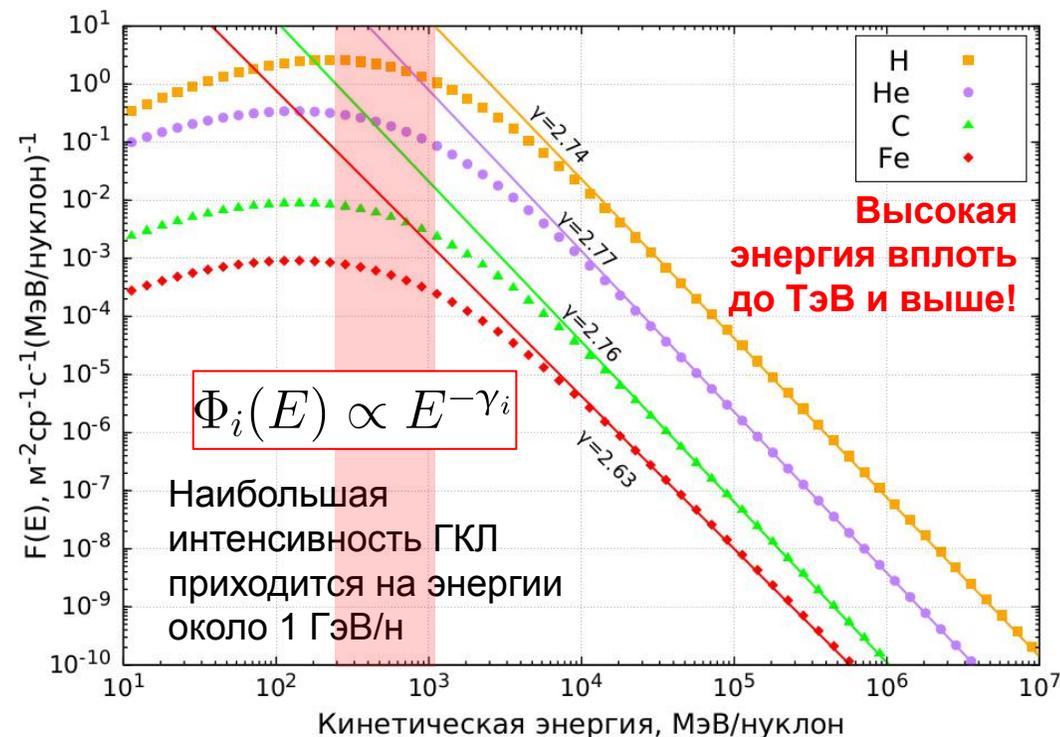
- Z от 5 до 8 (группа углерода),
- Z от 10 до 15 (группа магния),
- Z от 25 до 28 (группа железа).



Состав ГКЛ по зарядовому числу

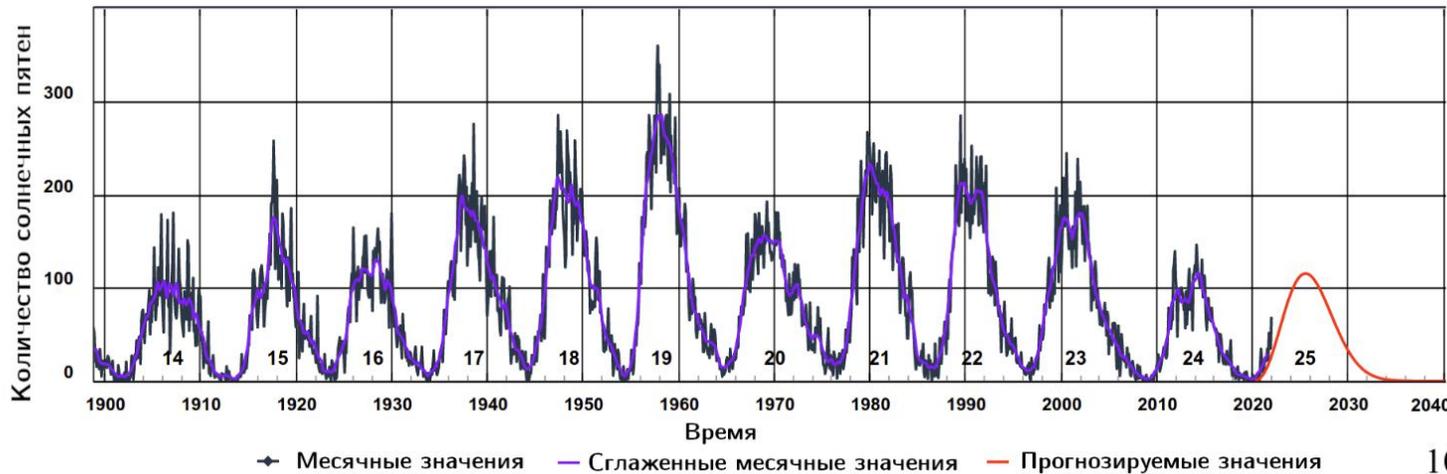
Особенности:

- Высокая изотропия,
- широкие энергетические спектры,
- максимальная проникающая способность по сравнению с другими излучениями в космосе.



Типичные спектры наиболее распространенных частиц ГКЛ

<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>



Количество солнечных пятен в период с 1900 по 2040, цифрами подписаны циклы солнечной активности

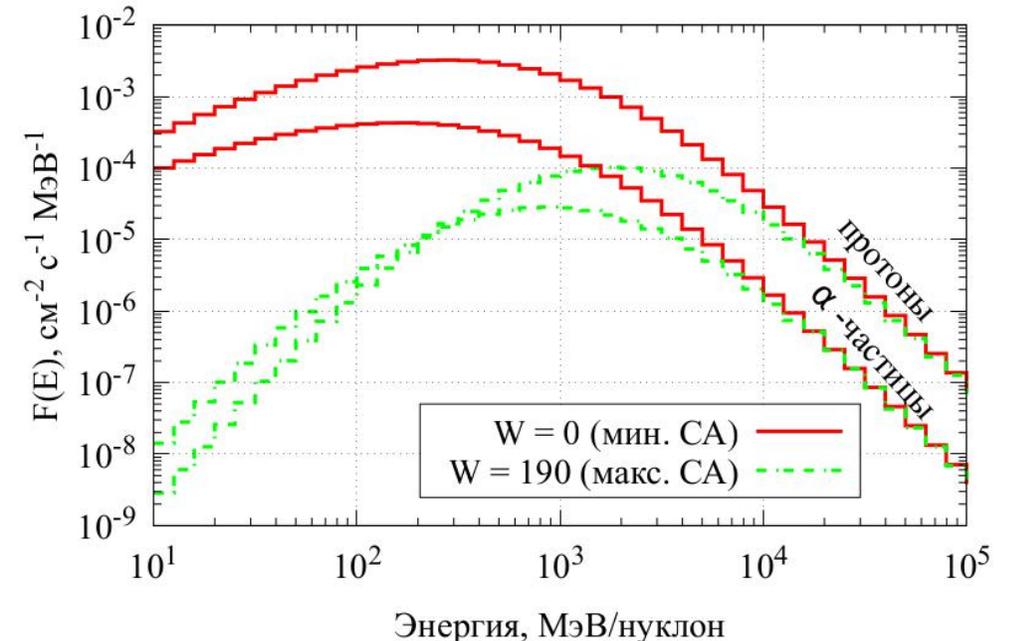
Число Вольфа является показателем текущей солнечной активности (СА):

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

- k — эмпирический нормировочный коэффициент,
- g — количество групп пятен,
- s — число всех наблюдаемых отдельных пятен.

Нумерация циклов начинается с нуля (с 1749 года)
Продолжительность цикла около 11 лет.

При моделировании учитывалось два крайних значения СА: мин. СА ($W = 0$) и макс. СА ($W = 190$)



Модуляция спектров ГКЛ

Спектры частиц ГКЛ

Для прогнозирования радиационной безопасности в космосе необходимо знать характеристики поля излучения, которому будут подвергаться космонавты

Теоретически, транспорт частиц ГКЛ в гелиосфере выражается уравнением переноса Паркера

$$\underbrace{\nabla \cdot \left(\overline{\overline{\mathbf{K}}}^{(S)} \cdot \nabla f \right)}_{\text{диффузия}} + \underbrace{\nabla \cdot \left(\overline{\overline{\mathbf{K}}}^{(A)} \cdot \nabla f \right)}_{\text{дрейф}} - \underbrace{\mathbf{V}_{\text{CB}} \nabla f}_{\text{конвекция}} + \underbrace{\frac{1}{3} (\nabla \cdot \mathbf{V}_{\text{CB}}) \frac{\partial f}{\partial \ln p}}_{\text{потери энергии}} + \underbrace{Q(\mathbf{r}, p, t)}_{\text{источники}} = \frac{\partial f}{\partial t}$$

диффузия

Описывает диффузию частиц \parallel и \perp магнитному полю

дрейф

Описывает дрейф частиц в магнитном поле

конвекция

Искомая функция - распределение частиц по импульсам (энергии)

$$f(\mathbf{r}, p, t)$$

источники

$$\overline{\overline{\mathbf{K}}} = \begin{bmatrix} \kappa_{\perp} & \kappa_{\top} & 0 \\ -\kappa_{\top} & \kappa_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_{\parallel} \end{bmatrix}$$

Тензор диффузии

$$\kappa_{\parallel} = \kappa = kT/m\nu$$

$$\kappa_{\perp} = \kappa_{\parallel} / (1 + \omega^2 \tau^2)$$

$$\kappa_{\top} = \omega \tau \kappa_{\perp}$$

$$\omega = qB/m \quad \nu = 1/\tau$$

Для решения уравнения необходимо знать детальные пространственные, временные и энергетические зависимости основных параметров уравнения от размеров и геометрии области модуляции, что, как правило, затруднительно.

Многообразие природных процессов и связей, в которые вовлечены ГКЛ велико.

Решение, как правило, находят численно при определённых упрощениях:

1. Статическая гелиосфера.
2. Логарифмическая координатная сетка.
3. Как правило одномерное или двумерное решение.

Существуют специальные полупирические модели для расчёта спектров, в которых используются некоторые упрощения в решении уравнения переноса

Модели спектров частиц ГКЛ:

- Модель NASA «Badhwar-O'Neill GCR Model» (BON) [1]
- Модель Ныммика (международный стандарт ISO 15390 и ГОСТ 25645.150-90) [2]
- Модель Немецкого аэрокосмического центра (модель «Matthia et al») [3]

[1] Slaba, T. C. The Badhwar-O'Neill 2020 GCR Model [Text] / T. C. Slaba, K. Whitman // Space Weather. — 2020. — June. — Vol. 18, no. 6. — URL: <https://doi.org/10.1029/2020SW002456>.

[2] A model of galactic cosmic ray fluxes [Text] / R. A. Nymmik [et al.] // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. — 1992. — Vol. 20, no. 3. — P. 427—429.

[3] A ready-to-use galactic cosmic ray model [Text] / D. Matthiä [et al.] // Advances in Space Research. — 2013. — Vol. 51, no. 3. — P. 329—338.

Согласно модели, уравнение переноса решается в форме Фоккера-Планка

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 V_{\text{CB}} U) - \left[\frac{1}{3r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 V_{\text{CB}}) \right] \left[\frac{\partial}{\partial T} (\alpha T U) \right] = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \kappa \frac{\partial U}{\partial r} \right)$$

$U(r, T)$ - искомая функция, распределение плотности потока частиц (интегрированное по всем направлениям)

Граничное условие

$$\alpha = (T + 2m) / (T + m)$$

$$f_{\text{ЛМС}}(T) = j_0 \beta^\delta (T + m)^{-\gamma}$$

Описывает локальный межзвездный спектр (на расстоянии 100 а.е.), т.е. без модуляции магнитным полем (степенной закон)

j_0, γ и δ

первый и второй параметры фиксируют размах и наклон высокоэнергетической части спектра соответственно (различны для каждого типа ядер)

Коэффициент диффузии

$$\kappa(r, t) = \frac{\beta R k_0}{\varphi(t)} \left[1 + \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]$$

Описывает состояние гелиосферы на некотором расстоянии от Солнца r во время t

m - масса покоя протона,
 R - магнитная жёсткость ядра,
 $\varphi(t)$ - модуляционный потенциал,
 $r_0 = 4$ а.е. и $k_0 = 8.8 \cdot 10^{20}$ см²/с - константы

Таким образом,

- В модели используется приближение сферически симметричной гелиосферы (одномерный случай),
- учитывается распространение ГКЛ с учётом диффузии в гелиосфере, конвекции и адиабатического охлаждения,
- модуляционный потенциал $\varphi(t)$ описывает СА.
- В открытом доступе существует интерфейс на сайте НАСА [1], при помощи которого возможно рассчитать спектры по модели, но нет возможности получать все необходимые спектры в пакетном режиме при конкретной СА, выражаемой числом Вольфа.

[1] OLTARIS — The On-Line Tool for the Assessment of Radiation in Space [Electronic Resource] / NASA.
— URL: <https://oltaris.nasa.gov/>

Полуэмпирическая модель, первоначально разработанная в НИИЯФ МГУ [2] Ныммиком Р. А. и коллегами.

Используется в международном стандарте ISO 15390 и стандарте ГОСТ 25645.150-90 [1]

$$f_{\text{ЛМС}}(R) = D_i R^{-\gamma_i} \beta^{\alpha_i}$$

Локальный межзвёздный спектр (ЛМС) описывается как функция магнитной жёсткости частицы R (степенная функция)

Согласно модели, спектр частицы описывается произведением двух сомножителей:

$$F_i(R, t) = f_{\text{ЛМС}}(R) \Phi(R, R_0(t), q)$$

$$\Phi(R, R_0(t), q) = \left(\frac{R}{R + R_0(t)} \right)^{\Delta + \delta \Delta(q, R)}$$

Модуляционная функция
(учитывает отклонение от степенного закона)

[1] ГОСТ 25645.150-90. ЛУЧИ КОСМИЧЕСКИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИЕ. Модель изменения потоков частиц. — 1992. — 12 с.

[2] A model of galactic cosmic ray fluxes / R. A. Nymmik [et al.] // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. — 1992. — Vol. 20, no. 3. — P. 427—429.

$$F_i(R, t) = f_{\text{ЛМС}}(R) \underbrace{\Phi(R, R_0(t), q)}_{\text{Модуляционная функция}}$$

$$R_0(t) = 0.385 + 3 \cdot 10^{-4} W(t - \Delta t(R))^{1.445} \quad \Phi(R, R_0(t), q) = \left(\frac{R}{R + R_0(t)} \right)^{\Delta + \delta \Delta(q, R)}$$

Модуляционный потенциал гелиосферы для момента времени t (описывает адиабатическое охлаждение)

Модуляционная функция (учитывает отклонение от степенного закона)

Модель реализована в программах CREME96/2009, предназначенных для изучения влияния космических лучей на микроэлектронику. Интерфейс для работы с программами доступен через сайт [1] (после прохождения регистрации).

Нет возможности получать все необходимые спектры в пакетном режиме

$$\Phi_i(\mathbf{r}, t, E) = \int_{4\pi} \Phi_i(\mathbf{r}, t, E, \Omega) d\Omega = \frac{C_i \beta^{\alpha_i}}{R_i(E)^{\gamma_i}} \left[\frac{R_i(E)}{R_i(E) + (0.37 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot W(t)^{1.45})} \right]^{b \cdot W(t) + c} \frac{A_i}{Z_i} \frac{1}{\beta}$$

Модель Немецкого аэрокосмического центра («Matthia et al») является упрощением модели Ныммика, в которой модуляция описывается одним параметром (числом Вольфа).

- $R_i(E) = \frac{A_i}{Z_i} \sqrt{E^2 + 2EE_0}$ – магнитная жёсткость частицы типа i с кин. энергией E , E_0 – энергия покоя на нуклон (протона);
- A_i и Z_i – массовое и зарядовое число атомного ядра частицы ГКЛ типа i ;
- β – отношение скорости частицы к скорости света;
- C_i, α_i, γ_i – параметры, специфичные для каждой частицы типа i (находятся из измерений);
- $W(t)$ отвечает за модуляцию спектра ГКЛ в гелиосфере (число Вольфа) в момент времени t .

Модуляционная функция в модели Ныммика

$$\Phi(R, R_0(t), q) = \left(\frac{R}{R + R_0(t)} \right)^{\Delta + \delta\Delta(q, R)}$$

Модуляционная функция в модели «Matthia et al»

$$\left[\frac{R_i(E)}{R_i(E) + (0.37 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot W(t)^{1.45})} \right]^{b \cdot W(t) + c}$$

- Параметры b и c были получены авторами путём применения процедуры минимизации, с использованием данных по углероду со спектрометра CRIS (ACE) в период с 14 августа 1997 года по 2 апреля 2012 года.
- Оказалось, их можно зафиксировать: $b = 0.02$ и $c = 4.7$, что позволяет достаточно хорошо описывать не только данные по углероду, но и по остальным ядрам при различной СА.

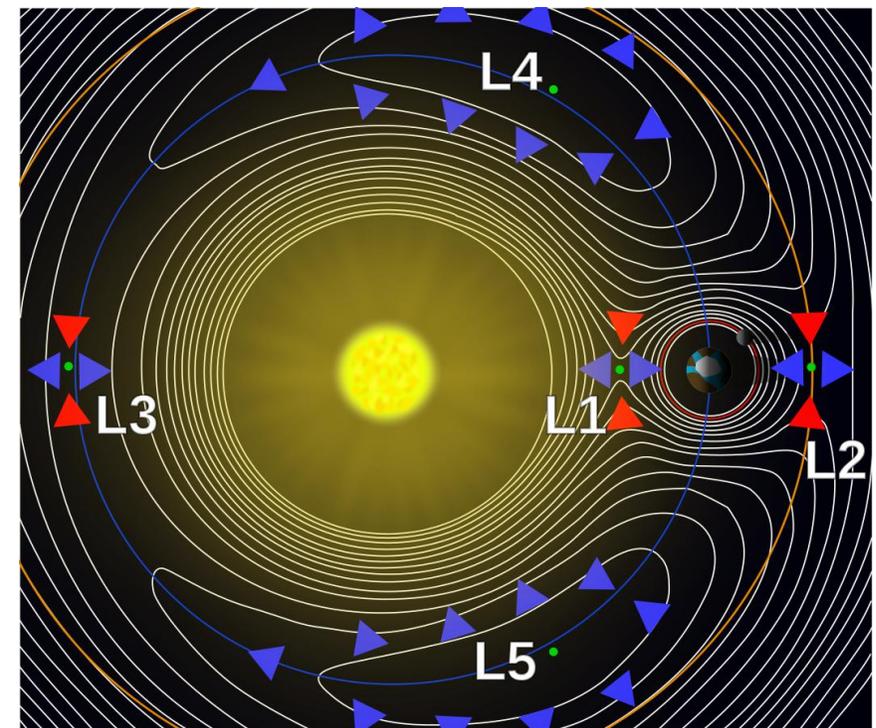
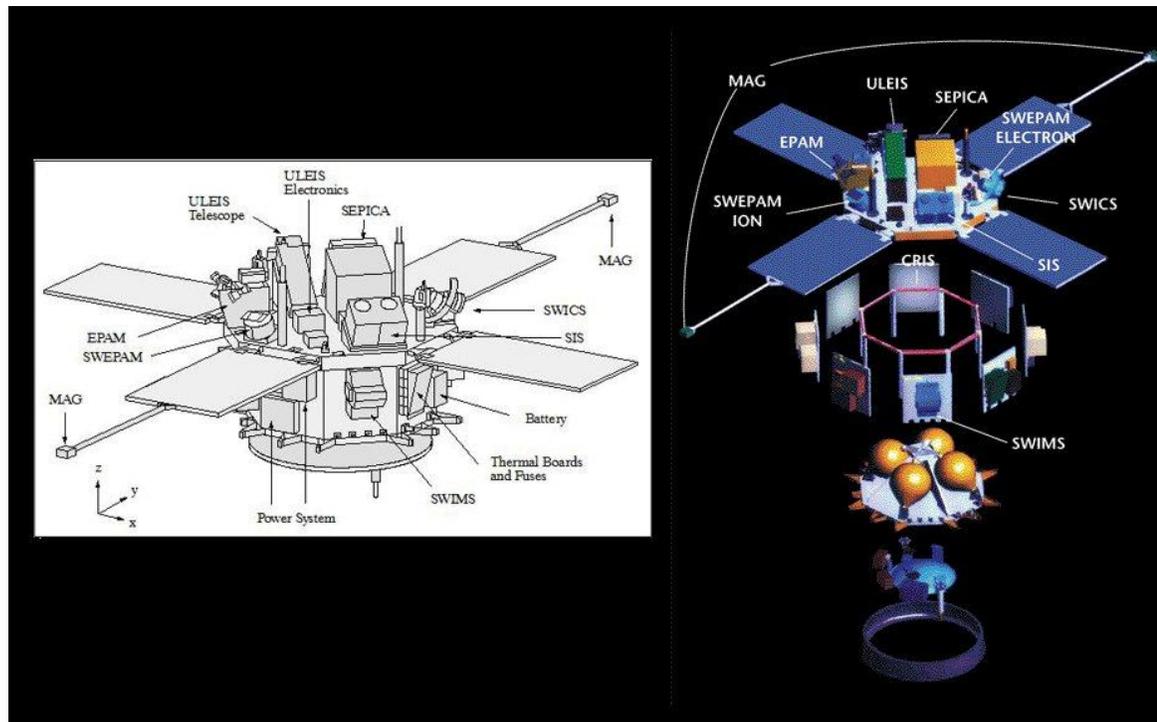
Данные измерений с космических аппаратов

Свободные параметры моделей определяются по результатам измерений на аппаратах, находящихся в космосе.

Для сравнения результатов расчетов по моделям, докладчиком были проанализированы данные с аппарата ACE (**A**dvanced **C**omposition **E**xplorer).

Американский космический аппарат ACE предоставляет наиболее полные данные по измерениям потоков ядер ГКЛ.

Аппарат находится на орбите Лиссажу вблизи точки Лагранжа L1: на прямой между Солнцем и Землей, на расстоянии около 1.5 млн. км от Земли, т. е. вне её магнитосферы.



<https://science.nasa.gov/mission/ace/>

Точки Лагранжа

- На ACE установлен спектрометр космических лучей CRIS, способный измерять потоки частиц с $2 \leq Z \leq 28$ в энергетическом интервале 100–500 МэВ/н.
- Спектрометр солнечных изотопов SIS измеряет потоки частиц с $2 \leq Z \leq 28$ при меньших энергиях (5–150 МэВ/н.)
- Во время крупных СПС, когда потоки частиц могут увеличиваться на ~ 4 порядка, SIS измеряет изотопный состав солнечной короны, а во время спокойного Солнца, низкоэнергетические частицы ГКЛ и состав аномальных космических лучей (АКЛ), которые проявляются как резкий скачок потока некоторых элементов ГКЛ в диапазоне энергий $\sim 10\text{--}50$ МэВ/н.

Данные измерений ACE доступны через сайт New ACE Level 2 Data Server [Electronic Resource] / ACE Science Center. — URL: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/new/>

TABLE I
ACE instrumentation

Sensor	Full name	Measured species	Measured quantities	Typical energy (MeV nucl ⁻¹)	Technique
CRIS	Cosmic-ray isotope spectrometer	$2 \leq Z \leq 30$	Z, M, E	≈ 200	$dE/dx - E$
SIS	Solar isotope spectrometer	$2 \leq Z \leq 30$	Z, M, E	≈ 20	$dE/dx - E$
ULEIS	Ultra low energy isotope spectrometer	$2 \leq Z \leq 28$	M, E	≈ 1	TOF – E
SEPICA	Solar energetic particle ionic charge analyzer	$2 \leq Z \leq 28$	Q, Z, E	≈ 1	E/Q $dE/dx - E$
EPAM	Electron, proton and alpha monitor	H, He, e^-	Z, M, E	≈ 0.3	$dE/dx - E$
SWIMS	Solar wind ion mass spectrometer	$2 \leq Z \leq 30$	$M, E/Q$	≈ 0.001	E/Q TOF – E
SWICS	Solar wind ion composition spectrometer	$2 \leq Z \leq 30$	Z, E	≈ 0.001	E/Q TOF – E
SWEPAM	Solar wind electron, proton and alpha monitor	H, He, e^-	E/Q dist.	≈ 0.001	E/Q
MAG	Magnetometer	B	B_x, B_y, B_z		Triaxial fluxgate

E = energy, M = mass, Z = nuclear charge, Q = ionic charge, B = magnetic field.

