

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 107 с., 59 рис., 10 табл., 12 источников, 0 прил.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, радиационная электризация, бета-излучение, космический спектр, дисковые источники, угловое распределение, пространственное распределение, космический аппарат

Объектом исследования является разработанная вакуумная камера, используемая для получения электронной компонент космического спектра

Цель работы – методом статистического моделирования (методом Монте-Карло) определить условия формирования необходимых характеристик электронов (энергетическое, пространственное и угловое распределение) от двух типов источников в специальных вакуумных камерах, которые разрабатываются для целей испытаний элементов космических аппаратов на радиационную электризацию.

В процессе исследования проводилось моделирование методом Монте-Карло в программе Компьютерная лаборатория.

В результате исследования было получено согласие с космическим спектров как при использовании моноэнергетического пучка ускорителя, пропущенного через сложную алюминиевую мишень, так и для бета-излучающих радионуклидов. Для радионуклидов также получены равномерные пространственные и изотропные угловые распределения.

Область применения: поверхностная электризация диэлектрических материалов, моделирование низкоэнергетической электронной компоненты космического излучения.

## Оглавление

|                                                                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение .....</b>                                                                                                              | <b>5</b>  |
| <b>Глава 1 Радиационные условия в ближнем космосе .....</b>                                                                        | <b>10</b> |
| 1.1. Источники радиации на орбитах КА.....                                                                                         | 10        |
| 1.2. Галактическое космическое излучение .....                                                                                     | 10        |
| 1.3. Солнечные космические лучи.....                                                                                               | 11        |
| 1.4. Радиационные пояса Земли.....                                                                                                 | 12        |
| 1.5. Электризация элементов КА.....                                                                                                | 15        |
| <b>Глава 2 Моделирование энергетического распределения электронов на<br/>основе излучения ускорителей .....</b>                    | <b>19</b> |
| 2.1. Установка SIRENE .....                                                                                                        | 19        |
| 2.2. Расчет электронных спектров за Al мишенями .....                                                                              | 22        |
| Выводы по главе 2.....                                                                                                             | 37        |
| <b>Глава 3 Моделирование энергетического распределения электронов на<br/>основе бета-излучения радионуклидных источников .....</b> | <b>38</b> |
| 3.1 Моделирование характеристик электронов для бета-излучения $^{137}\text{Cs}$ 40                                                 |           |
| 3.1.1 Спектр электронов.....                                                                                                       | 42        |
| 3.1.2 Радиальное распределение .....                                                                                               | 44        |
| 3.1.3 Угловое распределение.....                                                                                                   | 45        |
| 3.1.4 Расчет влияния гамма-излучения $^{137}\text{Cs}$ на спектр электронов .....                                                  | 47        |
| 3.1.5 Влияние алюминиевой подложки на спектр .....                                                                                 | 47        |
| 3.2 Моделирование характеристик электронов для бета-<br>излучения $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ .....                             | 48        |
| 3.3 Сравнение рассчитанных $\beta^-$ -спектров с электронным<br>SPACE спектром.....                                                | 51        |

|                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4 Расчет характеристик электронов для источников $^{147}\text{Pm}$ , $^{155}\text{Eu}$ , $^{63}\text{Ni}$ , $^{32}\text{Si}$ ..... | 55 |
| 3.4.1 <i>Eu-155</i> .....                                                                                                            | 55 |
| 3.4.2 <i>Ni-63</i> .....                                                                                                             | 60 |
| 3.4.3 <i>Pm-147</i> .....                                                                                                            | 62 |
| 3.4.4 <i>Si-32</i> .....                                                                                                             | 64 |
| Вывод по главе 3 .....                                                                                                               | 67 |

#### **Глава 4. Социальная ответственность ....** Ошибка! Закладка не определена.

4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов ..... **Ошибка!**  
**Закладка не определена.**

4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния при работе на ПЭВМ  
**Ошибка! Закладка не определена.**

4.2.1 Организационные мероприятия ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

4.2.2 Технические мероприятия ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

4.2.3 Условия безопасной работы ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

4.3 Электробезопасность ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

4.4 Пожарная и взрывная безопасность .. **Ошибка! Закладка не определена.**

#### **Глава 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....** Ошибка! Закладка не определена.

5.1 Потенциальные потребители результатов исследования ..... **Ошибка!**  
**Закладка не определена.**

5.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения **Ошибка!** **Закладка не определена.**

5.3 SWOT-анализ ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

5.4 Планирование научно-исследовательской работы **Ошибка! Закладка не определена.**

5.4.1 Определение трудоемкости выполнения НИОКР **Ошибка! Закладка не определена.**

5.4.2 Разработка графика проведения научного исследования **Ошибка! Закладка не определена.**

5.4.3 Календарный план-график в виде диаграммы Ганта **Ошибка! Закладка не определена.**

5.5 Бюджет научного исследования ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

5.6 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования **Ошибка! Закладка не определена.**

**Заключение ..... 68**

**Список используемых источников ..... 70**

**Список публикаций ..... 71**

## Введение

Находясь на земной орбите и в открытом космосе, космические аппараты (КА) подвергаются непрерывному воздействию потоков различного рода частиц: электронов, протонов, ионов высокой энергии и электромагнитного излучения. Радиационная обстановка на орбите складывается из множества непредсказуемых факторов. Вклад в состав излучения вносят: потоки космических частиц высоких энергий, образующихся вследствие процессов, происходящих за пределами нашей солнечной системы (вспышки сверхновых, квазары, пульсары и др.), радиационные пояса Земли (РПЗ), космическая плазма, солнечное излучение. Некоторые действующие факторы космического пространства, например, космическая плазма и солнечное ультрафиолетовое излучение, оказывают влияние лишь на приповерхностные слои материалов. Другие, например, заряженные частицы высоких энергий, вместе с создаваемыми ими в элементах конструкции КА вторичными частицами и фотонами, способны проникать на большую глубину материалов, а также во внутренние отсеки КА.

В состав КА входит много диэлектрических материалов, да и КА не заземлен, поэтому в результате взаимодействия материалов и элементов КА с космической плазмой на их поверхности индуцируется и накапливается заряд. Его величина зависит от первичных токов электронов и ионов плазмы, а также вторично-эмиссионных токов с поверхности КА, включая ток фотоэлектронной эмиссии, вызываемой солнечным излучением. Образование электрического заряда на КА влечет за собой появление разности потенциалов между его поверхностью и окружающей плазмой. Например, время зарядки внешних диэлектрических поверхностей КА в момент магнитной бури во внешнем РПЗ составляет доли секунды. Накопленный диэлектриком электронный заряд может создавать высокую напряженность электрического поля и вызывать

поверхностные электростатические разряды, которые генерируют электромагнитные помехи, влияющие на стабильность работы бортового оборудования КА. При большой разности потенциалов  $-(10-20)\text{кВ}$ , могут происходить разрушения элементов конструкции КА. Способность диэлектрика эффективно аккумулировать электрический заряд определяется его высоким удельным сопротивлением более  $10^{14}\text{ ом}\cdot\text{см}$ .

Поскольку электризация КА вызывается различными типами космических излучений, то это явление иногда называют радиационной электризацией. При заряджении диэлектрических материалов КА в горячей магнитосферной плазме (энергия частиц более  $100\text{ эВ}$ ) глубина проникновения электронов плазмы с энергиями до  $50\text{ кэВ}$  составляет  $\sim 20-30\text{ мкм}$ . Такую электризацию называют поверхностной электризацией. Электроны радиационного пояса Земли (РПЗ) с энергиями  $2-10\text{ МэВ}$  могут проникать в диэлектрик на глубину  $\sim 5-20\text{ мм}$ . Электризацию, возникающую в этом случае, называют объемной электризацией.

Воздействие факторов космического пространства, приводит к постепенному ухудшению свойств материалов и характеристик бортовых систем КА и к их отказам по истечении некоторого периода эксплуатации. Типичным примером является постепенное снижение эффективности солнечных батарей КА в результате накопления поглощенной дозы космической радиации. Кроме этого возможны внезапные отказы в работе бортовых систем, которые непосредственно сопровождают радиационное воздействие на КА, например, сбои в интегральных микросхемах под действием одиночных протонов или тяжелых ионов высокой энергии. По оценкам отечественных и зарубежных экспертов, более половины отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры КА обусловлены неблагоприятным воздействием факторов космического пространства.

С данной проблемой столкнулись еще в 70-х годах прошлого века, на заре строения КА, когда на спутниках, находящихся на высокой орбите были зафиксированы значительные неполадки в работе оборудования.

Например, американские спутники, созданные для обеспечения радиосвязи и транслировании телевизионных передач, не смогли нормально функционировать, в виду внезапных включений-выключений аппаратуры, проблем, связанных с передачей сигнала, в некоторых случаях менялась произвольным образом ориентация антенн. Как правило, работа восстанавливалась, но оборудование либо необратимо портилось, либо выходило из строя совсем. Так, как через спутники на орбите Земли передается значительный объем информации, потери которой могут быть невосполнимы, было принято решение серьезно заняться данной проблемой.

Первым шагом была установка на запускаемые спутники приборов для регистрации помех и измерения потенциалов оболочки КА. Оболочка заряжалась отрицательно, что объясняется большей плотностью электронов по сравнению с протонами в РПЗ. Для предотвращения проблем, связанных с электризацией КА, необходимо проводить радиационные испытания материалов конструкции. Данные испытания необходимо проводить, как в натуральных условиях (на орбите), так и в земных условиях (в лабораториях). Для проведения лабораторных испытаний необходимо использовать соответствующие источники излучения.

Интегральный космический спектр и протонов и электронов является быстро спадающим с увеличением энергии частиц и описывается следующей формулой:

$$N(E) = C \times E^{-\gamma},$$

где E-энергия частиц, C – некоторая постоянная,  $\gamma$  - в зависимости от энергии принимает значение от 2 до 3,. Интегральный спектр протонов ГКЛ представлен на рис. 1.

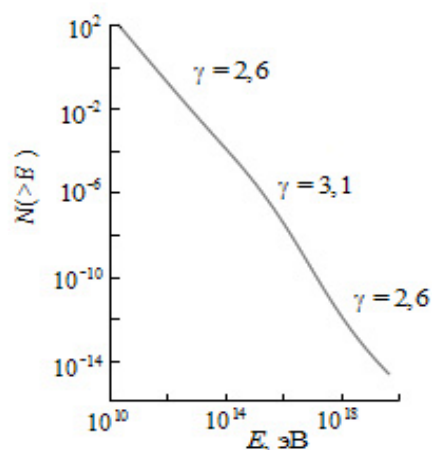


Рис. 1 – Интегральный спектр ГКЛ

Максимальные энергии электронов РПЗ на низких орбитах находятся в области 2–10 МэВ, а на высоких геостационарных орбитах максимальные энергии электронов магнитосферной плазмы составляют несколько десятков кэВ. С учетом спектра электронов и их небольших пробегах они определяют величину поверхностной электризации элементов КА.

Как правило, лабораторные испытания проводятся с заменой корпускулярных излучений со сплошным спектром, подобным космическому спектру, моноэнергетическими излучениями, которые генерируют ускорители заряженных частиц или радионуклидные источники. Например, этот вид испытаний широко применяется для прогнозирования радиационной стойкости изделий, расположенных на внешней поверхности КА (солнечные элементы из кремниевых фотопреобразователей, терморегулирующие покрытия, оптические системы ориентации, лазерные зеркала).

Не всегда такие лабораторные испытания правильно прогнозируют поведение материалов, находящихся в космическом пространстве. Например, исследования заряжения диэлектрических материалов с помощью низкоэнергетических (20–30 кэВ) моноэнергетических электронных пучков, которые имеют небольшую глубину проникновения, значительно переоценивают возникающие напряженности электростатического поля и риски для материалов в космосе. Для более точного прогнозирования



поведения диэлектрических материалов в космосе необходимо проводить испытания с учетом реального спектра частиц, падающих на КА. Для этих целей разрабатываются специальные устройства, позволяющие преобразовывать моноэнергетический электронный (или протонный) пучок ускорителя в непрерывный спектр, соответствующий натурному спектру. Также, существует возможность получения необходимой формы электронного спектра при использовании бета-излучения радионуклидных источников.

В данной работе приводятся результаты моделирования методом Монте Карло электронного космического спектра для высоких геостационарных орбит двумя способами:

- с помощью моноэнергетических электронных пучков ускорителей и специальных рассеивающих фольг из Al;
- с помощью бета-излучения радионуклидов.

# Глава 1

## Радиационные условия в ближнем космосе

### 1.1. Источники радиации на орбитах КА

В открытом космосе, космические аппараты (КА) находятся в сложной радиационной обстановке. В ближнем космосе на орбитах КА основными источниками излучения, вносящими вклад в электризацию, являются:

- Первичное галактическое космическое излучение;
- Солнечные космические лучи;
- Радиационные пояса Земли.

### 1.2. Галактическое космическое излучение

ГКЛ – это излучение, равномерно заполняющее всю галактику, состоящее по большей части из тяжелых частиц высоких энергий, порядка десятков ГэВ на 1 нуклон, максимальная зарегистрированная энергия частиц ГКЛ  $10^{20}$  эВ. Для сравнения максимальная энергия частиц в БАК  $7 \cdot 10^{12}$  эВ. Наиболее вероятными источниками данного вида излучения являются вспышки сверхновых и образующиеся при этом пульсары. Электромагнитные поля, которыми обладают пульсары, могут ускорять заряженные частицы до высоких энергий, а затем рассеивать их на межзвездных магнитных полях[1]. Также возможно, что частицы имеющие энергию до 100 МэВ на нуклон получают вследствие ускорения в межпланетном пространстве солнечного ветра или межзвездного газа. Плотность потока ГКЛ вблизи нашей планеты равна 1 частица/(см<sup>2</sup>\*с). Угловое распределение изотропное.

В ходе изучения ГКЛ, был установлен их примерный состав:

- 92% - протоны;
- 6% - альфа-частицы;

- 1% - ядра тяжелых элементов;
- 1% - электроны и позитроны.

Большие энергии данного вида излучение накладывают определенные требования на безопасность, как космических аппаратов, так и космонавтов при нахождении на орбите. Для полного поглощения ГКЛ необходим свинцовый экран толщиной примерно 15 м.

### 1.3. Солнечные космические лучи

От Солнца в межпланетное пространство постоянно идет поток плазмы непрерывно расширяющейся солнечной короны – солнечный ветер, который по большей части состоит из протонов, электронов и небольшого числа тяжелых ядер. Эти частицы постоянно пополняют радиационные пояса Земли. Около Земли скорость частиц составляет от 300–750 км/с, а концентрация – несколько десятков частиц в  $1\text{ см}^3$ .

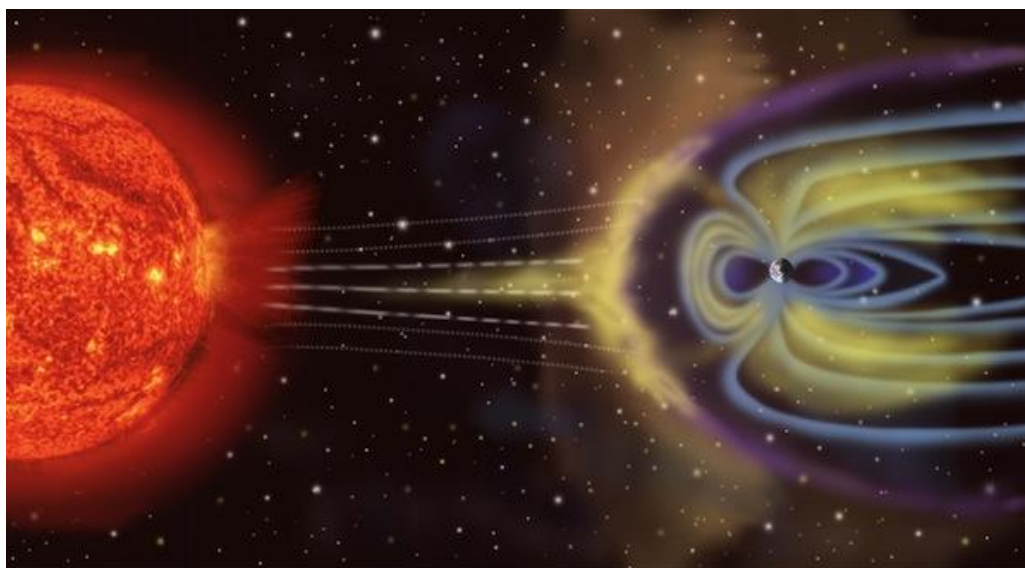


Рис. 1.1. Солнечные космические лучи

Излучение от Солнца не является постоянным, иногда при возникновении неустойчивых состояний возникает взрывной процесс выделения энергии, что называется солнечными вспышками. В эти моменты (от нескольких минут до нескольких десятков минут) выделяется энергия

порядка  $10^{25}$  Дж в виде протонов и электронов, также электромагнитного излучения различных диапазонов от жесткого рентгеновского и гамма-излучения до метровых радиоволн. Плотность потока данных лучей  $2-6 \cdot 10^3$  частиц/см<sup>2</sup>\*с, скорости увеличиваются на несколько порядков, составляя около  $10^5$  км/с.

Из этого можно сделать вывод, что из-за солнечных вспышек радиационная обстановка на орбите для космического аппарата подвержена большим и непредсказуемым флуктуациям.

#### 1.4. Радиационные пояса Земли

Так как Земля имеет магнитное поле, обусловленное наличием металлического ядра и процессов, происходящих в нем, то можно выделить область пространства вокруг планеты, где будут накапливаться и взаимодействовать с этим магнитным полем заряженные частицы от Солнца и из ГКЛ. Данные области называются радиационными поясами земли (РПЗ). РПЗ были открыты русскими учеными С.Н. Верновым и А.Е. Чудаковым, также американским Дж. Ван-Алленом в 1958 году (на данный момент носят его имя **Van Allen belts**).

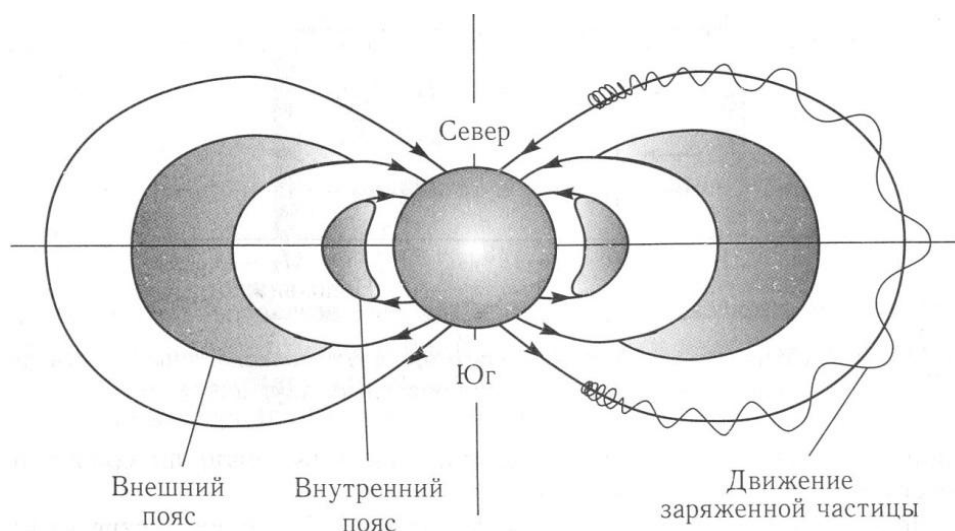


Рисунок 1.2. Радиационные пояса Земли

Частицы заполняют ту область магнитосферы, где линии магнитного поля замкнуты. Внутри магнитного поля Земли, как и в любом поле диполя, существуют области, где находятся заряженные частицы с определенными энергиями. Частицы, находящиеся внутри пояса с  $E < E_{кр}$ , не могут эти области покинуть. Эти зоны магнитного поля Земли называются зонами захвата. Данный пространственный интервал простирается от нескольких сот километров, до нескольких тысяч над поверхностью Земли, траектории электронных орбит до нескольких десятков тысяч км. Часто данные пояса разделяют и говорят о внешнем и внутреннем радиационном поясе Земли. Примерная граница внутреннего пояса  $\sim 4000$  км, граница внешнего  $\sim 21000$  км, говорить о точной границе не имеет смысла, потому что линии магнитного поля Земли «уходят» в бесконечность. Энергии частиц, заполняющих внутренний пояс с большей напряженностью геомагнитного поля, выше, чем во внешнем РПЗ. Например, энергии протонов во внутреннем РПЗ – десятки-сотни МэВ, электронов до 10 МэВ. Энергии электронов во внешнем – десятки кэВ. Нижняя граница поясов определяется долготой местности. Так над Атлантикой стремительное возрастание плотности частиц начинается с 500 км, над Индонезией около 1300 км. Между радиационными поясами существует граница, размером порядка 2–3 радиусов Земли. Поток частиц во внешнем РПЗ больше, нежели во внутреннем. В свою очередь, внутренний пояс достаточно стабилен, в то время как внешний испытывает очень резкие колебания плотности частиц.

*Внутренний РПЗ (протонный)*, состоящий из протонов с энергиями 20-800 МэВ и электронов с энергиями от 20 кэВ до 5–7 МэВ. Радиационная обстановка здесь, в основном, определяется протонами. Этот пояс простирается на расстояние до 4000–5000 км от поверхности Земли. Внутренний РПЗ обладает пространственной и временной стабильностью. Плотность протонов до  $10^4$  протон/см<sup>2</sup>×с×ср

*Внешний РПЗ (электронный)* – пояс по большей части состоит из электронов, с энергией от 40 кэВ до нескольких сотен кэВ с интегральной

плотностью потока  $10^6$ - $10^7$  электрон/см<sup>2</sup>\*с\*ср. В периоды солнечной активности фиксируются электроны с энергиями более 1 МэВ. На расстоянии 20000 км от Земли плотность электронов максимальна. Несмотря на наличие других частиц, радиационную обстановку здесь формируют электроны.

Также, заметно различие в структуре радиационных поясов, относительно положения Земли. На солнечной стороне граница магнитосферы находится на расстоянии 10–12 радиусов Земли, в обратную сторону на расстояние около 60 радиусов (рис. 1.3). Потоки первичных электронов и протонов является основным фактором, создающим радиационную опасность на геостационарной орбите. Пространственное распределение описывается достаточно сложно, но общей закономерностью является то, что большинство частиц являются низкоэнергетическими и с увеличением энергии число частиц резко падает.

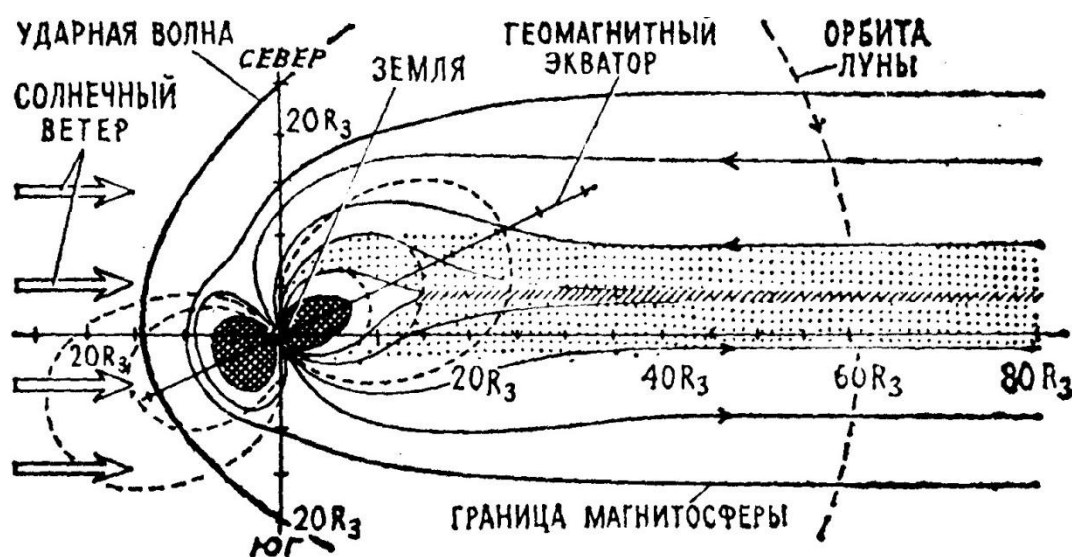


Рис. 1.3. Магнитосфера Земли

Некоторые действующие на КА факторы космического пространства (ФКП), например, космическая плазма и солнечное ультрафиолетовое излучение, оказывают влияние лишь на приповерхностные слои материалов. Другие – заряженные частицы высоких энергий вместе с создаваемыми ими в

элементах конструкции КА вторичными частицами и фотонами, способны проникать на большую глубину материалов, а также во внутренние отсеки КА.

