

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМЕНИ  
Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА

На правах рукописи  
УДК 523.4-854

Золотарев Иван Анатольевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ В  
КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ ПРИ ПОЛЕТЕ ПО  
ВЫСОКОШИРОТНОЙ ОРБИТЕ**

Специальность 05.26.02 —  
«Безопасность в чрезвычайных ситуациях  
(авиационная и ракетно-космическая техника)»

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат физико-математических наук  
Бенгин Виктор Владимирович

Москва — 2017

## Оглавление

	Стр.
<b>Введение . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Обзор Литературы . . . . .</b>	<b>8</b>
1.1 Радиационная обстановка на высокоширотных околоземных орbitах. . . . .	8
1.1.1 Вопросы, требующие детального исследования . . . . .	10
1.2 Методы регистрации дозы ионизирующих излучений . . . . .	11
1.3 Приборы для радиационного мониторинга в космосе . . . . .	12
1.3.1 Пассивные детекторы . . . . .	12
1.3.2 Активные детекторы . . . . .	13
1.3.3 Детекторы нейтронов . . . . .	22
1.4 Математическое моделирование дозиметрических приборов для космических условий . . . . .	25
1.4.1 GEANT4 . . . . .	26
1.5 Возможности КА Ломоносов в продолжении ряда российских исследований радиационной обстановки . . . . .	27
<b>Глава 2. Аппаратура для проведения исследований . . . . .</b>	<b>29</b>
2.1 Прибор Дэпрон . . . . .	29
2.1.1 Устройство прибора . . . . .	29
2.2 Конструктивные особенности прибора . . . . .	31
2.3 Детекторы . . . . .	33
2.3.1 Телескоп детекторов . . . . .	34
2.3.2 Нейтронные детекторы . . . . .	36
2.4 Аналоговая обработка сигналов . . . . .	38
2.5 Цифровая обработка сигналов . . . . .	39
2.6 Связь с внешними системами . . . . .	43
2.6.1 Питание . . . . .	44
2.6.2 Программное обеспечение . . . . .	44
2.6.3 Контрольная проверочная аппаратура . . . . .	46

2.7	Градуировочные характеристики прибора . . . . .	47
2.8	Энергетическая чувствительность прибора ДЭПРОН . . . . .	49
2.9	Моделирование функций отклика прибора в geant4 . . . . .	50
<b>Глава 3. Обработка информации с прибора . . . . .</b>		<b>55</b>
3.1	Схема обработки информации при КДИ . . . . .	55
3.1.1	Отладочная программа Depron Terminal . . . . .	56
3.1.2	Программа DepronExplorerView . . . . .	57
3.1.3	Структура массивов (базы данных) результатов измерений .	58
3.1.4	Содержание блоков данных ДЭПРОН . . . . .	59
3.1.5	Периодичность выдачи массивов данных . . . . .	60
3.2	Обработка наземных данных . . . . .	60
3.3	Схема обработки и распределения потоков информации полетных данных . . . . .	61
3.3.1	Восстановление метки времени в массивах данных . . . . .	61
<b>Глава 4. Результаты . . . . .</b>		<b>66</b>
4.1	Планетарное распределение потоков частиц, мощности дозы на высоте полета КА а также потоков нейтронов . . . . .	66
4.2	Распределения мощности дозы в области ЮОАА . . . . .	67
4.3	Распределения мощности дозы в авроральных областях . . . . .	67
4.4	Распределение мощности дозы вне радиационных поясов Земли .	69
4.5	Спектры ЛПЭ и распределение мощности эквивалентной дозы .	69
<b>Заключение . . . . .</b>		<b>73</b>
4.6	Благодарности . . . . .	73
<b>Список сокращений и условных обозначений . . . . .</b>		<b>75</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>		<b>76</b>
<b>Список рисунков . . . . .</b>		<b>88</b>
<b>Список таблиц . . . . .</b>		<b>91</b>
<b>Приложение А. Структура данных измерений ДЭПРОН . . . . .</b>		<b>92</b>
A.1	Блок данных ДЭПРОН А . . . . .	92

A.2 Блок данных ДЭПРОН S . . . . .	93
A.3 Блок данных ДЭПРОН Н . . . . .	94
A.4 Блок данных ДЭПРОН Н . . . . .	94
A.5 Блок данных ДЭПРОН Т . . . . .	95
A.6 Команды прибора ДЭПРОН . . . . .	95
A.7 Отладочные сообщения прибора ДЭПРОН . . . . .	96
<b>Приложение Б. Листинги программного кода комплекса ДЭПРОН . . .</b>	<b>98</b>
<b>Приложение В. Листинги программного кода моделирования ДЭПРОН</b>	<b>104</b>
B.0.1 Список использованных материалов для создания модели в geant4 . . . . .	106
B.0.2 Список процессов для нейtronов использованных при моделировании в geant4 . . . . .	109