Приборы на борту аппарата ACE

Данных АСЕ недостаточно для наиболее лёгких и распространённых частиц: протонов и ядер гелия, которые имеют большое значение для радиационной нагрузки на космонавтов при межпланетных перелётах.

Для заполнения пробела по данным для протонов и гелия, можно использовать результаты измерений со спектрометра BESS [1].

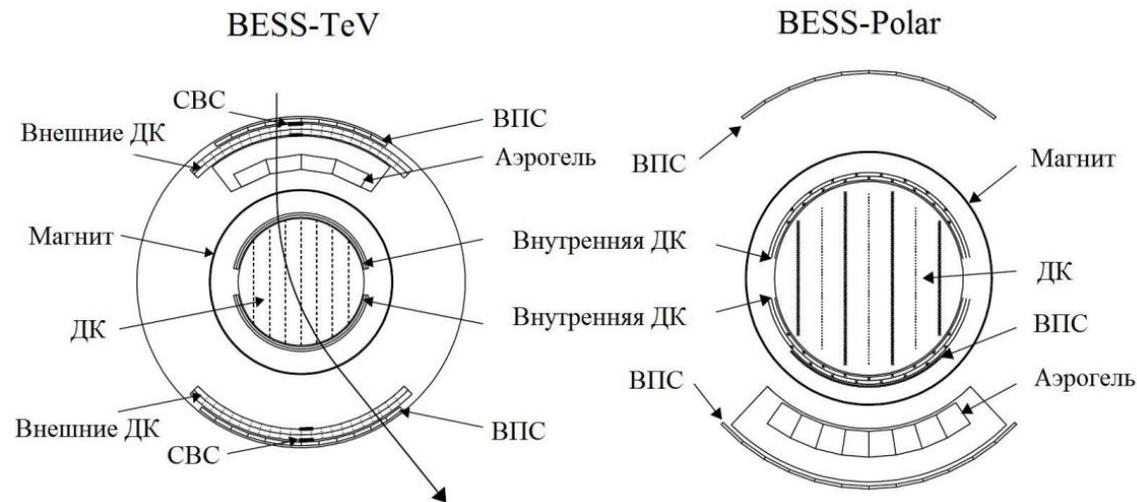
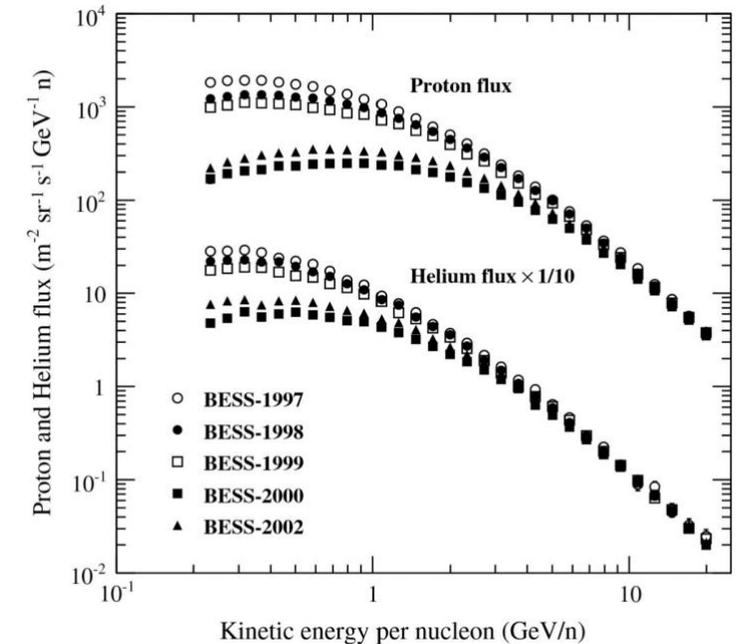


Схема магнитного спектрометра BESS



Измерения BESS



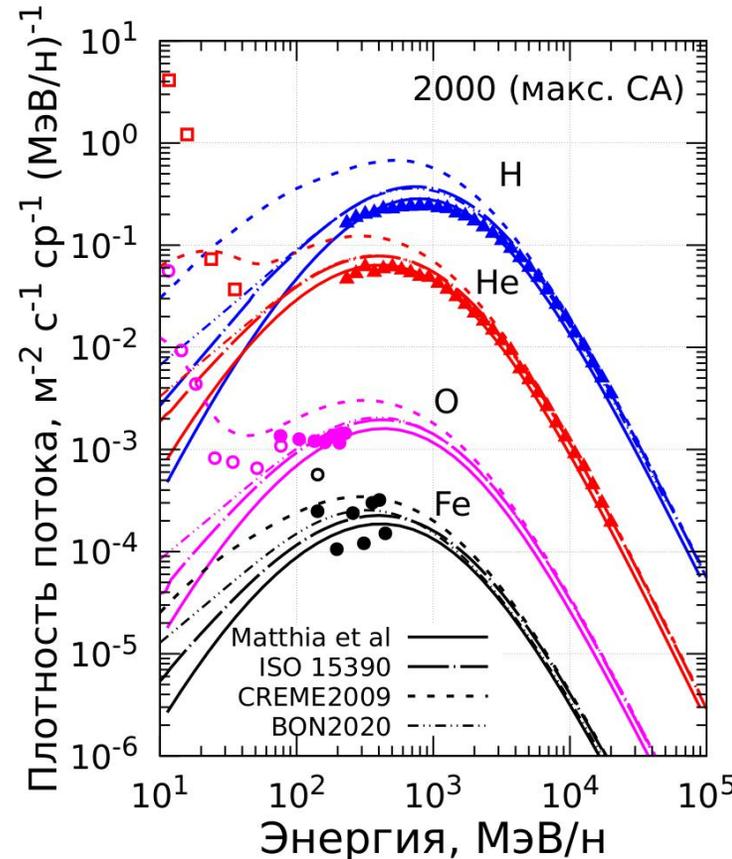
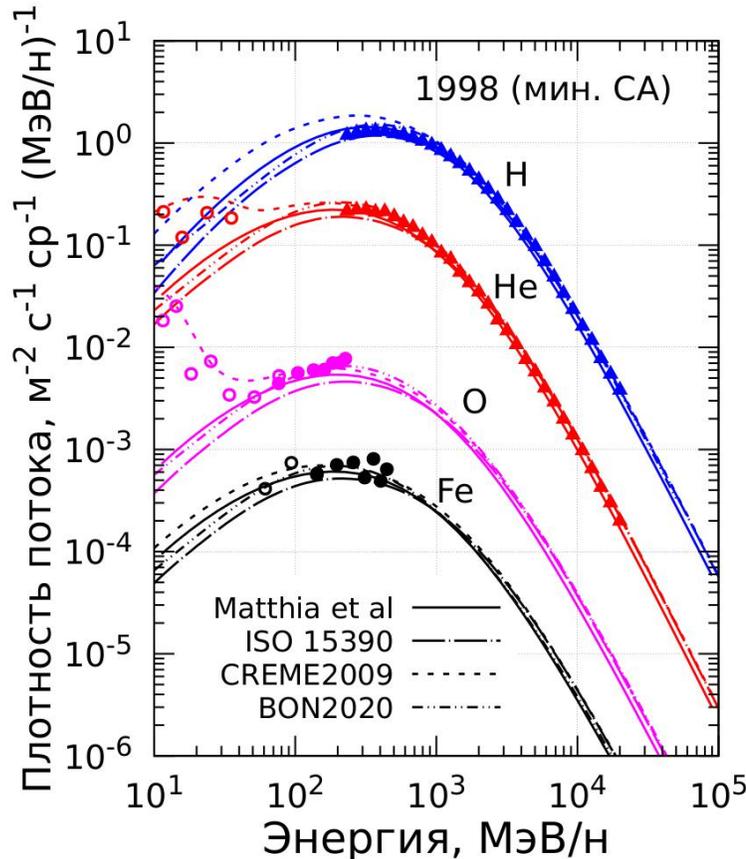
Фотография спектрометра BESS на аэростате

[1] Measurements of 0.2-20GeV/n cosmic-ray proton and helium spectra from 1997 through 2002 with the BESS spectrometer [Text] / Y. Shikaze [et al.] // Astroparticle Physics. — 2007. — Vol. 28, no. 1. — P. 154—167.

Для дальнейшей программной реализации и моделирования взаимодействия ГКЛ с аппаратом необходимо было выбрать модель с наилучшим соответствием данным измерений при различной СА

Модель «Matthia et al» хорошо согласуется с экспериментальными данными и другими моделями, а также позволяет задать модуляцию спектров при помощи одного параметра: числа Вольфа.

Поэтому она была выбрана для дальнейших расчетов.



Сравнение результатов расчетов по различным моделям спектров ГКЛ с данными измерений BESS и ACE при минимуме (а) и максимуме (б) СА для некоторых частиц ГКЛ

Маркерами отмечены данные измерений:

- треугольники – BESS,
- заполненные круги – ACE (CRIS),
- открытые круги – ACE (SIS)

Была создана программа *GCRs Spectra*, которая позволяет получать спектры и интегральные значения (флюенс) частиц ГКЛ с Z от 1 до 28.

В основу алгоритма работы программы была положена модель Немецкого аэрокосмического центра («Matthia et al»)

Программа написана на Python 3 с использованием модулей:

- NumPy, Pandas (расчеты по модели)
- Matplotlib (построение графиков)
- PyQt5 (графический интерфейс)

The program for calculating spectra of GCR particles with spectrum modulation depending on the value of the Wolf number, the calculations are based on the article:
A ready-to-use galactic cosmic ray model (Daniel Matthiä, Thomas Berger, Alankrita I. Mrigakshi, Günther Reitz) Advances in Space Research 51 (2013) 329–338

Wolf number value: 0

Choose the GCR particle

E_{\min} : 10 E_{\max} : 10

Number of bins: 40

Save to ASCII file:

Double differential $F(E)$, $m^2 \cdot s^{-1} \cdot sr^{-1} \cdot (MeV/n)^{-1}$

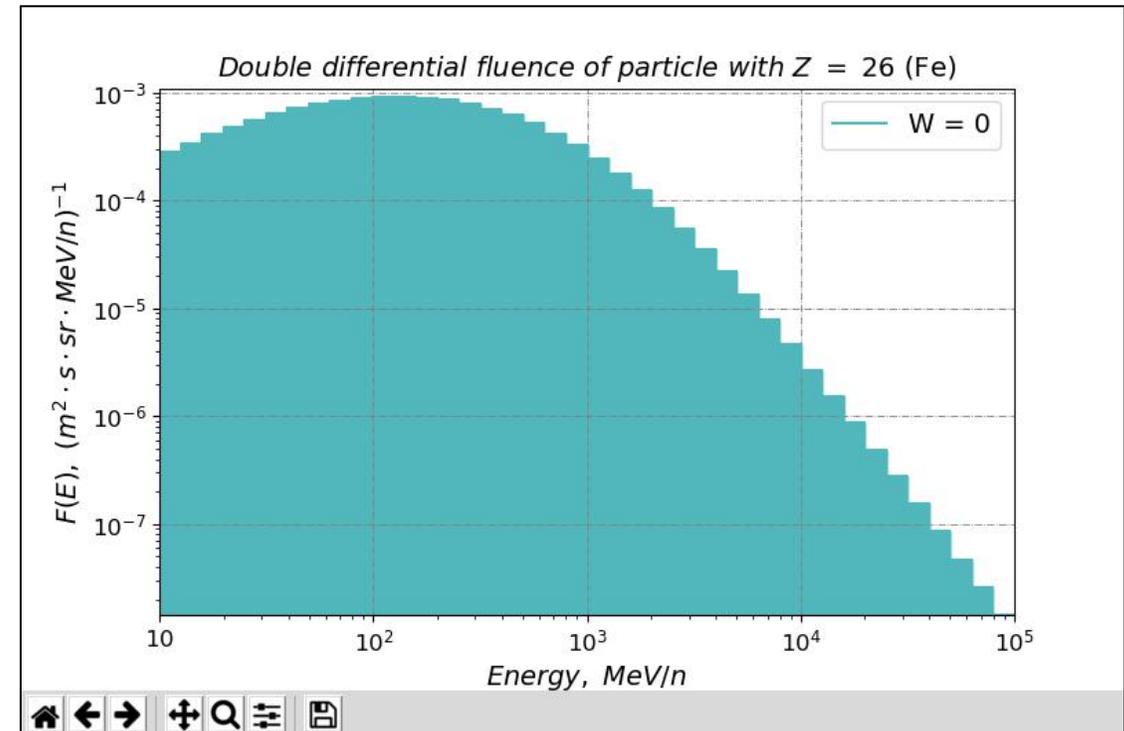
Differential $F(E)$, $m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot (MeV/n)^{-1}$

$F(E)dE$, $m^{-2} \cdot s^{-1}$

Integral Fluence, $m^{-2} \cdot s^{-1}$

***** History *****

Clear History Calculate Plot



Графический пользовательский интерфейс программы GCRs Spectra: главное окно (слева) и окно с результатом (справа)



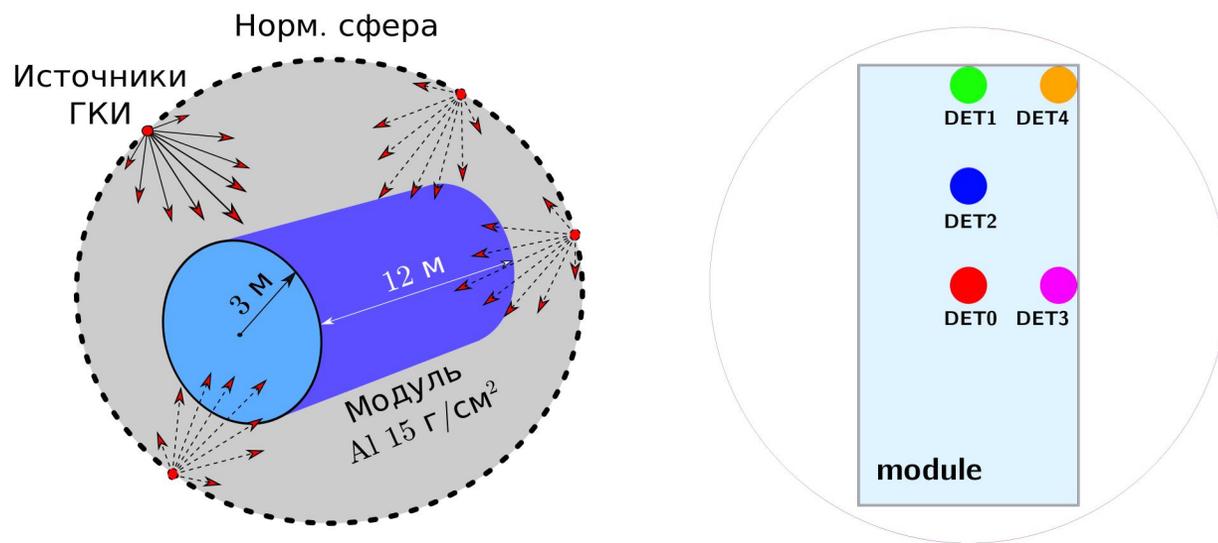
Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

При помощи разработанной программы были получены спектры всех частиц ГКЛ с Z от 1 до 28 при двух крайних значениях СА: $W = 0$ (мин. СА) и $W = 190$ (макс. СА).

Результаты работы программы использовались в качестве входных данных для последующего компьютерного моделирования взаимодействия частиц ГКЛ с моделью космического аппарата.

Моделирование производилось при помощи Монте-Карло программ переноса ионизирующего излучения через вещество.

Моделирование внутреннего радиационного поля космического аппарата



Модель обитаемого модуля космического аппарата: общий вид с нормирующей сферой и источниками ГКИ (слева); справа показан вид в разрезе с обозначением детектирующих областей (детекторов)

Модель обитаемого модуля космического корабля:

- Полый цилиндр \varnothing 6 м и длиной 12 м ($V = 339.3 \text{ м}^3$).
- Алюминиевая оболочка толщиной 15 г/см^2 ($\rho_{\text{Al}} = 2.7 \text{ г/см}^3$).
- Заполнен сухим воздухом под нормальным давлением.

Модель является приближением помещения, в котором космонавты будут проводить большую часть времени при межпланетном перелете.

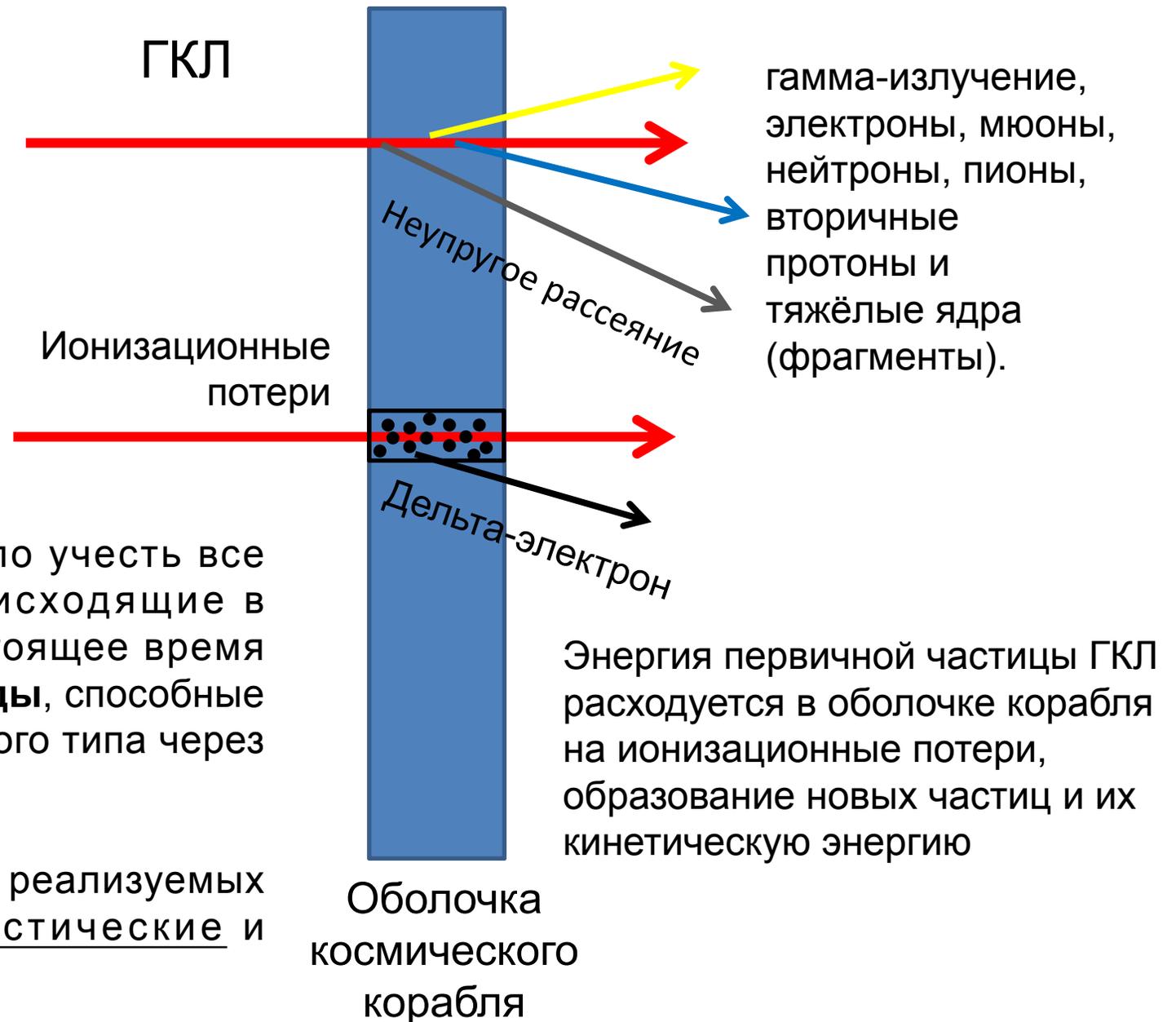
Полагалось, что пребывание космонавтов в любом месте модуля равновероятно в течение продолжительности всего полёта. Тем не менее, для проверки однородности внутреннего радиационного поля, внутри модуля задавались также выделенные детектирующие области пространства (детекторы), в которых производился расчёт плотности потока частиц.

Экипаж будет подвержен облучению **вторичным излучением**, которое формируется в ядерных реакциях ГКЛ с оболочкой корабля.

Радиационное поле внутри корабля будет **смешанным**: существенно отличающимся от ГКЛ вне корабля и от природных видов радиации.

При моделировании необходимо было учесть все возможные ядерные реакции, происходящие в оболочке. Для подобных задач в настоящее время широко применяются **транспортные коды**, способные проводить расчет переноса ИИ различного типа через вещество.

Транспортные коды делятся на основе реализуемых численных методов на детерминистические и статистические (вероятностные).



Примером детерминистического транспортного кода является HZETRN (High charge (**Z**) and **E**nergy **TRa**Nsport), разрабатываемый НАСА. Код основывается на численном решении уравнений переноса (кинетическое уравнение Больцмана):

приближение непрерывного замедления
(ионизационные потери)

плотность потока ионов типа j с атомной массой A_j , в точке \mathbf{x} в направлении движения $\boldsymbol{\Omega}$, с энергией E

$$\left[\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla - \frac{1}{A_j} \frac{\partial}{\partial E} L_j(E) + \sigma_j(E) \right] \varphi_j(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Omega}, E) =$$

макроскопическое сечение среды, отвечающее за убыль частиц (за счёт поглощения)

$$= \sum_k \int_E^\infty \int_{4\pi} \sigma_{jk}(E, E', \boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}') \varphi_k(\mathbf{x}, \boldsymbol{\Omega}', E') d\boldsymbol{\Omega}' dE'$$

макроскопические сечения, отвечающие за различные ядерные процессы (фрагментация ядра-снаряда или мишени, распад), приводящие к производству частицы типа j с энергией E в направлении $\boldsymbol{\Omega}$, в результате столкновения частиц типа k с энергиями E' с направлением $\boldsymbol{\Omega}'$

Начальное условие

$$\varphi_j(0, \boldsymbol{\Omega}, E) = F_j(\boldsymbol{\Omega}, E) \quad \text{спектр частиц ГКЛ}$$

При решении уравнения существует ряд сложностей и необходимо прибегать к ряду приближений:

- распространение вторичных частиц в том же направлении что и начальные, т. е. прямо вперёд
- дважды дифференциальные сечения для рождения нейтронов и других частиц разделяют на прямую и изотропную составляющие
- пренебрежение процессами фрагментации ядра-мишени
- до определённого времени невозможно было в принципе произвести генерацию и транспорт мезонов, фотонов и лептонов
- простейшие геометрии типа: плита-детектор, сфера-детектор

Код является эффективным при вычислениях, но недостаточно точным при описании некоторых важных процессов, что может оказаться критичным при описании более сложных геометрий и при задании нетривиальных конфигураций первичного пучка.