Воздействие ФКП приводит к постепенному ухудшению свойств материалов и характеристик бортовых систем КА и к отказам в работе КА по истечении некоторого периода эксплуатации. Типичным примером является постепенное снижение эффективности солнечных батарей КА в результате накопления поглощенной дозы космической радиации. Кроме этого возможны внезапные отказы в работе бортовых систем, которые непосредственно сопровождают радиационное воздействие на КА. Например, сбои в интегральных микросхемах под действием одиночных протонов или тяжелых ионов высокой энергии. По оценкам отечественных и зарубежных экспертов, более половины отказов и сбоев в работе бортовой аппаратуры КА обусловлены неблагоприятным воздействием ФКП.

### **1.5. Электризация элементов КА**

С проблемой электризации элементов КА столкнулись еще в 70-х годах прошлого века, когда на спутниках, находящихся на высокой орбите были зафиксированы значительные неполадки в работе оборудования, к примеру, спутники США, созданные для обеспечения радиосвязи и транслировании телевизионных передач не смогли нормально функционировать, т.к. были замечены неполадки в устройствах, связанные с включением, выключением аппаратуры, передачей сигнала, менялась произвольным образом ориентация антенн. Как правило, работа восстанавливалась, но оборудование либо необратимо портилось, либо выходило из строя совсем. Так, как через спутники на орбите земли передается значительный объем информации, потери которой могут быть невозполнимы, следует что-то предпринимать. Работа в данной области ведется с 70х годов.

На космические аппараты, запускаясь позднее ставили приборы для регистрации помех и измерения потенциалов оболочки, в итоге было

выяснено, что корнем проблемы выхода бортовой техники из строя являлось как раз накопление отрицательного заряда на поверхности. Можно сказать, что данное явление не являлось для разработчиков космических аппаратов большой неожиданностью, т.к. на рубеже 30-40 годов 20 века были написаны первые научные работы, рассматривающие заряджение космической пыли, влияние заряда на движение искусственных спутников Земли. Значительный вклад в изучение процесса электризации был внесен и советскими учеными в 1957 году, были опубликованы работы И.М. Имянитова, К.И. Грингауза, В.Г. Истомина, Б.А. Миртова. Данные работы заложили как основы методик измерения параметров электрических полей и космической плазмы во внеземном пространстве. Большой цикл экспериментов по моделированию взаимодействия оболочки космического аппарата с окружающей его космической плазмой, был проделан Л.П. Питаевским, А.В. Гуревичем, Я.Л. Альпертом под руководством И.М. Подгорного. Моделирование было важно с точки зрения понимания процессов, происходящих при электризации искусственных спутников Земли.

В 1961 году ученые В.И. Мороз и В.Г. Курт, используя данные о соотношении частиц в космической плазме, оценили потенциалы, до которых может заряжаться аппарат в условиях земной орбиты. Потенциалы составили 10-20 кВ. Но данные величины были приведены неточно в виду ограниченности экспериментальных данных.

В 70-х годах XX века начался новый этап в рассмотрении проблем электризации КА, он связан с исследованием, в первую очередь, механизмов высоковольтного заряджения оболочки и бортовой аппаратуры. Помимо этого, были выработаны методы для борьбы с данным явлением.

Экспериментальные данные, полученные в конце 70-х годов, подтвердили теоретические результаты расчетов интенсивности потоков электронов с энергией до 30 кэВ при низкой концентрации их в окрестности КА.



Так как возможности натурных (в космосе) испытаний весьма ограничены, то для проведения лабораторных испытаний с имитацией космических условий возникает потребность создания в земных условиях электронного источника, со спектральным распределением электронов соответствующим космическому электронному спектру[2].

В результате взаимодействия КА с окружающей космической плазмой на его поверхности образуется электрический заряд, знак и величина которого определяются соотношением первичных токов электронов и ионов плазмы и вторично-эмиссионных токов с поверхности КА (при потенциалах выше нескольких десятков эВ), включая ток фотоэлектронной эмиссии, вызываемой солнечным излучением (уносит заряд). Образование электрического заряда на КА влечет за собой появление разности потенциалов между его поверхностью и окружающей плазмой. Например, время зарядки внешних диэлектрических поверхностей КА в момент магнитной бури во внешнем РПЗ составляет доли секунды. Накопленный диэлектриком электронный заряд может создавать высокую напряженность электрического поля и вызывать поверхностный электростатический разряд (ЭСР), который генерируют электромагнитные помехи, влияющие на стабильность работы бортового оборудования КА. Способность диэлектрика эффективно аккумулировать электрический заряд определяется его высоким удельным сопротивлением более  $10^{14}$  ом·см.

Поскольку электризация КА вызывается различными типами космических излучений, то это явление иногда называют *радиационной электризацией*. При заряджении диэлектрических материалов КА в горячей магнитосферной плазме с интенсивными потоками электронов, имеющих энергии 20–30 кэВ, глубина проникновения электронов плазмы составляет ~20-30 мкм. Такую электризацию называют *поверхностной электризацией*. Электроны радиационного пояса Земли с энергиями 2–10 МэВ могут проникать в диэлектрик на глубину ~ 5–20 мм. Электризацию, возникающую в этом случае, называют *объемной электризацией*.

Электрическое заряджение КА оказывает особенно серьезное неблагоприятное влияние на работу бортовых систем при запусках КА на геостационарную орбиту (круговая экваториальная орбита с высотой  $\sim 36\,000$  км), где параметры магнитосферной плазмы таковы, что значения потенциалов на КА могут достигать значений  $-(10-20)$  кВ. При таких потенциалах уровень помех, создаваемых ЭСР, весьма высок, а в некоторых случаях ЭСР могут приводить к разрушению компонентов аппаратуры и элементов конструкции КА.

## Глава 2

### Моделирование энергетического распределения электронов на основе излучения ускорителей

Спектры электронов, полученные в лабораторных условиях экспериментально – это, как правило, спектры за различными мишенями (фольгами). Особенностью лабораторных спектров является наличие максимума с быстрым уменьшением числа электронов с энергиями более и менее наиболее вероятной энергии. Электронный космический спектр имеет другую форму. В нем число электронов монотонно возрастает с уменьшением их энергии. Необходимую форму электронного лабораторного спектра можно получить, пропуская электронный пучок ускорителя через сложную мишень переменной толщины. Пример использования данного метода – французская установка SIRENE.

#### 2.1. Установка SIRENE

Установка SIRENE позволяет получать спектр, согласующийся с космическим в области низких энергий 50–350 кэВ (рис. 2.1).

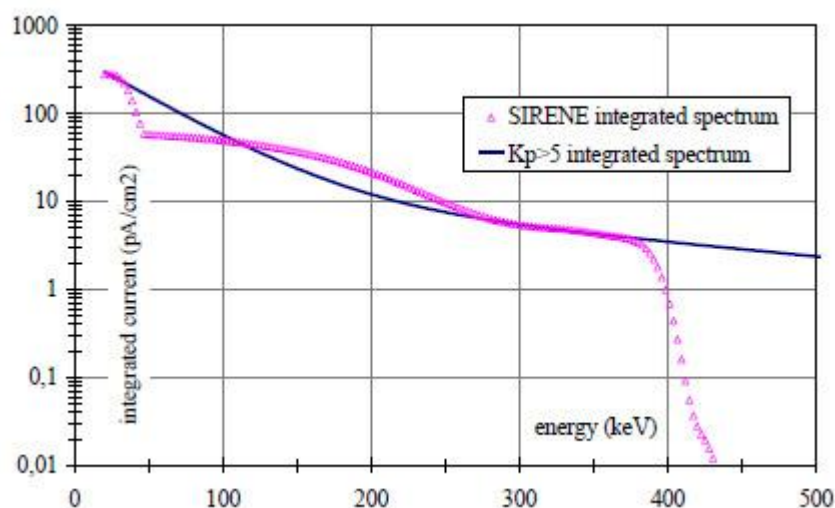


Рис. 2.1. – Электронный спектр в установке SIRENE

Схема установки SIRENE приведена на рис. 2.2. Основной электронный пучок с энергией 400 кэВ пропускается через рассеивающую фольгу, имеющую различную толщину по сечению. В результате падающий на тестируемый образец непрерывный спектр формируется из набора элементарных спектров электронов, прошедших через определенные площади рассеивающей фольги с различными толщинами. Второй пучок (низкоэнергетический) пропускается через фольгу с постоянной толщиной и необходим для увеличения числа низкоэнергетических электронов.

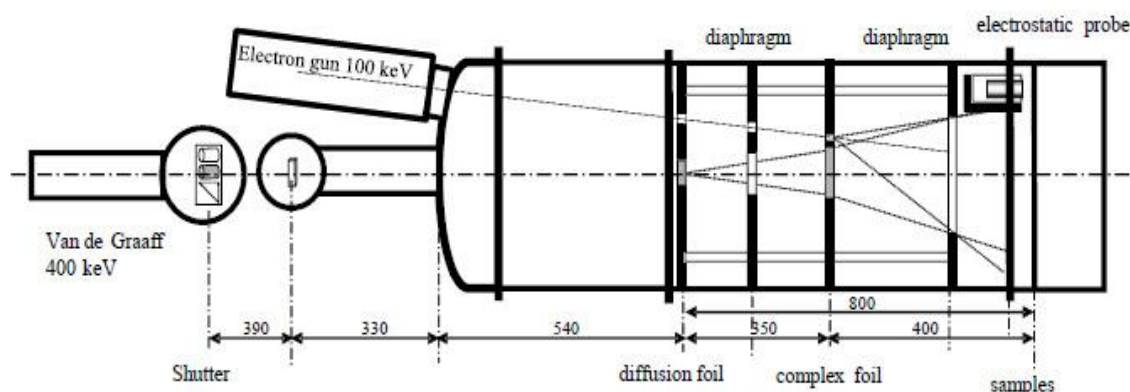


Рис. 2.2. – Схема установки SIRENE

*Основные параметры установки SIRENE[12]:*

- Цилиндрическая вакуумная камера, длиной 1.5 м, диаметром 0,5 м;
- Магнитное поле для компенсации влияния магнитного поля Земли;
- Основной и второстепенный откачивающие элементы, способные создать давление  $p \sim 10^{-6}$  гПа после часа работы;
- Терморегулирующие элементы, способные изменять температуру в интервале от -180 С до 100 С;
- Два источника электронов основной и дополнительный. Отличаются энергиями – основной источник способен генерировать электроны в диапазоне энергий 100–400 кэВ, дополнительный 1–100 кэВ. Наличие именно таких источников обусловлено наличием в космическом спектре электронов с различными энергиями, часть из которых создает

поверхностную электризацию, а часть – объемную. Могут быть включены, как оба, так и каждый из данных источников. Выбор того или иного обусловлен орбитой КА.

- Комплект фольг, способных регулировать выходящий пучок.
- Поток до  $1 \text{ нА/см}^2$

В НИИ ЯФ МГУ, где проводится большое число разнообразных испытаний элементов КА, еще в 1968 г. для преобразования моноэнергетического пучка протонов в пучок со сплошным спектром, использовали аналогичный метод – пропускали пучок протонов через профилированную пластину переменной толщины (см. рис. 2.3).

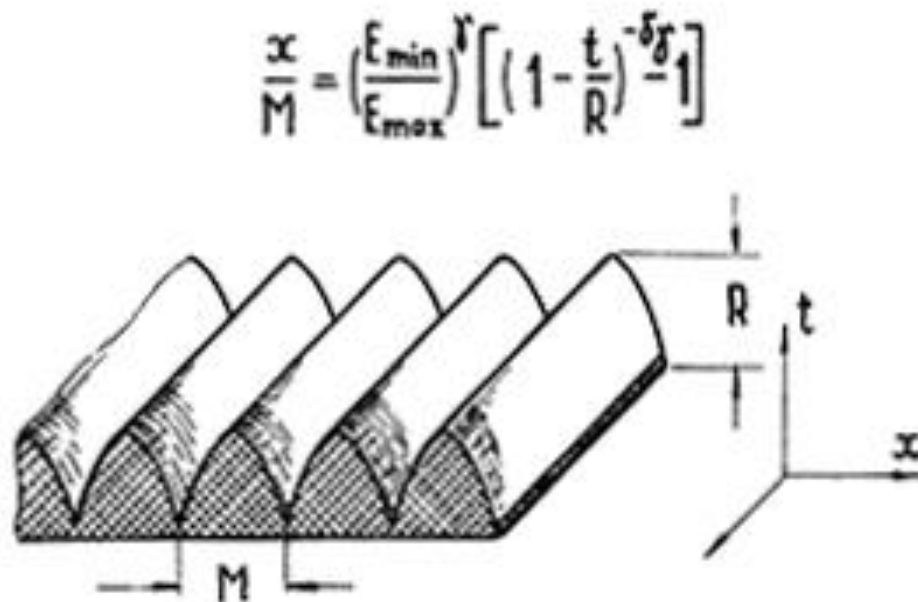


Рис. 2.3. Профилированная пластина для преобразования моноэнергетического пучка протонов с энергией 6,3 МэВ в непрерывный спектр [3]

В испытательном центре ИНК ТПУ в настоящее время разрабатываются несколько вакуумных камер для наземных испытаний подсистем бортовой аппаратуры на радиационную электризацию. В этих камерах моноэнергетические пучки электронных пушек необходимо преобразовать в пучки с интегральным спектром соответствующим космическому электронному спектру на заданной орбите КА. Для этого

необходимо пропустить первичный пучок через специальную мишень со сложной геометрией. Значительно ускорить и удешевить процесс определения геометрии мишени можно с помощью статистического моделирования – методом Монте Карло.

## 2.2. Расчет электронных спектров за Al мишенями

Схема геометрии камеры приведена на рис. 2.3, а на рис. 2.4 показана фотография этой камеры.

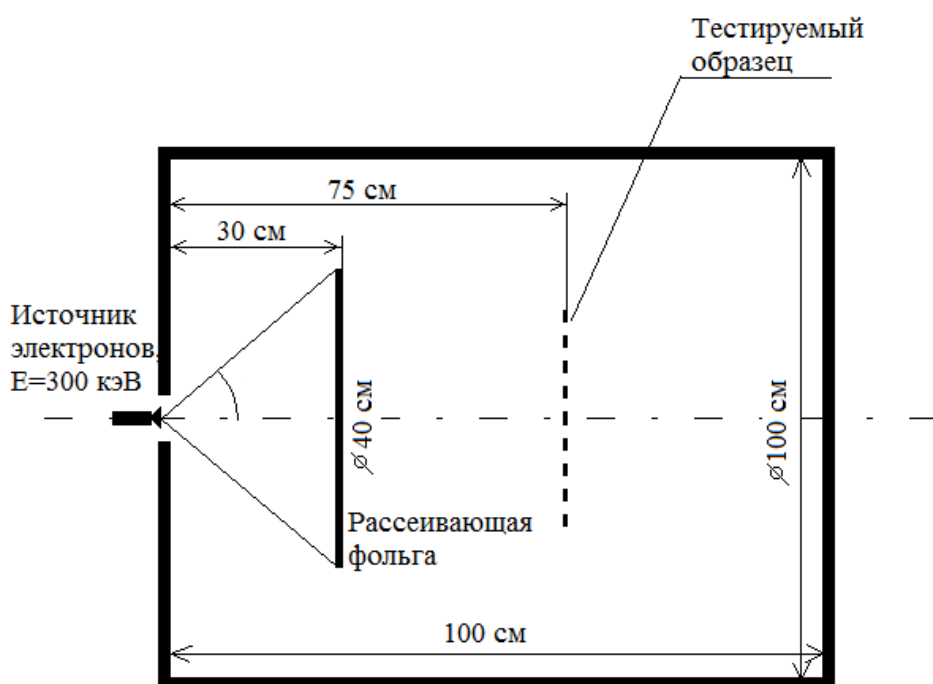


Рис. 2.4. Схема вакуумной камеры



Рис. 2.5 – Фото вакуумной камеры

Для определения геометрии сложной рассеивающей мишени необходимо иметь набор элементарных дифференциальных электронных спектров для простых однородных мишеней разных толщин. Расчеты этих спектров выполнены методом Монте Карло в программе «Компьютерная лаборатория» (КЛ/PCLab) [4] в режиме БАРЬЕР (см. рис. 2.6). Программа PCLab разработана В.И. Беспаловым на каф. Прикладной физики ФТИ ТПУ.

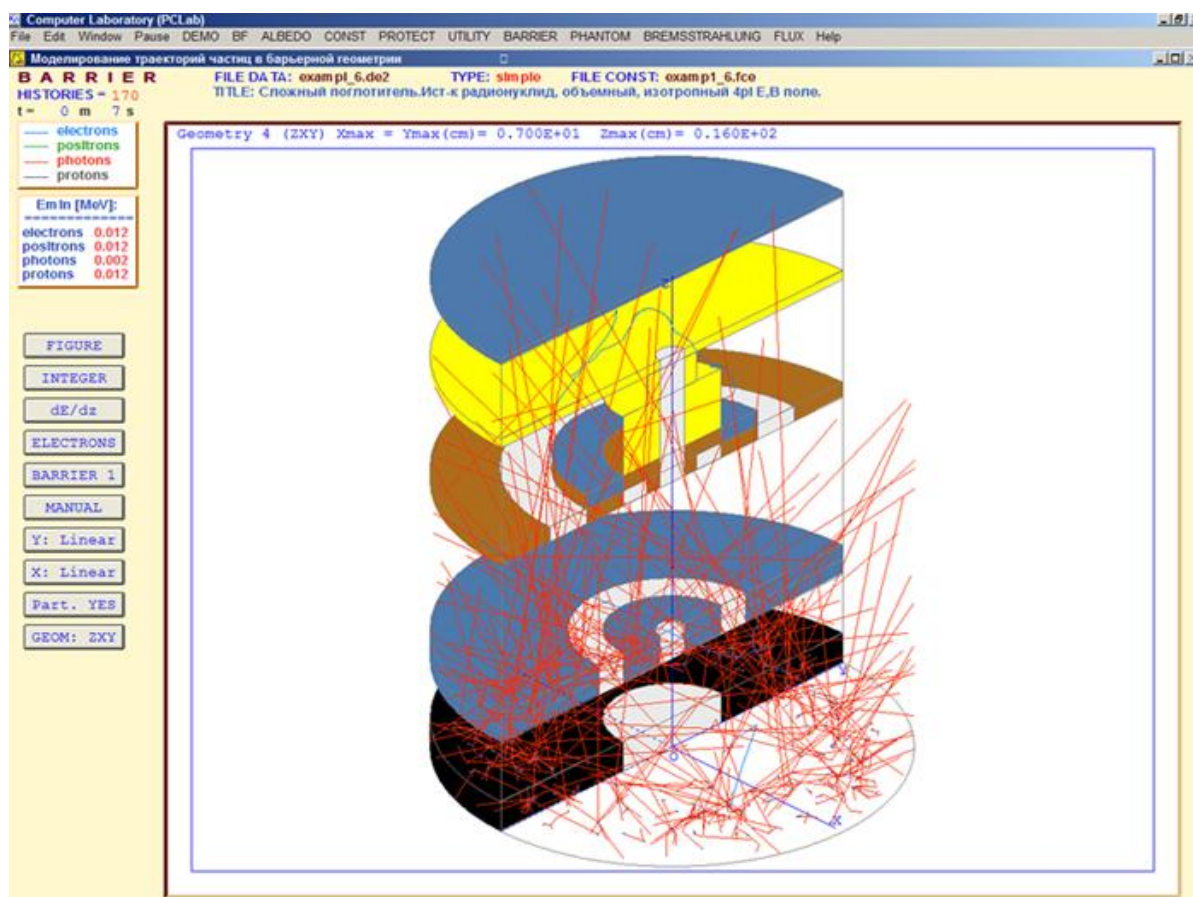


Рис. 2.6. Программа КЛ, моделирование в режиме БАРЬЕР

Основным источником является электронная пушка на энергию 300 кэВ, с изотропным распределением электронов в определенном конусе. В расчетах половина угла раствора конуса равнялась 10 градусам. Электронный пучок выводится на расстоянии 150 мм от камеры. Расстояние от начала камеры до рассеивающей фольги 250 мм. В качестве материала рассеивающей фольги выбран Al, для уменьшения выхода вторичного тормозного излучения. Электронные спектры («элементарные спектры») рассчитывались за фольгами с толщами: 40, 80, 120, 160, 200, 240, 280, 300, 320, 340 мкм, на расстоянии 400 мм от фольги (в этой области будут в последствии размещаться исследуемые на электризацию образцы).

В линейном и логарифмическом масштабе элементарные спектры для Al фольг различных толщин представлены на рис. 2.7–2.10.