## Введение

Актуальность работы обусловлена планами создания пилотируемого транспортного корабля нового поколения, работающего на высокоширотных и лунных орbitах. Проект транспортного корабля активно разрабатывается с 2010 г. и к настоящему времени начата работа по выпуску рабочей конструкторской документации на составные части корабля, в том числе и на дозиметр бортовой.

Несмотря на непрерывный дозиметрический контроль всех российских космических миссий, начиная с первого полета человека в космос и заканчивая полетами экспедиций на МКС, не вызывает сомнений необходимость продолжения ряда исследований радиационной обстановки на каждом из пилотируемых и на значительной части беспилотных космических аппаратах.

Именно поэтому необходимо разработать приборы для проведения непрерывного дозиметрического мониторинга области околоземного пространства, в которой планируется проведение перспективных пилотируемых полетов. *Данная работа направлена на создание основ для осуществления такого мониторинга.*

**Целью** данной работы является разработка методов исследования распределения мощности дозы космической радиации и создание на основе этих методов современных приборов, предназначенных для космических аппаратов, работающих на околоземных и лунных орбитах.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить следующие задачи:

1. Систематизировать и обобщить характеристики радиационных условий на аналогичных орбитах (аппараты БИОН, Прогноз, Cluster, POES) для разработки программы эксперимента;
2. Разработать требования к бортовому дозиметру для нового пилотируемого транспортного корабля;
3. Разработать прибор для дозиметрического мониторинга на борту космического аппарата «Ломоносов»;
4. Участвовать в подготовке и проведении эксперимента с дозиметром на борту КА «Ломоносов»;
5. Обработать полученную с прибора ДЭПРОН информацию и провести её анализ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработан прибор для радиационного мониторинга на борту КА
2. Подтверждены измерительные характеристики нового прибора
3. Получены и обработаны дозиметрические экспериментальные данные
4. Выделен вклад в дозы при пересечении различных областей космического пространства - внутреннего и внешнего радиационного пояса

**Научная новизна:**

1. Впервые разработан исследовательский прибор, сочетающий в едином блоке дозиметр заряженных частиц и нейтронные детекторы;
2. Было выполнено оригинальное моделирование спектрометрических свойств дозиметра протонов электронов и нейtronов;
3. Было выполнено создание базы данных спутниковых измерений прибора ДЭПРОН за все время работы прибора.

**Научная и практическая значимость** определяется необходимостью контроля радиационных условий в целях обеспечения надежной работы аппаратуры на полярных спутниках. Прибор ДЭПРОН позволил провести полноценное исследование всех основных компонент радиационного излучения, вносящих вклад в поглощенную и эквивалентную дозы на борту космического аппарата.

**Степень достоверности** полученных результатов обеспечивается публичностью данных спутниковых измерений радиационных условий. Результаты находятся в соответствии с исследованиями, проведенными на других приборах RELEC и ELFIN эксперимента Ломоносов, а также на других полярных спутниках (POES). Результаты измерений сравнивались с измерениями на баллонах BARREL (запуски август 2016г).

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на: международной конференции COSPAR2014, конференции ОМУС-2015 (г. Дубна), нескольких конференциях “Ломоносовские чтения”, рабочих совещаний коллаборации Lomonosov, а также ряде других конференций.

**Личный вклад.** Автор принимал активное участие в проведении тепловых испытаний полупроводникового детектора с усилительным трактом прибора. Проведены проверки работоспособности усилительного тракта с радиоактивными источниками ОСГИ Cs137 и Со60. Автор участвовал в проведении испытаний детекторов тепловых нейтронов на лабораторном источнике нейтронов.

Проведены работы по стыковке и согласованию платы цифровой обработки сигналов с аналоговыми усилительными трактами и дискриминирующими блоками прибора. Автором вместе с его научным руководителем написана программа на С++ для контроллера платы цифровой обработки сигналов. Для наземной отработки и испытаний написана программа для ПК на WinForms/C#, позволяющая оперативно контролировать параметры работы прибора и выходные данные.