Альтернатива: Монте-Карло моделирование

Плюсы: высокая точность, возможность задания практически любой сложной геометрии

Главный минус: эффективность вычислений

Для моделирования процесса переноса частиц методом Монте-Карло (МК) необходимо:

1. Процедура описания геометрии задачи: обычно используется простая линейная алгебра, векторное исчисление и комбинаторная геометрия.
2. Описание физических моделей различных взаимодействий: используется большой объём данных по сечениям и специальные генераторы ядерных реакций (которые обычно также основаны на методе МК).
3. Задание специальных процедур сбора результатов, позволяющих оценить искомые величины (флюенс, дозы, и т. д.).
4. **Важная часть МК:** генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ) - алгоритм, позволяющий получать квазислучайные последовательности, которые зависят от значения начального числа (seed)

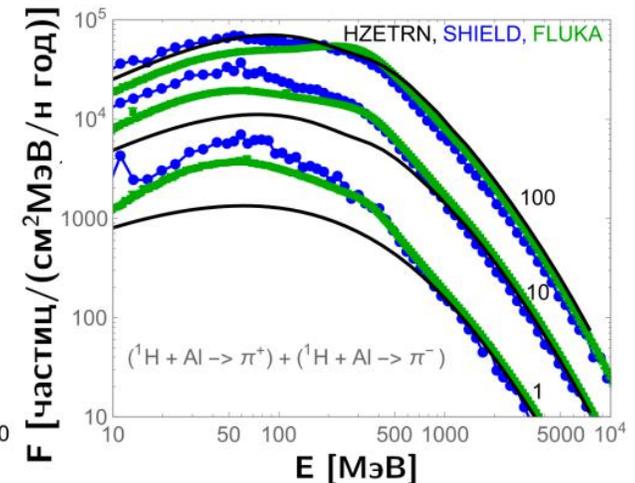
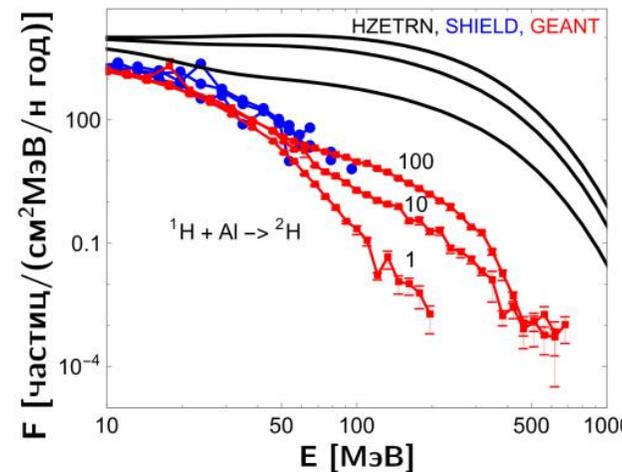
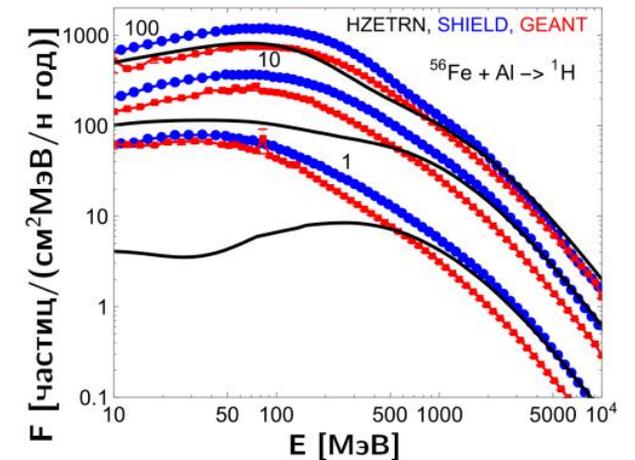
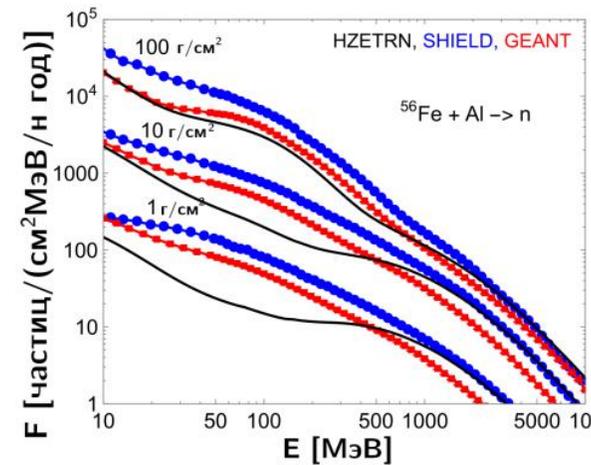
Моделирование переноса частиц реализовано в специальных кодах: **SHIELD**, **GEANT4**, **FLUKA**, **PHITS**, построенных на базе Монте-Карло подходов. Данные коды позволяют использовать практически любую сложную геометрию и получать очень точные результаты (ограниченные используемыми физ. моделями и сечениями)

В работе использовались FLUKA и PHITS, результаты работы программ сверялись на тестовых расчётах с экспериментальными данными

Другими авторами [1] приводились сравнения работы кода HZETRN и известных Монте-Карло программ GEANT, SHIELD, FLUKA для некоторых типов реакций.

Отмечается, что код HZETRN плохо воспроизводит выход некоторых частиц.

HZETRN сильно занижает количество протонов и нейтронов с энергиями до ~500 МэВ. Это критично для задач радиационной безопасности, т. к. именно эти частицы являются дозообразующими.



[1] Comparing HZETRN, SHIELD, FLUKA and GEANT transport codes [Text] / J. W. Norbury [et al.] // Life Sciences in Space Research. — 2017. — Vol. 14. — P. 64—73.

Монте-Карло коды



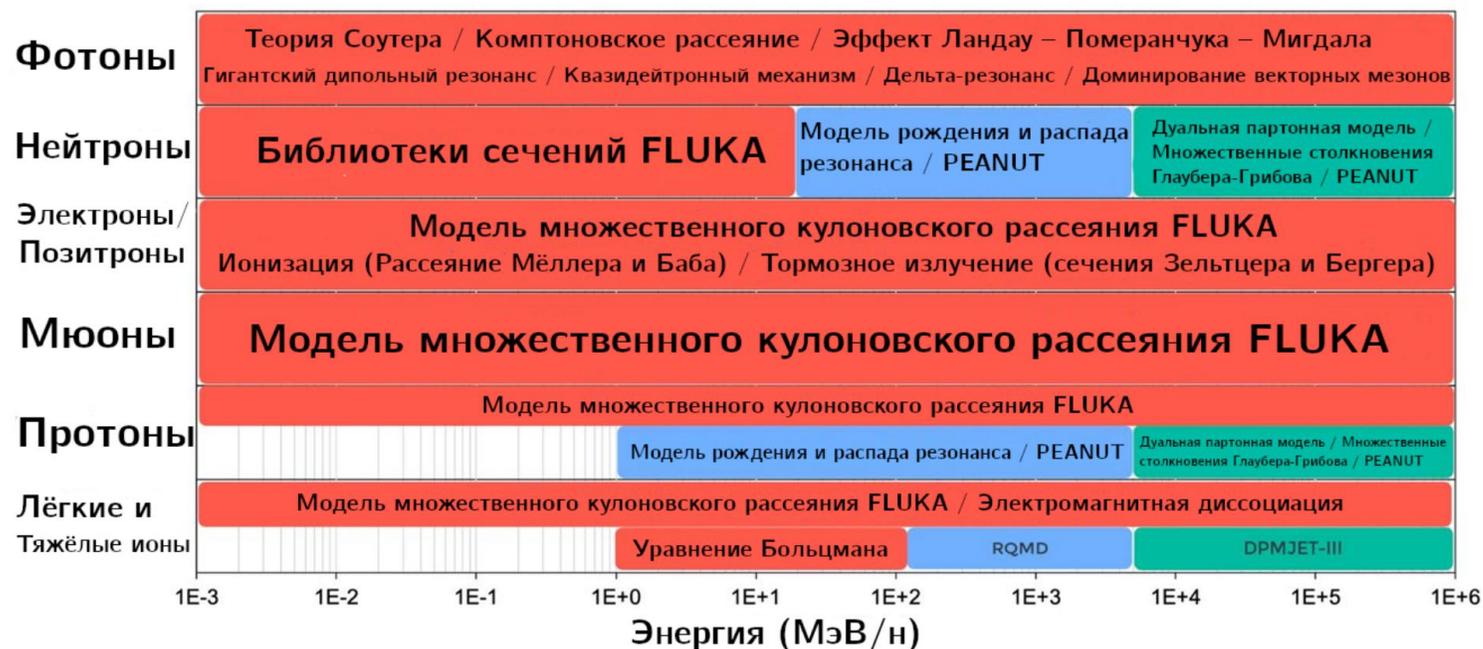
FLUKA (CERN) – универсальный программный пакет для расчёта переноса частиц и взаимодействий с веществом, охватывающий широкий спектр применения. На данный момент имеет две независимые ветки разработки: от INFN и CERN.

FLUKA использовалась для моделирования взаимодействия частиц ГКЛ с моделью обитаемого модуля космического аппарата

FLUKA

Код написан на довольно архаичном стандарте Fortran 77, при «нестандартных» задачах пользователю необходимо определять необходимый функционал при помощи пользовательских подпрограмм

Код выполняется на *nix ОС



Физические модели и данные, используемые во FLUKA при транспорте частиц через вещество



PHITS

PHITS – универсальный транспортный МК код, разрабатываемый Агентством по атомной энергии (JAEA, Япония). Данный код, также как и FLUKA, способен обеспечивать перенос большинства видов частиц, но с энергиями вплоть до 1 ТэВ (на нуклон для тяжёлых ядер) и использованием собственных моделей ядерных реакций и библиотек данных.

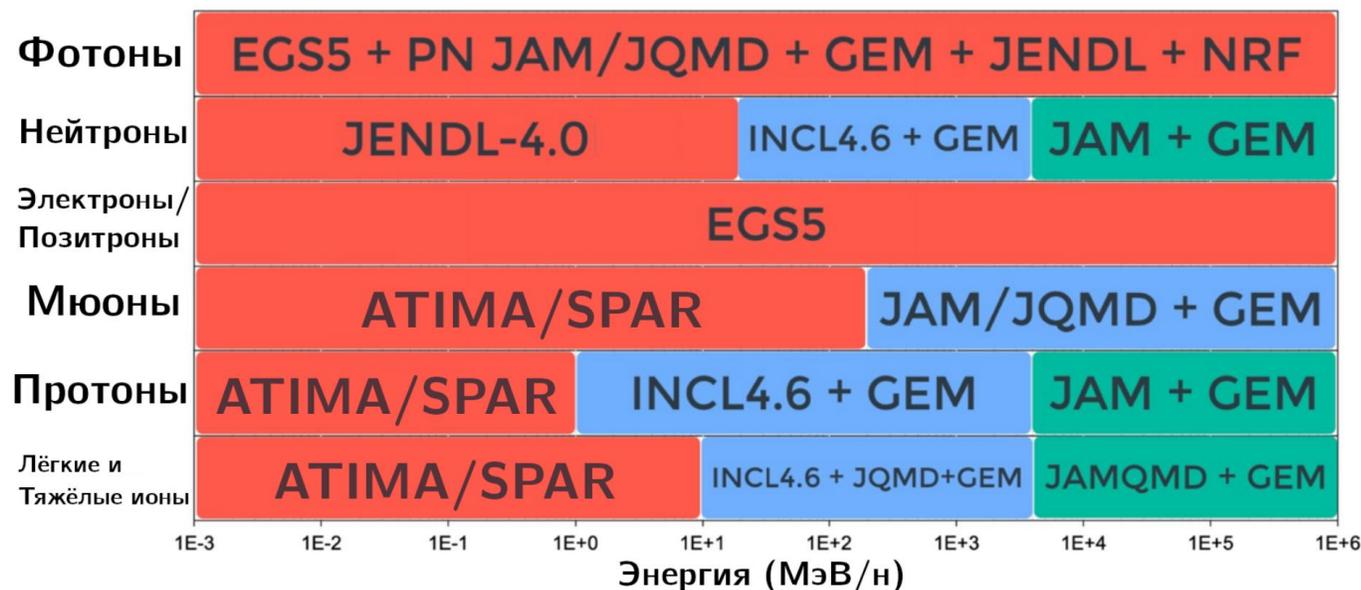
PHITS применялся на этапе разработки симулятора ГКЛ для расчёта вторичного излучения из набора мишеней различных толщин.

Код написан на Fortran

Отличия кода PHITS от FLUKA:

- на программном уровне поддерживает технологии MPI и OpenMP, что позволяет существенно ускорить расчёты, задействуя многопоточность процессора.
- выполняется на операционных системах: Windows, Mac и Linux.

PHITS



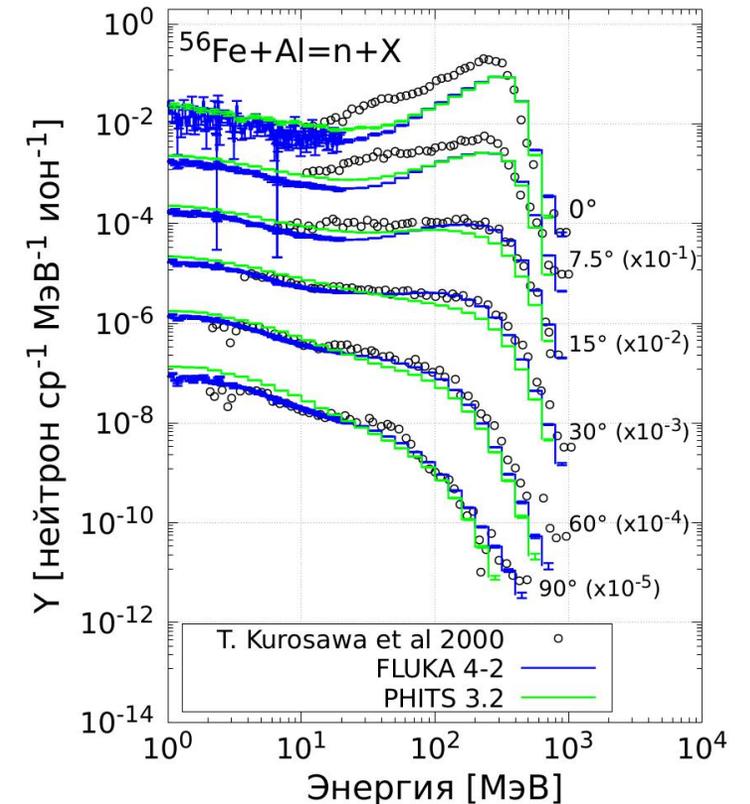
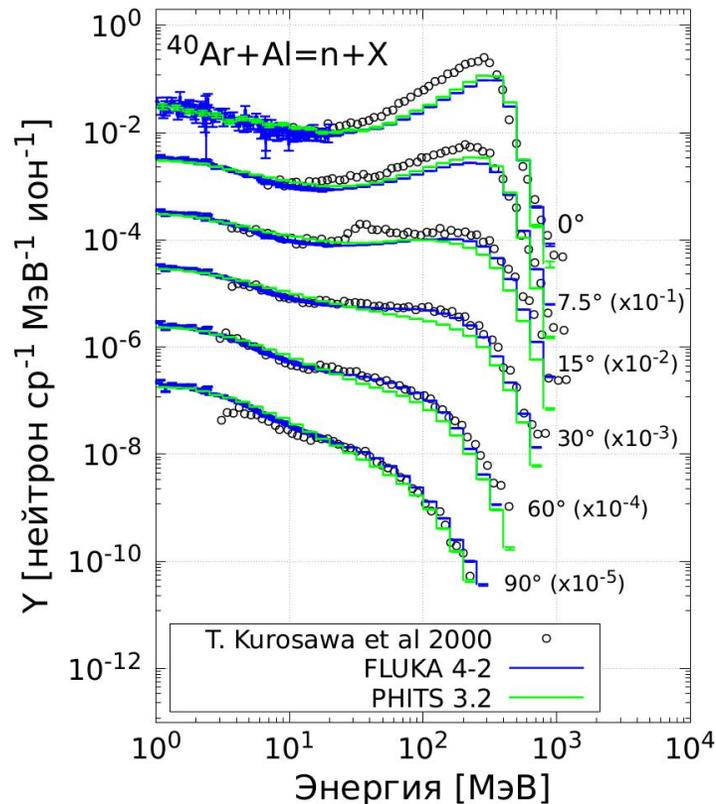
Физические модели и данные, используемые во PHITS при транспорте частиц через вещество

Был проведен ряд тестовых расчетов для проверки результатов работы кодов с экспериментальными данными.

Внутри космических аппаратов образуются нейтроны, которые будут являться значимой компонентой смешанного радиационного поля. Вклад в дозу от этой компоненты должен быть правильно оценён.

Для проверки точности воспроизведения выхода вторичных нейтронов под различными углами, было проведено сравнение с экспериментом [1]

Проверка моделей RQMD (FLUKA) и JQMD (PHITS)



Дважды дифференциальные (по углу и энергии) выходы вторичных нейтронов от 400 МэВ/н Ar (слева) и Fe (справа) на алюминии толщиной 5.55 и 3 см соответственно

[1] Neutron yields from thick C, Al, Cu, and Pb targets bombarded by 400 MeV/nucleon Ar, Fe, Xe and 800 MeV/nucleon Si ions [Text] / T. Kurosawa [et al.] // Phys. Rev. C. — 2000. — Sept. — Vol. 62, no. 4. — P. 044615.

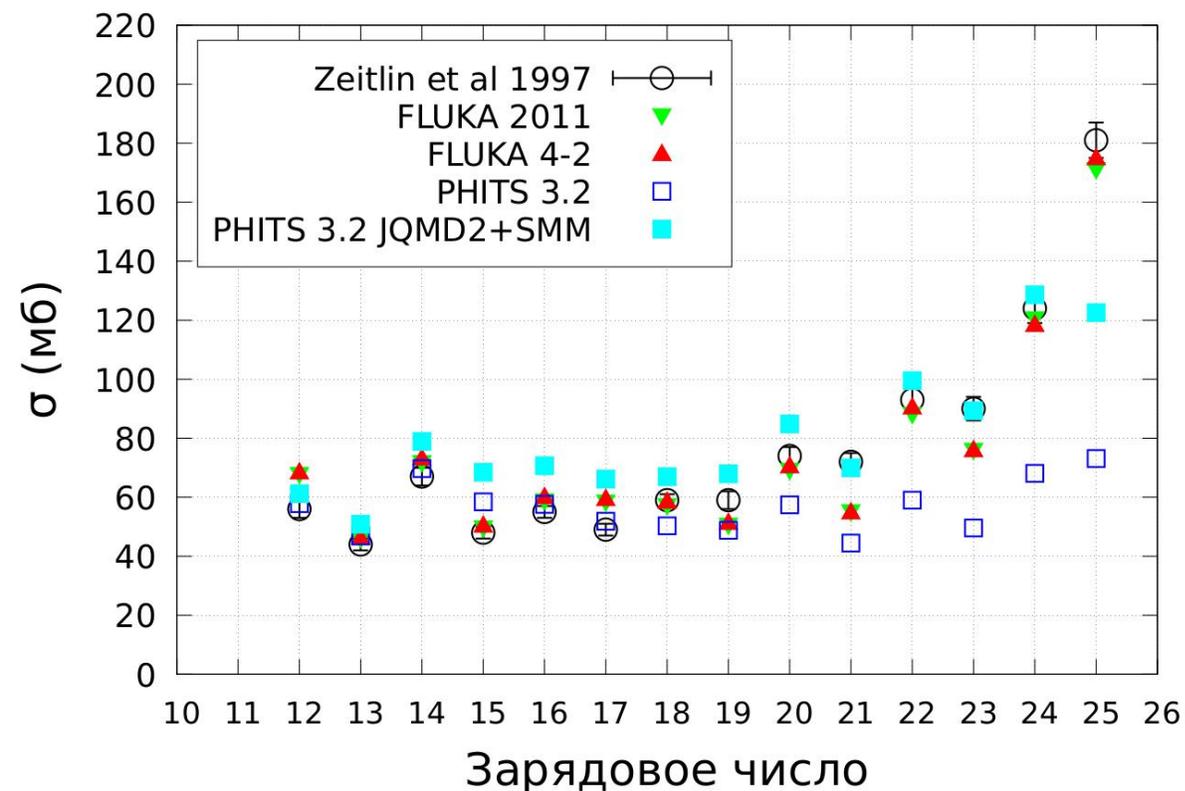
Вклад в дозу от тяжелых заряженных частиц также является значительным и важно правильно моделировать фрагментацию ядер-снарядов.

Периферийные ядро-ядерные столкновения приводят к реакциям сколов ядер-снарядов, а осколки возбуждённого ядра-мишени, в свою очередь, будут распадаться с испарением нуклонов и лёгких ядер.

Было проведено сравнение результатов расчётов с имеющимися литературными данными о сечениях фрагментации ядер железа с энергией 1.05 ГэВ/н на алюминии [1].

Проверка моделей
RQMD (FLUKA) и JQMD (PHITS)

[1] Heavy fragment production cross sections from 1.05 GeV/nucleon ^{56}Fe in C, Al, Cu, Pb, and CH_2 targets [Text] / C. Zeitlin [et al.] // Phys. Rev. C. — 1997. — July. — Vol. 56, no. 1. — P. 388—397.



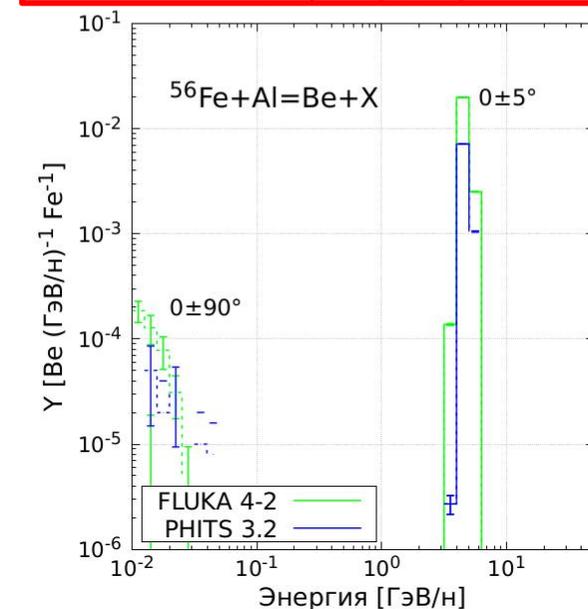
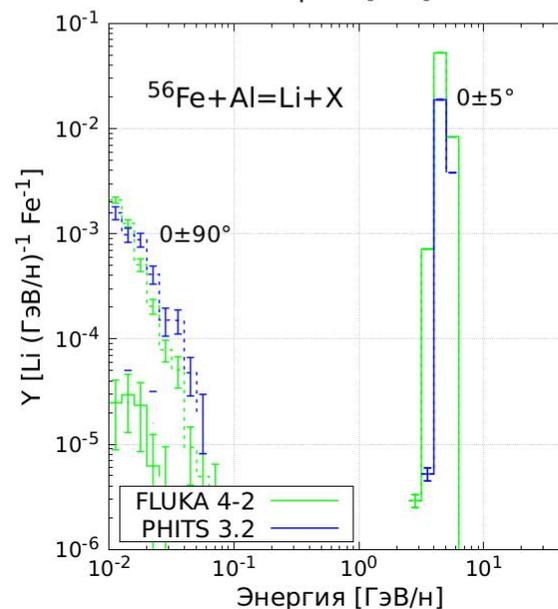
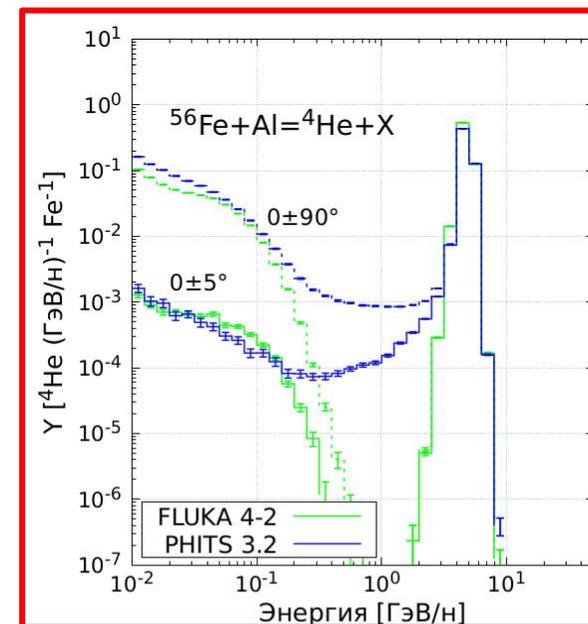
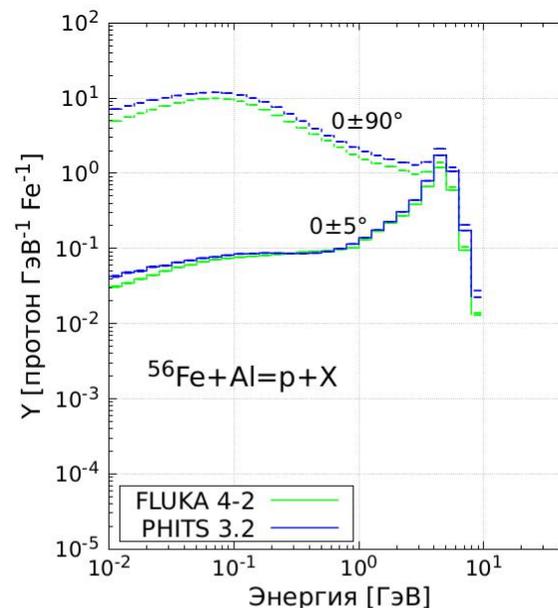
Сравнения расчетных и экспериментальных сечений фрагментации для ядер железа энергии 1.05 ГэВ/н на мишени из алюминия

Для сравнения моделей межъядерного каскада, были проведены тестовые расчеты выхода частиц из толстой мишени алюминия

На рисунке показаны выходы легких фрагментов из алюминиевой (толстой) мишени, обусловленные испарительными и каскадными процессами.