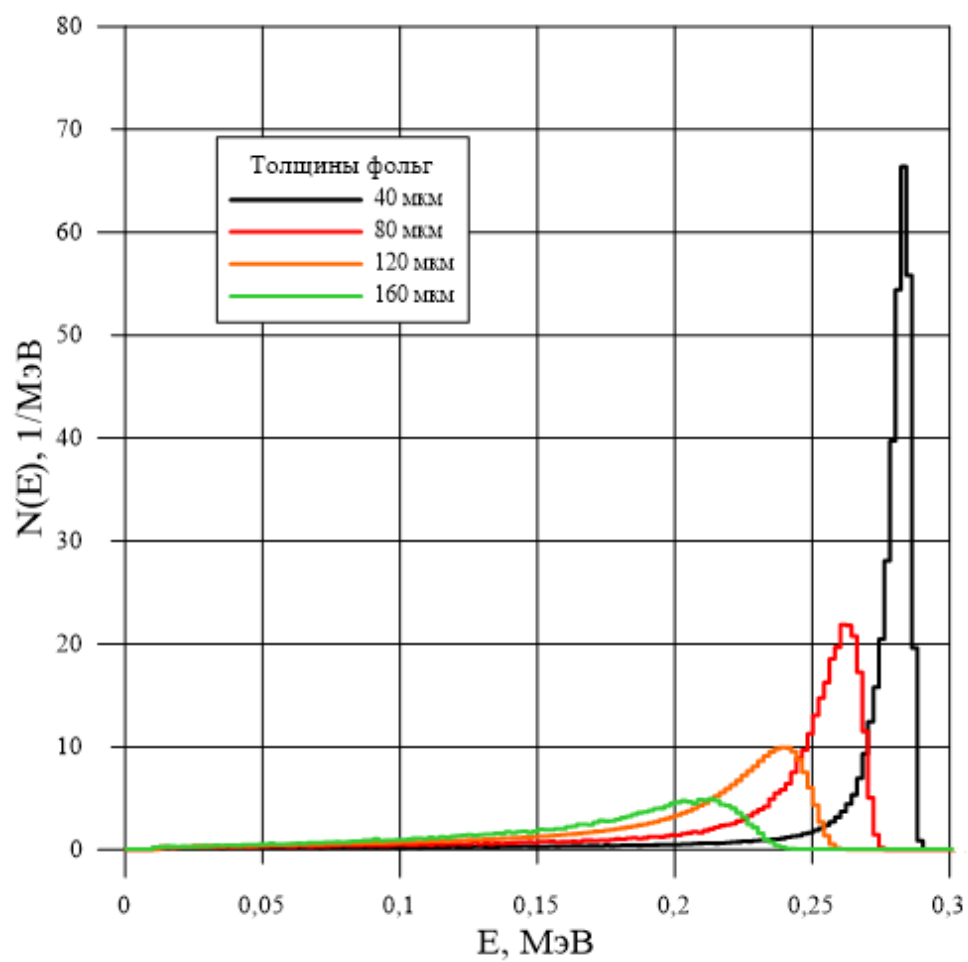


Рис. 2.7. – Спектры электронов, падающих на образец, для различных толщин рассеивающей фольги

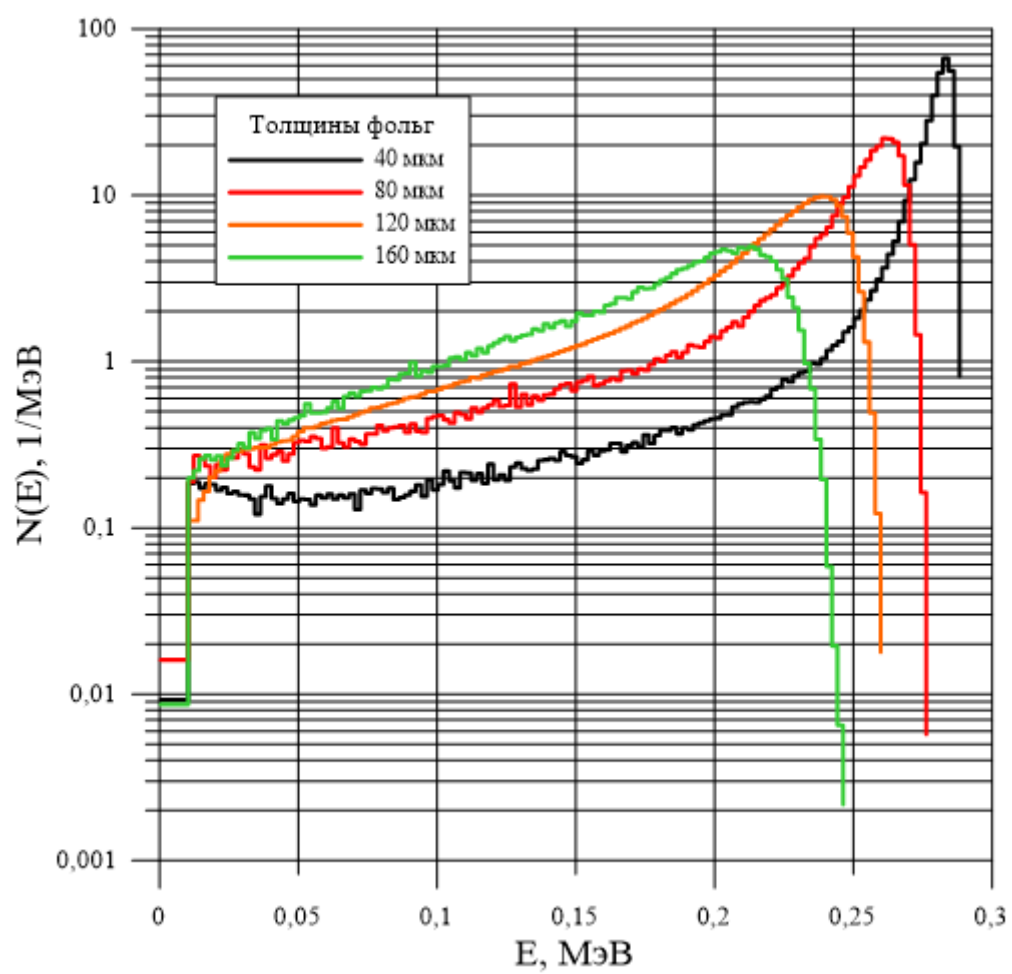


Рис. 2.8 – Спектры электронов, падающих на образец, для различных толщин рассеивающей фольги

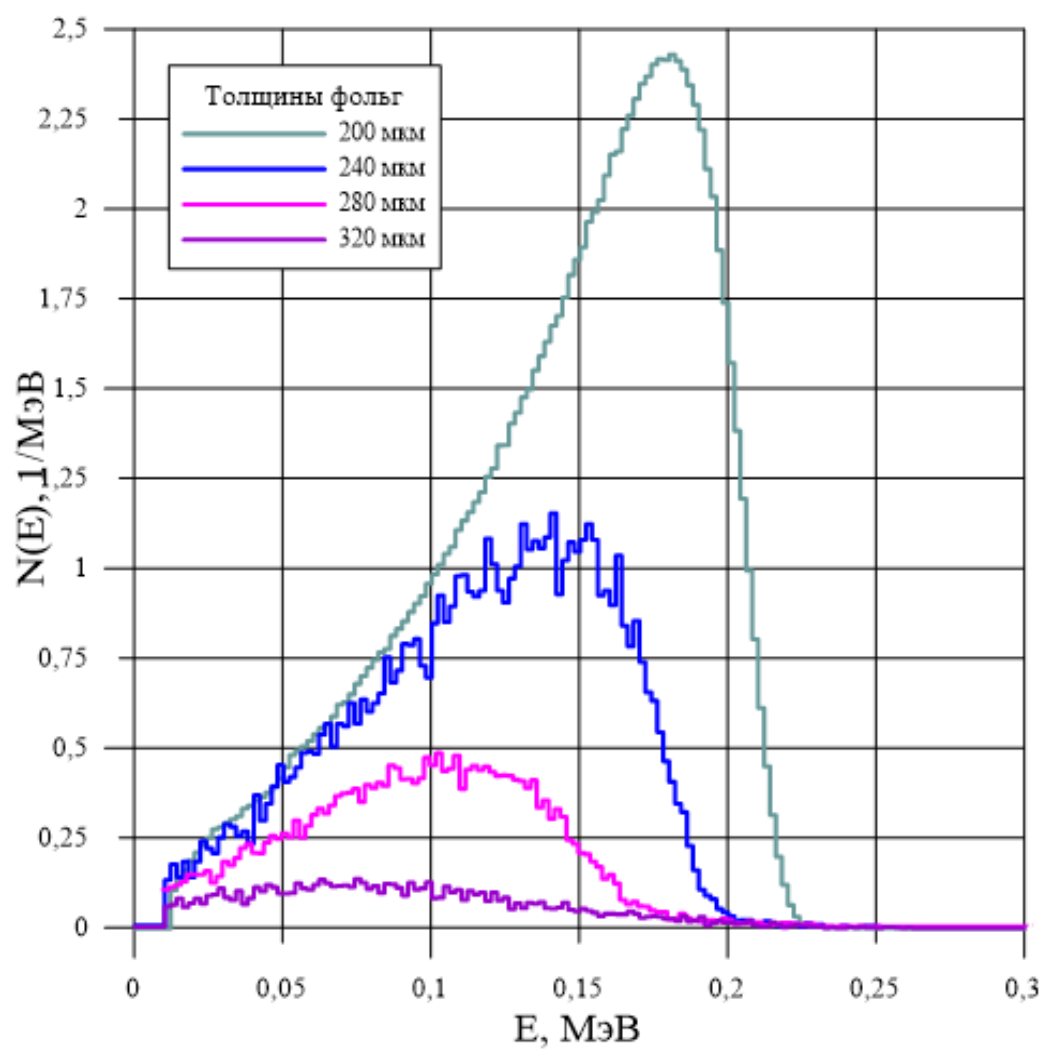


Рис. 2.9. Спектры электронов, падающих на образец, для различных толщин рассеивающей фольги

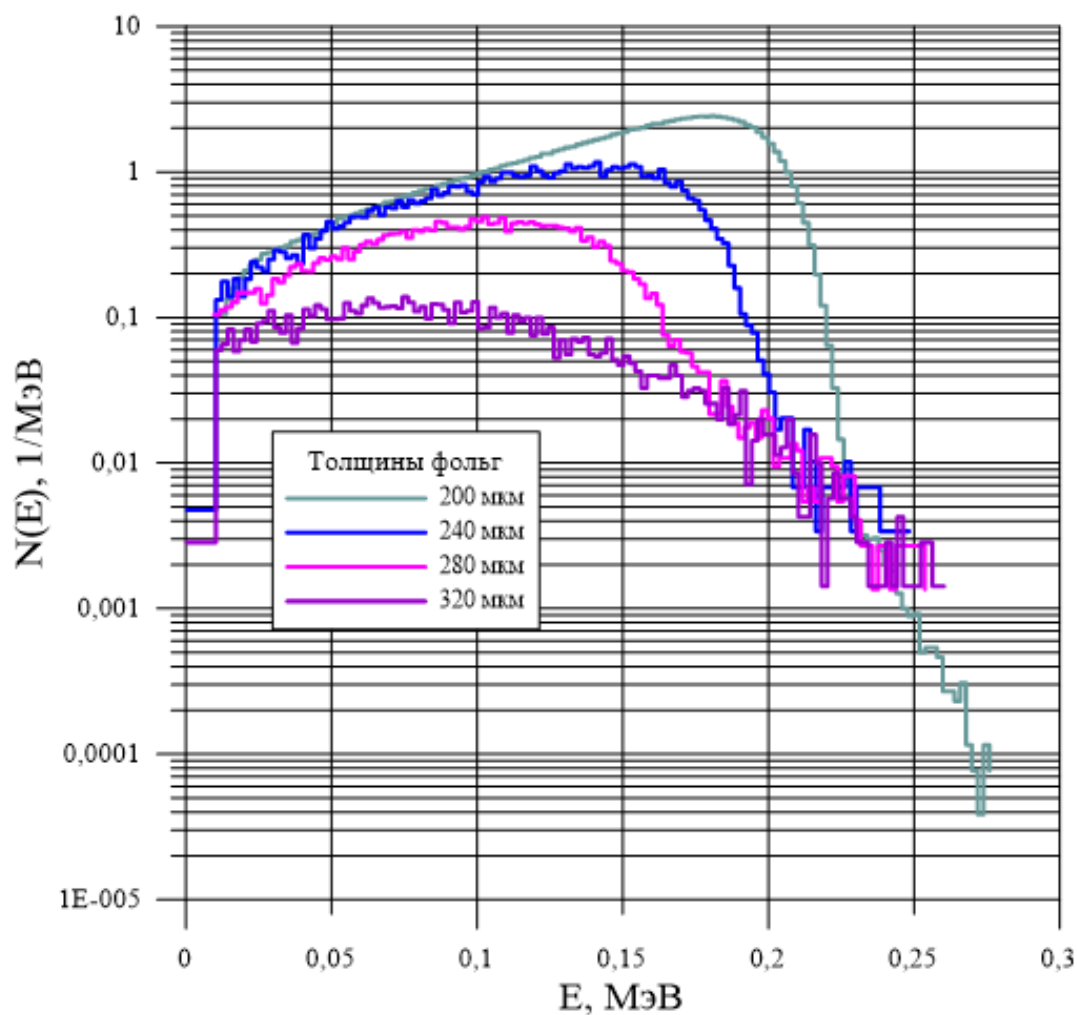


Рис. 2.10. Спектры электронов, падающих на образец, для различных толщин рассеивающей фольги

Из приведенных результатов хорошо видно, что для всех спектров число электронов резко уменьшается в области энергий менее наиболее вероятной энергии. По этой причине из набора элементарных электронных спектров трудно смоделировать космический (SPACE) спектр с непрерывным возрастанием числа электронов с уменьшением их энергии.

Для расчета результирующего SPACE спектра из набора полученных элементарных спектров, был использован режим работы UTILITY-SPECTRUM в программе PCLAB (см. рис. 2.11). Данный режим позволяет:

- Проводить сравнение интегральных и дифференциальных спектров;

- С помощью методики сложения с определенными вкладами нескольких элементарных спектров можно получать результирующий (LAB) спектр с необходимым распределением (формой) электронов.

Основное назначение данного режима – подбор LAB спектра электронов из набора рассчитанных или измеренных элементарных спектров за фольгами различных толщин, форма которого соответствует заданному SPACE спектру.

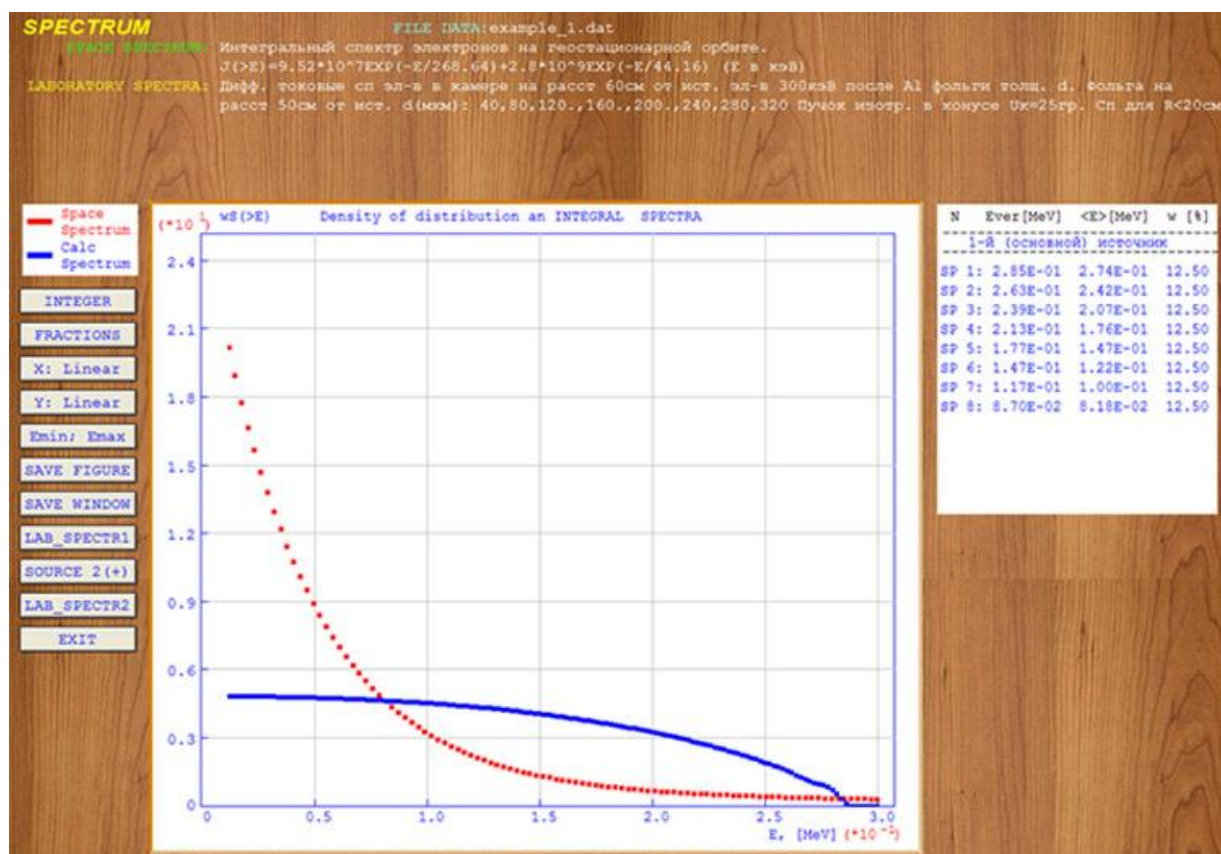


Рис. 2.11. Окно программы SPECTRUM

Данный режим также позволяет регулировать процентную составляющую вкладов каждого из элементарных спектров в результирующий. Таким образом, изменяя вклады можно достичь необходимого соответствия с натурным SPACE спектром в определенной энергетической области.

Результаты, полученные при расчете интегрального спектра на основе приведенных элементарных спектров от каждой фольги, представлены на рис. 2.12. Интегральный спектр частиц, который используется при описании энергетических распределений частиц в космическом пространстве, определяется выражением

$$N(E >) = \int_E^{E_{\max}} N(E) dE,$$

где  $N(E)$  – дифференциальный (1/МэВ) спектр частиц.

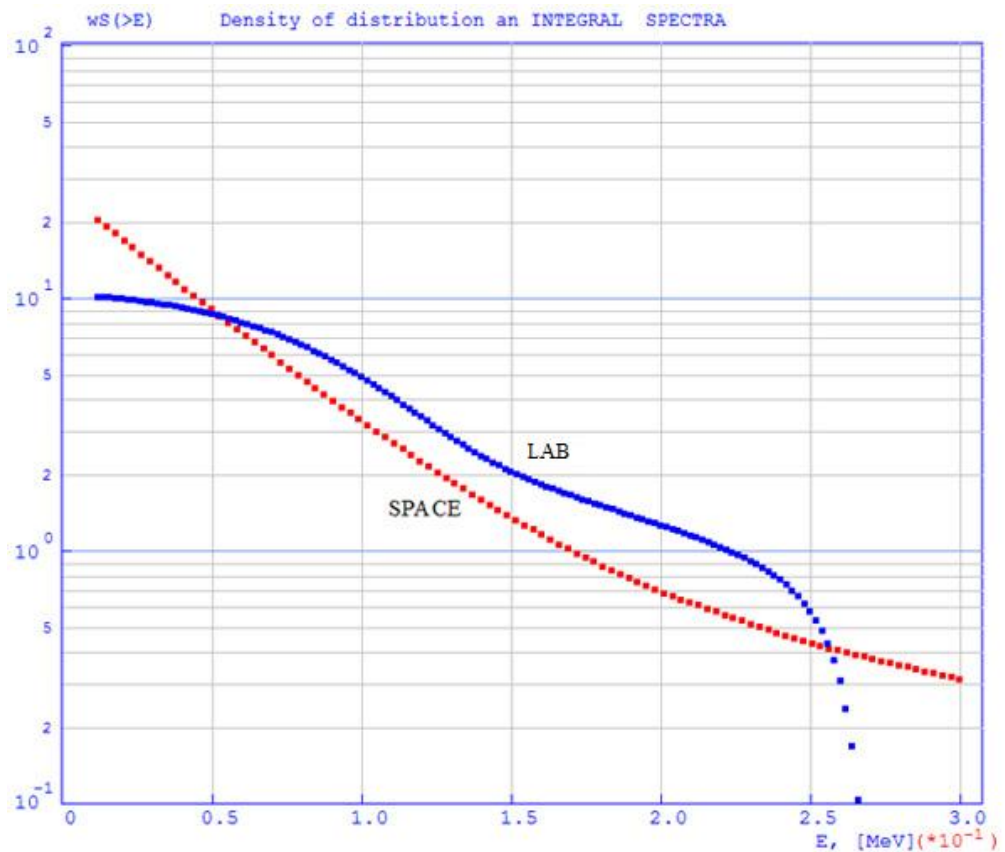
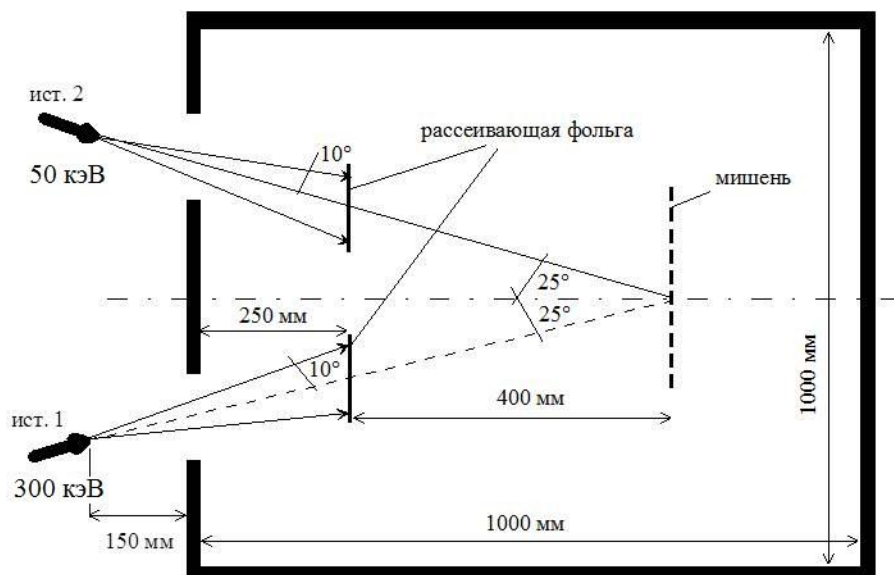


Рис. 2.12. Сравнение интегральных SPACE и LAB спектров электронов от комплексной фольги для проектируемой камеры. (от источника 300 кэВ)

Из рис. 2.12 хорошо видно, что в виду особенности распределения SPACE спектра электронов не удастся получить необходимую форму спектра в низкоэнергетической области (энергии менее 50 кэВ). Эту особенность отмечают и создатели установки SIRENE. Поэтому для повышения

соответствия лабораторного спектра космическому необходим второй низкоэнергетический источник электронов. В создаваемой камере предполагается использовать электронную пушку на энергию до 50 кэВ. Пучок электронов от этой пушки будет пропускаться через Al фольгу фиксированной толщины. Геометрия камеры была изменена на геометрию, представленную на рис. 2.13



2.13. Схема вакуумной камеры с двумя источниками 50 кэВ и 300 кэВ

Результат моделирования показал, что возможно получить интегральный LAB спектр, хорошо согласующийся с космическим при помощи двух источников энергии 300 кэВ и 50 кэВ. Пучок электронов с энергией 300 кэВ необходимо предварительно пропустить через рассеивающую фольгу, имеющую переменную толщину по всей площади, а электроны от источника с энергией 50 кэВ пропустить через Al фольгу толщиной 10 мкм. Вклады элементарных спектров в результирующий LAB спектр представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

## Вклады элементарных спектров

|                      |     |     |     |     |     |     |     |     |    |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| Толщина<br>Al, мкм   | 340 | 300 | 280 | 240 | 200 | 160 | 120 | 80  | 40 |
| Вклад в<br>спектр, % | 76  | 20  | 3   | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0  |

Вклады элементарных спектров означают, что вся площадь рассеивающей фольги делится на зоны. Каждая зона имеет определенную толщину, а доля площади зоны от площади всей фольги соответствует вкладу соответствующего спектра. Например, 76% площади всей фольги должна быть равна 340 мкм, 20% иметь толщину 300 мкм и т. д. Необходимо иметь в виду, что все толщины менее максимальной толщины должны размещаться равномерно по площади фольги, т. к. на образец должен падать равномерный поток электронов.

На рис. 2.14 приведено сравнение космического и лабораторных спектров от двух источников с процентной составляющей каждого из элементарных спектров, приведенных выше.



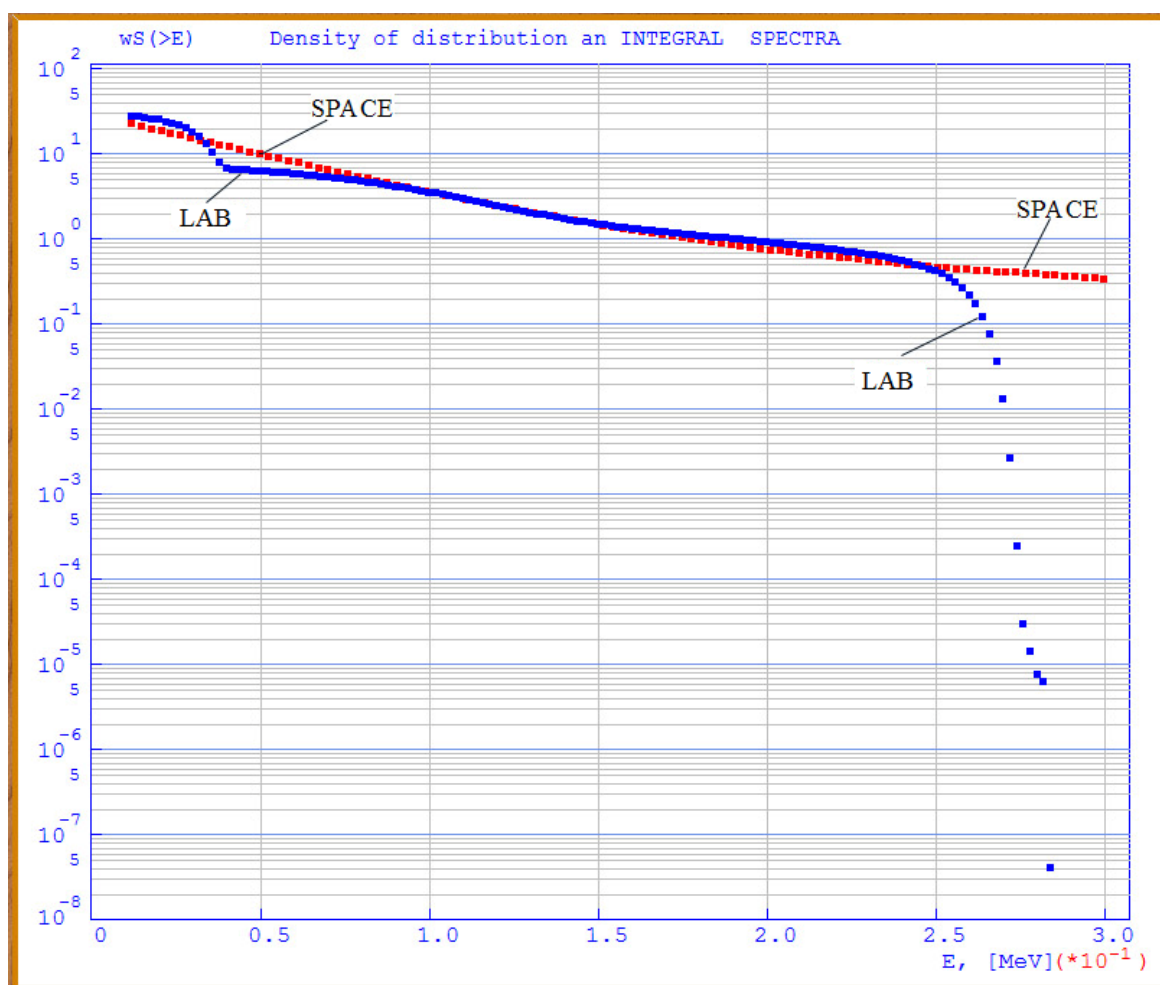


Рис. 2.14. Сравнение интегральных SPACE и LAB спектров электронов от двух источников

Роль второго источника с энергией 50 кэВ в формировании результирующего спектра хорошо видна из сравнения рис. 2.12 и 2.14. Нельзя добиться хорошего совпадения спектров при низких энергия (менее  $\sim 50$  кэВ) без применения второго низкоэнергетического источника. По результатам расчетов вклад излучения второго источника должен составлять 20%. Это означает, что его ток должен быть в 5 раз меньше тока источника с энергией 300 кэВ.

Результаты моделирования также показали, что добиться необходимой формы дифференциального спектра гораздо труднее, чем для интегрального. Дифференциальный LAB спектр с теми же вкладами

элементарных спектров (см. табл. 2.1) и дифференциальный SPACE спектр представлен на рис. 2.15.

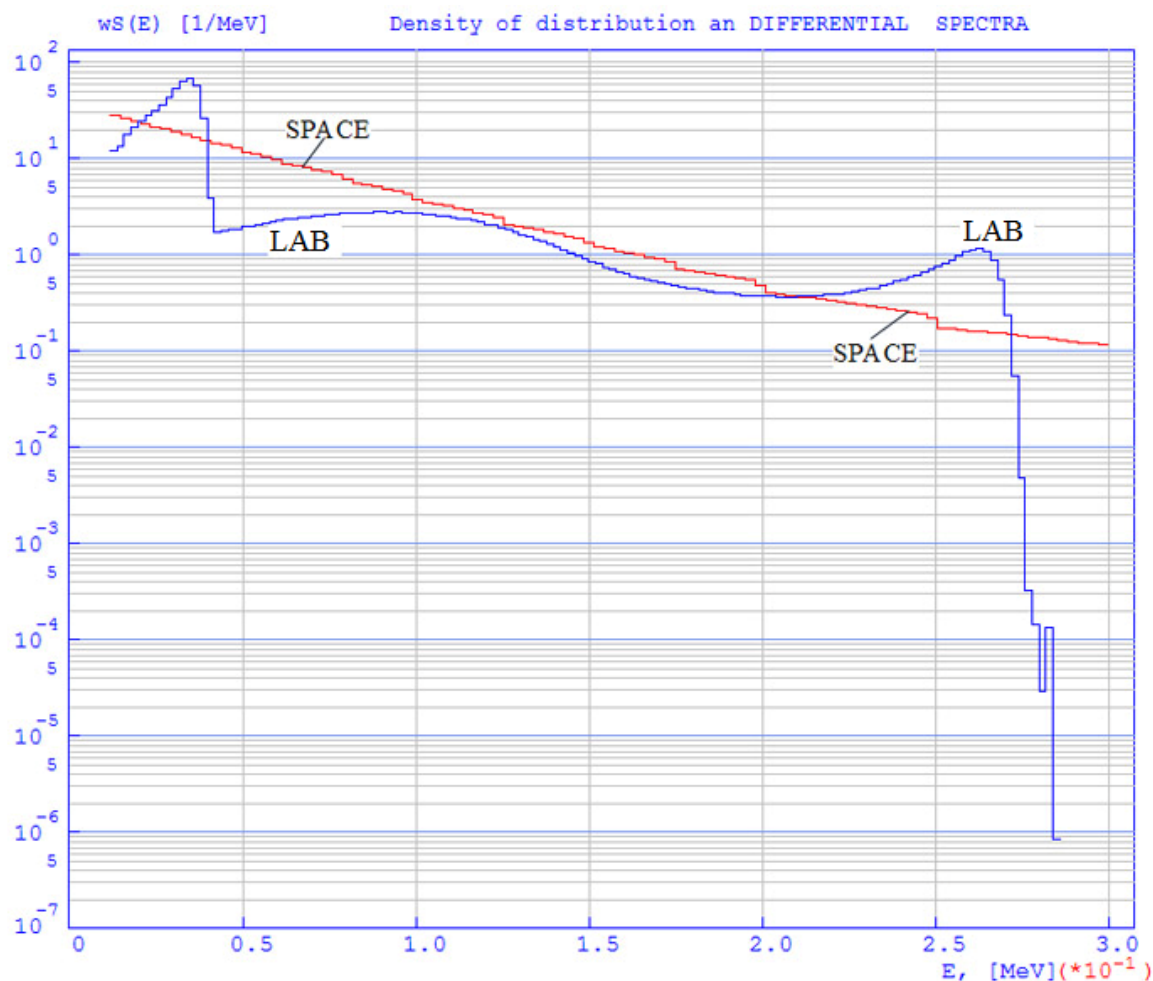


Рис. 2.15. Дифференциальные SPACE и LAB спектры для комплексной фольги и двух источников

Для моноэнергетического пучка ускорителя, используемого для создания сплошного спектра, характерны большие потери, так например, на рис. 2.16 изображен график отношения количества падающих частиц к числу, формирующих спектр в области образца (на расстоянии 65 см от начала камеры), выраженный в процентах, в зависимости от толщины фольги, через которую пропускается пучок. Данные для него приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Зависимость отношения числа электронов к электронам первичного пучка в области формирования спектра

| d, мкм  | 40    | 80    | 120   | 160   | 200   | 240   | 280   | 320   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| N(z), % | 6.757 | 5.891 | 5.063 | 3.866 | 2.377 | 1.167 | 0.425 | 0.002 |

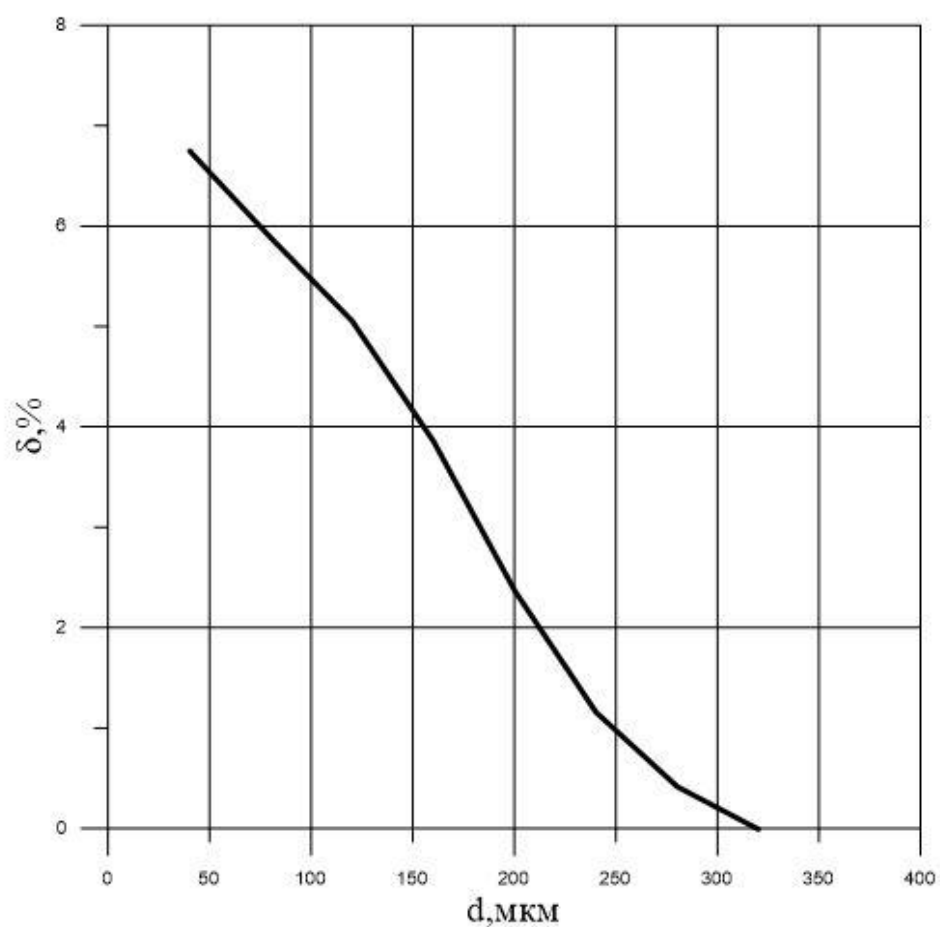


Рис. 2.16 – Отношение числа электронов, формирующих спектр к числу первичных электронов от ускорителя в месте тестируемого образца к толщине фольги

На рис. 2.17 представлено отношение числа электронов, формирующих спектр к первичным электронам от ускорителя, в зависимости от расстояния, пройденного электронами в вакуумной камере установки. Для толщины рассеивающей фольги 240 мкм.

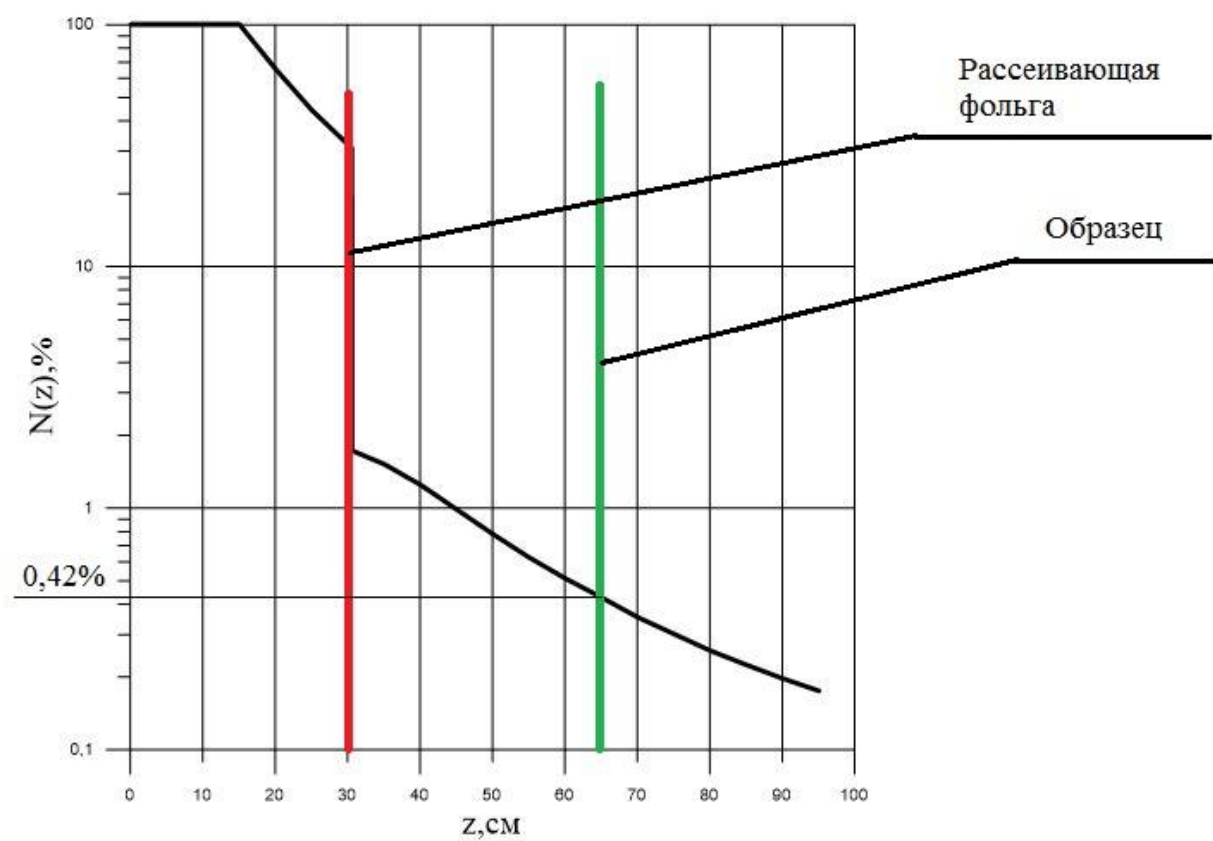


Рис. 2.17 – Отношение числа электронов, формирующих спектр к числу первичных электронов от ускорителя в зависимости от расстояния, пройденного в вакуумной камере

## Выводы

1. Показано, что с помощью неоднородной по толщине Al фольги, возможно моноэнергетический пучок электронной пушки с энергиями несколько сотен кэВ, преобразовать в непрерывный спектр с распределением подобным космическому спектру.
2. Одна электронная пушка на энергию 300 кэВ не позволяет получить необходимую форму электронного спектра в низкоэнергетической области. Для хорошего согласия LAB и SPACE электронных спектров необходимо использовать дополнительный источник с энергиями менее 50 кэВ
3. Преобразование спектра сопровождается большими потерями электронов. На образец попадает менее 1% электронов от первичного пучка.
4. Проведенные расчеты показали, что для источников электронов на основе электронных пушек не удастся одновременно получить все три характеристики электронного космического излучения: энергетическое распределение, равномерное пространственное и изотропное угловое распределение.
5. Задачу по определению геометрии сложной рассеивающей фольги целесообразно решать методом статистического моделирования – методом Монте Карло. Это значительно ускоряет и удешевляет ее решение.

### Глава 3

#### Моделирование энергетического распределения электронов на основе бета-излучения радионуклидных источников

Во второй главе данной работы показано, как в лабораторных условиях получить спектр электронов, соответствующий электронному SPACE спектру, на основе моноэнергетических пучков электронных ускорителей.

Но особенностью космического излучения, помимо особой формы спектра является изотропное угловое и равномерное радиальные распределения (пространственная однородность). Данные распределения невозможно получить методом пропускания моноэнергетического пучка через фольгу переменной толщины (не внося изменения в геометрию эксперимента). Радиальное и угловое распределения электронов, падающих на поверхность образца, после Al фольги толщиной 40 мкм представлены на рис. 3.1 и 3.2. Из графиков хорошо видно, что радиальное и угловое распределения не соответствуют космическим, хотя спектр электронов имеет хорошее согласие с натурным.

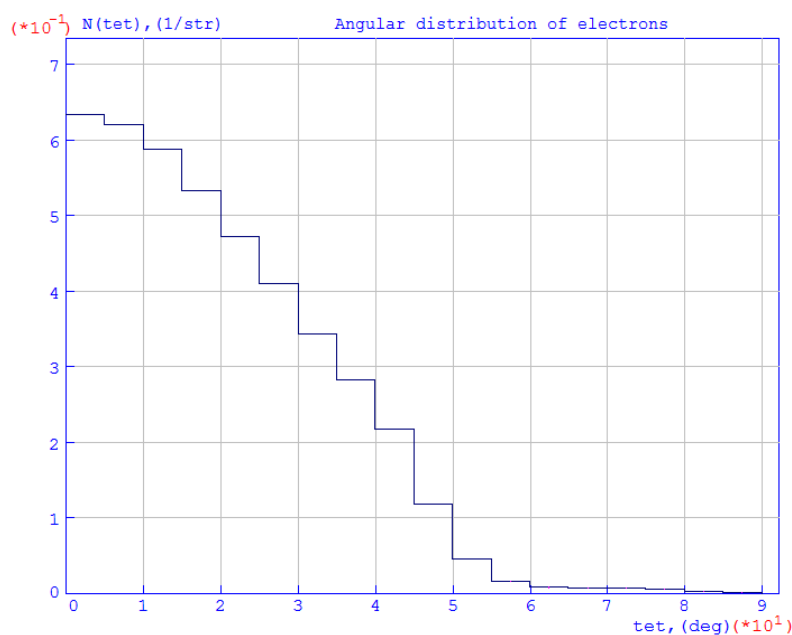


Рис. 3.1. Угловое распределение электронов, прошедших фольгу 40 мкм

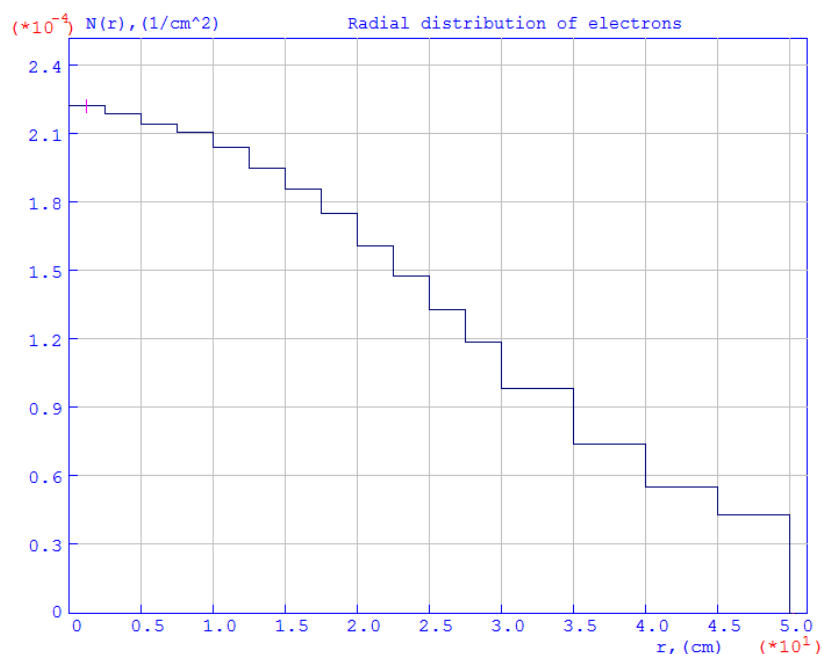


Рис. 3.2. Радиальное распределение электронов, прошедших фольгу 40 мкм

Как известно, бета-излучение радионуклидных источников имеет непрерывный спектр, а также изотропное угловое распределение. Если изготовить источник (например, дисковый) с достаточными поперечными размерами и с равномерной активностью по поверхности, то он может обеспечить и однородное пространственное распределение электронов на образце. Тонкие слои источника возможно получить используя метод напыления.

В данной главе предпринята попытка получения всех трех характеристик электронного космического излучения при помощи бета-излучения радионуклидных источников. Моделирование проводилось методом Монте-Карло в программе PCLAB [4] в режиме BARRIER.

Следует отметить, что такой источник представляет определенную радиационную опасность, поэтому необходимо предусматривать специальные устройства для защиты от бета-излучения источника и для его хранения.

Расчеты проводились для камеры из главы 2 данной работы. Схема численного эксперимента представлена на рис. 3.3:

- Длина камеры – 100 см;
- Диаметр камеры – 100 см;
- расстояние между началом камеры и подложкой с источником – 40 см
- толщина слоя радионуклида – 0,01 см;
- радиус источника переменный (10–25) см;
- образец помещен на расстояние 70 см от передней стенки камеры.

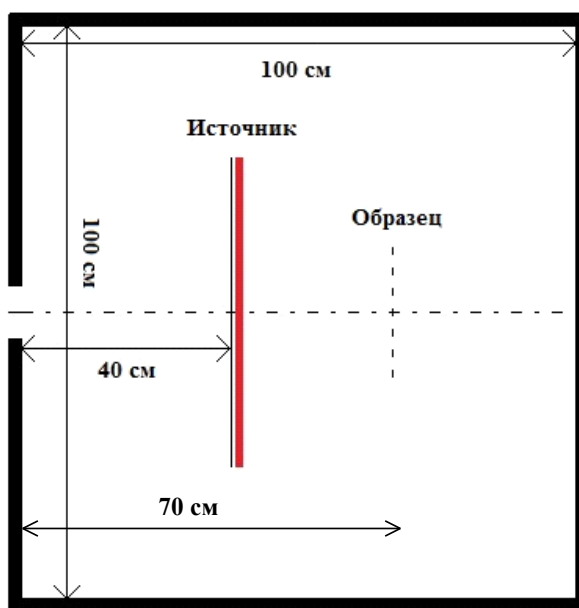


Рис. 3.3. Геометрия расчетов для бета-излучения р/н

### 3.1 Моделирование характеристик электронов для бета-излучения $^{137}\text{Cs}$

Первоначальные (проверочные) расчеты были проведены для  $\beta^-$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$  с периодом полураспада 30,17 лет

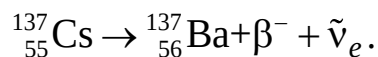




Схема распада  $^{137}\text{Cs}$  приведена на рис. 3.4.  $^{137}\text{Cs}$ , в основном, используется как моноэнергетический источник гамма-излучения с энергией 0,662 МэВ. Сам  $^{137}\text{Cs}$  испытывает  $\beta^-$ -распад в результате которого образуется стабильный изотоп бария  $^{137}\text{Ba}$ . Но с вероятностью 94,6%  $\beta^-$ -распад идет на метастабильный уровень  $^{137}\text{Ba}$ , который в свою очередь с периодом полураспада 2,55 мин переходит в основное состояние, испуская гамма-квант с энергией 661,7 кэВ (или конверсионный электрон с энергией 661,7 кэВ, уменьшенной на величину энергии связи электрона).

Число  $\beta^-$ -частиц в спектре  $^{137}\text{Cs}$  в интервале энергий 1–500 кэВ быстро возрастает с уменьшением их энергии (как и у электронного дифференциального SPACE спектра (см. рис. 3.5 и 2.14)).