Для ядер гелия в случае PHITS есть плавный переход между низкоэнергетической испарительной частью и каскадной, а в FLUKA происходит их чёткое разделение.

Выход лёгких фрагментов в прямом направлении (раствор угла 5 градусов) и в переднюю полусферу, при взаимодействии ядер Fe энергии 5 ГэВ/н с мишенью из алюминия толщиной 15 г/см²



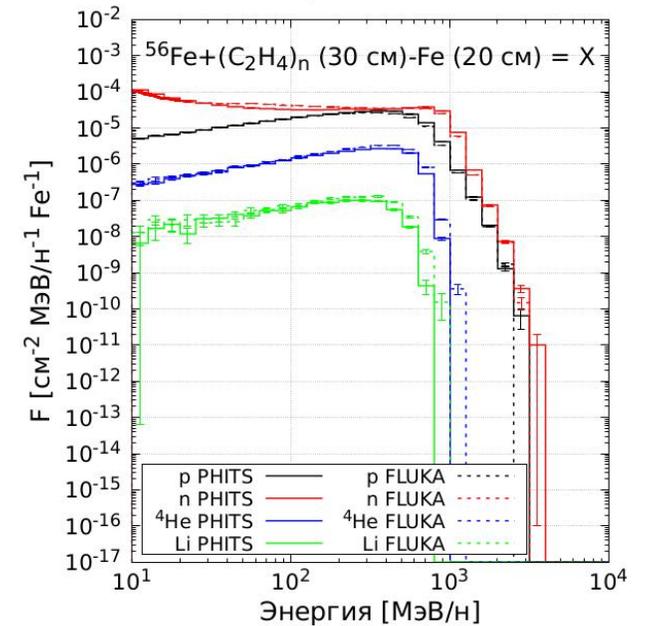
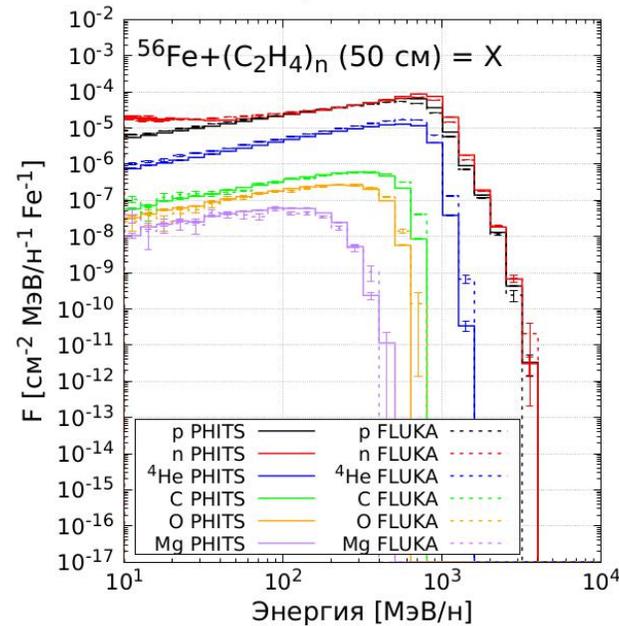
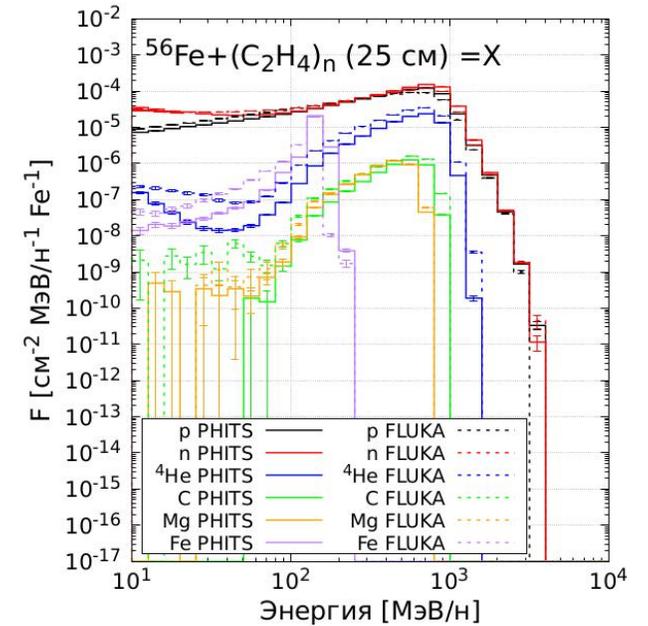
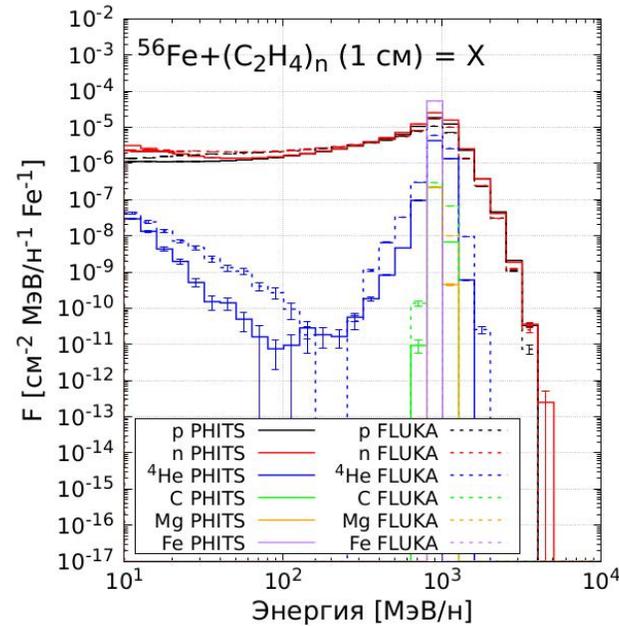
Сравнение кодов FLUKA и PHITS (выход из толстой мишени) 39

Необходимо было также проверить образование фрагментов на толстых полиэтиленовых и составных (полиэтилен+железо) мишенях.

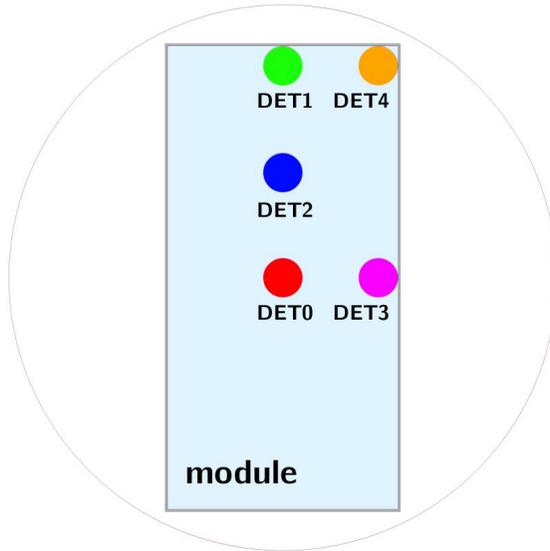
Код PHITS использовался для расчета спектров вторичного излучения за набором толстых мишеней. Результаты использовались для разработки симулятора ГКЛ.

Результаты показывают, что для данной задачи пригодны оба кода. PHITS был выбран из утилитарных соображений (лучшей эффективности).

Сравнение спектров вторичных частиц из мишеней $(C_2H_4)_n$ с толщинами 1, 25 и 50 см и составной мишени из 30 см $(C_2H_4)_n$ + 20 см железа, при взаимодействии ядер Fe энергии 1 ГэВ/н



Методика расчёта



Расположение детекторов

Зная тип иона и его энергию, шкалу можно переопределить в ЛПЭ, для этого использовалась программа АТІМА[1]. Таким образом были определены спектры $\bar{\Phi}_V(L)$

[1] <https://web-docs.gsi.de/~weick/atima/>

Спектры рассчитывались по FLUKA (оценщик USRTRACK) на равномерной логарифмической энергетической сетке $\{E_k\}$, шириной $\Delta E = E_{k+1} - E_k$. Каждая взвешенная длина пути суммируется в соответствующем энергетическом интервале, энергетический спектр среднего по объёму флюенса оценивается как:

$$\bar{\Phi}_V(E) \equiv \frac{1}{V} \int_V dV \int_{4\pi} \Phi(\mathbf{r}, E, \Omega) d\Omega \simeq \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} W_i^j S_i^j}{NV \Delta E}$$

V - любой выпуклый объем

Оценка по длине пробега

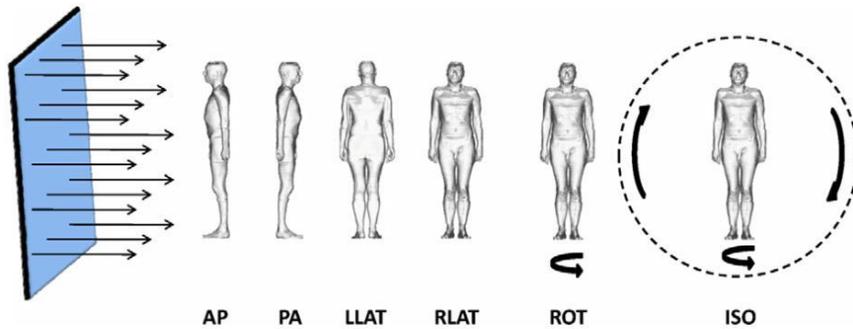
Оценщик эффективный в вычислительном плане, потому как по ходу выполнения программы длины треков в регионах просчитываются заранее.

Необходимо соблюдать компромисс: слишком маленький объём усложняет набор статистики, а слишком большой приводит к огрублению получаемых результатов. Из этих соображений диаметр для детекторов-сфер был выбран величиной в 1 метр.

Эффективная доза отражает риск возникновения отдалённых последствий облучения всего организма человека с учётом радиочувствительности отдельных органов малыми дозами.

В **Публикации 116 МКРЗ [1]** приводятся коэффициенты для возможных геометрий облучения (см. ниже), они предназначены очень широкой и произвольной категории лиц (заведомо консервативные).

Космонавты представляют собой, как правило, узкий круг лиц: никогда не курившие мужчины, в возрасте 30–60 лет [2]



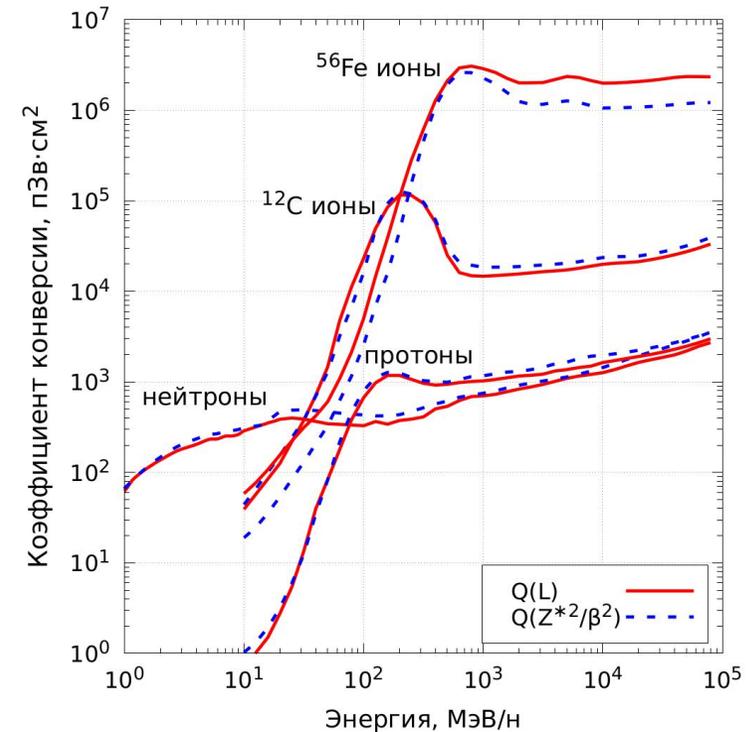
Геометрии облучения

[1] Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2–5).

[2] Timoshenko, G. N. Fluence-to-effective dose conversion coefficients for male astronauts // Journal of radiological protection (2019) Vol. 39, issue 2, P. 511—521.

Эффективная доза для частиц j определяется через свёртку спектров с соответствующими коэффициентами:

$$D_{j,\text{эфф.}} = \sum_k^N \Phi_{j,k}(E_k) c_{j,k}(E_k) \Delta E_k$$



Примеры коэффициентов конверсии флюенс-эффективная доза для космонавтов на основе различных физических характеристик

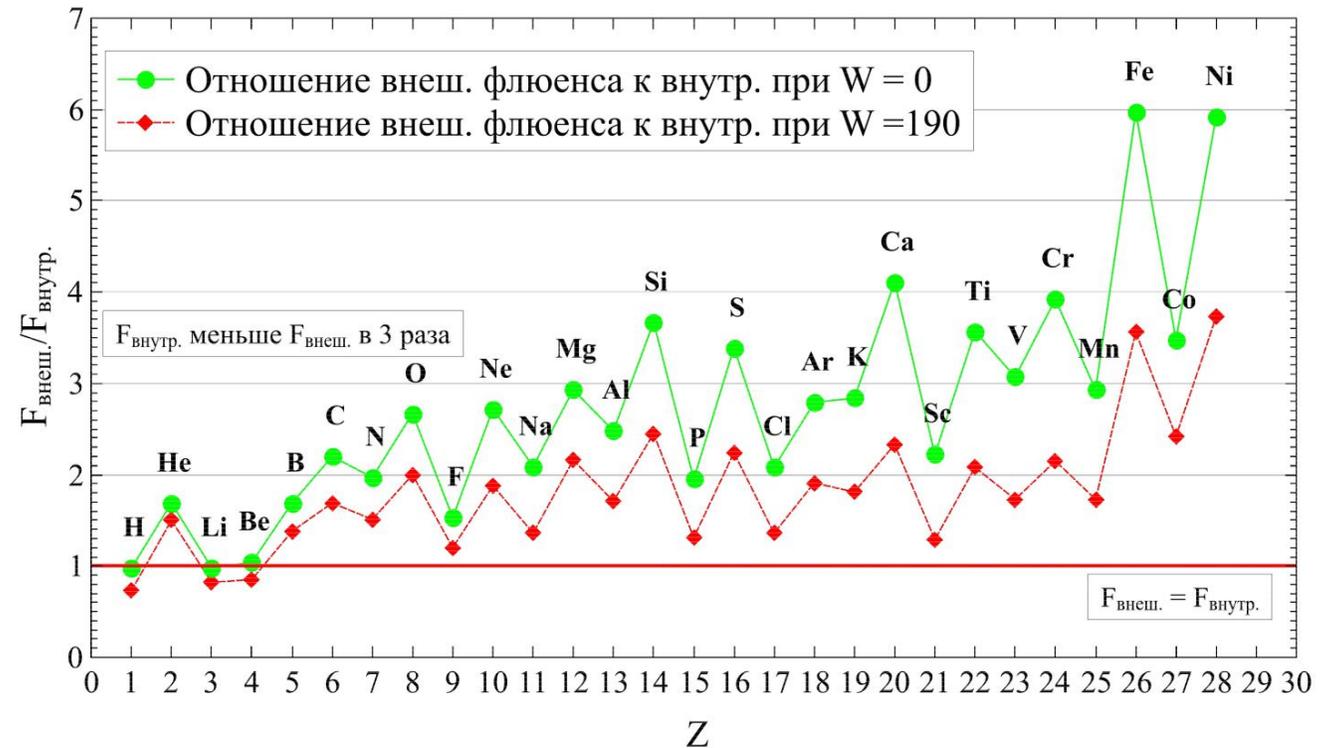
Результаты моделирования внутреннего радиационного поля космического аппарата

Были получены спектры частиц внутреннего смешанного радиационного поля: p , n , γ , e^\pm , μ^\pm , π^\pm , K^\pm , d , t и частицы с Z от 2 до 28.

Отношение флюенса тяжёлых ядер во внутреннем поле увеличивается по мере роста Z , особенно сильно в мин. СА (для ядер Fe и Ni в 6 раз).

Увеличение флюенса лёгких частиц (p , Li, Be) во внутреннем поле излучения происходит вследствие фрагментации первичных частиц ГКЛ. При макс. СА отношение увеличивается медленнее с ростом Z , ввиду более жестких спектров частиц ГКЛ.

Вклад нейтронов во внутреннем поле составляет около **30%** по флюенсу и практически не зависит от СА.



Отношение флюенсов первичных частиц ГКЛ (внешний флюенс) и частиц внутри модуля (внутренний флюенс) при мин. ($W = 0$) и макс. ($W = 190$) СА

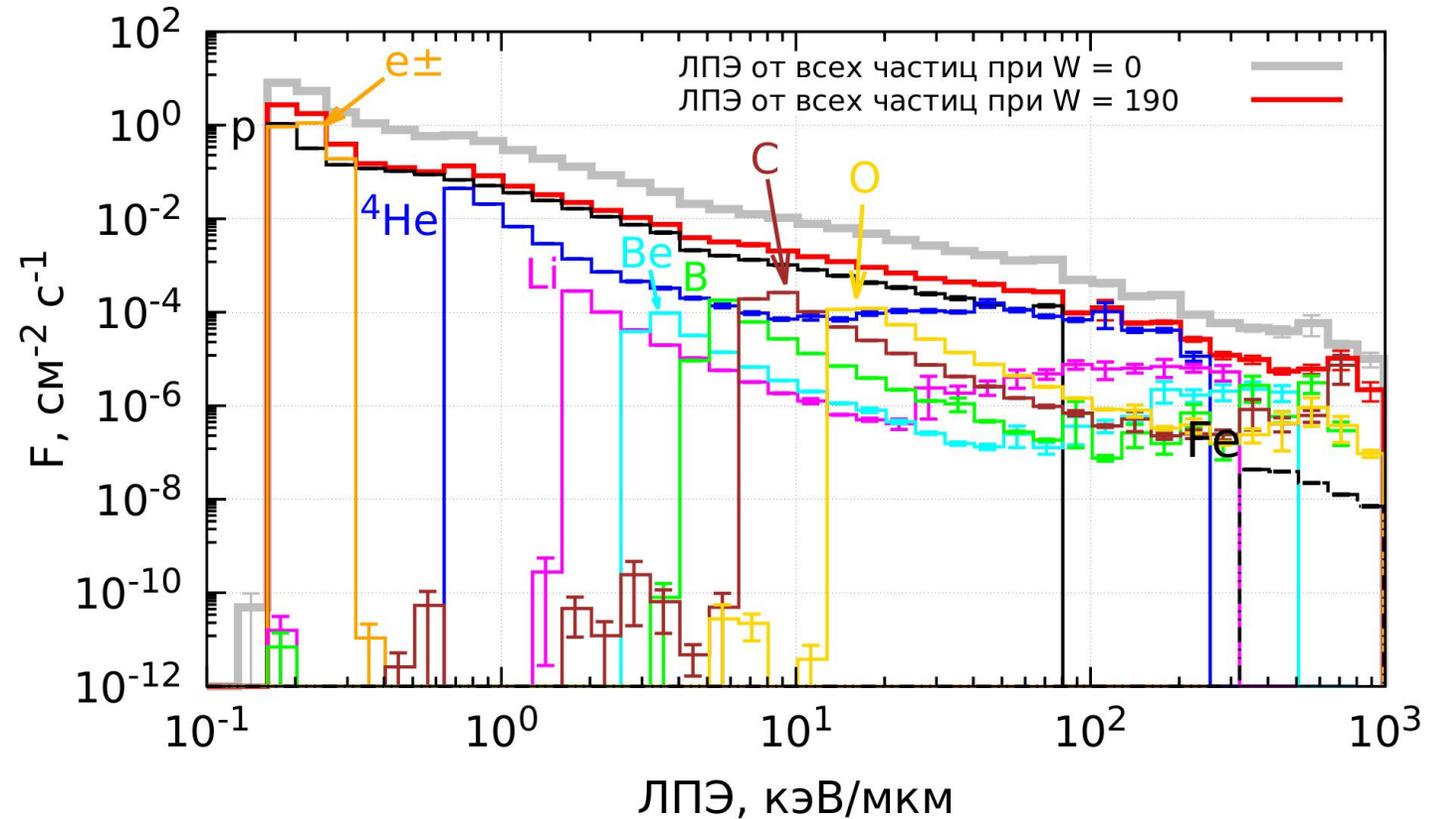
Результат: оболочка 15 г/см^2 является **размножающей мишенью**, т. е. внутри модуля возрастает количество лёгких частиц, в особенности: протонов, лёгких ядер лития и бериллия, а также возникают новые частицы: n , γ , e^\pm , μ^\pm , π^\pm , K^\pm .

Для максимума СА показаны наиболее значимые вклады (при минимуме СА наблюдается аналогичная ситуация).

Различимы пики:

- В области низкой ЛПЭ (0.15–0.3 кэВ/мкм) протоны и e^\pm , спектр протонов достигает значений вплоть до 79 кэВ/мкм.
- Пик от ядер ^4He находится вблизи $\sim 0.63\text{--}1.25$ кэВ/мкм и простирается до значения 251 кэВ/мкм.

Наиболее интересным является то, что спектры даже относительно лёгких ядер Be, B, а также более тяжёлых C и O достигают крайне высоких значений ЛПЭ: **вплоть до 500–1000 кэВ/мкм**. Наиболее тяжёлые частицы с Z от 20 до 28 вносят вклад только в ЛПЭ свыше 125 кэВ/мкм.