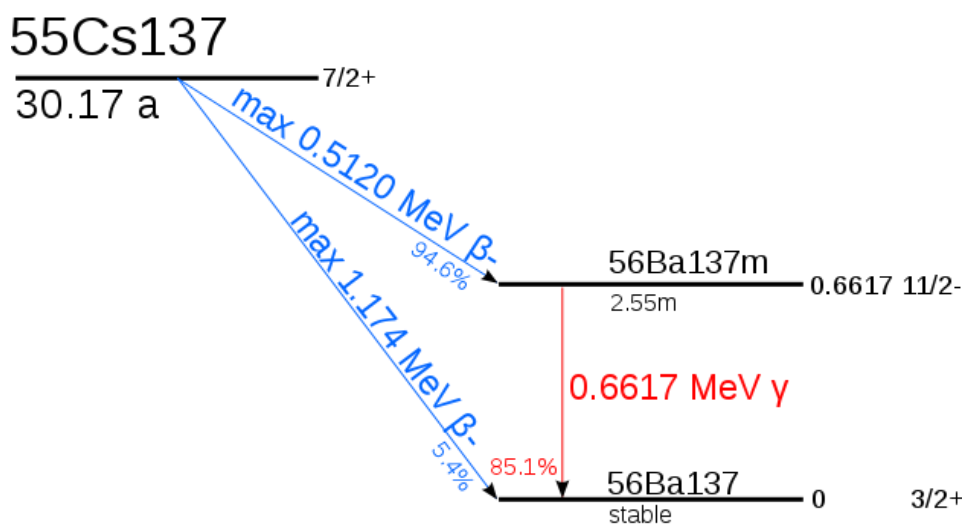


Рис. 3.4. Схема распада  $^{137}\text{Cs}$

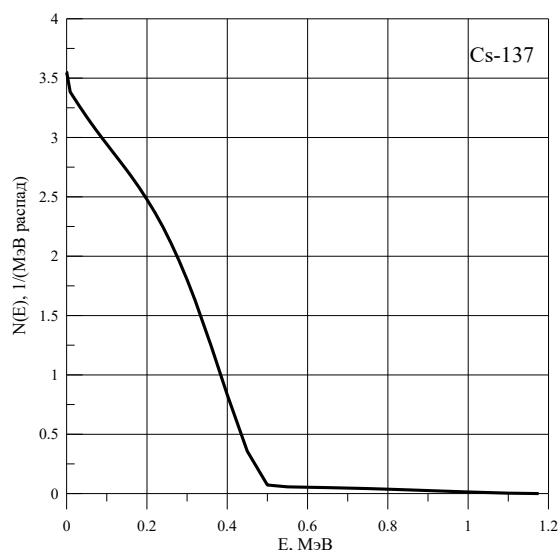


Рис. 3.5. Спектр  $\beta^-$ -излучения  $^{137}\text{Cs}$

Хорошее согласие спектра, радиального и углового распределения можно достичь, помещая источник достаточно близко к образцу. В виду сильных электростатических полей, возникающих в электризуемом образце, необходимо располагать источник и образец на расстоянии более 30 см. Поэтому для получения пространственной однородности и изотропного углового распределения, необходимо увеличивать радиус источника.

Первоначально радиус источника ( $R_{\text{ист}}$ ) полагали равным 10 см, затем он увеличивался с шагом 5 см.

### 3.1.1 Спектр электронов

На рис. 3.6 и 3.7 приведены спектры электронов, падающих на образец. Минимальная энергия данного спектра составляет 15 кэВ. Был взят низкоэнергетический интервал до 500 кэВ. Из рисунков следует, что число электронов, падающих на образец, уменьшается с увеличением радиуса источника. Это связано с возрастанием утечек электронов через боковую область образца. Также рис. 3.6 и 3.7 следует, что форма спектра не зависит от  $R_{\text{ист}}$ .

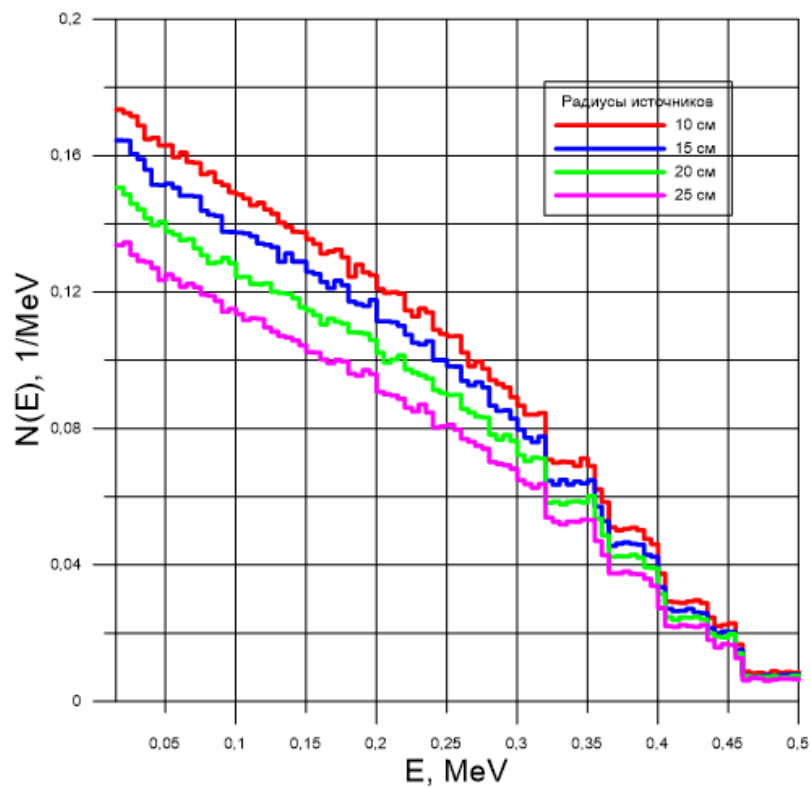


Рис. 3.6. Спектр электронов от источника Cs-137

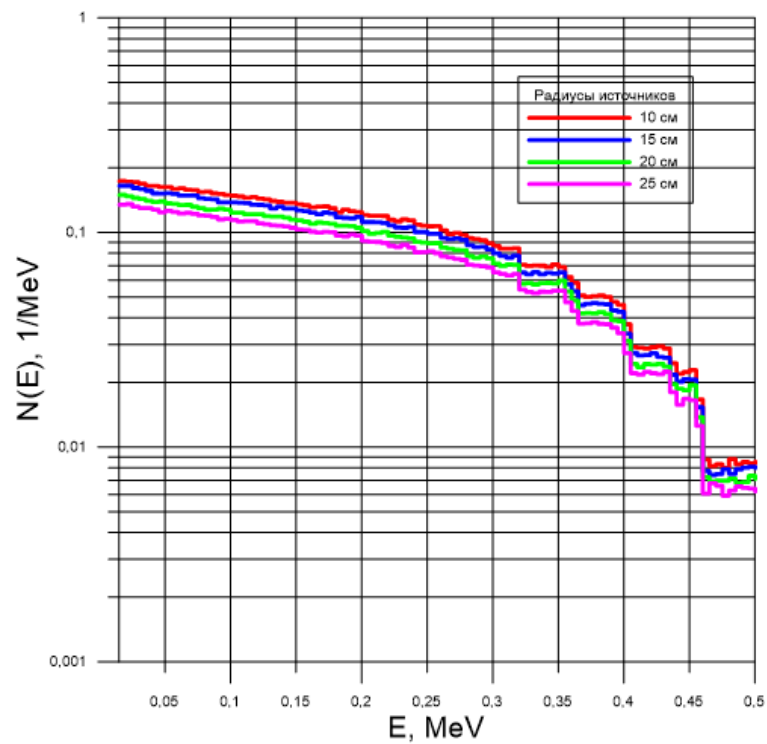


Рис. 3.7. Спектр электронов от источника Cs-137 в логарифмическом масштабе

### 3.1.2 Радиальное распределение

Радиальное распределение, при моделировании с радионуклидным источником, почти равномерное по всей измеряемой области ( $R=10$  см) на расстоянии 30 см от источника. Лучшую равномерность можно получить при использовании больших по радиусу источников, в несколько раз превышающих размеры образца. Но в этом случае увеличиваются потери бета-частиц.

Для хорошего равномерного распределения электронов, падающих на образец, необходимы большие поперечные размеры источника, превышающие размеры образца.

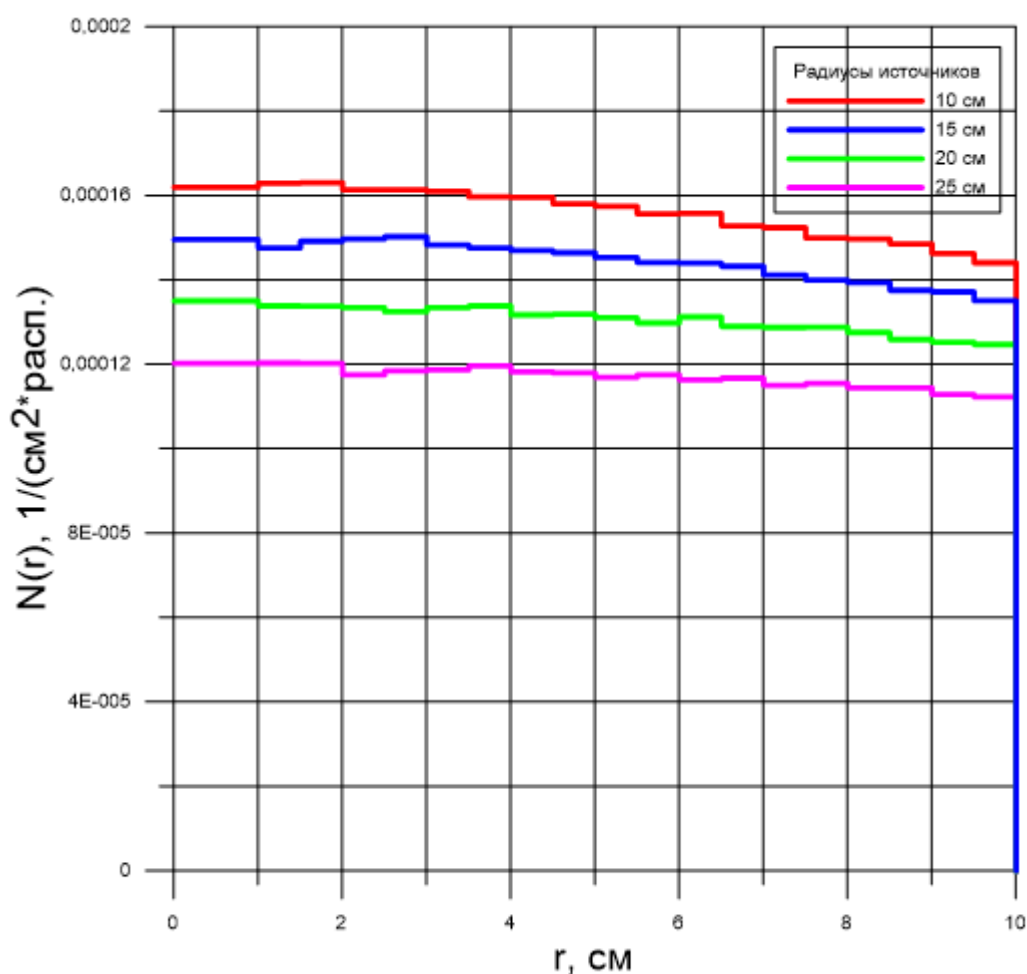


Рис. 3.8. Радиальное распределение электронов от источника Cs-137

### 3.1.3 Угловое распределение

Изотропность углового распределения увеличивается при увеличении радиуса источника, это можно наглядно заметить на графиках в линейном и логарифмическом масштабе (рис. 3.9, 3.10). В логарифмическом масштабе на графике для всех радиусов (рис. 3.10) возникает возрастание числа частиц на больших углах. В ходе дополнительного моделирования было выяснено, что это увеличение обусловлено электронами, которые отразились от боковой поверхности камеры. Это демонстрирует (рис. 3.11, 3.11а) где угловое распределение рассчитано для одной и той же вакуумной камеры с боковыми стенками и без них.

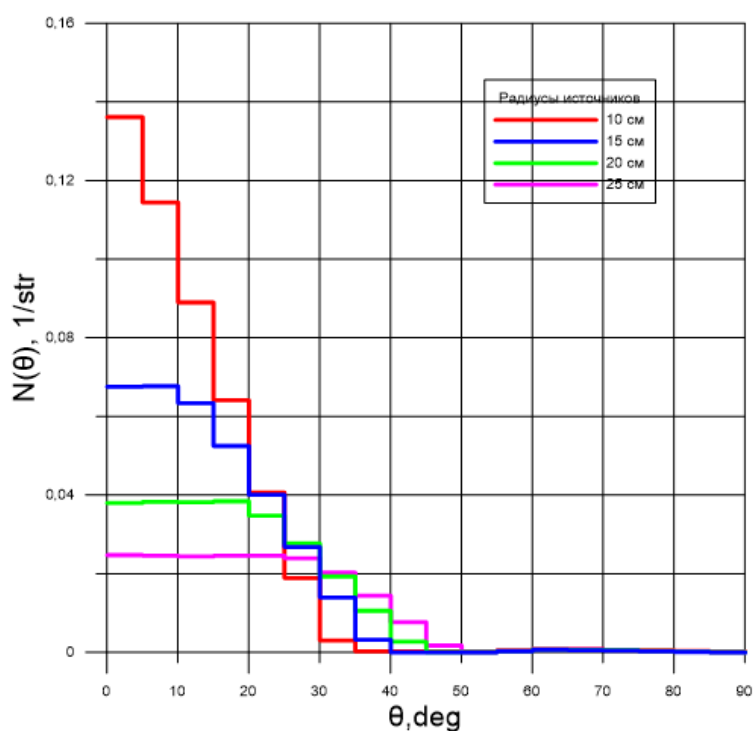


Рис. 3.9. Угловое распределение электронов от источника Cs-137

Из рис. 3.9 и 3.10 хорошо видно, что с увеличением радиуса источника угловое распределение  $\beta$ -частиц, падающих на образец становится более изотропным, но даже для радиуса источника 25 см (в 2,5 раза больше радиуса образца) для углов более  $40^\circ$  имеет место быстрое уменьшение числа  $\beta$ -частиц.

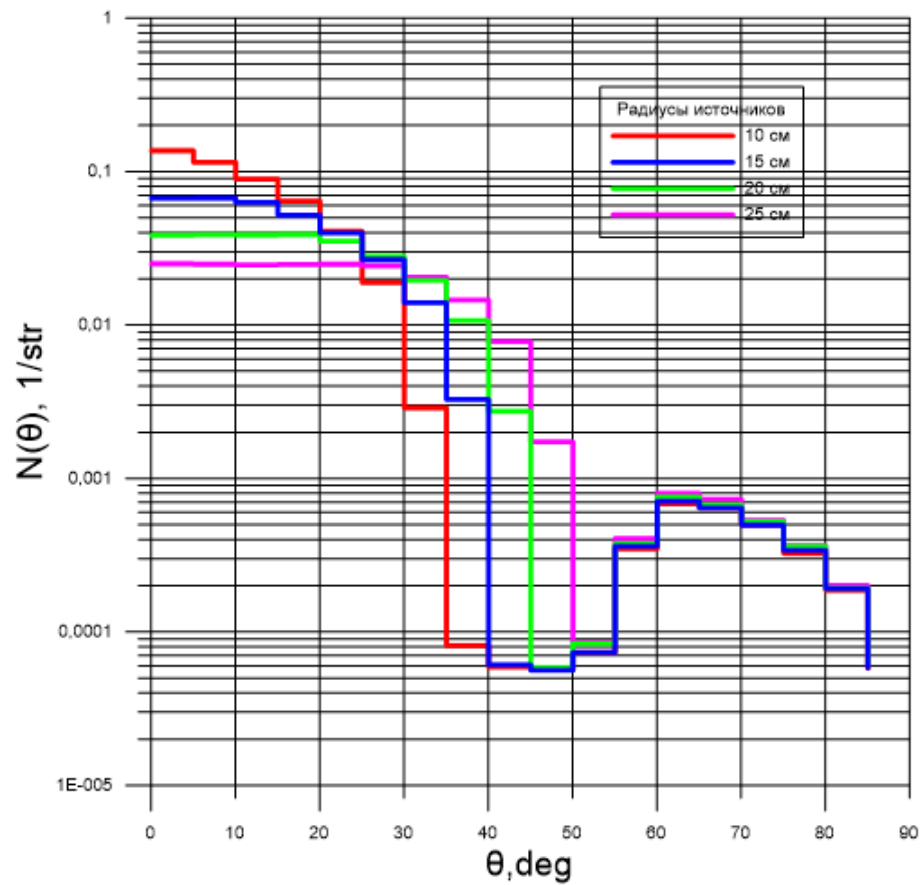


Рис. 3.10. Угловое распределение электронов от Cs-137 в логарифмическом масштабе

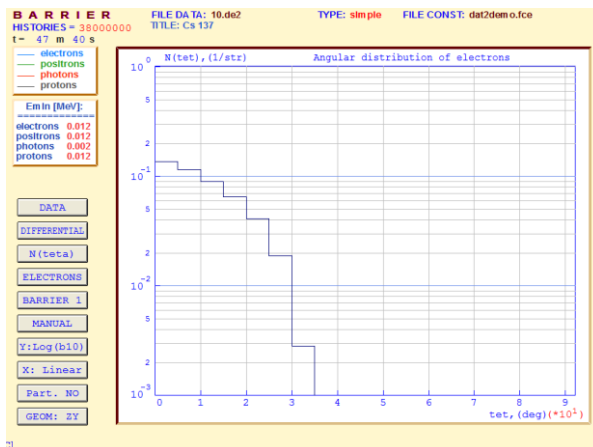


Рис. 3.11 – Угловое распределение электронов от источника  $^{137}_{55}\text{Cs}$  радиуса  $10\text{ cm}$  в камере без боковой стенки

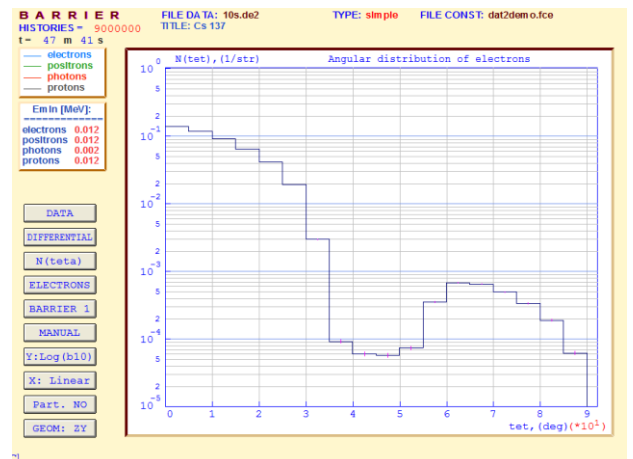


Рис. 3.11a. Угловое распределение электронов от источника  $^{137}_{55}\text{Cs}$  радиуса  $10\text{ cm}$  в камере с боковой железной стенкой

### **3.1.4 Расчет влияния гамма-излучения $^{137}\text{Cs}$ на спектр электронов**

В виду того, что помимо электронов энергии 1,17 МэВ и 0,51 МэВ испускает в 95 % случаев фотоны энергии 0,5 МэВ. Были проведены расчеты с учетом всех видов излучения р/н  $^{137}\text{Cs}$ , для оценки влияние гамма-излучения этого источника на рассчитываемые характеристики поля излучения. Гамма-излучение непосредственно не создает дополнительной электризации образца, но может изменить спектр  $\beta^-$ -частиц за счет вторичных электронов, рождающихся в стенках камеры.

Результаты моделирования показали, что в этом отношении гамма-излучение  $^{137}\text{Cs}$  не оказывает заметного влияния на спектр, радиальное и угловое распределения, графики практически неразличимы во всей области формирования спектра.

Заметное влияние гамма-излучение оказывает на поглощенную в образце энергию. С этой целью был проведен расчет поглощенной энергии в образце, который представили слоем Al толщиной 2 мм и радиусом 100 мм. Получены следующие результаты:

- Только  $\beta^-$ -излучение  $^{137}\text{Cs}$ :  $\Delta E = 0,0088 \pm 0,00003 \frac{\text{МэВ}}{\text{распад}}$  ;
- Все излучение  $^{137}\text{Cs}$ :  $\Delta E = 0,0122 \pm 0,00005 \frac{\text{МэВ}}{\text{распад}}$  .

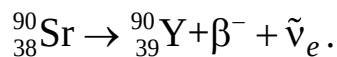
Увеличение примерно на 28%.

### **3.1.5 Влияние алюминиевой подложки на спектр**

Помимо расчета распределений электронов с учетом гамма-излучения  $^{137}\text{Cs}$ , были также проведены расчеты, учитывающие наличие подложки в радионуклидном источнике. Моделирование показало также отсутствие значительного влияние подложки на формирования спектра, угловых, радиальных распределений по всей области. Руководствуясь данными расчетами можно выбирать источник, имеющий в своем спектре гамма-кванты, но в этом случае возрастают сложности защиты для такого источника, так как проникающая способность гамма-излучения много выше, чем у электронов.

### 3.2 Моделирование характеристик электронов для бета-излучения $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  – это  $\beta^-$ -излучающий радионуклид с  $T_{1/2} = 28,79$  лет, у которого отсутствует гамма-излучение.  $^{90}\text{Sr}$  претерпевает  $\beta^-$ -распад (вероятность 100 %), переходя в радиоактивный иттрий  $^{90}\text{Y}$



Радионуклид  $^{90}\text{Y}$  имеет период полураспада в 64,1 часа и в процессе  $\beta^-$ -распада (вероятность 100 %) с максимальной энергией 2,28 МэВ превращается в стабильный  $^{90}\text{Zr}$

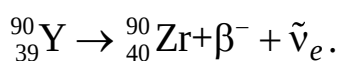


Схема распада источника  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  приведена на рис. 3.12.

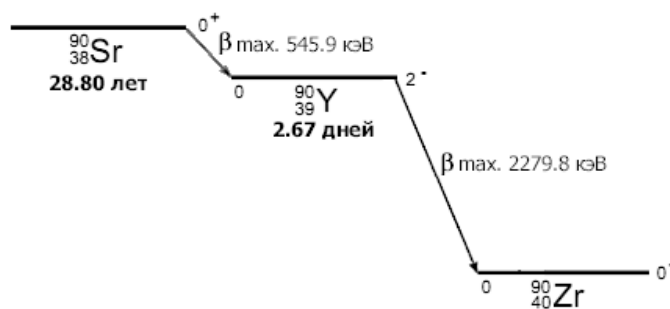


Рис. 3.12. Схема распада  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

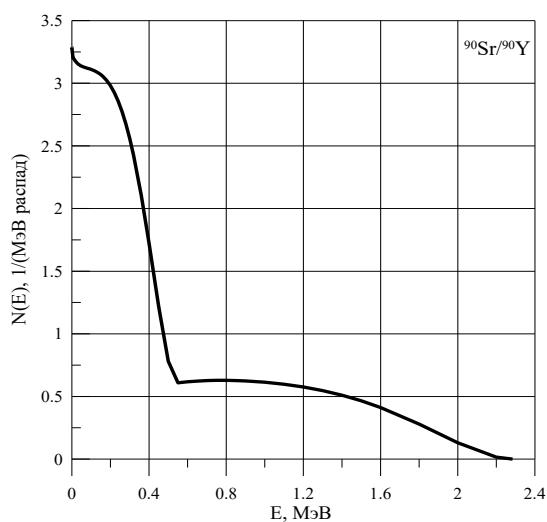


Рис. 3.13. Спектр  $\beta^-$ -излучения



На рис. 3.13 приведен суммарный Спектр  $\beta^-$ -излучения  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ .

Для источника  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  рассчитаны такие же характеристики  $\beta^-$ -излучения, падающего на образец, как и для источника  $^{137}\text{Cs}$ . Расчеты проведены для нескольких радиусов источника. На рис. 3.14 приведены дифференциальные спектры  $\beta^-$ -излучения для энергий менее 500 кэВ.

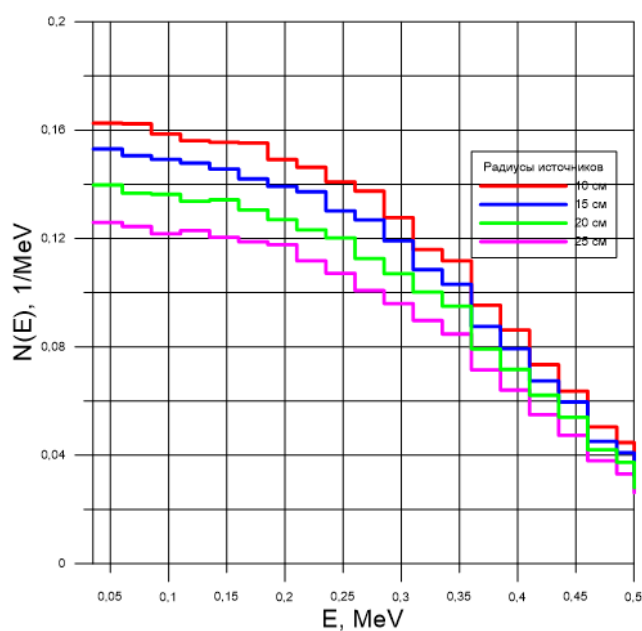


Рис. 3.14. Спектр  $\beta^-$ -частиц, падающих на образец от источника  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

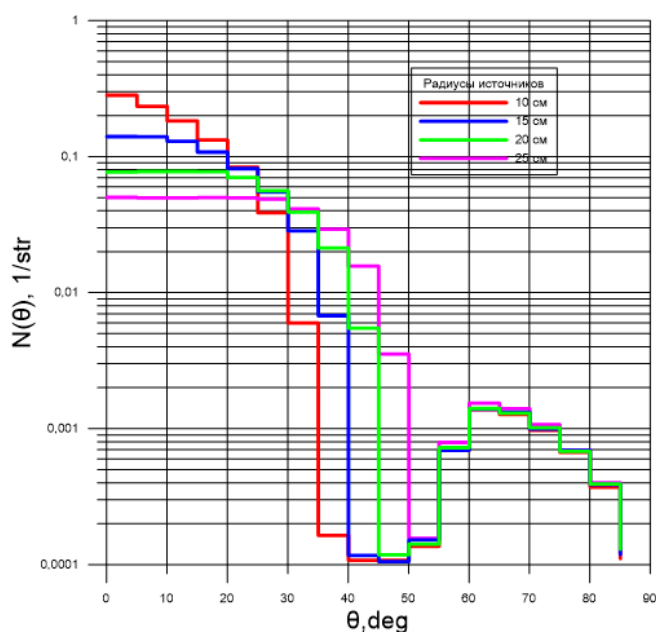


Рис. 3.15. Угловое распределение  $\beta^-$ -частиц на образце для источника  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

На рис. 3.15 приведены угловые распределения  $\beta^-$ -частиц, падающих на образец для различных радиусов источника. На рис. 3.16 приведены радиальные распределения этих частиц.

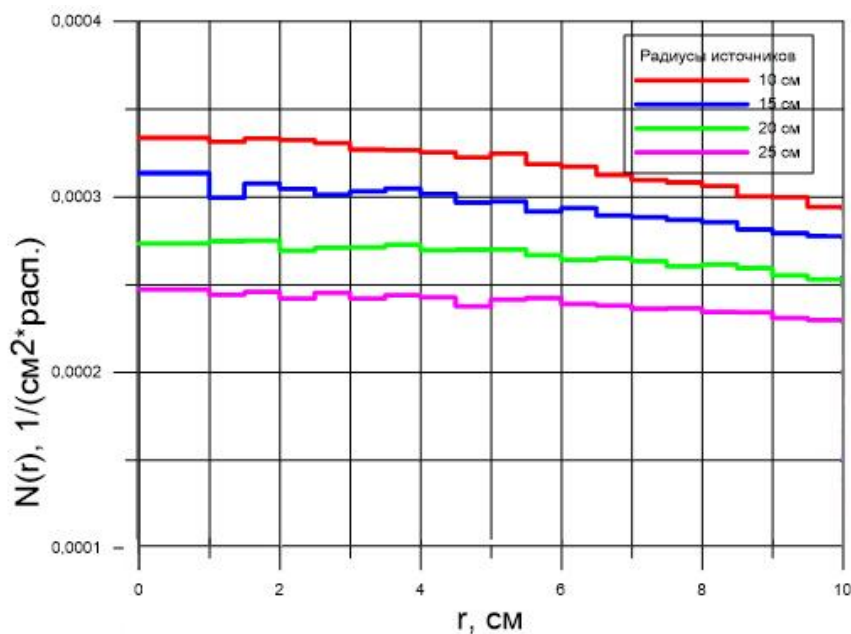


Рис. 3.16. Радиальное распределение  $\beta^-$ -частиц, падающих на образец для источника  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

На рис. 3.17 сравниваются спектры  $\beta^-$ -частиц, падающих на образец, для двух источников  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ .

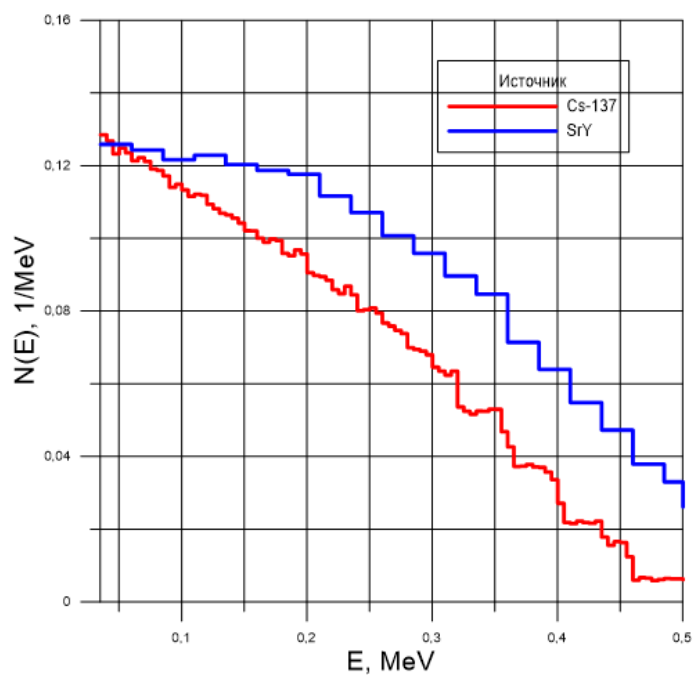


Рис. 3.17. Спектры  $\beta^-$ -частиц, падающих на образец для 2-х источников

### 3.3 Сравнение рассчитанных $\beta^-$ -спектров с электронным SPACE спектром

На рис. 3.18–3.22 сравниваются плотности распределений интегральных спектров  $\beta^-$ -частиц, падающих на образец с интегральным электронным SPACE спектром на геостационарной орбите в различных энергетических интервалах. Спектры сравнивались с помощью программы SPECTRUM.

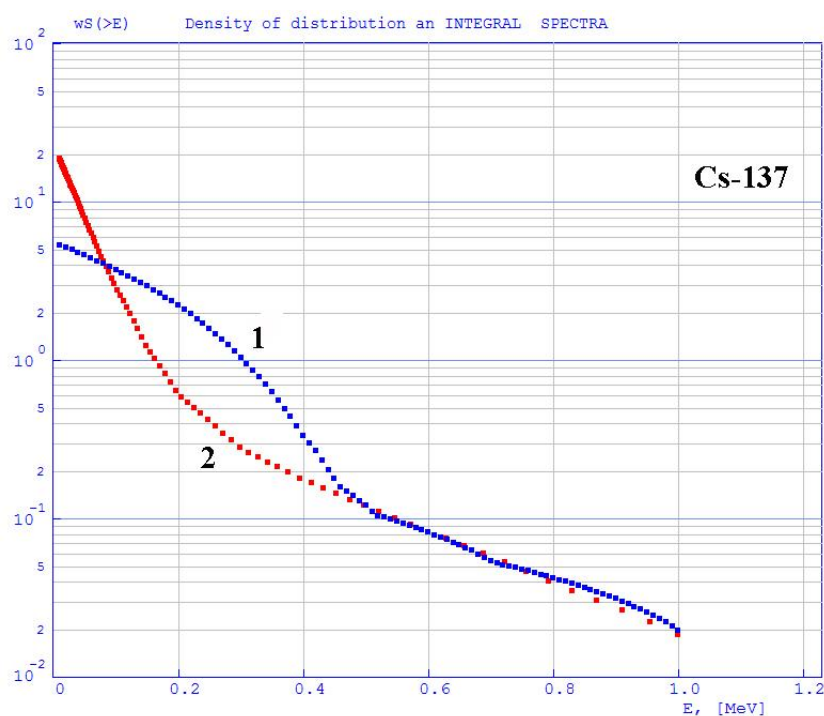


Рис. 3.18. Интегральный спектр  $\beta^-$ -частиц (1) и SPACE спектр (2) в интервале (0,01–1) МэВ

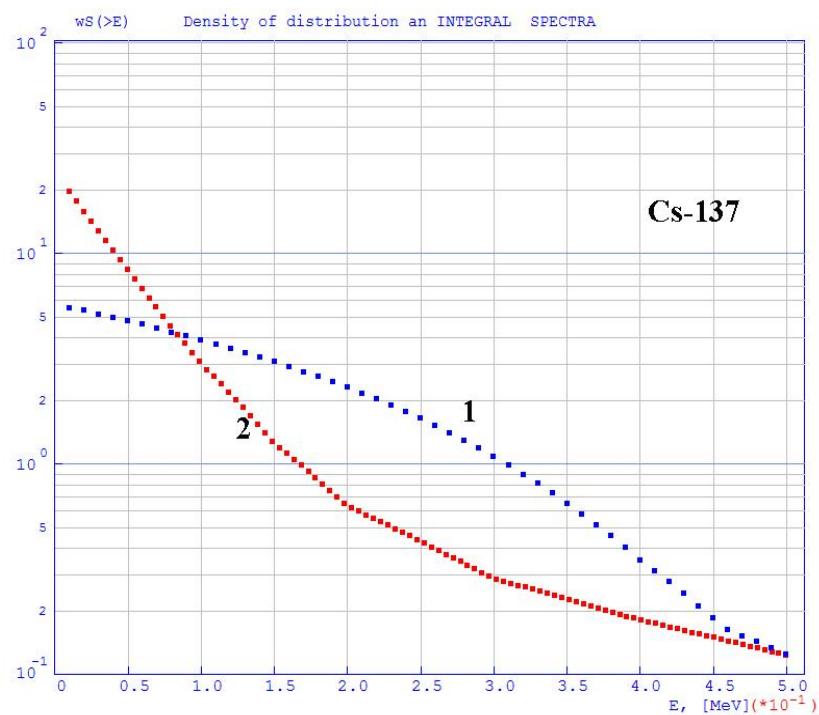


Рис. 3.19. Интегральный спектр  $\beta^-$ -частиц (1) и SPACE спектр (2) (0,01-0,5) МэВ

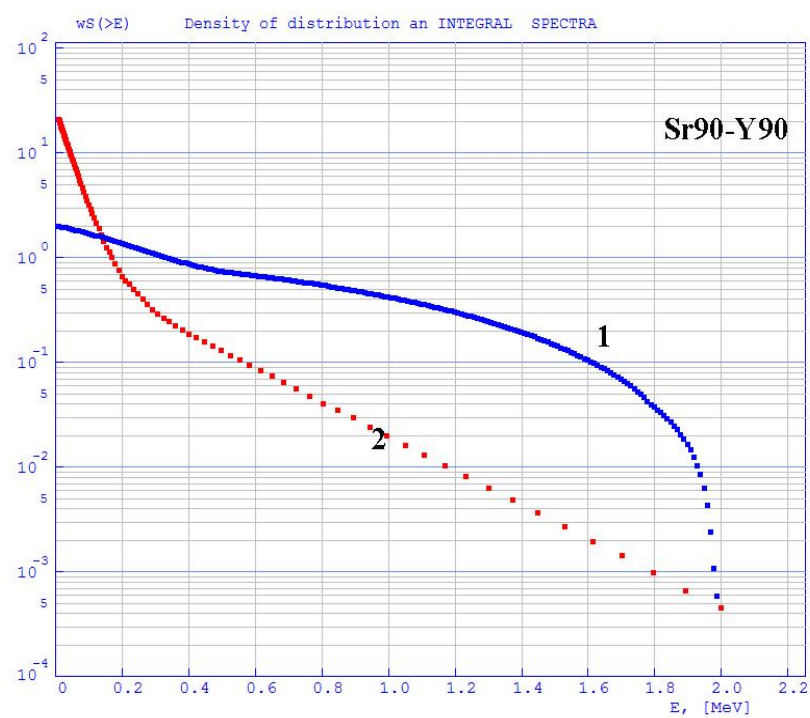


Рис. 3.20. Интегральный спектр  $\beta^-$ -частиц (1) и SPACE спектр (2) (0,01–2) МэВ

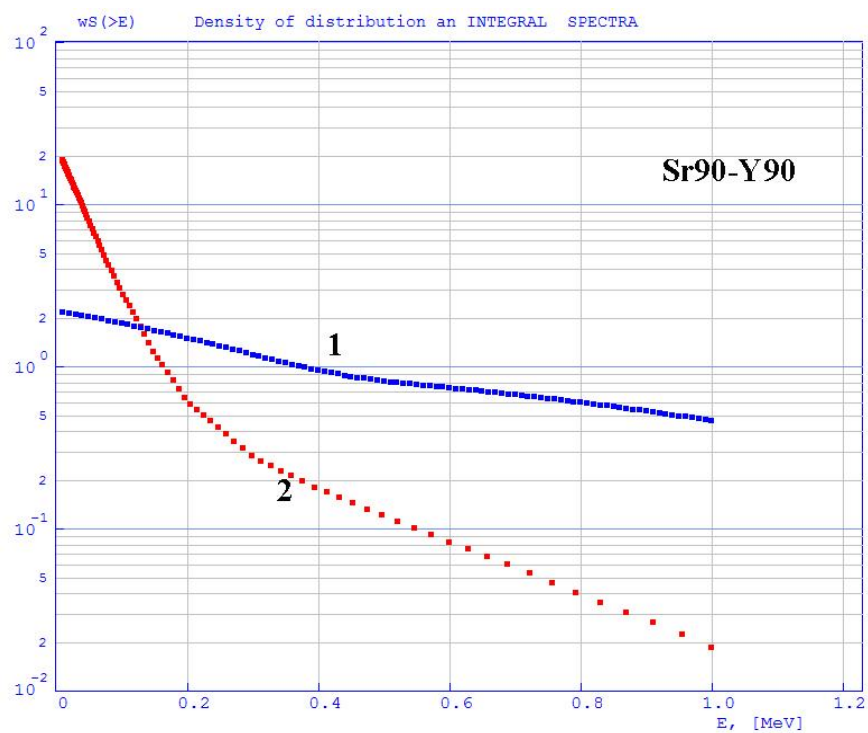


Рис. 3.21. Интегральный спектр  $\beta^-$ -частиц (1) и SPACE спектр (2) (0,01–1) МэВ

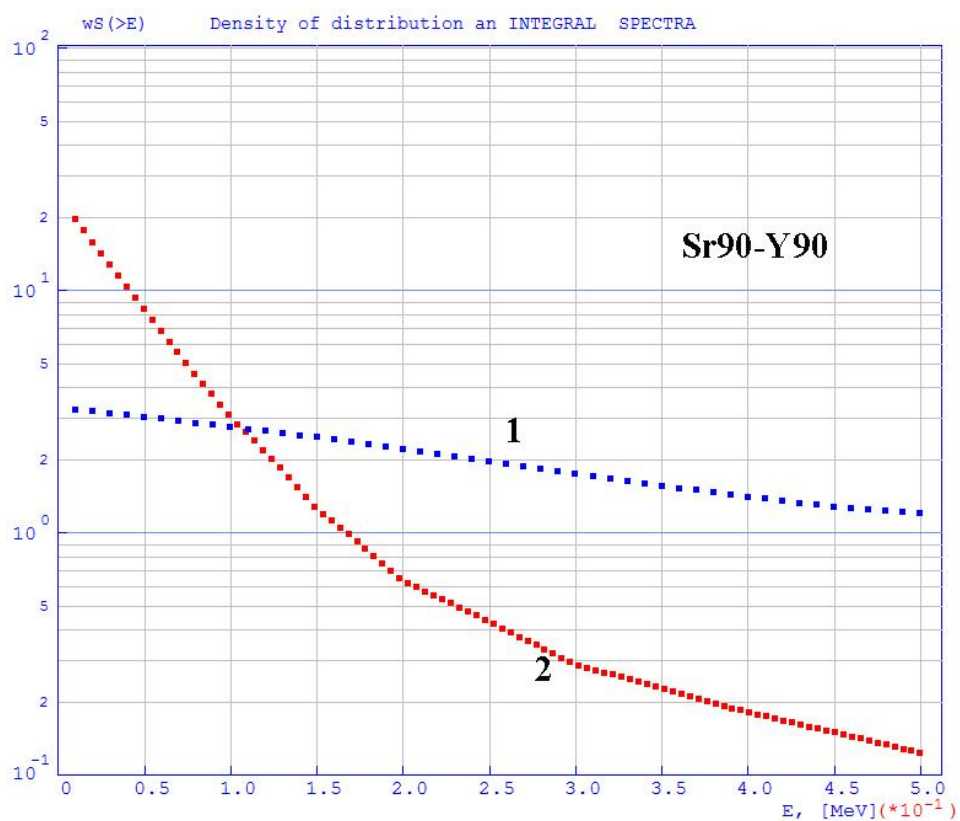


Рис. 3.22. Интегральный спектр  $\beta^-$ -частиц (1) и SPACE спектр (2) (0,01–0,5) МэВ

Рис. 3.23 показывает величину потерь  $\beta^-$ -частиц, летящих к образцу в цилиндрической области с радиусом 10 см, в зависимости от расстояния до источника  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ . Радиус источника 10 см.

Для уменьшения потерь  $\beta^-$ -частиц и улучшения изотропии их углового распределения на образце необходимо уменьшать расстояние между источником и образцом.

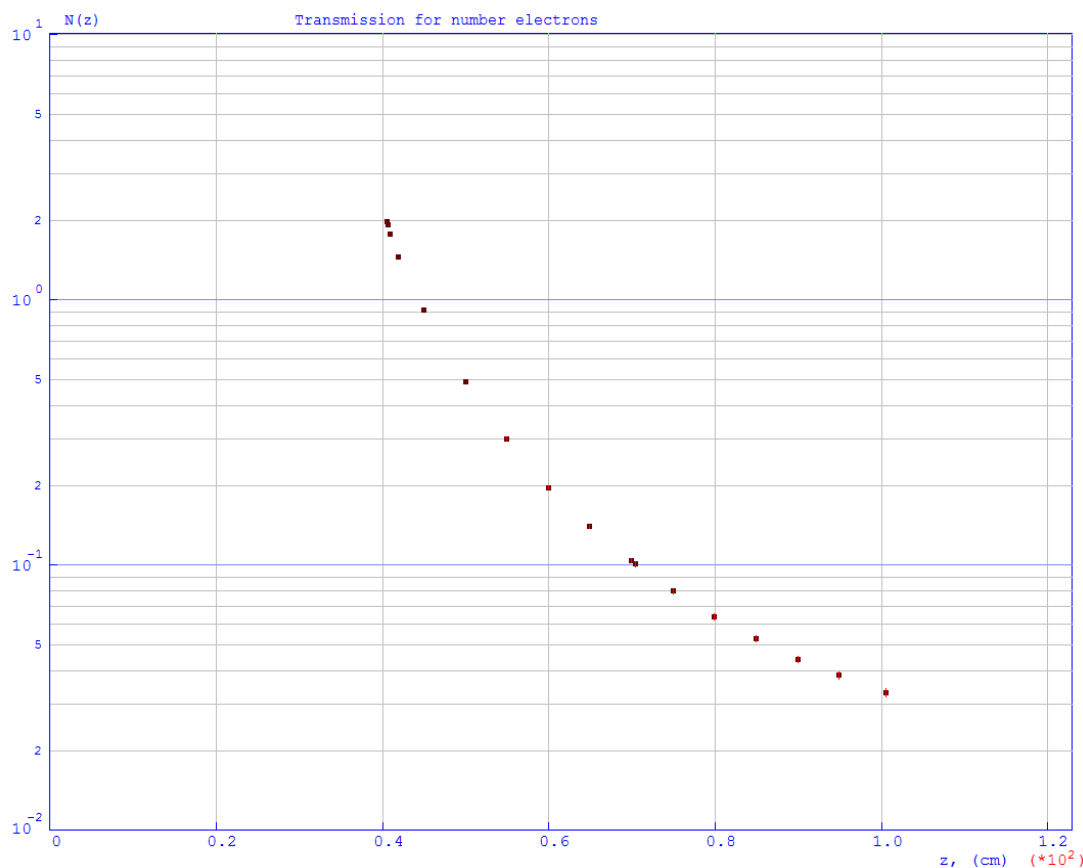


Рис. 3.23. Зависимость числа  $\beta^-$ -частиц, летящих в цилиндрической обл. с  $R=100$  мм от расстояния до источника  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$

При проведении данных расчетов для уменьшения времени расчетов угловое распределение частиц, вылетающих из источников, принималось изотропным только в переднее полупространство!

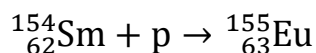
### 3.4 Расчет характеристик электронов для источников $^{147}\text{Pm}$ , $^{155}\text{Eu}$ , $^{63}\text{Ni}$ , $^{32}\text{Si}$

В виду того, что Cs распадается в 95 % случаев в возбужденное состояние Ba, с последующим испусканием гамма-кванта энергии 0,662 МэВ, необходимым условием является создание защиты от фотонов, как следствие усложнение конструкции вакуумной камеры. Спектр  $\text{Sr}^{90}\text{-Y}^{90}$ -источника имеет плохое соответствие с космическим, что демонстрируют рис. 3.22, поэтому были произведены дополнительные расчеты с источниками, которые имеют бета-спектр похожий на космический спектр, – большое число низкоэнергетических электронов. Также, важным условием было наличие у радионуклидов большого периода полураспада (для большего времени использования данного источника). Были выбраны следующие радионуклиды:  $^{155}\text{Eu}$  ( $T_{1/2}=4,76$  лет),  $^{147}\text{Pm}$  ( $T_{1/2}=2,62$  года),  $^{63}\text{Ni}$  ( $T_{1/2}=100$  лет),  $^{32}\text{Si}$  ( $T_{1/2}=170$  лет). Спектры для этих источников в линейном и логарифмическом масштабе, а также соответствие их космическому спектру, представлены далее.

#### 3.4.1 Eu-155

Данный изотоп получается путем выгорания радиоизотопа  $^{154}_{63}\text{Eu}$ , имеющего  $T_{1/2}=8,8$  лет. Период полураспада  $^{155}_{63}\text{Eu}$  составляет  $T_{1/2}=4,76$  лет.  $^{155}_{63}\text{Eu}$  испускает электроны с максимальной энергией 0,25 МэВ с переходом в стабильный  $^{156}_{64}\text{Gd}$  и фотоны энергии 0,087 МэВ и 0,105 МэВ. [5]

Данный радионуклид получают на циклотроне при облучении протонами мишени из  $^{154}_{62}\text{Sm}$ .



Дифференциальный спектр электронов  $^{155}_{63}\text{Eu}$  представлен на рис. 3.24. Сравнение интегрального спектра, полученного при использовании источника  $^{155}_{63}\text{Eu}$ , с космическим спектром, приведено на рис. 3.25, 3.26.