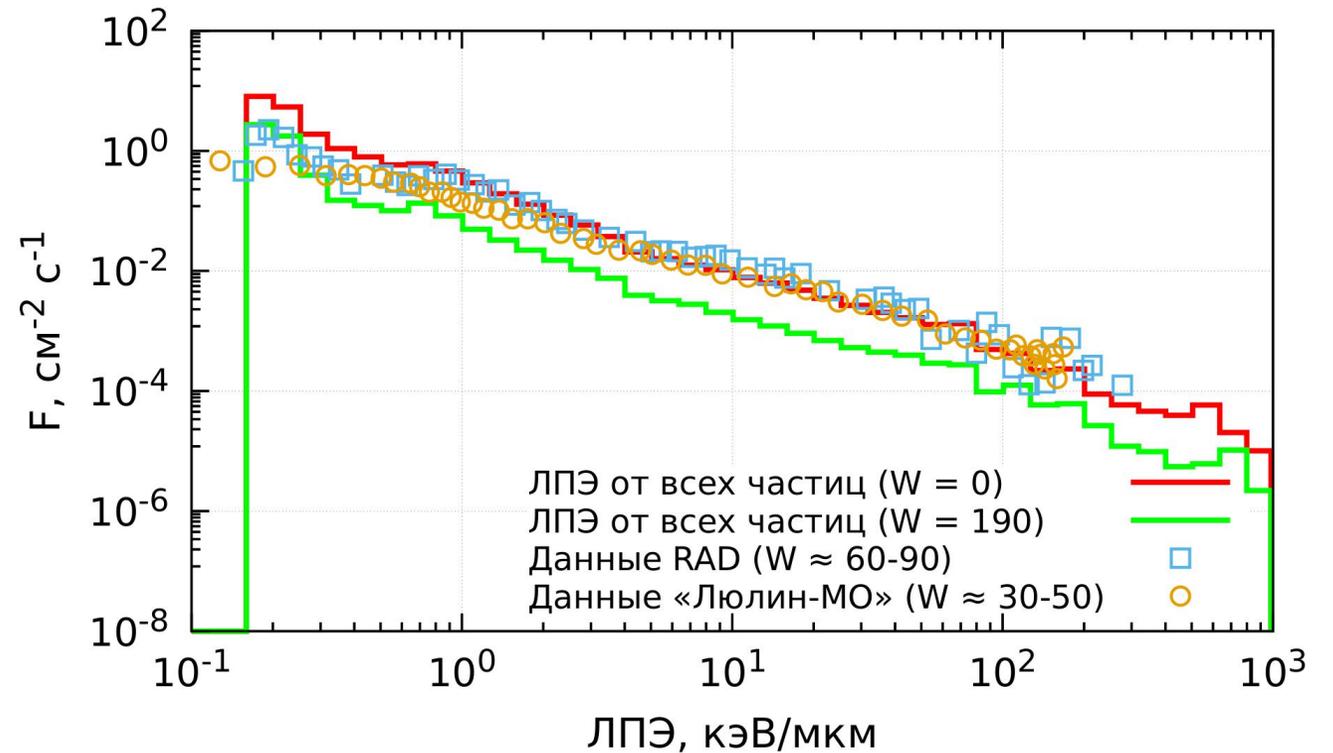


Суммарные расчетные спектры ЛПЭ (в воде) при мин. ($W = 0$) и макс. ($W = 190$) СА, с парциальными вкладами от некоторых частиц в общий спектр при макс. СА

Результат: детально показан вклад каждой частицы в суммарный спектр ЛПЭ

Отличия обуславливаются различием в толщине защиты на аппаратах, которая варьируется в пределах: $\sim 20\text{--}27.5$ г/см² для RAD [1] и $1\text{--}70$ г/см² (в среднем ~ 10 г/см²) для «Люлин-МО» [2] и толщиной оболочки, принятой в расчёте 15 г/см², а также периодом СА в измерениях и в расчёте.

Данные RAD и «Люлин-МО» по ЛПЭ в воде получаются путём конвертации dE/dx в кремнии, где для перевода dE/dx в кремнии в ЛПЭ в воде используется постоянный коэффициент 1.38 ± 0.08 .



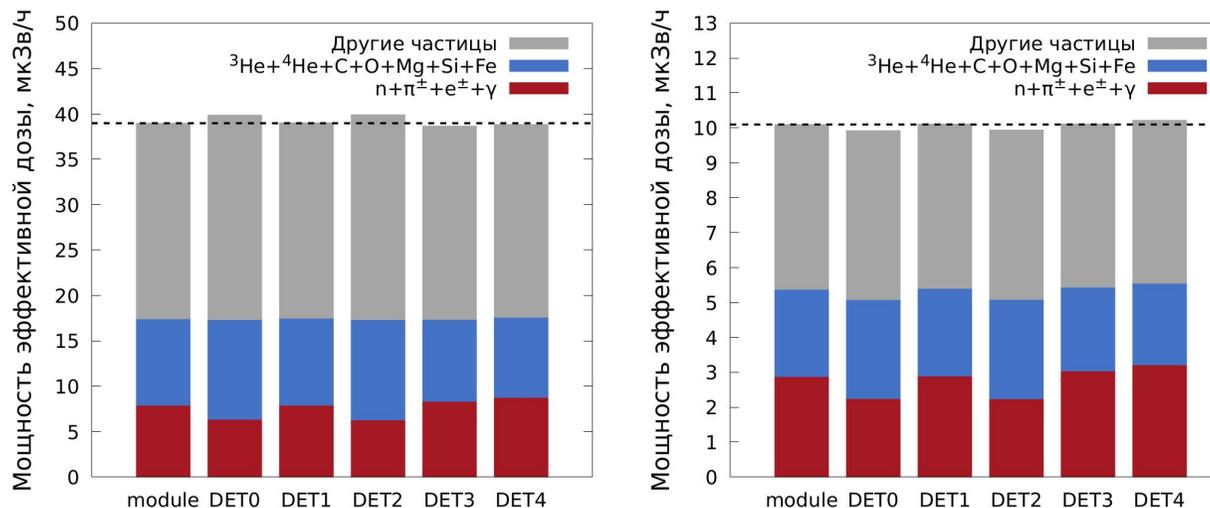
Сравнение расчётных суммарных спектров ЛПЭ (в воде) при минимуме ($W = 0$) и максимуме ($W = 190$) СА с измерениями RAD [1] и «Люлин-МО» [2]

[1] Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover [Text] / D. M. Hassler [et al.] // Science. — 2014. — Jan. — Vol. 343, no. 6169. — P. 1244797.

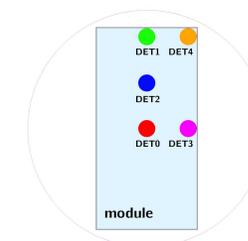
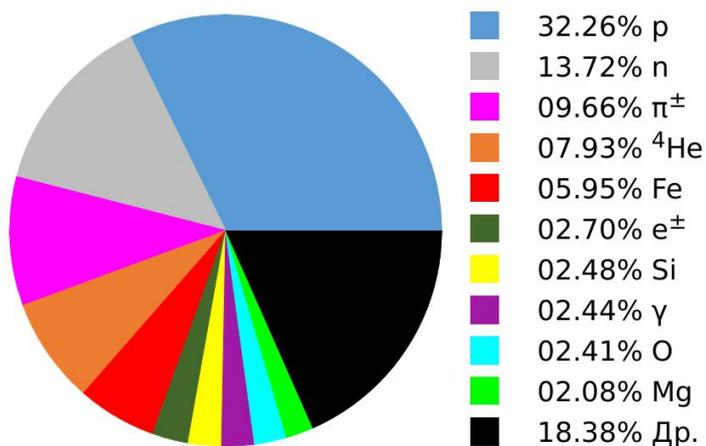
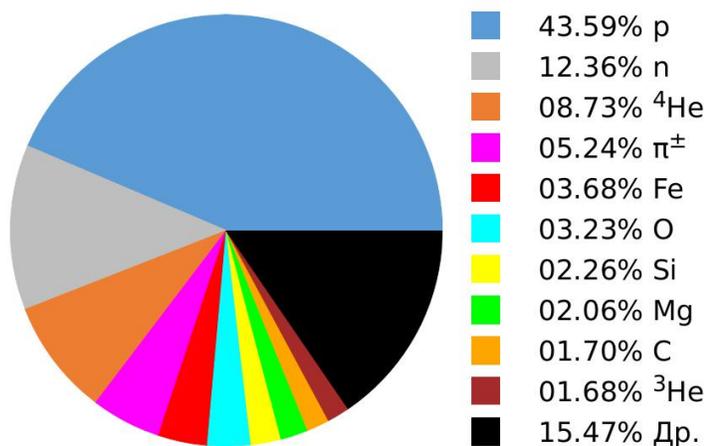
[2] Charged particles radiation measurements with Liulin-MO dosimeter of FRENDO instrument aboard ExoMars Trace Gas Orbiter during the transit and in high elliptic Mars orbit [Text] / J. Semkova [et al.] // Icarus. — 2018. — Vol. 303. — P. 53—66.

В целом, суммарная доза по всем частицам, при различных положениях внутри модуля меняется незначительно.

Наибольший вклад в дозу вносят: протоны (~32–48 %) и нейтроны (~12–16 %), а также π^\pm -мезоны (~5–10 %), вклад от ядер ^4He ~8–9.4 %.



Вклады частиц в суммарную эффективную дозу в зависимости от положения внутри модуля при мин. (слева) и макс. (справа) СА



Вклады в суммарную эффективную дозу (на основе Q(L)) частиц внутреннего радиационного поля модуля космического корабля при мин. (слева) и макс. (справа) СА

Суммарная доза зависит от времени транзита и пребывания, в таблице приведены результаты расчета и измерений прибора RAD [1]

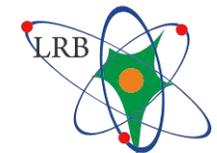
При отсутствии в период миссии мощных протонных событий на Солнце суммарный риск космонавтов за всю миссию не превысит регламентированного НАСА 3-х процентного значения (3% REID – «Risk of Exposure Induced Death»).

Таким образом, даже при наихудшем сценарии доза для космонавтов в ходе марсианской миссии не превысит принятые в России нормативы. Результаты были опубликованы в статье [2].

Сравнение полученных в расчёте значений доз с измерениями прибора RAD [1] при различной солнечной активности

	Мин. СА ($W \sim 6$) RAD	Мин. СА ($W = 0$) расчёт	Макс. СА ($W \sim 86$) RAD	Макс. СА ($W = 190$) расчёт
Транзит (2×180 дней)	0.64–0.80 Зв	0.35–0.4 Зв	0.57 Зв	0.09–0.1 Зв
Пребывание (500 дней)	0.36 Зв	0.36 Зв	0.32 Зв	0.32 Зв
Суммарная доза	1–1.2 Зв	0.71–0.76 Зв	0.9 Зв	0.41–0.42 Зв

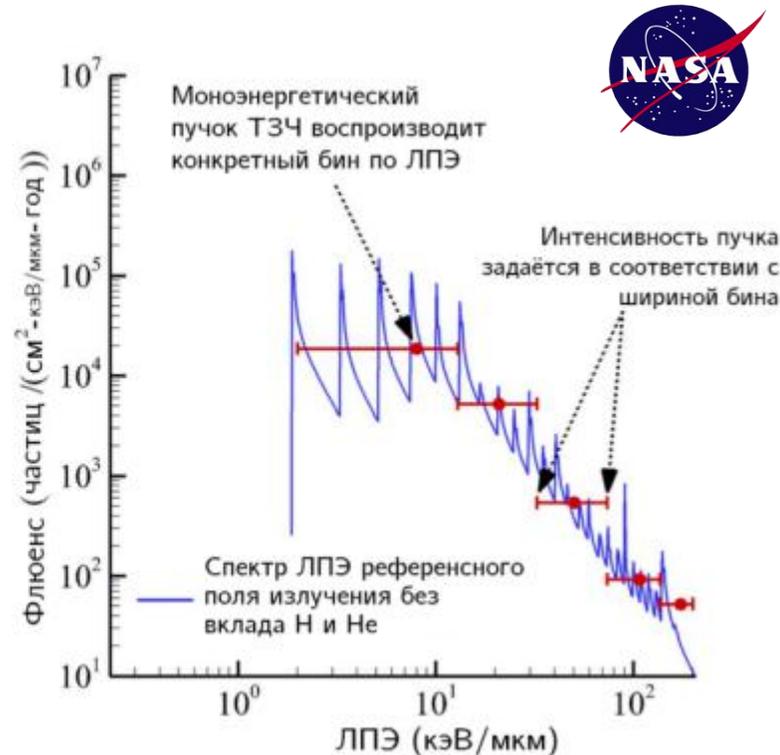
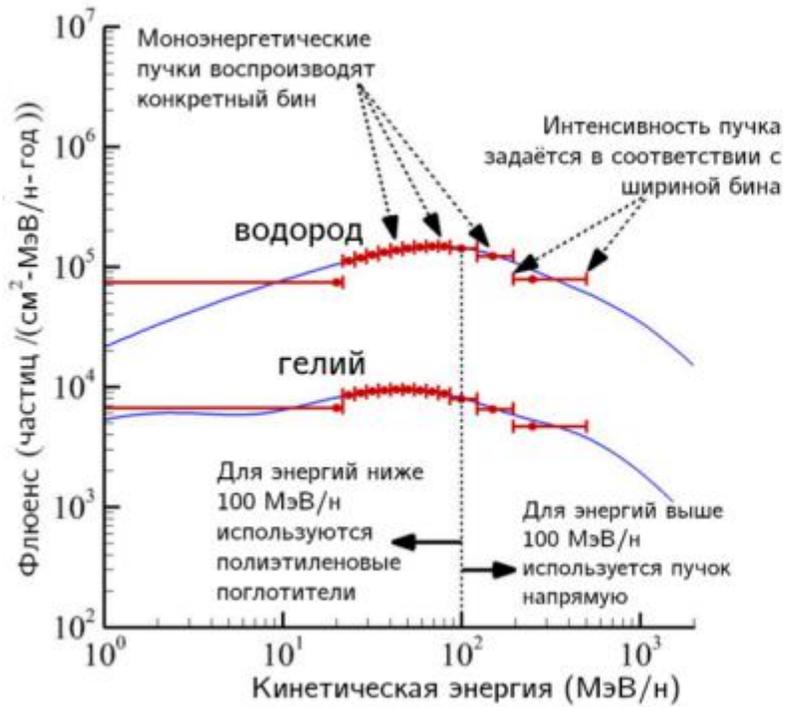
Для всех вычислений была задействована платформа HybriLIT ЛИТ и сервера ЛРБ ОИЯИ.



[1] Mars' Surface Radiation Environment Measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover [Text] / D. M. Hassler [et al.] // Science. — 2014. — Jan. — Vol. 343, no. 6169. — P. 1244797.

[2] Timoshenko, G. N. Estimation of the Astronaut's Doses inside the Spacecraft Habitable Module in Deep Space [Text] / G. N. Timoshenko, **I. S. Gordeev** // Physics of Particles and Nuclei. — 2020. — Vol. 51, no. 5. — P. 988—993.

Моделирование смешанного поля излучения на ускорителях заряженных частиц



Активный подход - параметры пучка меняются за время облучения

Ключевые особенности

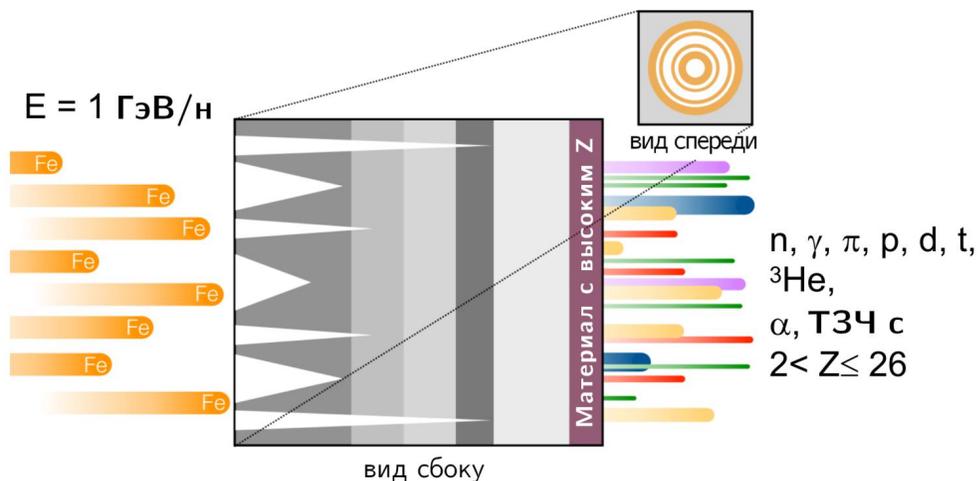
- Сложно реализовать на других ускорительных комплексах
- Спектры квазинепрерывные
- Облучение является скорее последовательным, нежели одновременным

Смешанное поле излучения, имитирующее радиационную обстановку в космосе, создается при помощи быстро сменяющихся пучков: меняется как тип, так и энергия частиц в пучке [1,2]

[1] NASA's first ground-based Galactic Cosmic Ray Simulator: Enabling a new era in space radiobiology research [Text] / L. C. Simonsen [et al.] // PLOS Biology. — 2020. — May. — Vol. 18, no. 5. — e3000669.

[2] Galactic cosmic ray simulation at the NASA space radiation laboratory - Progress, challenges and recommendations on mixed-field effects [Text] / J. L. Huff [et al.] // Life Sciences in Space Research. — 2022.

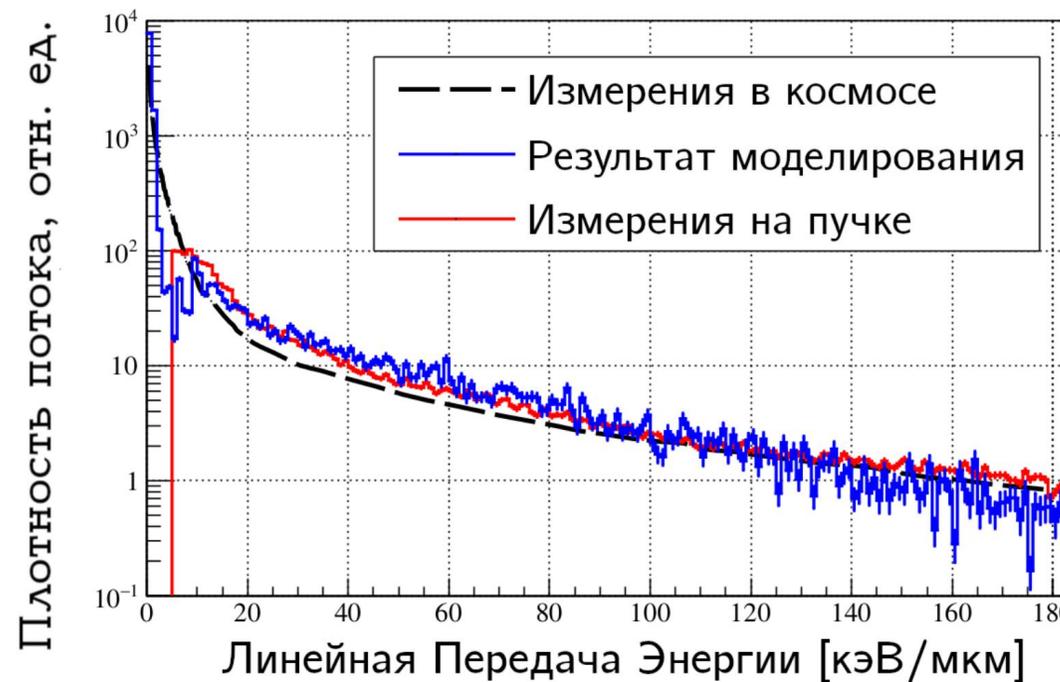
Смешанное поле излучения создается одним моноэнергетическим пучком Fe, падающим на специальный «модерирующий блок» (конвертер)



Ключевые особенности

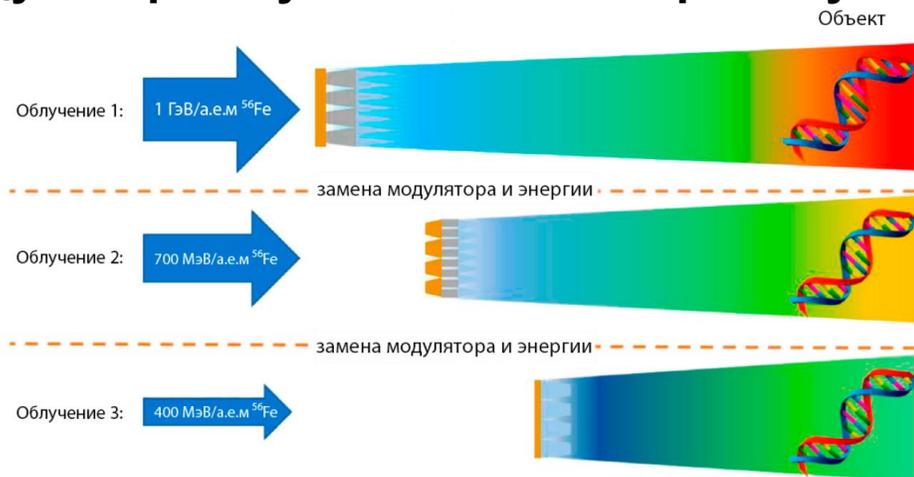
- Конкретная конструкция «модерирующего блока» (конвертера) не раскрывается (запатентована) [1]
- Авторы заявляют об успешном воспроизведении лишь **суммарного** спектра ЛПЭ (могут отсутствовать некоторые частицы и энергии (?))
- Поле вторичных частиц за конвертером может быть неоднородно в области облучения

Пассивный подход - пучок остаётся неизменным в течение всего сеанса облучения



[1] Подобный суммарный спектр ЛПЭ может быть воспроизведен протонами и ядрами гелия с широкими энергетическими спектрами [какие ТЗЧ?]

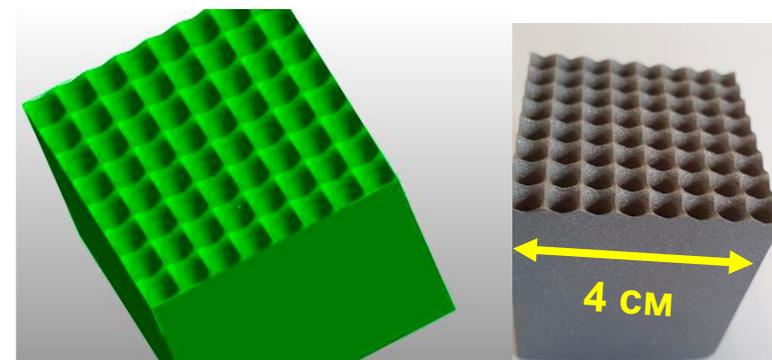
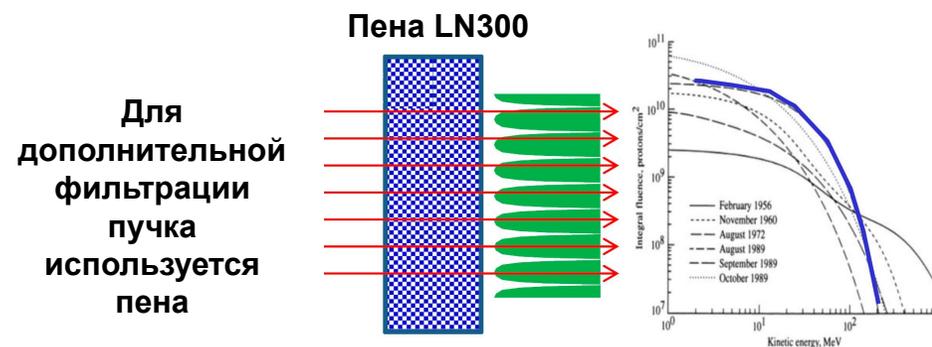
Для смешанного поля излучения используется комбинация геометрически сложных, пассивных модуляторов пучка и смена энергии пучка



Ключевые особенности

- Сложность создания однородного поля вторичных частиц за модуляторами
- Тестирование проводилось только для спектра протонов (СПС), подходит ли для моделирования ГКЛ?
- Изготовление модуляторов является сложным и требует высокой точности (используется 3D-принтер)
- Облучение является скорее последовательным, нежели одновременным

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



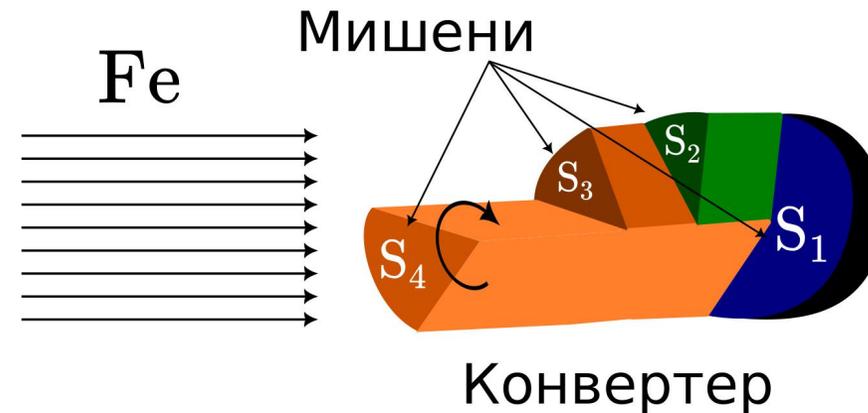
Первая версия симулятора воспроизводит только спектр протонов СПС



Предлагаемый симулятор ГКЛ описывается СЛАУ

$$f_w P = J$$

Схема конструкции конвертера



3D визуализация симулятора ГКЛ

$$f_w = \begin{pmatrix} \frac{f_{1,D_1}}{F_{1,ref}} & \frac{f_{1,D_2}}{F_{1,ref}} & \dots & \frac{f_{1,D_N}}{F_{1,ref}} \\ \frac{f_{2,D_1}}{F_{2,ref}} & \frac{f_{2,D_2}}{F_{2,ref}} & \dots & \frac{f_{2,D_N}}{F_{2,ref}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{f_{26,D_1}}{F_{26,ref}} & \frac{f_{26,D_2}}{F_{26,ref}} & \dots & \frac{f_{26,D_N}}{F_{26,ref}} \end{pmatrix}$$

матрица взвешенных с референсными значениями флюенсов

$$P = \begin{pmatrix} P_{D_1} \\ P_{D_2} \\ \vdots \\ P_{D_N} \end{pmatrix} \quad J = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

Параметры модели (площадь и экспозиция)

S_i — занимаемая i -ой мишенью площадь сектора

- Конвертер C_j — составной из мишеней D_i цилиндр,
- Мишень — цилиндрический сегмент определённой толщины D_i (гомогенный или гетерогенный).

[1] **Gordeev, I. S.** A new type of ground-based simulator of radiation field inside a spacecraft in deep space [Text] / **I. S. Gordeev**, G. N. Timoshenko // Life Sciences in Space Research. — 2021. — Vol. 30. — P. 66—71.

$$\underline{f_w} \mathbf{P} = \mathbf{J}$$

$$f_w = \begin{pmatrix} \frac{f_{1,D_1}}{F_{1,ref}} & \frac{f_{1,D_2}}{F_{1,ref}} & \dots & \frac{f_{1,D_N}}{F_{1,ref}} \\ \frac{f_{2,D_1}}{F_{2,ref}} & \frac{f_{2,D_2}}{F_{2,ref}} & \dots & \frac{f_{2,D_N}}{F_{2,ref}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{f_{26,D_1}}{F_{26,ref}} & \frac{f_{26,D_2}}{F_{26,ref}} & \dots & \frac{f_{26,D_N}}{F_{26,ref}} \end{pmatrix}$$

матрица флюенсов, взвешенных с соответствующими референсными значениями

$$f = \begin{pmatrix} f_{1,D_1} & f_{1,D_2} & \dots & f_{1,D_N} \\ f_{2,D_1} & f_{2,D_2} & \dots & f_{2,D_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{26,D_1} & f_{26,D_2} & \dots & f_{26,D_N} \end{pmatrix}$$

Составлена делением построчно матрицы флюенсов вторичных частиц за мишенями на элементы вектора референсных значений

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_{1,ref} \\ F_{2,ref} \\ \vdots \\ F_{26,ref} \end{pmatrix}$$

Вектор референсных значений



PHITS

Значения флюенса вторичных частиц (на один ион) за мишенями толщины D_i .

Данные получены по PHITS 3.20 (JQMD + GEM и JAMQMD + GEM)



Референсные значения – флюенс частиц в космическом аппарате (результаты расчетов).

Значения могут быть заданы для макс. или мин. СА, либо другим произвольным образом, в зависимости от цели моделирования

$$f_w \underline{\mathbf{P}} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{D_1} \\ P_{D_2} \\ \vdots \\ P_{D_N} \end{pmatrix}$$

Параметры модели.
Отвечают за вклад флюенса
каждой мишени в суммарное
поле облучения за
симулятором

N – число мишеней
в конвертере C_j

K – число
конвертеров в
симуляторе

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

$$\sum_{i=1}^N a_{C_j, D_i} = A_{tot}$$

a_{C_j, D_i} – площадь сектора
мишени D_i в конвертере C_j

A_{tot} – площадь торца
конвертера

$$\sum_{j=1}^K t_{C_j} = T_{tot}$$

t_{C_j} – время экспозиции
конвертера C_j

T_{tot} – общее время
экспозиции симулятора

$$I = \sum_{i=1}^N P_{D_i}, \quad \mathbf{P} = \begin{pmatrix} P_{D_1} \\ P_{D_2} \\ \vdots \\ P_{D_N} \end{pmatrix} I^{-1}.$$

Число I – интенсивность (c^{-1})
гипотетического пучка ускорителя,
при которой обеспечивается
необходимое радиационное поле

Нормировка

$$\sum_{i=1}^N \frac{a_{C_j, D_i}}{A_{tot}} = \sum_{i=1}^N a'_{C_j, D_i} = 1$$

$$\sum_{j=1}^K \frac{t_{C_j}}{T_{tot}} = \sum_{j=1}^K t'_{C_j} = 1$$

$$f_{\mathbf{w}}\mathbf{P} = \mathbf{J}$$

Оптимизация (NNLS)

$$\arg \min_p \|\mathbf{f}_{\mathbf{w}}\mathbf{P} - \mathbf{J}\|_2, \quad p \geq 0$$

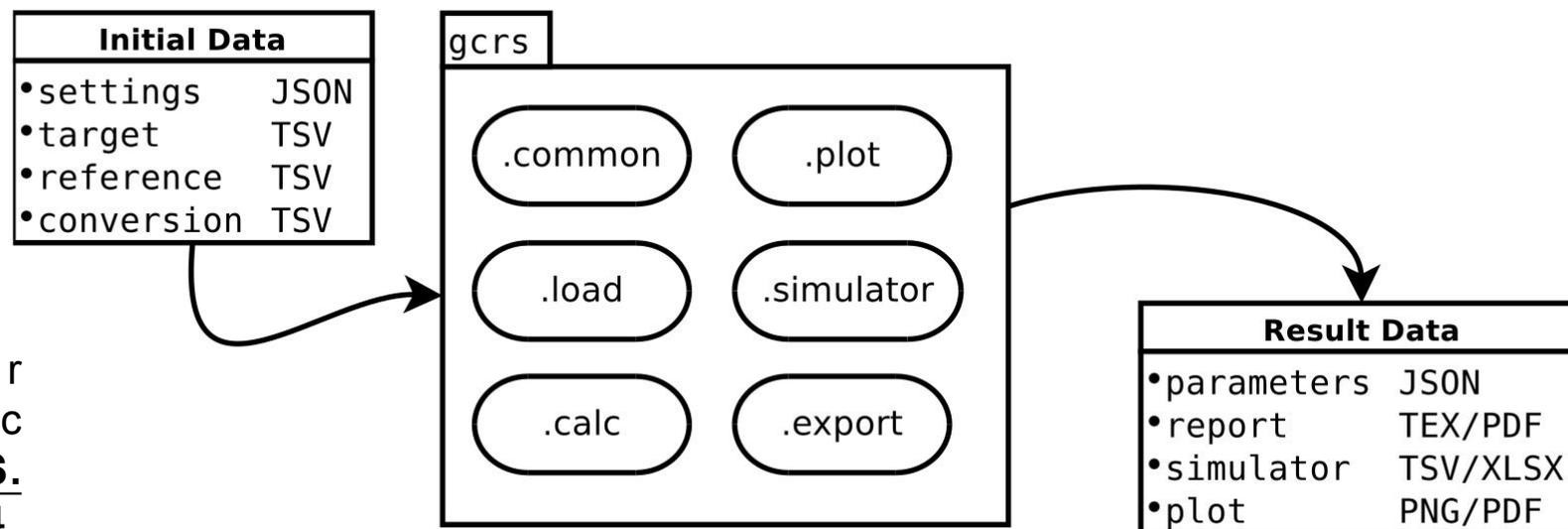
Задача подбора оптимальных параметров модели решается путём математической оптимизации, методом неотрицательных наименьших квадратов (NNLS), т. к. компоненты вектора-столбца \mathbf{P} не могут быть отрицательными.

Алгоритм NNLS был предложен Лоусоном и Хэнсоном [1]. Реализация этого алгоритма доступна на языке Python в модуле SciPy как функция `optimize.nnls`, которая является обёрткой оригинального Fortran кода.

[1] Lawson, C. L. Solving least squares problems [Text] / C. L. Lawson, R. J. Hanson // Journal of the American Statistical Association. — 1997. — Vol. 72, no. 360. — P. 930—931.

Изложенная выше модель реализована в специально разработанном программном обеспечении (ПО). ПО является Python 3 пакетом (с названием **gcrs**), который содержит набор специальных модулей с функциями, отвечающими за обработку и отображение данных.

На исходный код программы были получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. Описание математической модели и разработанного кода приведено автором в публикации [1]. Разработка кода продолжается.



[1] **Gordeev, I. S.** Computer modeling of a new type galactic cosmic rays simulator [Text] / **I. S. Gordeev**, A. N. Bugay. — 2024. Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research [E11-2024-17]. Submitted to «Computer Physics Communications».

Схема структуры исходного кода программного обеспечения для компьютерного моделирования симулятора ГКЛ

Далее показаны результаты моделирования для предлагаемой схемы симулятора

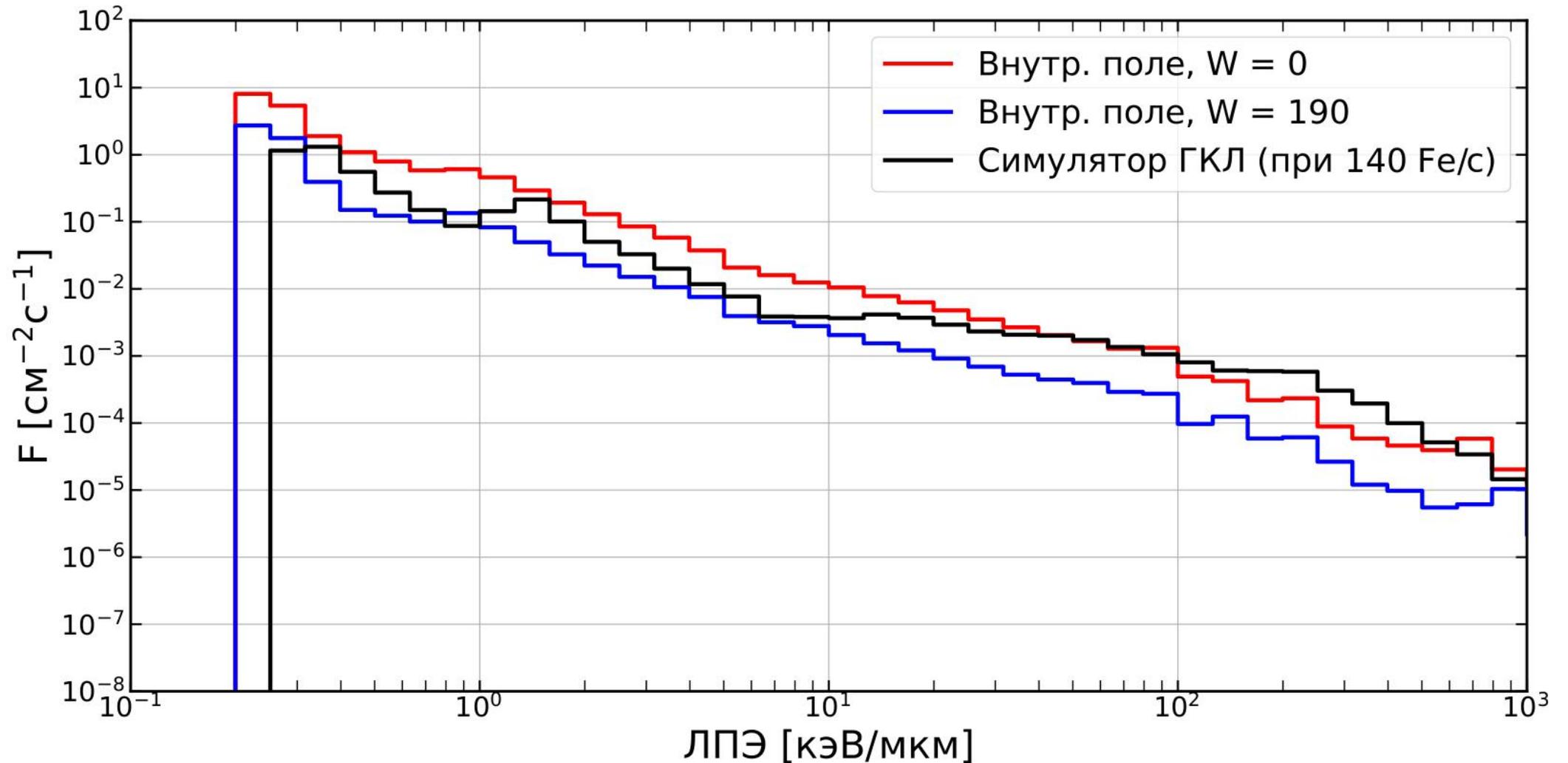
Путем компьютерного моделирования показано, что предлагаемая схема позволяет корректно воспроизводить частицы смешанного радиационного поля по зарядовому числу.

№ конвертера C_j	Кол-во мишеней	Толщина мишени, D_i (см)	Доля по площади, a'_{C_j, D_i}	Доля по 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

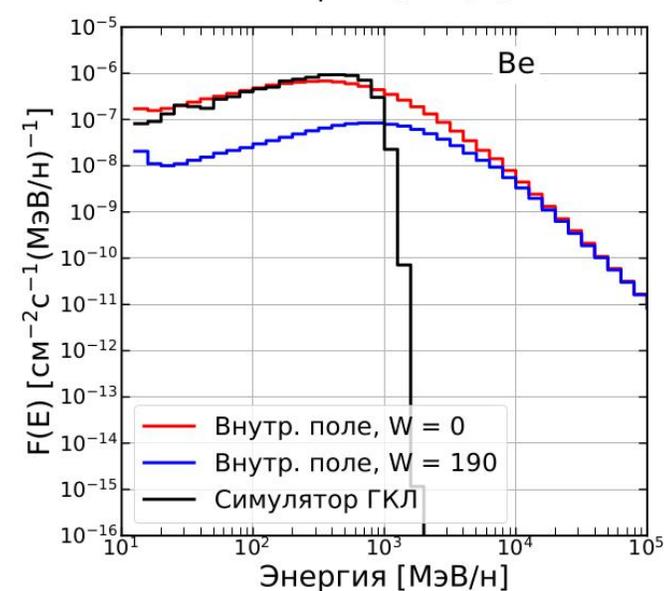
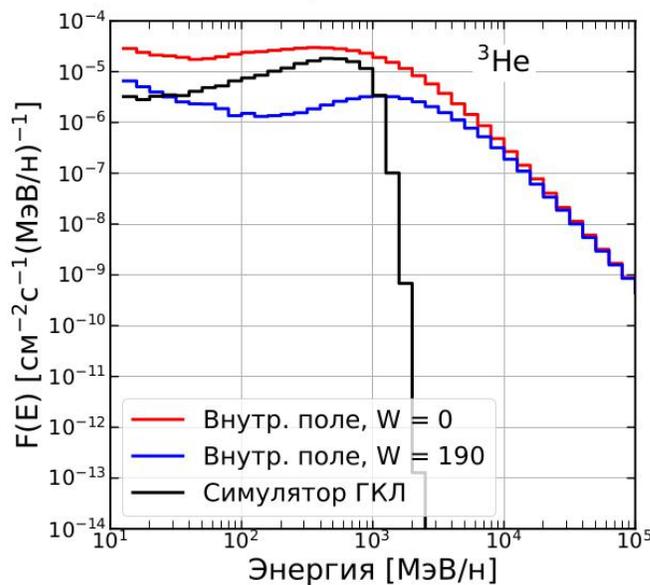
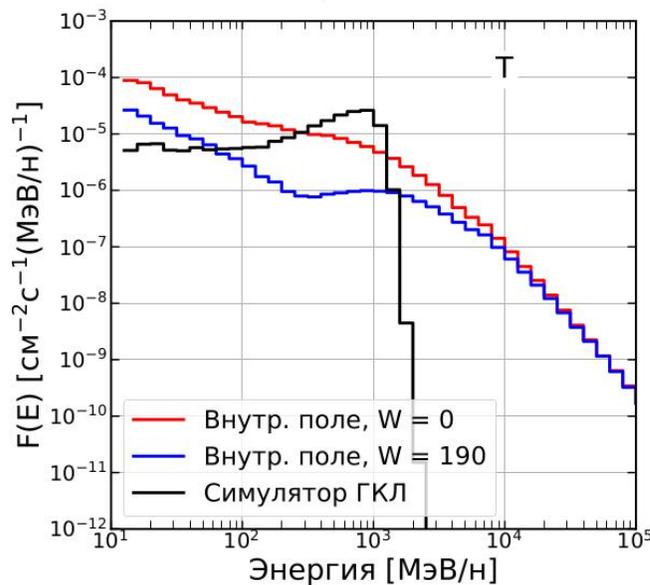
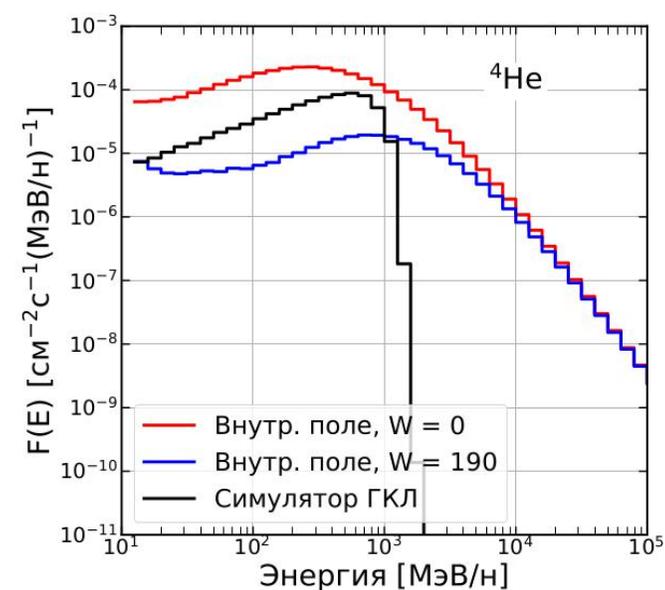
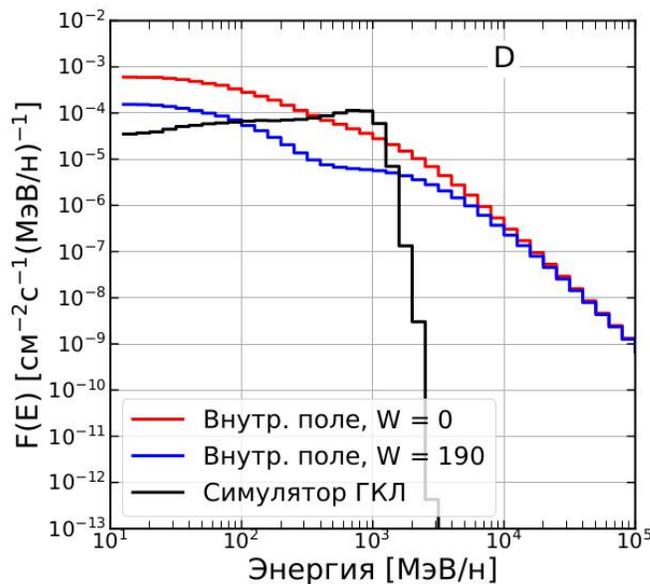
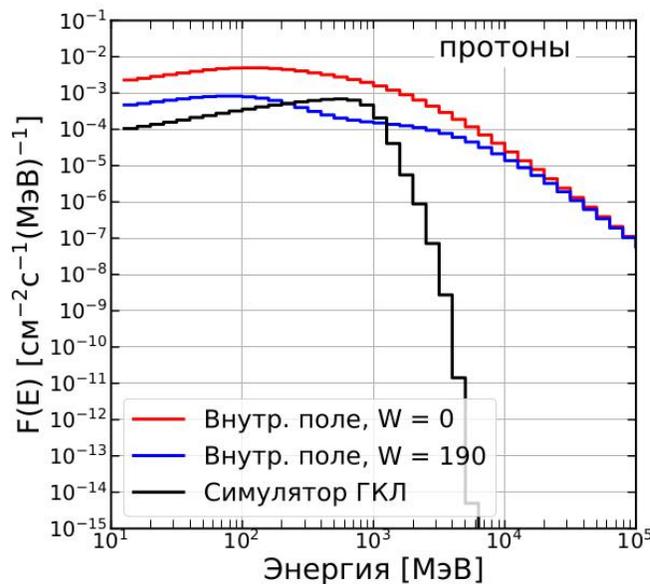


Сравнение зарядового распределения компонентов внутреннего радиационного поля космического аппарата (расчетных) при мин. ($W = 0$) и макс. ($W = 190$) СА с распределением от симулятора ГКЛ