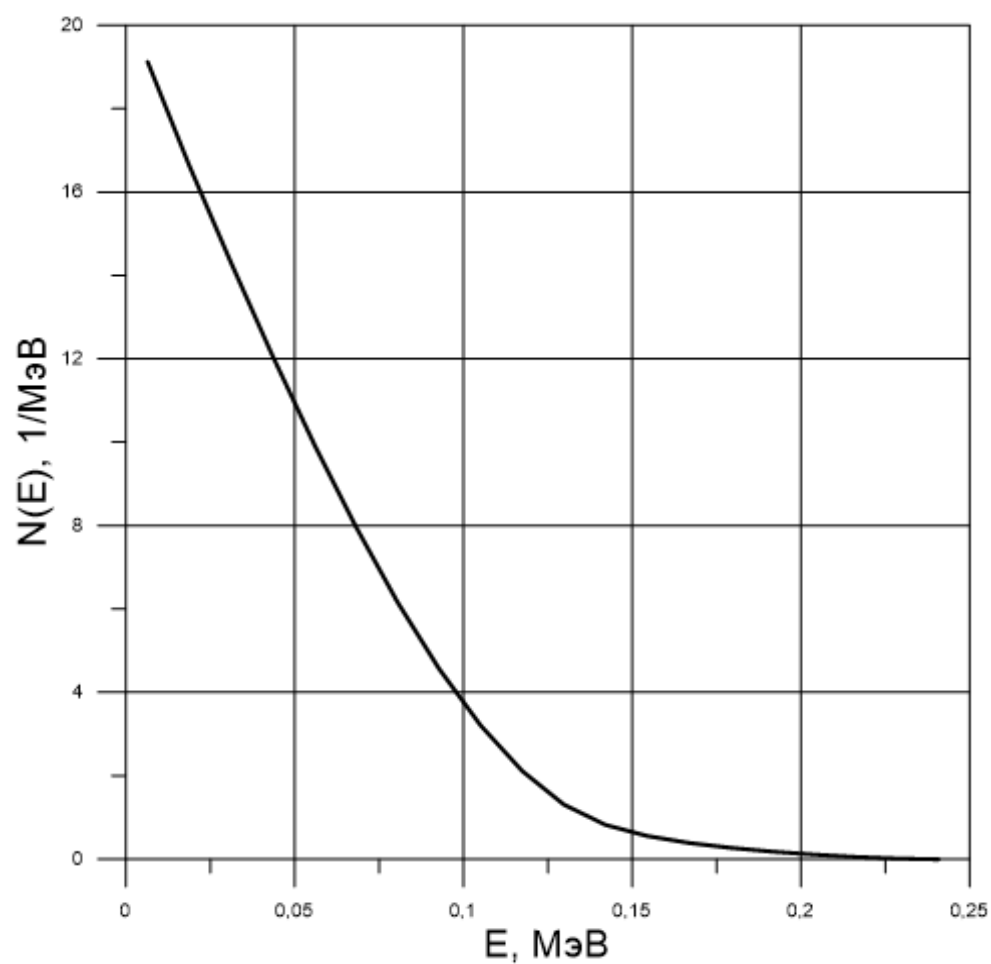


Рис. 3.24 Дифференциальный спектр электронов от источника  $^{155}_{63}\text{Eu}$

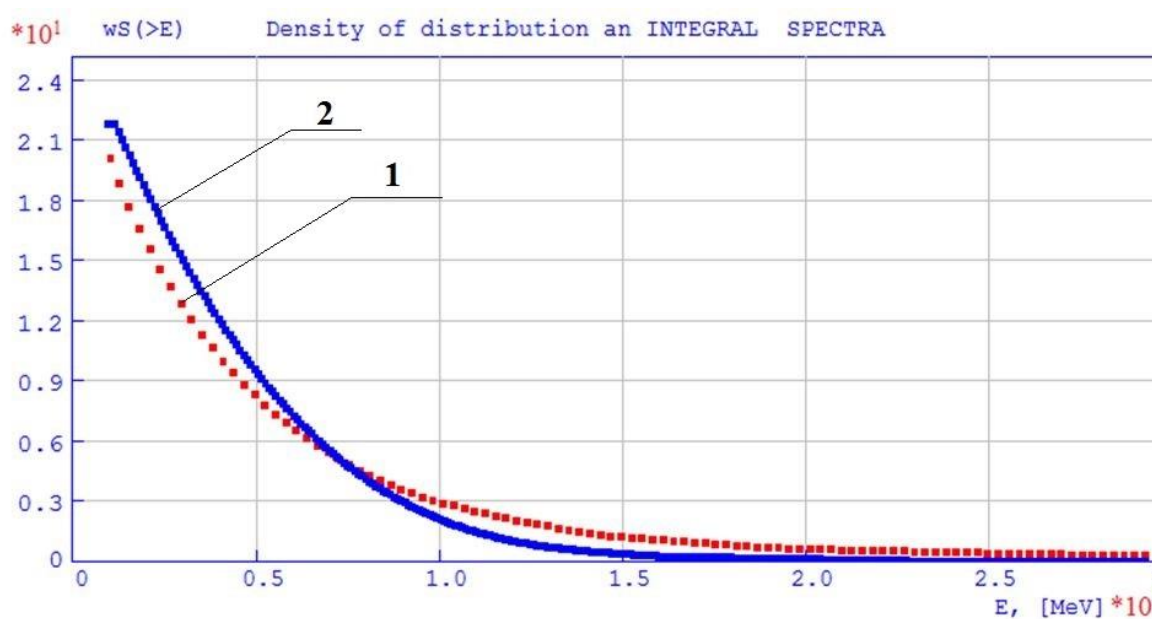


Рис. 3.25. Сравнение интегральных спектров: SPACE (1) и от  $^{155}_{63}\text{Eu}$  (2)



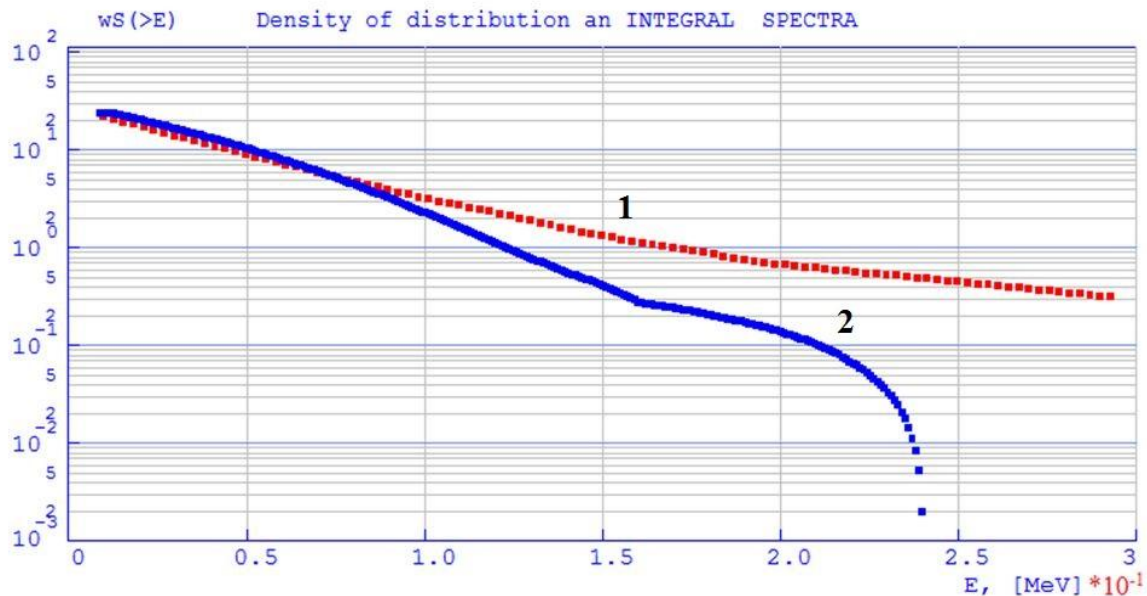


Рис. 3.26. Сравнение интегральных спектров: SPACE (1) и от  $^{155}_{63}\text{Eu}$  (2)

Как видно из рис. 3.25, 3.26, бета-спектр радионуклида  $^{155}_{63}\text{Eu}$  хорошо повторяет космический в низкоэнергетической области примерно до 100 кэВ. Далее спектр расходится, и данный радионуклид невозможно применять для моделирования SPACE спектра в большей энергетической области.

Помимо расчета интегрального спектра, были получены радиальное и угловое распределения в образце, полученные с использованием данного источника ( $^{155}_{63}\text{Eu}$ ). Эти результаты приведены далее на рис. 3.27, 3.28. Данные распределения получены на расстоянии 5 см от источника.

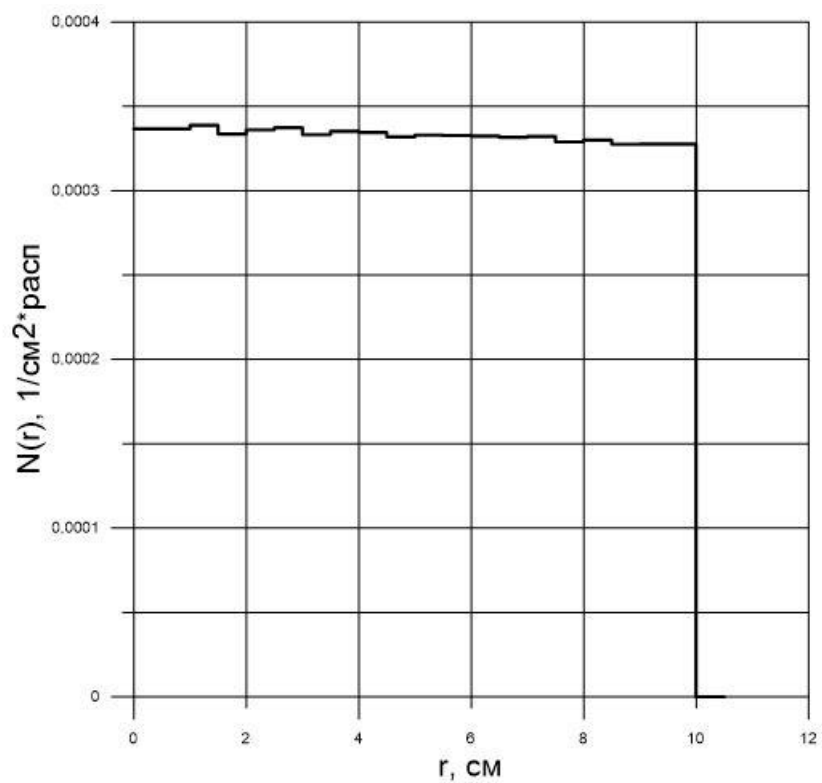


Рис. 3.27 – Радиальное распределение электронов в образце, располагающемся на расстоянии 5 см от источника  $^{155}_{63}\text{Eu}$

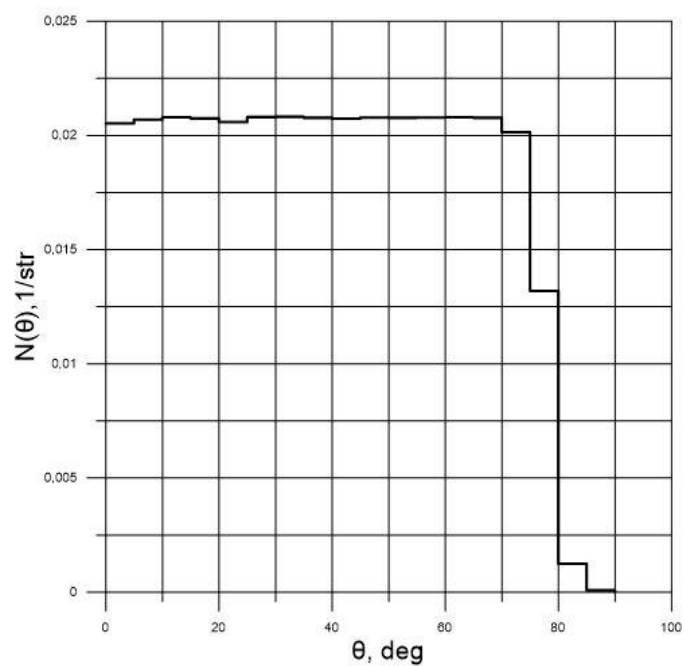


Рис. 3.28 – Угловое распределение электронов в образце, располагающемся на расстоянии 5 см от источника  $^{155}_{63}\text{Eu}$

Как видно из рис. 3.27, 3.28, большую пространственную однородность и более изотропное угловое распределение можно получить, располагая источник на небольшом расстоянии от облучаемого образца. Дифференциальный спектр электронов при данной геометрии на расстоянии 5 см от источника будет иметь следующий вид (рис. 3.29, 3.30).

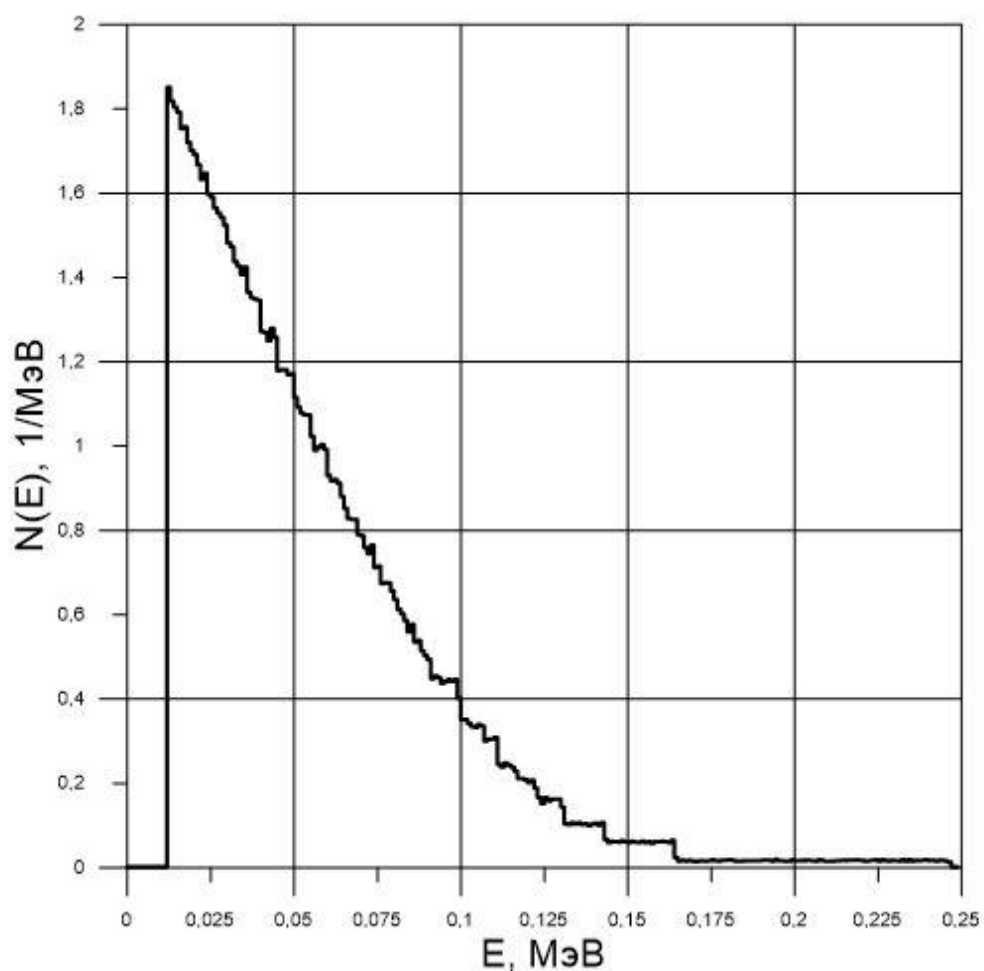


Рис. 3.29 – Дифференциальный спектр электронов от источника  $^{155}_{63}\text{Eu}$  в вакуумной камере

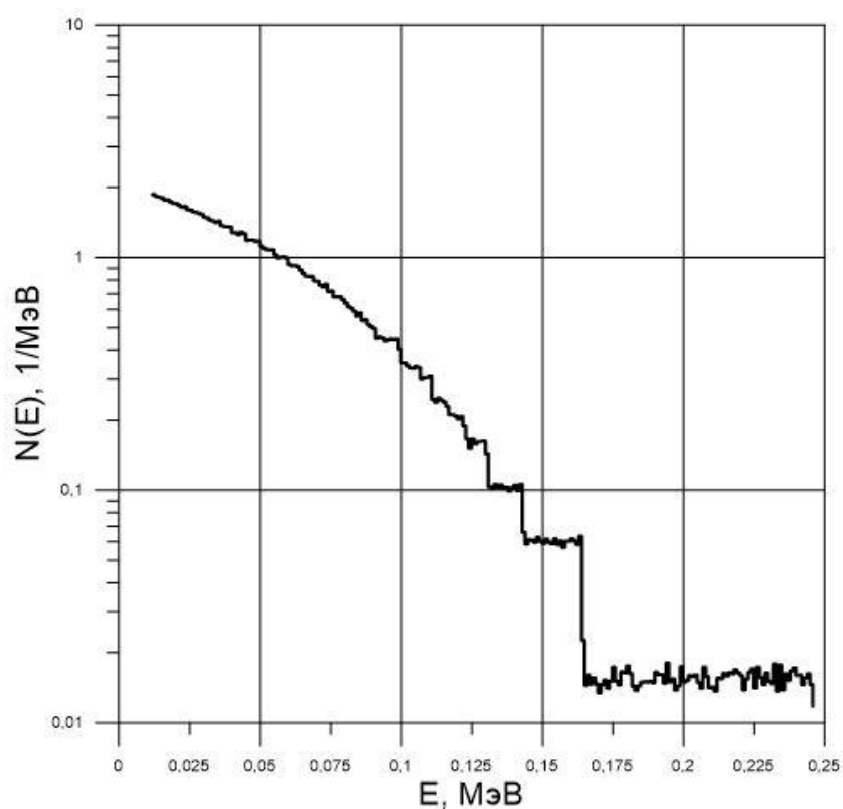


Рис. 3.30 – Дифференциальный спектр электронов внутри камеры на расстоянии 5 см от источника  $^{155}_{63}\text{Eu}$

### 3.4.2 Ni-63

Данный радиоактивный изотоп ( $^{63}_{28}\text{Ni}$ ), получают в реакторе при облучении мишени  $^{62}_{28}\text{Ni}$ . Такой способ применяют при получении  $^{63}_{28}\text{Ni}$  в промышленных масштабах.

Данный радионуклид испускает электроны с максимальной энергией 66,945 кэВ и имеет  $T_{1/2}=100$  лет. Дифференциальный спектр электронов данного источника представлен на рис. 3.31. Сравнение интегрального электронного спектра, полученного при помощи бета-излучения источника  $^{63}_{28}\text{Ni}$  представлены на рис. 3.32, 3.33.

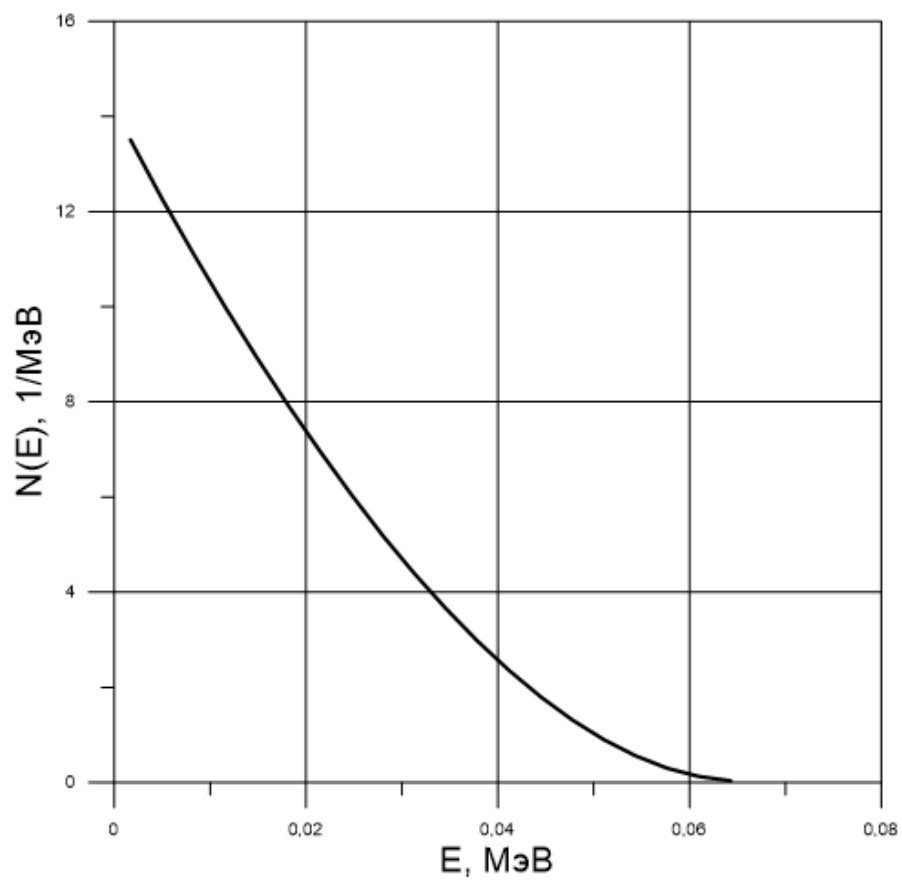


Рис. 3.31 – Дифференциальный спектр электронов от источника  $^{63}_{28}\text{Ni}$

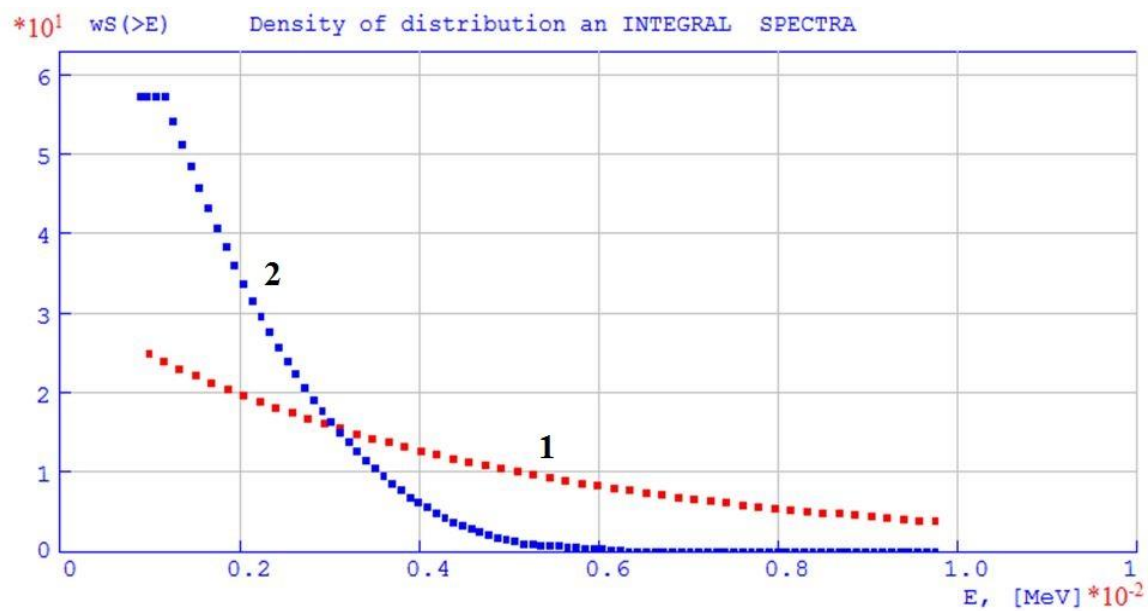


Рис. 3.32. Сравнение интегральных спектров: SPACE (1) и от  $^{63}_{28}\text{Ni}$  (2)

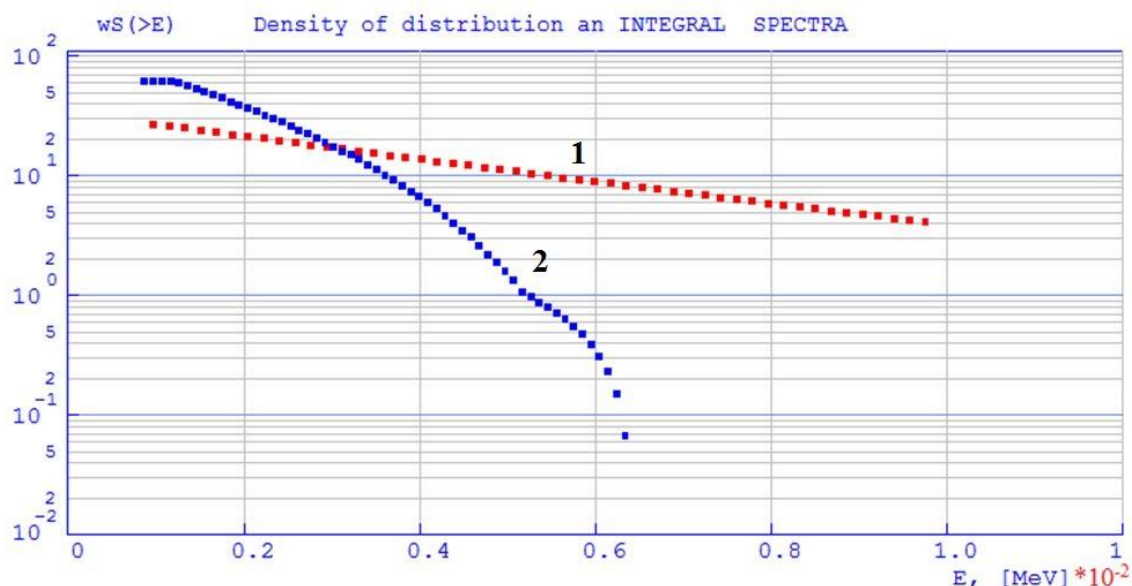


Рис. 3.33. Сравнение интегральных спектров: SPACE (1) и от  $^{63}\text{Ni}$  (2)

На графиках (рис. 3.32, 3.33) хорошо заметно несоответствие спектра бета-излучения источника  $^{63}\text{Ni}$  с космическим спектром. Данный источник, несмотря на небольшую максимальную энергию электронов и большой период полураспада нельзя использовать для моделирования низкоэнергетической части космического спектра.

### 3.4.3 Pm-147

Промышленным способом получения данного радионуклида является радиохимическая переработка ОЯТ. Отделение  $^{147}_{61}\text{Pm}$  от других элементов осуществляется методом ионного обмена на специальной ионообменной смоле – амберлите. Изотоп не вырабатывается в чистой металлической форме, и при осаждении в виде оксалата подвергается прокаливанию до оксида прометия, и в форме оксида находит применение для производства нагревательных элементов радиоизотопных генераторов.

$^{147}_{61}\text{Pm}$  испускает только электроны с максимальной энергией 0,224 МэВ и имеет  $T_{1/2}=2,62$  года. Дифференциальный спектр представлен на рис. 3.34.

Сравнение интегрального бета-спектра электронов, полученного от источника  $^{147}_{61}\text{Pm}$  в вакуумной камере, приведено на рис. 3.35, 3.36.

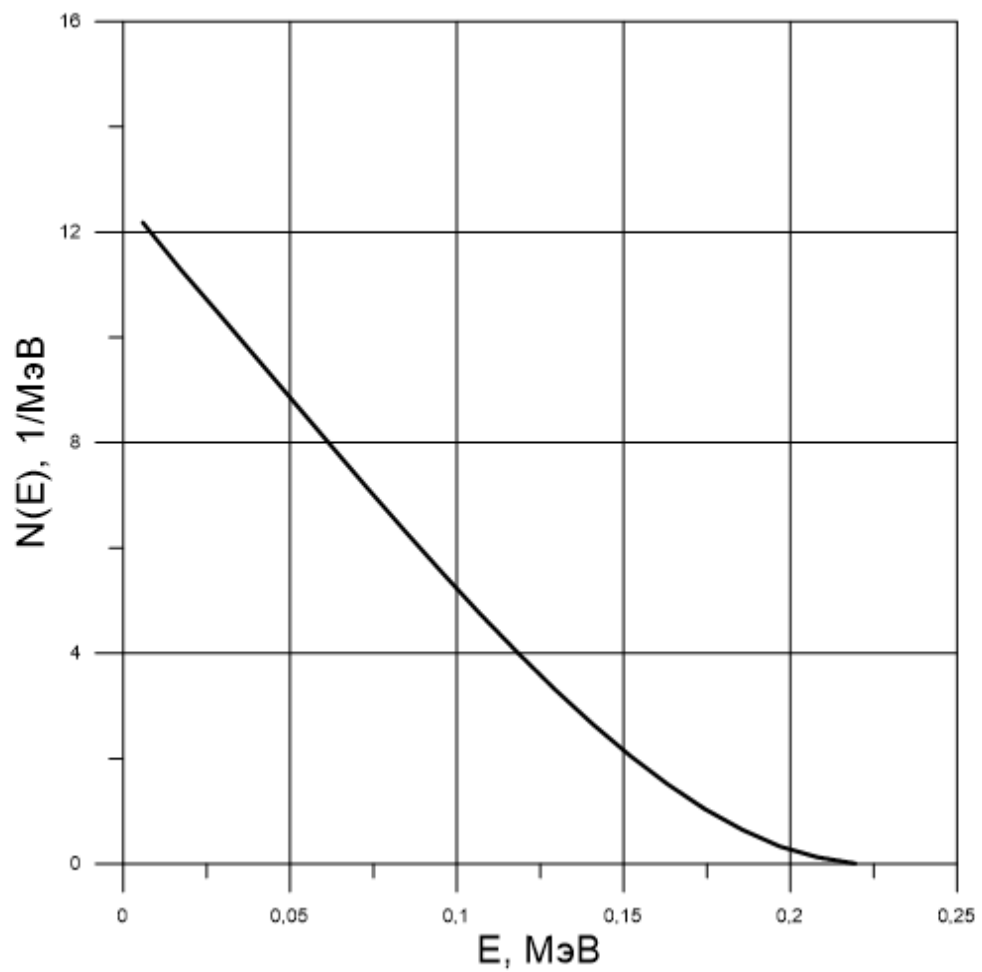


Рис. 3.34 – Дифференциальный спектр электронов от источника  $^{147}_{61}\text{Pm}$

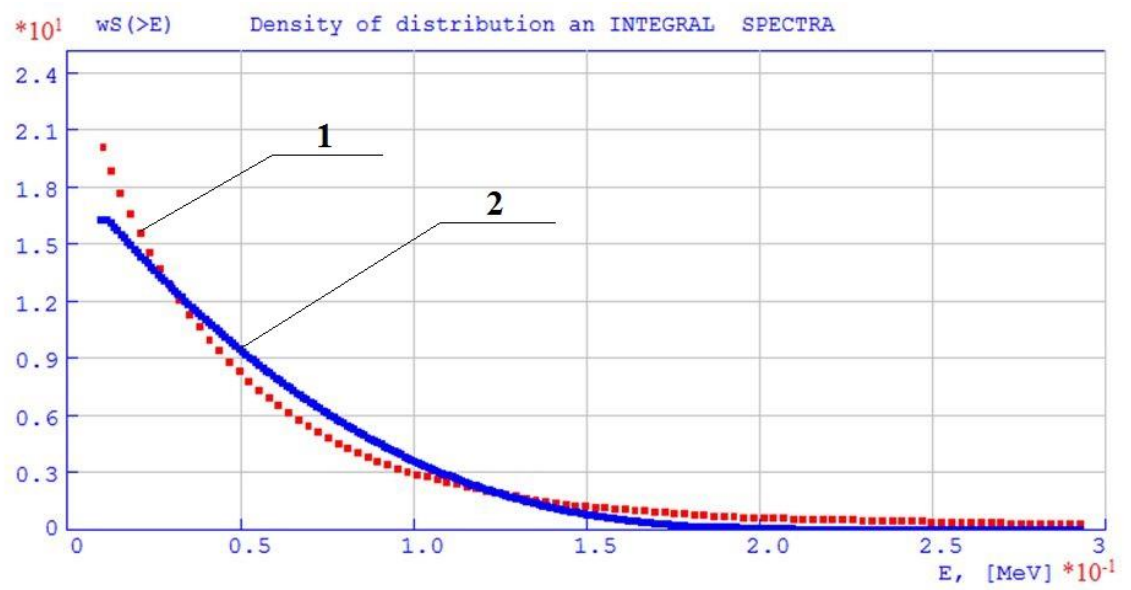


Рис. 3.35. Сравнение интегральных спектров: SPACE (1) и от  $^{147}_{61}\text{Pm}$  (2)

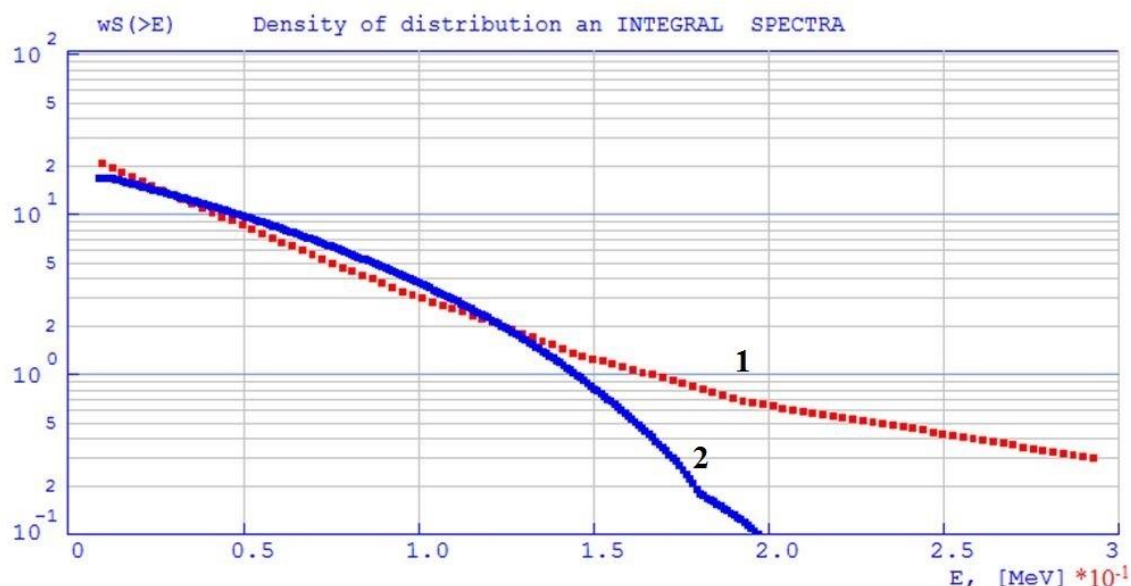


Рис. 3.36. Сравнение интегральных спектров: SPACE (1) и от  $^{147}_{61}\text{Pm}$  (2)

Как видно из рис. 3.35, 3.36, при помощи бета-излучения данного радионуклида  $^{147}_{61}\text{Pm}$  возможно повторить космический спектр в низкоэнергетической области примерно до 130-150 кэВ. Далее спектр расходится, и данный радионуклид невозможно применять для моделирования спектра в большей энергетической области. Соответствие в области 50-100 кэВ несколько хуже, нежели  $^{155}_{63}\text{Eu}$ . Также у  $^{147}_{61}\text{Pm}$ , в сравнении с  $^{155}_{63}\text{Eu}$ , в два раза меньше период полураспада, поэтому его активность будет спадать намного быстрее. Положительной стороной использования данного источника может быть отсутствие, как у  $^{155}_{63}\text{Eu}$ , Cs-137 гамма-квантов в излучении.

### 3.4.4 Si-32

$^{32}_{14}\text{Si}$  - бета-излучающий радионуклид с  $T_{1/2}=170$  лет и максимальной энергией электронов 210 кэВ. Спектр бета-излучения  $^{32}_{14}\text{Si}$  представлен на рис. 3.37.

Сравнение интегрального спектра, полученного при использовании источника  $^{32}_{14}\text{Si}$ , с космическим спектром, приведено на рис. 3.38, рис. 3.39.



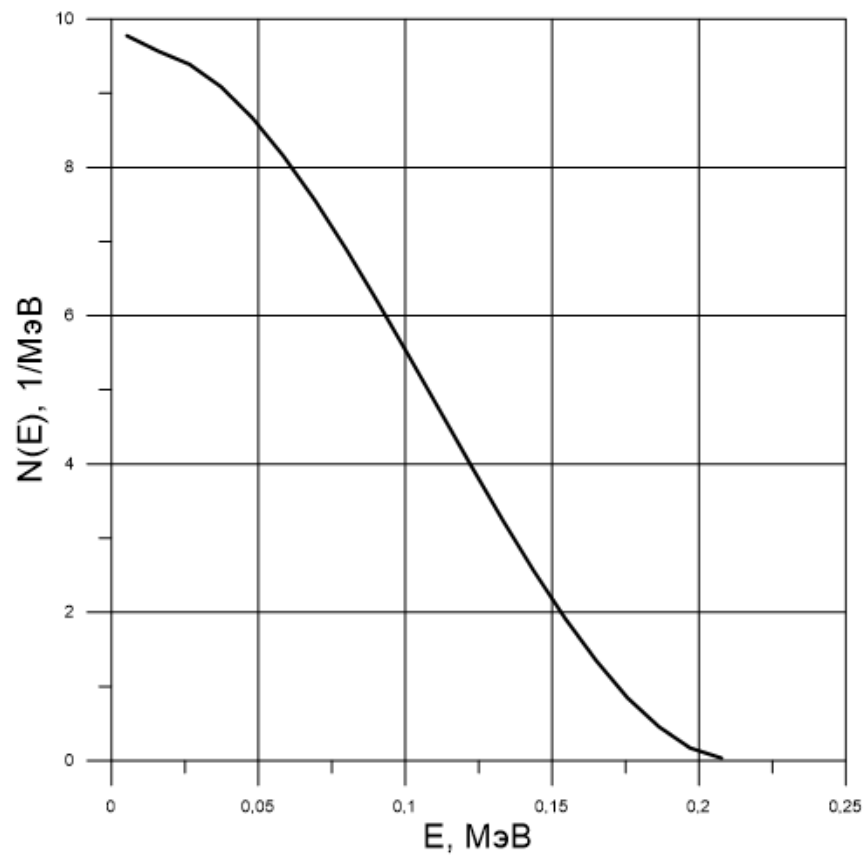


Рис. 3.37 – Дифференциальный спектр электронов от источника  $^{32}_{14}\text{Si}$

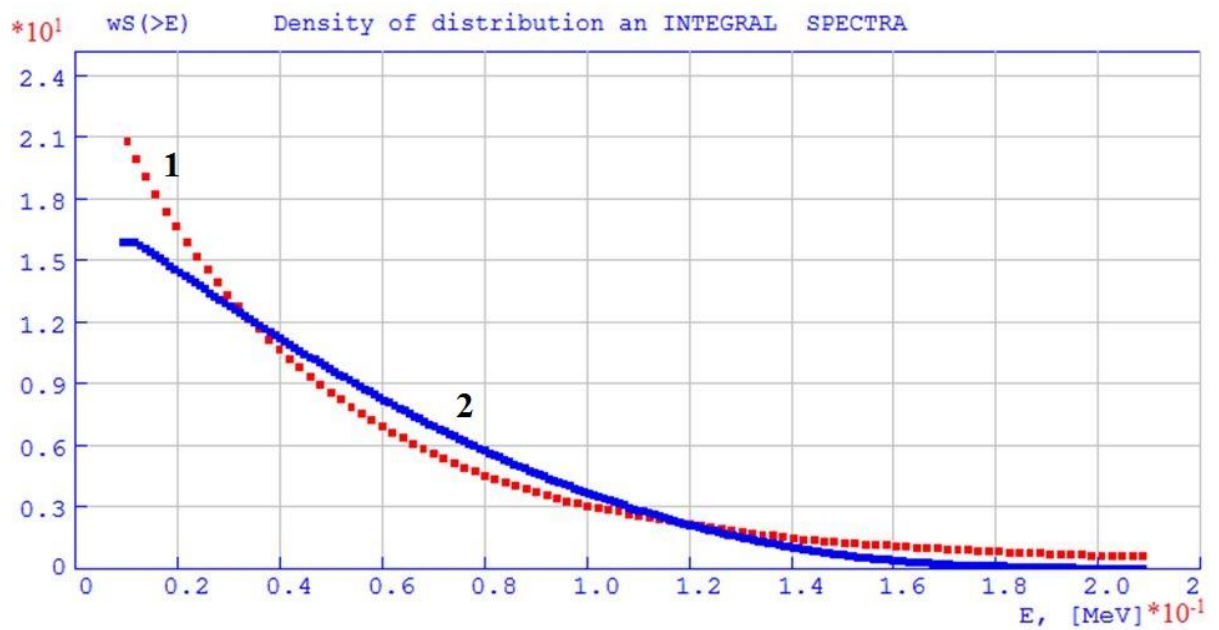


Рис. 3.38. Сравнение интегральных спектров: SPACE (1) и от  $^{32}_{14}\text{Si}$ (2)

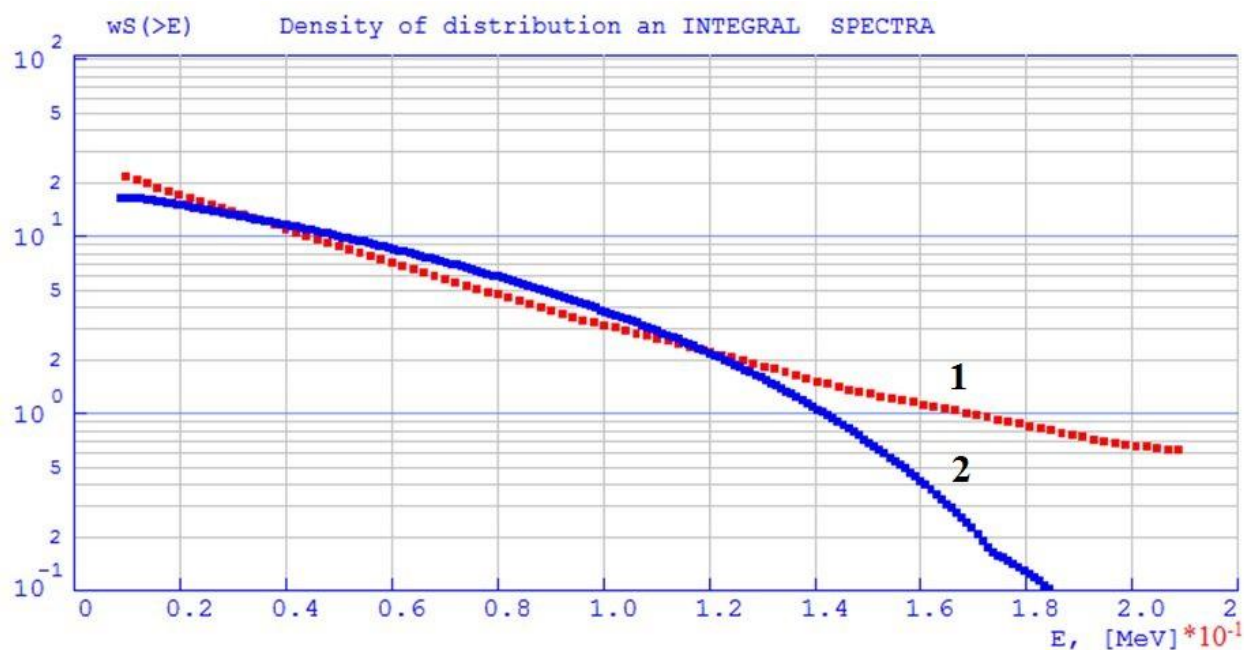


Рис. 3.39. Сравнение интегральных спектров: SPACE (1) и от  $^{32}_{14}\text{Si}$  (2)

Как следует из рис. 3.38 и 3.39, интегральный электронный спектр от  $^{32}_{14}\text{Si}$  имеет хорошее согласие с космическим в области примерно до 140 кэВ. Период полураспада  $^{32}_{14}\text{Si}$  (170 лет) наибольший в сравнении с другими рассмотренными радионуклидами, что позволяет использовать данный источник длительное время.

## **Вывод**

1. В результате проведенных расчетов показано, что на основе бета-излучения некоторых радионуклидов, можно получить спектр электронов, совпадающий по форме с косическим электронным спектром в низкоэнергетической области – менее 100-150 кэВ
2. Дисковые поверхностные источники на основе бета-излучения радионуклидов позволяют создать на образце равномерное пространственное распределение электронов и изотропное угловое распределение при не больших (не более 5 см) расстояния от образца
3. Подобные источники электронов можно использовать при проведении испытаний на электризацию элементов КА для высоких орбит.
4. Подложка источника и сопутствующее гамма-излучение не оказывают заметного влияния на спектр электронов, падающих на образец.

## Заключение

В данной работе методом Монте Карло проведены расчеты характеристик электронов от двух типов источников. Расчеты проведены внутри специальных вакуумных камер, которые будут использоваться для испытаний элементов КА на радиационную электризацию. По результатам проведенных расчетов можно сделать выводы:

1. С помощью неоднородной по толщине Al фольги, возможно моноэнергетический пучок электронной пушки с энергиями несколько сотен кэВ, преобразовать в непрерывный спектр с распределением подобным космическому спектру.

2. Одна электронная пушка на энергию 300 кэВ не позволяет получить необходимую форму электронного спектра в низкоэнергетической области. Для хорошего согласия LAB и SPACE электронных спектров необходимо использовать дополнительный источник с энергиями менее 50 кэВ

3. Преобразование спектра сопровождается большими потерями электронов. На образец попадает менее 1% электронов от первичного пучка.

4. Для источников электронов на основе электронных пушек не удастся одновременно получить все три характеристики электронного космического излучения: энергетическое распределение, равномерное пространственное и изотропное угловое распределение.

5. На основе бета-излучения некоторых радионуклидов, можно получить спектр электронов, совпадающий по форме с космическим электронным спектром в низкоэнергетической области – менее 100-150 кэВ

6. Дисковые поверхностные источники на основе бета-излучения радионуклидов позволяют создать на образце равномерное пространственное распределение электронов и изотропное угловое распределение при не больших (не более 5 см) расстояния от образца

7. Подобные источники электронов можно использовать при проведении испытаний на электризацию элементов КА для высоких орбит.

8. Подложка источника и сопутствующее гамма-излучение не оказывают заметного влияния на спектр электронов, падающих на образец.

9. Задачу по определению условий формирования необходимых характеристик электронов от различных источников для целей испытаний на радиационную целесообразно решать методом статистического моделирования – методом Монте Карло. Это значительно ускоряет и удешевляет ее решение.

## Список используемых источников

1. Ширков, Д.В. Физика микромира. Маленькая энциклопедия./ Д.В. Ширков - М.: "Советская энциклопедия", 1980. - 528 с.
2. Акишин, А. И. Электризация космических аппаратов./А.И. Акишин, Л.С. Новиков – М.: Знание, 1985. – 64 с.
3. Акишин А.И. Космическое материаловедение. Методическое и учебное пособие./ А.И. Акишин –М: НИИЯФ МГУ, 2007, с. 209
4. Беспалов В.И. Дистрибутив программы «Компьютерная лаборатория». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://portal.tpu.ru/SHARED/b/BVI/pclab>
5. Виноградов Ю.А. Ионизирующая радиация: обнаружение, контроль, защита/ Ю.А. Виноградов – М.: СОЛОН-Р, 2002. 224 с.
6. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. №181-ФЗ
7. СанПин 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
8. ГОСТ 27212-87. Источники ионизирующего излучения радионуклидные закрытые. Общие технические условия.
9. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность.
10. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
11. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение / Гаврикова Н.А., Тухватулина Л.Р., Видяев И.Г. // Томск. – 2014.
12. Dirassen B. The sirene facility - an improved method for simulating the charge of dielectrics in a charging electron environment/ B. Dirassen, L. Levy, R. Reulet, D. Payan // In: Proceedings of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment, 16-20 June 2003, Noordwijk, The Netherlands.
13. Беспалов В.И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом: учебное пособие. – 5-е изд. доп., – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 427 с.

## Список публикаций

1. Чуликов В.В. Моделирование электронной компоненты космического спектра для радиационных испытаний космических аппаратов // Тр. XXI междунар. конф. «Современные техника и технологии» - М., 2015. - С. 149 - 151.

2. Беспалов В.И., Чуликов В.В. Моделирование электронной компоненты космического спектра на основе бета-спектров радионуклидов // Тр. VIII междунар. научно-практической конф. «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине» - М., 2016. - С. 111 – 112.