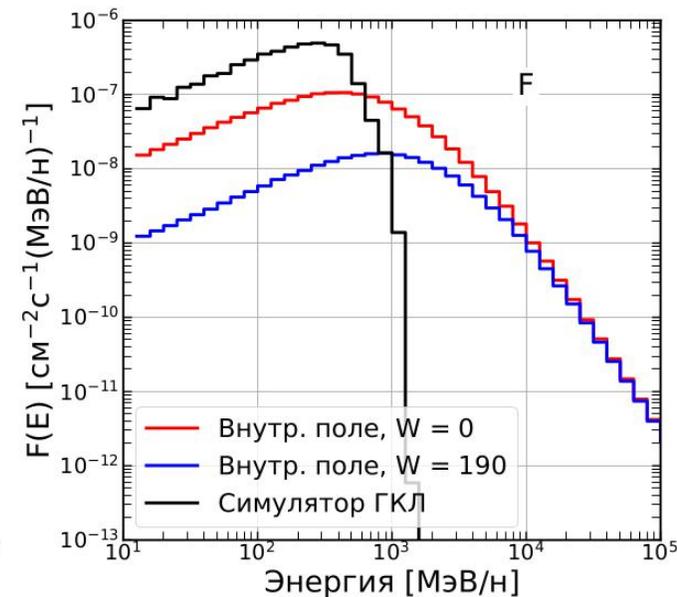
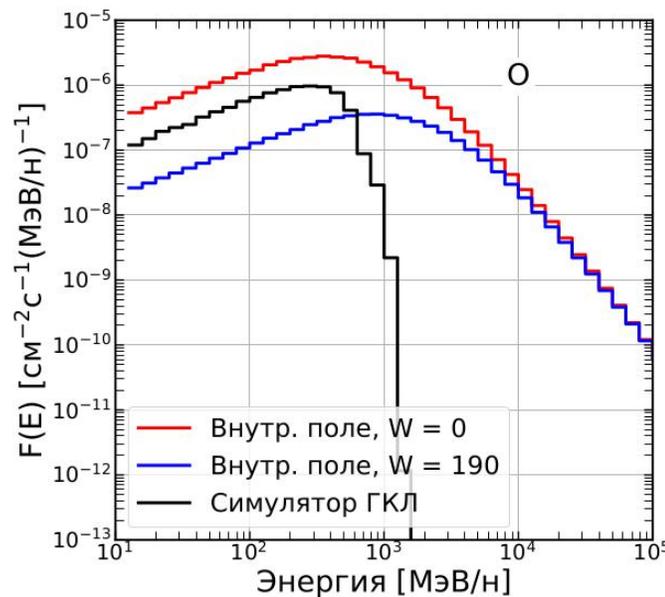
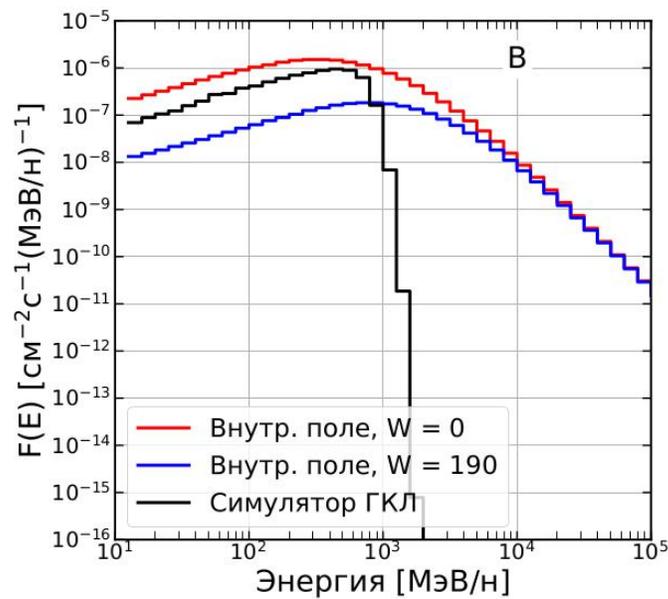
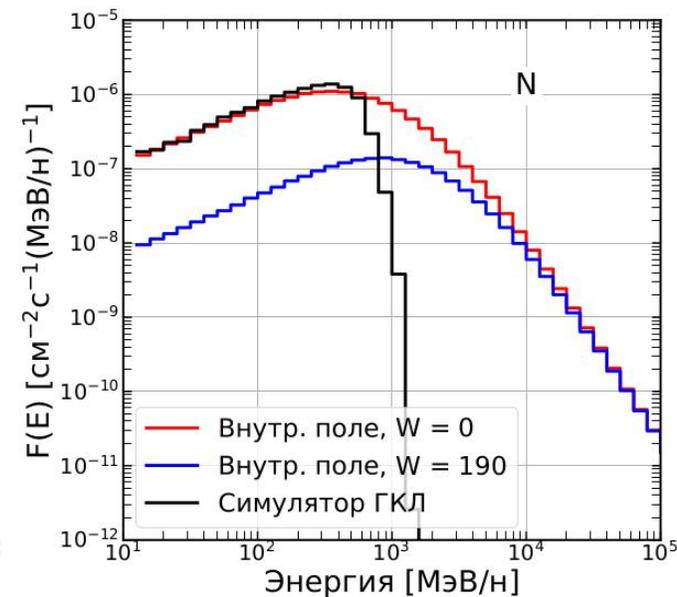
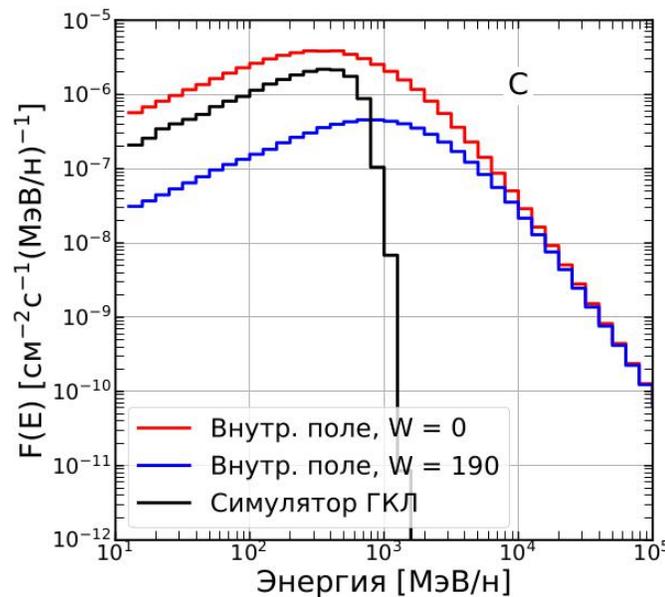
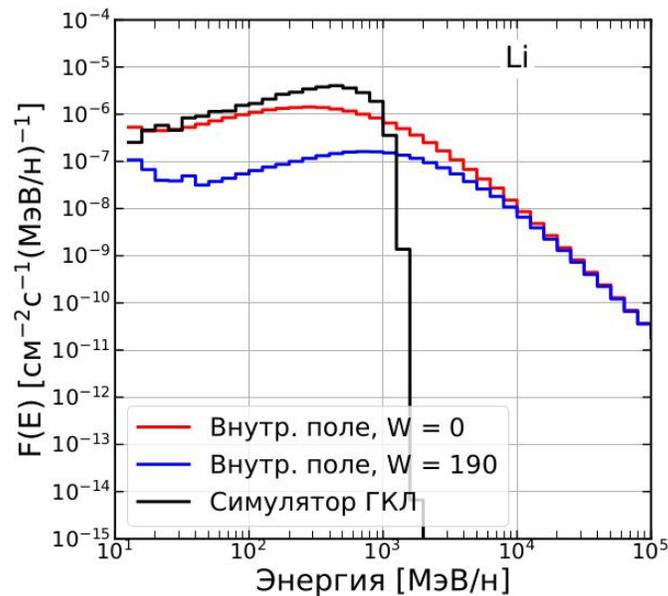
Характеристики мишеней и конвертеров симулятора ГКЛ



Сравнение суммарного спектра ЛПЭ за симулятором ГКЛ и спектров ЛПЭ внутреннего радиационного поля космического аппарата при мин. ($W = 0$) и макс. ($W = 190$) СА

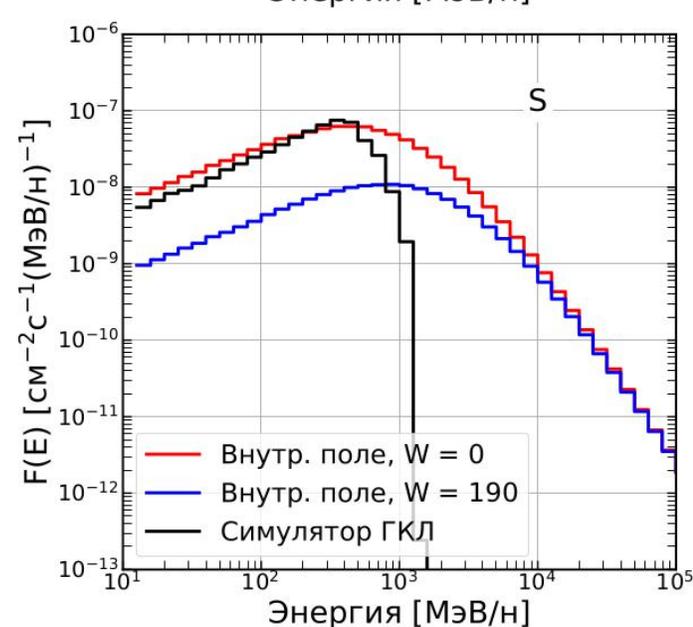
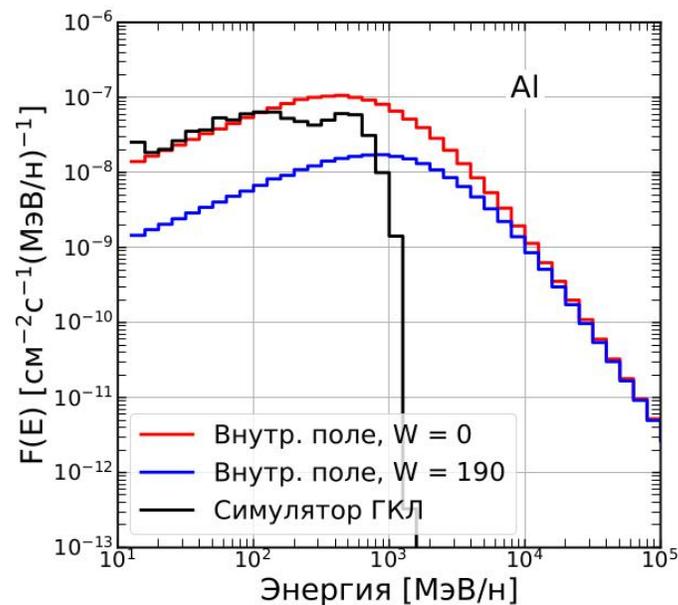
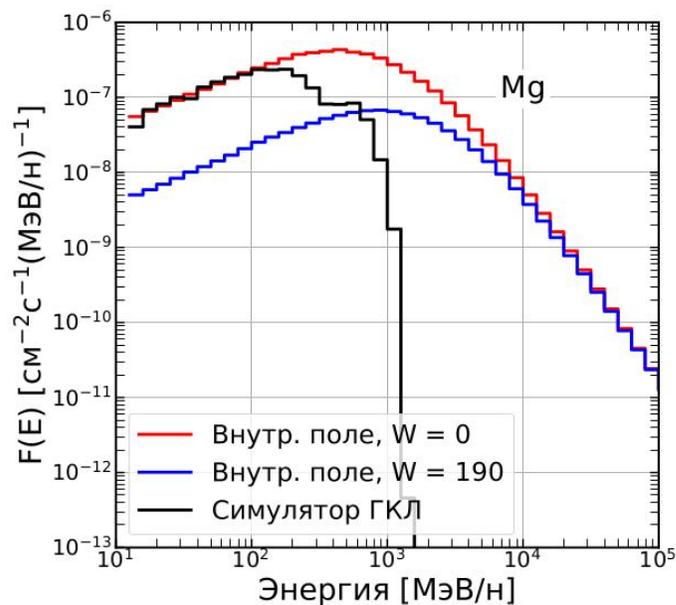
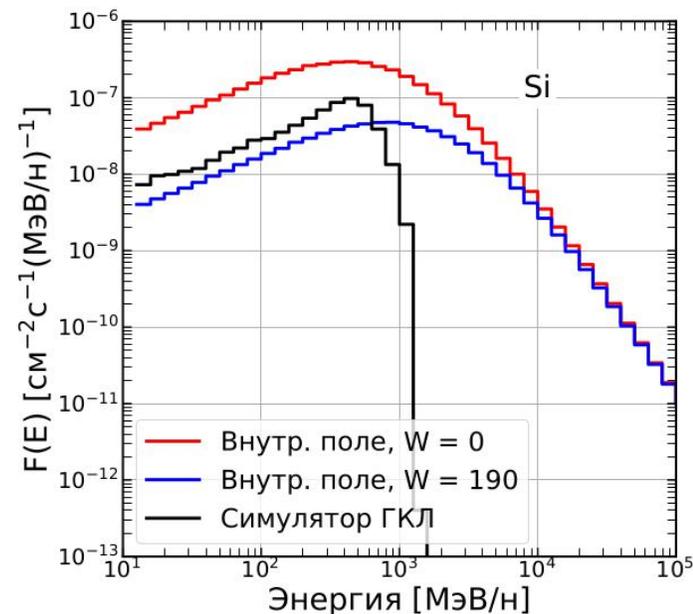
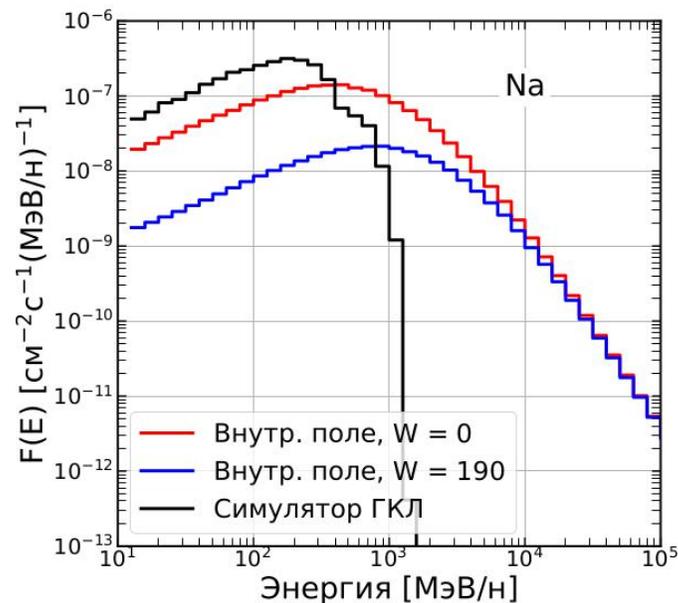
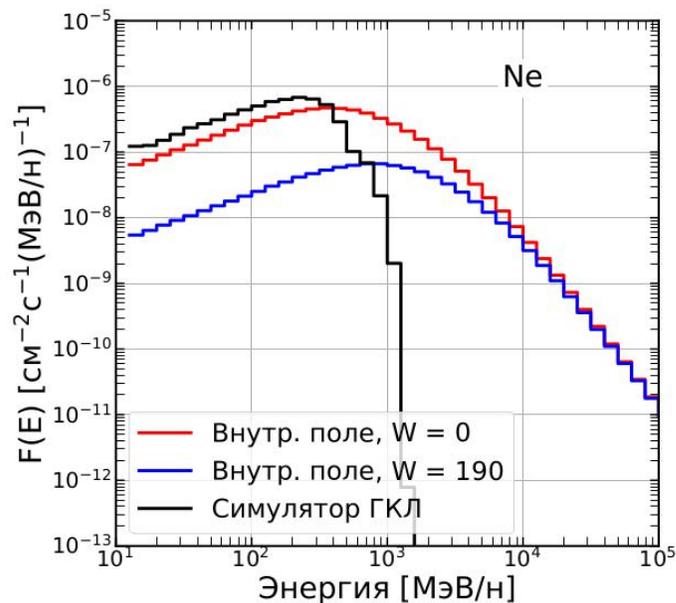


Сравнение дифференциальных энергетических спектров плотности потока

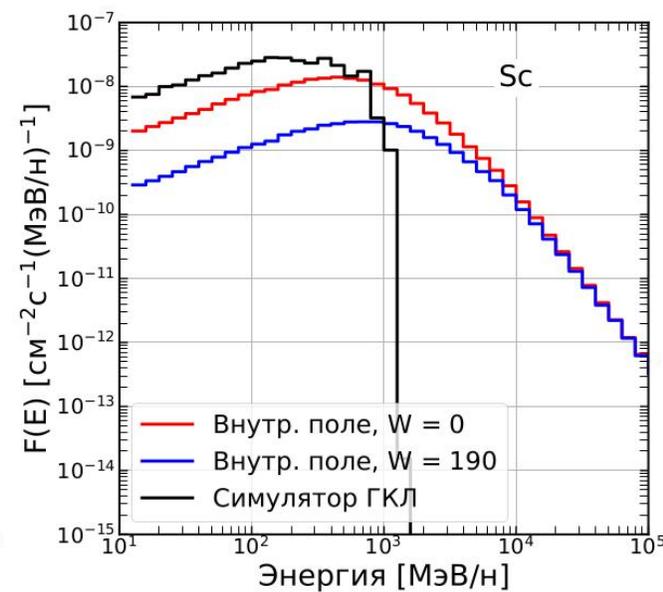
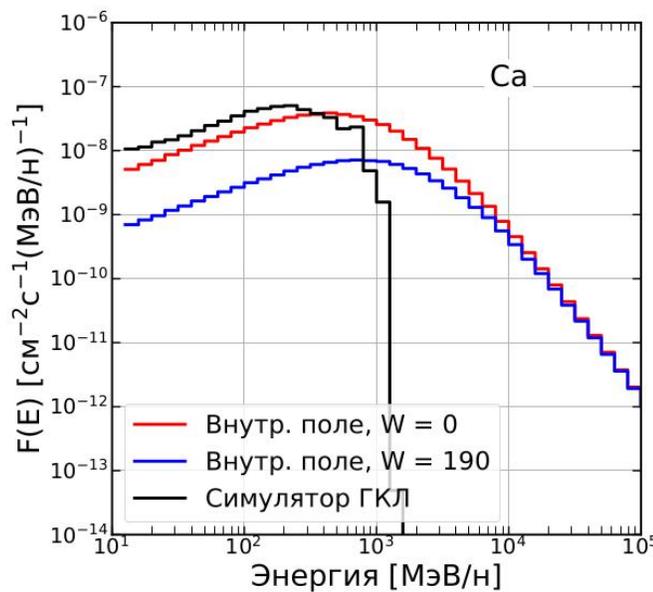
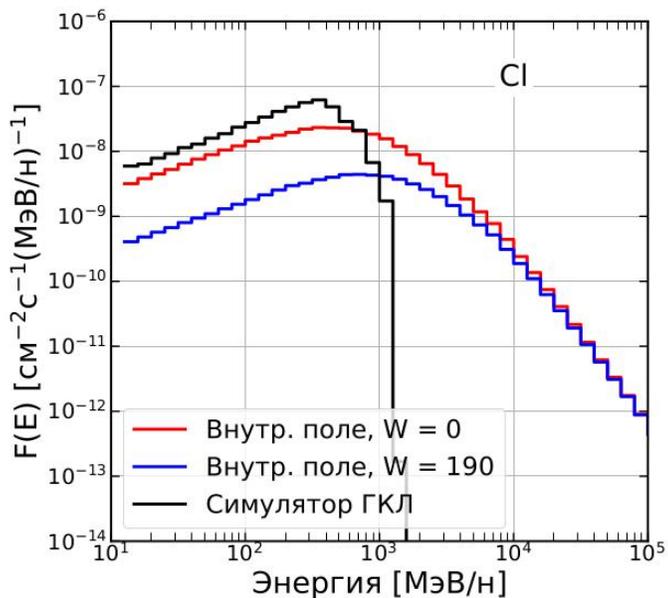
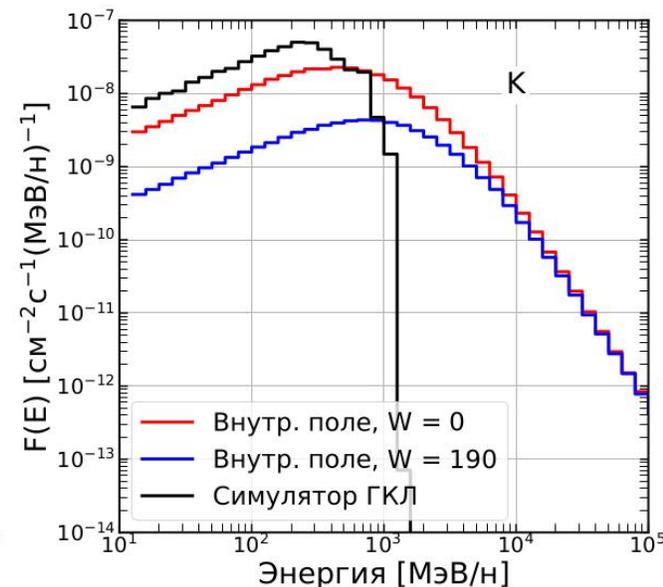
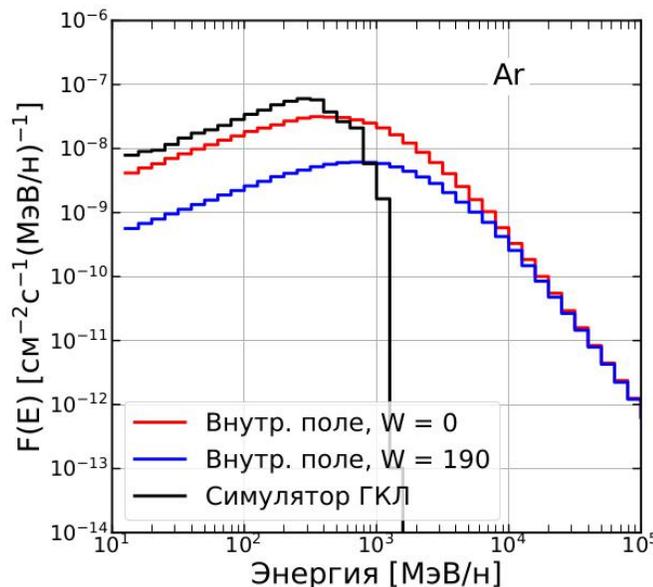
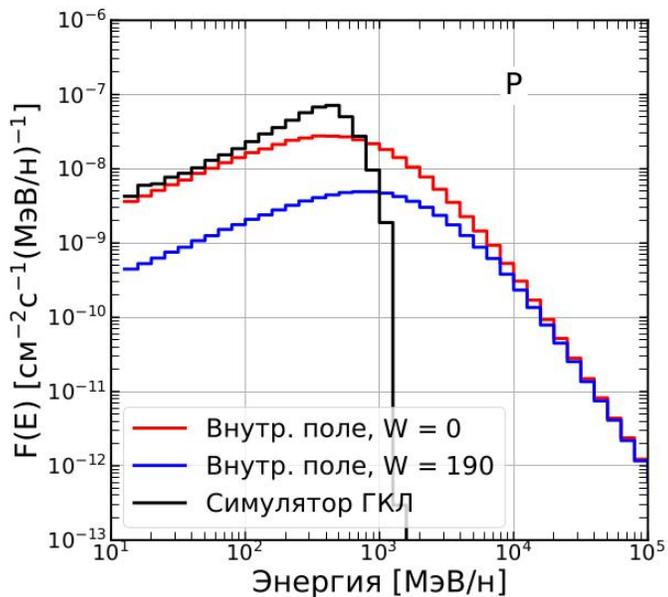


Сравнение дифференциальных энергетических спектров плотности потока

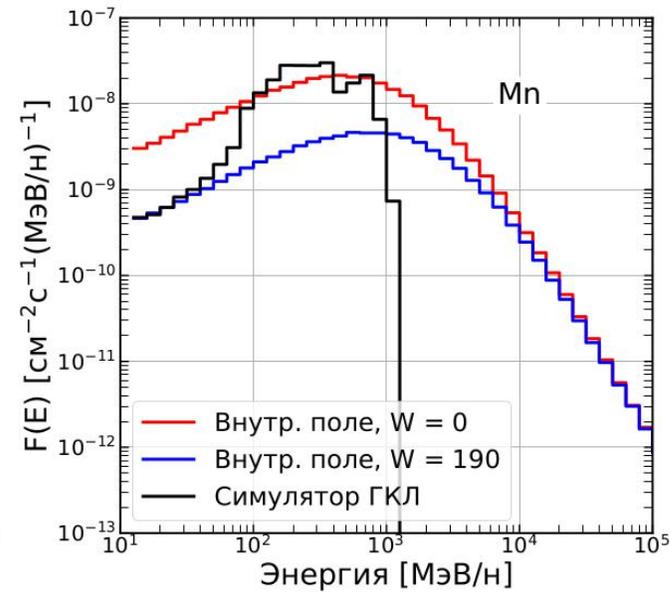
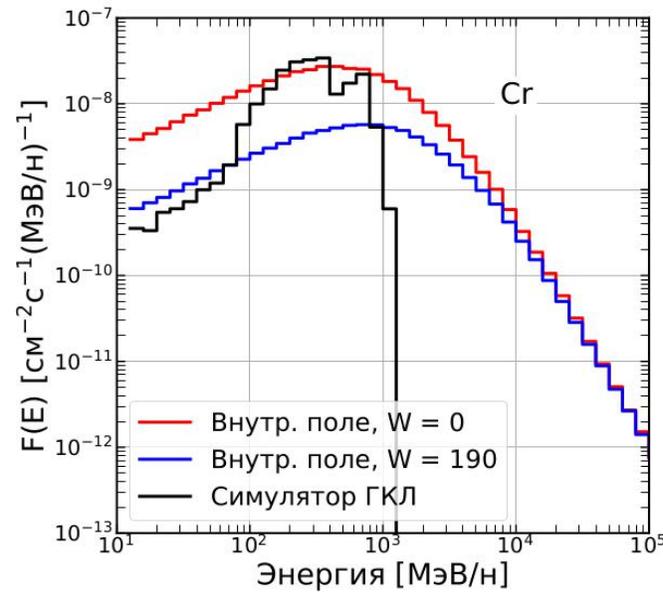
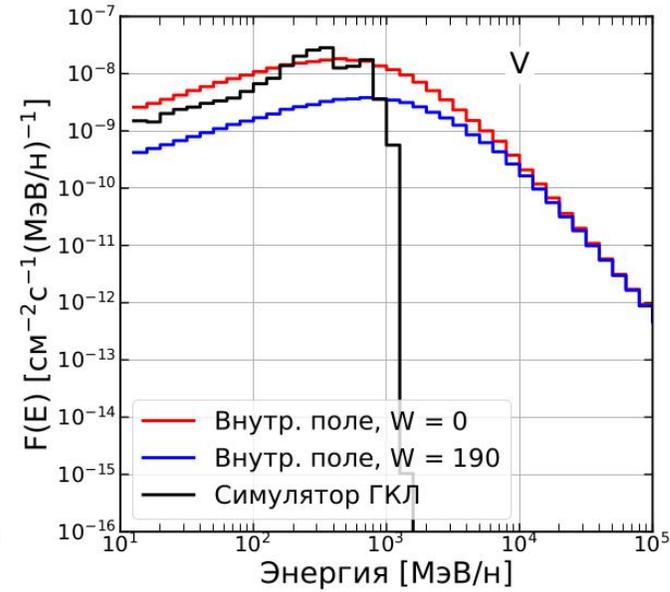
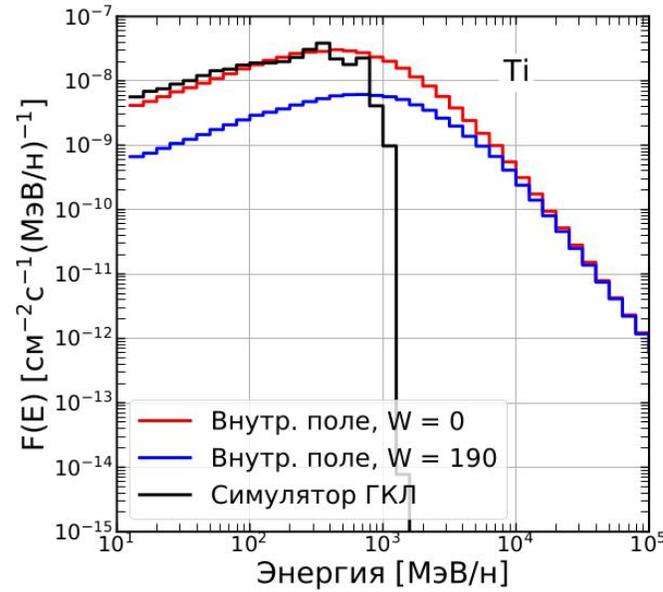
Результаты



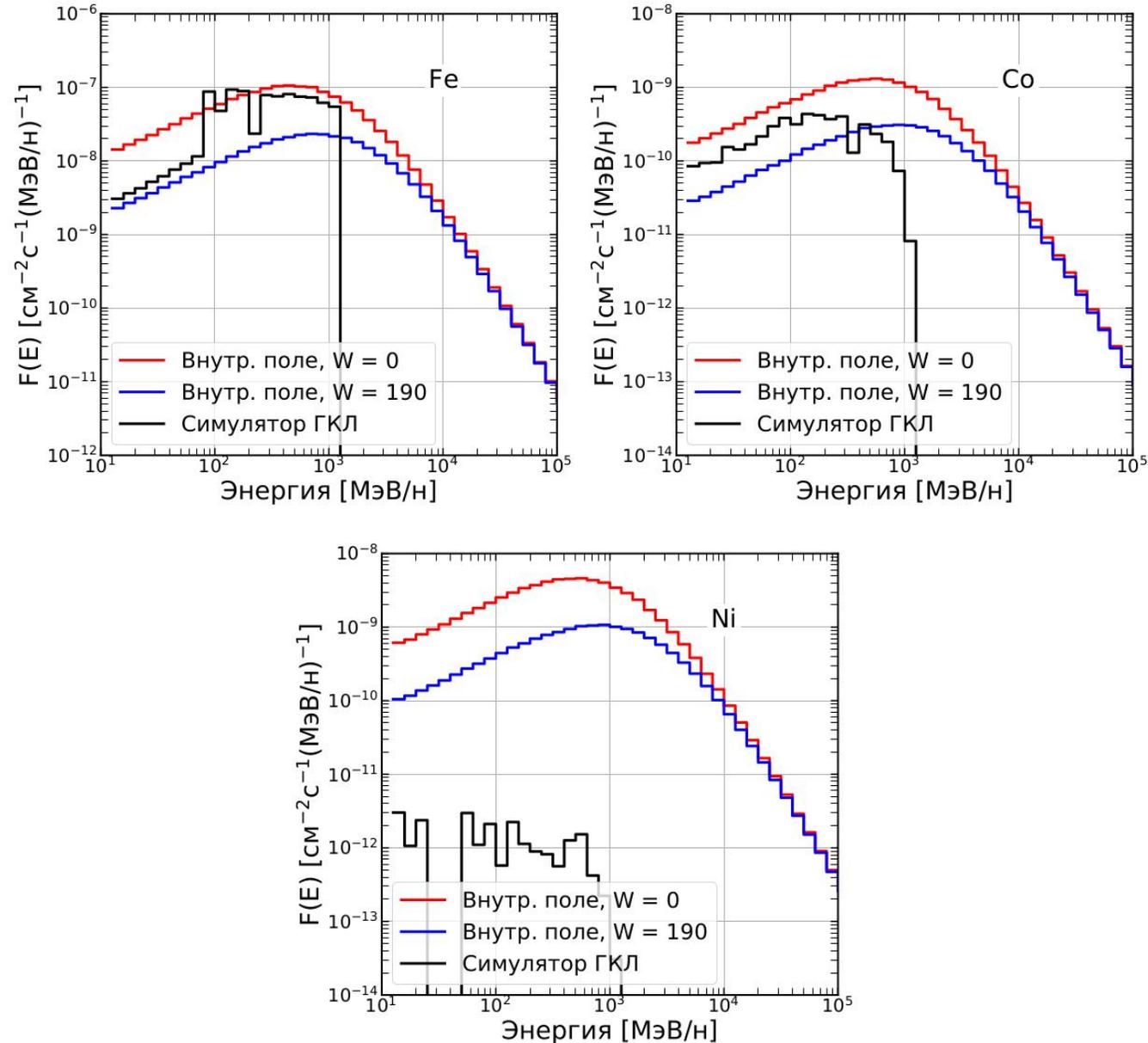
Сравнение дифференциальных энергетических спектров плотности потока



Сравнение дифференциальных энергетических спектров плотности потока



Сравнение дифференциальных энергетических спектров плотности потока



Сравнение дифференциальных энергетических спектров плотности потока

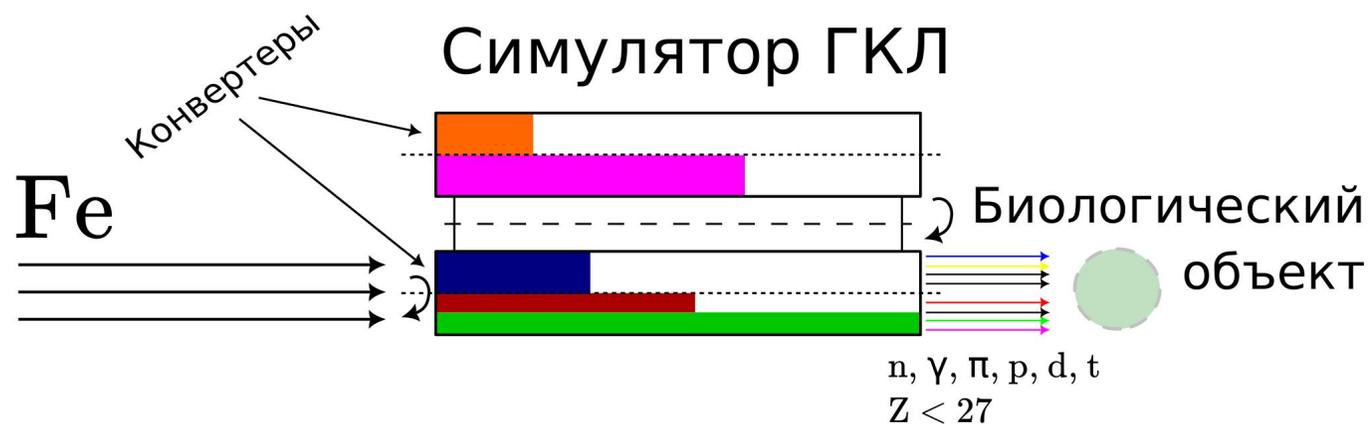


Схема симулятора может быть реализована в рамках комплекса NICA [1,2], на одном из каналов для прикладных исследований, например, СИМБО

[1] **Gordeev, I. S.** A new type of ground-based simulator of radiation field inside a spacecraft in deep space [Text] / **I. S. Gordeev**, G. N. Timoshenko // Life Sciences in Space Research. — 2021. — Vol. 30. — P. 66—71.

[2] Timoshenko, G. N. Reference Radiation Field for GCR Chronic Exposure Simulation [Text] / G. N. Timoshenko, **I. S. Gordeev** // Physics of Particles and Nuclei Letters. — 2021. — Vol. 18, no. 7. — P. 799—805.

Ключевые особенности

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

Основные результаты представленного цикла работ докладывались автором на:

- ежегодной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов государственного университета «Дубна» в **2017, 2018 и 2019 годах**;
- VIII Съезде по Радиационным Исследованиям **2021** года в Москве;
- XXVI международной научной конференции молодых ученых и специалистов в **2022 году** (AYSS-2022);
- рабочем совещании «Прикладные исследования на комплексе NICA: перспективы сотрудничества РСО-Алания – ОИЯИ» в **2023 году**;
- Третьем Международном форуме «Физика — **2024**» (Самарканд, Узбекистан).

Автор был удостоен **первой премии** ОИЯИ «За научно-технические прикладные работы» за **2021 год**.

Автор является **победителем** конкурса «Научных работ молодых ученых и преподавателей государственного университета «Дубна» в **2023 году** за цикл работ.

УЧЕНЫЙ СОВЕТ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
25 ФЕВРАЛЯ 2022 ГОДА ПРИСУДИЛ

ПЕРВУЮ ПРЕМИЮ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ивану Сергеевичу
ГОРДЕЕВУ

ЗА РАБОТУ
«РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ВНУТРИ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ВНЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ»

Председатель Ученого совета
Объединенного института
ядерных исследований,
директор Института



Дубна
25 февраля 2022 г.
№ 4633

Г. В. Трубников

Первая премия ОИЯИ (2021)

На схему симулятора ГКЛ был оформлен патент:

Устройство моделирования на пучках тяжелых ионов высокой энергии полей смешанного излучения для целей экспериментальной радиобиологии [Текст] : пат. 2021105845 RU : МПК G21K 5/00 / Г. Н. Тимошенко, **И. С. Гордеев** (RU) ; заявитель Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ). — № 2761376 ; заявл. 05.03.2021; опубл. 07.12.2021, Бюл.164 № 34; приоритет 26.04.2021 (RU). — 17 с.



Патент на изобретение



GCRs Spectra



gcrs: оптимизация



gcrs: визуализация

Изложенные в докладе результаты опубликованы автором в 7 работах:

1. **Gordeev, I. S.** *A new type of ground-based simulator of radiation field inside a spacecraft in deep space* / I. S. Gordeev, G. N. Timoshenko // *Life Sciences in Space Research*. — 2021. — Vol. 30. — P. 66—71. (Scopus, WoS).
2. **Gordeev, I. S.** *Computer modeling of a new type galactic cosmic rays simulator* / I. S. Gordeev, A. N. Bugay. — 2024. Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research [E11-2024-17]. Submitted to «Computer Physics Communications».
3. Timoshenko, G. N. *Simulation of radiation field inside interplanetary spacecraft* / G. N. Timoshenko, **I. S. Gordeev** // *Journal of Astrophysics and Astronomy*. — 2020. — Vol. 41, no. 1. — P. 5. (Scopus).
4. Timoshenko, G. N. *Computation of linear energy transfer of space radiation in biological tissue analog* / G. N. Timoshenko, **I. S. Gordeev** // *Planetary and Space Science*. — 2021. — Vol. 199. (Scopus, WoS).
5. Timoshenko, G. N. *Estimation of the Astronaut's Doses inside the Spacecraft Habitable Module in Deep Space* / G. N. Timoshenko, **I. S. Gordeev** // *Physics of Particles and Nuclei*. — 2020. — Vol. 51, no. 5. — P. 988—993. (Scopus).
6. Timoshenko, G. N. *Reference Radiation Field for GCR Chronic Exposure Simulation* / G. N. Timoshenko, **I. S. Gordeev** // *Physics of Particles and Nuclei Letters*. — 2021. — Vol. 18, no. 7. — P. 799—805. (Scopus).
7. Timoshenko, G. N. *Particle accelerator-based simulation of the radiation environment on board spacecraft for manned interplanetary missions* / G. N. Timoshenko, A. R. Krylov, M. Paraipan, **I. S. Gordeev** // *Radiation Measurements*. — 2017. — Vol. 107. — P. 27—32. (Scopus, WoS).

Визуализация прохождения частиц через обшивку модуля и рождение вторичных частиц



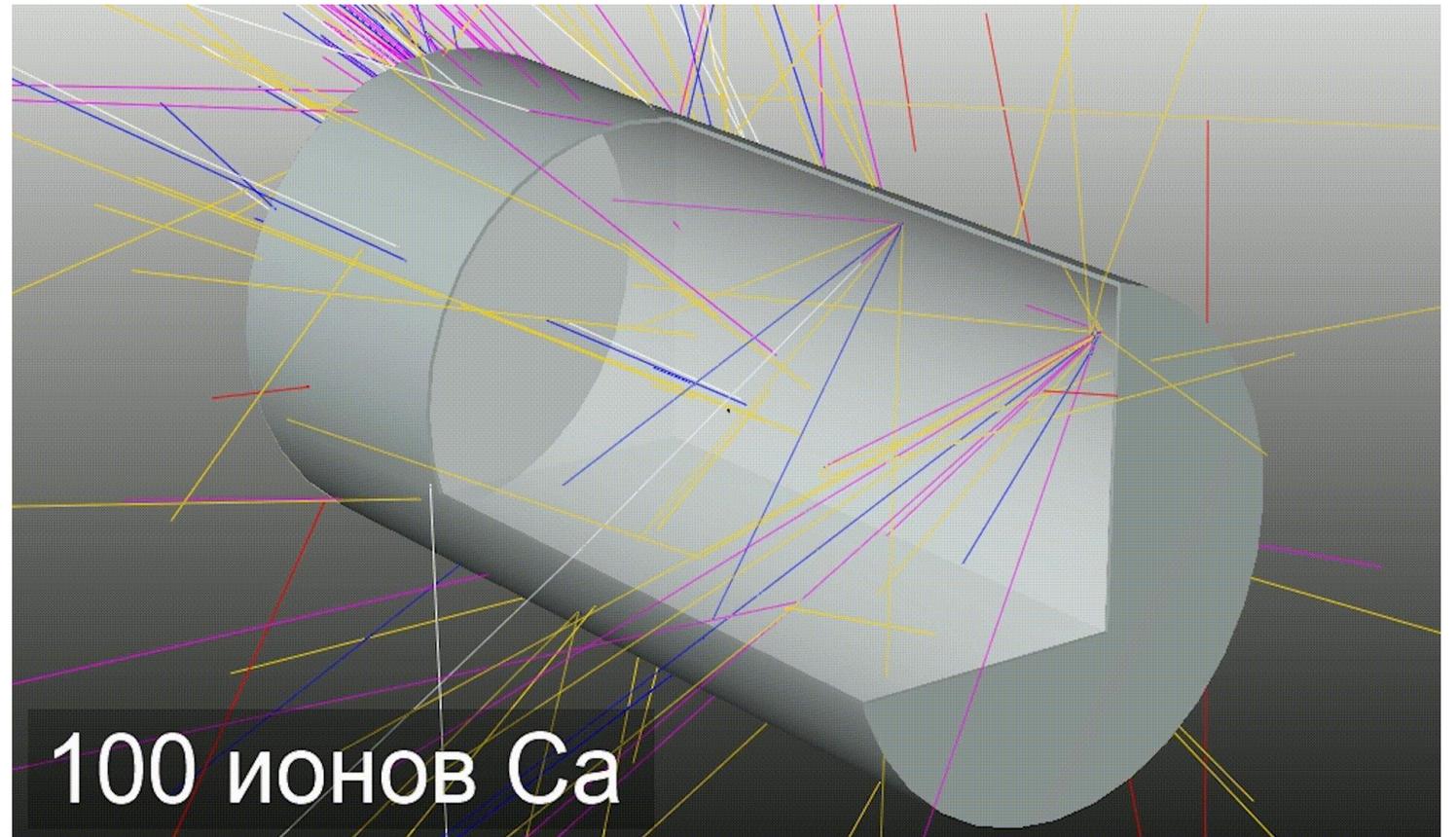
Ионы ГКИ – красный

Протоны – синий

Нейтроны – жёлтый

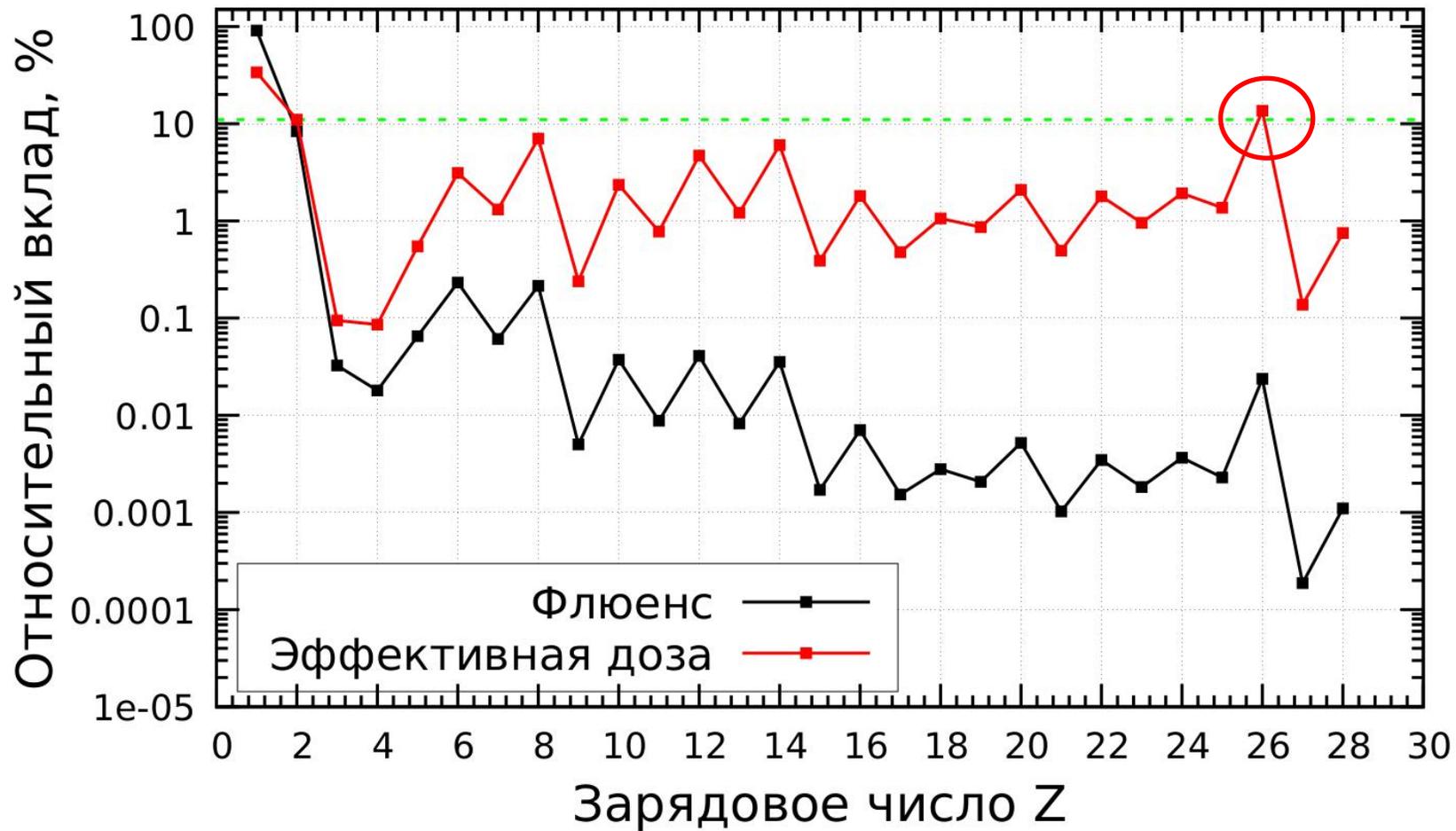
Гамма – зелёный

Пи-мезоны – пурпурный



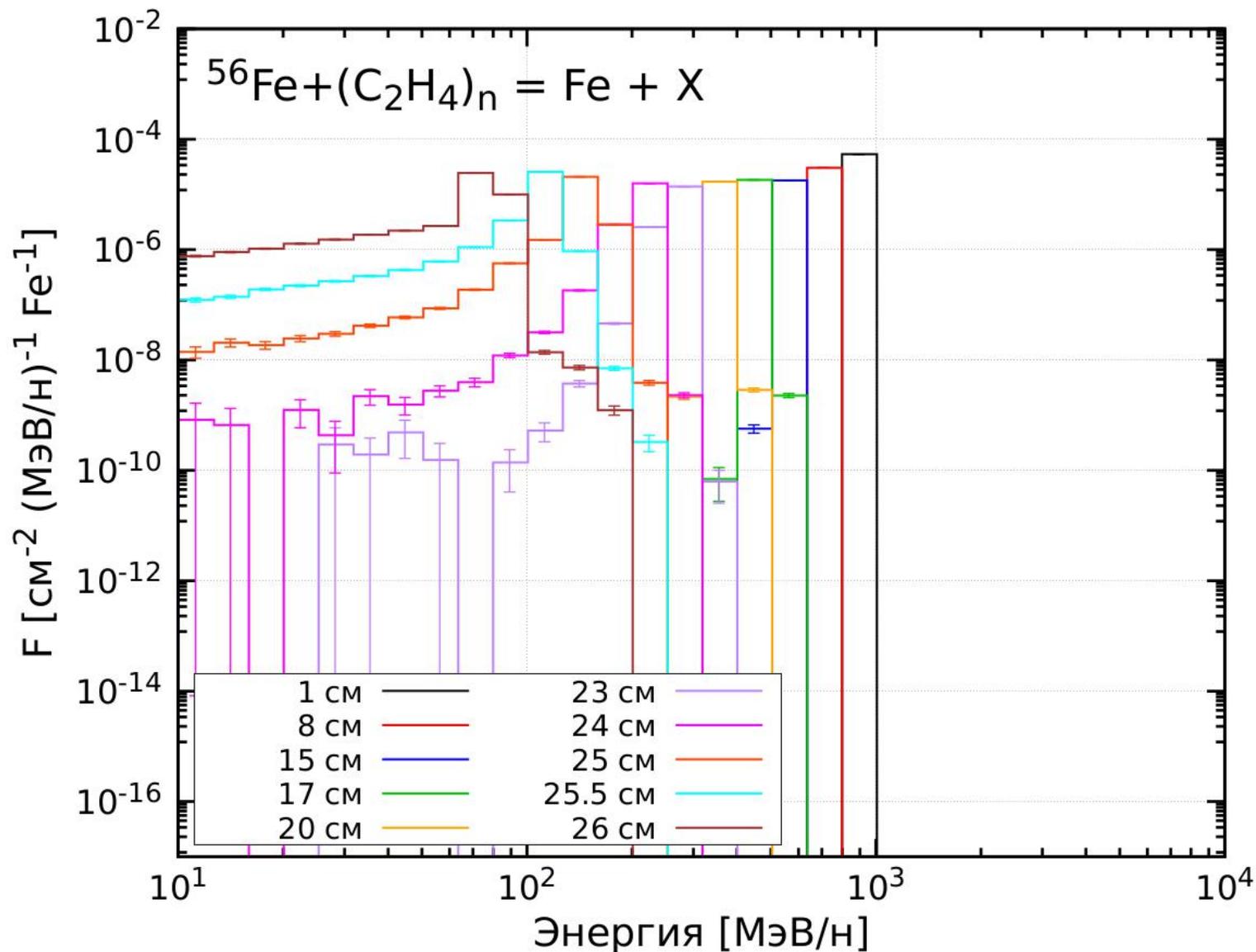
100 ионов Ca

Приложения



Несмотря на небольшую величину ТЗЧ по плотности потока, вклад в эффективную дозу от них значителен (без защиты).

Относительный вклад ядер первичных частиц ГКЛ (мин. СА) в общий флюенс и дозу



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

<https://github.com/GordoNice>



Страница на GitHub

The screenshot shows the GitHub profile of Ivan Gordeev. On the left is a circular profile picture of a man with sunglasses. Below it is the name "Ivan Gordeev". To the right, under the heading "Pinned", there are four repository cards:

- spek_qual** (Public): X-ray spectrum quality assessment. Language: Python.
- fitsgeo** (Public): FitsGeo - Python 3 package for PHITS geometry development and visualization. Language: Python. Stars: 12.
- FSEN4** (Public): Python tools for FLUKA input files with Spawn, Execute and Notify features (FSEN). Allows to spawn FLUKA input files, execute them and notify by e-mail (or via telegram bot) about run state. After ... Language: Python. Stars: 8. Forks: 1.
- GCRs_Spectra** (Public): The program with GUI for calculating spectra of GCR particles with spectrum modulation depending on the value of the Wolf number. Language: Python.

There is a "Customize your pins" link in the top right corner of the pinned section.