Создана исчерпывающая модель дозиметра в системе Catia и подготовлена для использования в Монте-Карло моделировании. Написана программа на базе пакета Geant4 для математического моделирования характеристик прибора ДЭПРОН, а также программы для моделирования характеристик приборов ДБ-8 и других приборов для радиационных измерений.

Автором подготовлены программы для анализа данных прибора ДЭПРОН, в том числе программы предобработки бинарных данных и программы визуализации данных детекторов прибора. Автором подготовлена методика точной привязки спутниковых данных с прибора ДЭПРОН ко всемирному времени. С использованием оригинальной методики получена полная база данных измерений прибора ДЭПРОН за все время работы прибора.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в XX печатных изданиях [1—3], X из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [4], XX — в тезисах докладов [5—9].

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 109 страниц с 45 рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит 104 наименования.

## Глава 1. Обзор Литературы

### 1.1 Радиационная обстановка на высокоширотных околоземных орbitах.

Исследования радиационной обстановки в космическом пространстве связано с началом полетов автоматических аппаратов и человека в космос. Широкое распространение технологий, связанных с использованием космической техники, а также непрерывные пребывание человека в космическом пространстве во время миссий на космических станциях МИР и МКС позволило выявить ряд опасностей космических полетов, среди которых особое внимание следует уделить радиационной опасности [10].

Запуск 2-го и 3-го спутников Земли, с приборами, изготовленными в НИИ-ЯФ МГУ, показал принципиальную возможность полета человека в космос. Еще из данных полученных при первых исследованиях радиационной обстановки был сделан вывод, что на орбите земли существуют отдельные области повышения радиационного фона (Рисунок 1.1). Существование данных областей связано с неоднородностями магнитного поля Земли и приводит к формированию области повышения потоков частиц в Южно Атлантической области [10], названной Южно-Атлантической Аномалией (ЮАА), как показано в статье Вернова С.Н.[11]. В первом приближении для описания магнитного поля Земли на высотах до 2000 км можно использовать представление модели смещенного диполя, этот подход позволяет учитывать ЮАА.

Рисунок Распределение потоков частиц по данным 2-го корабля-спутника над поверхностью земного шара на высоте 320 км. (цифры у линий дают потоки частиц в  $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ ) [10].

Таким образом, магнитное поле Земли экранирует космические аппараты, находящиеся на средних широтах и невысоких орбитах порядка трехсот четырехсот километров от поверхности Земли (именно на этих высотах поддерживается обращение космических станций). Значительный вклад, до 60%, в дозовую нагрузку на аппараты и их экипаж получают в ЮАА, поэтому важную роль при прогнозировании дозы является точное определение дозы в ЮАА[13; 14].

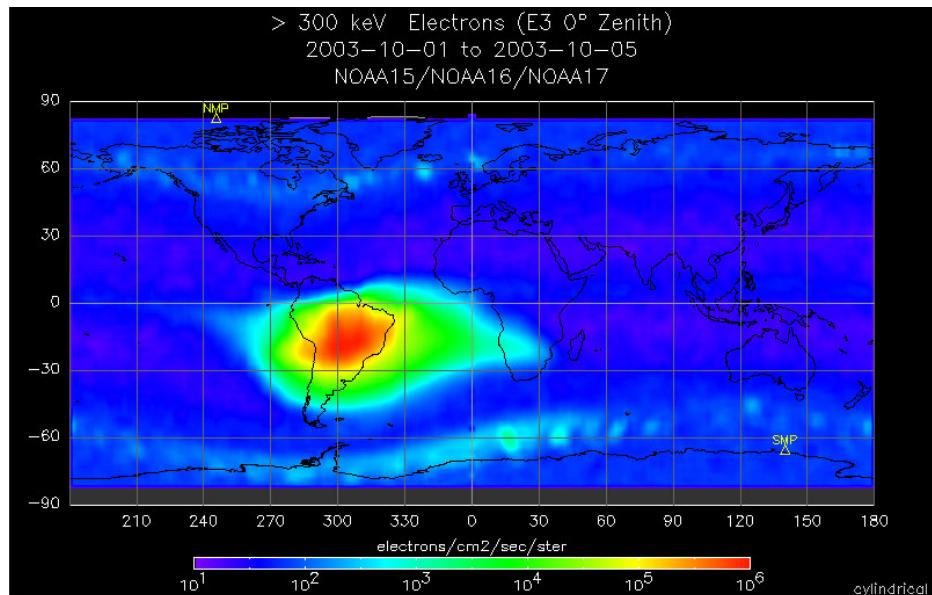


Рисунок 1.1 — Измерения потоков электронов >300 кэВ на спутнике POES [12]

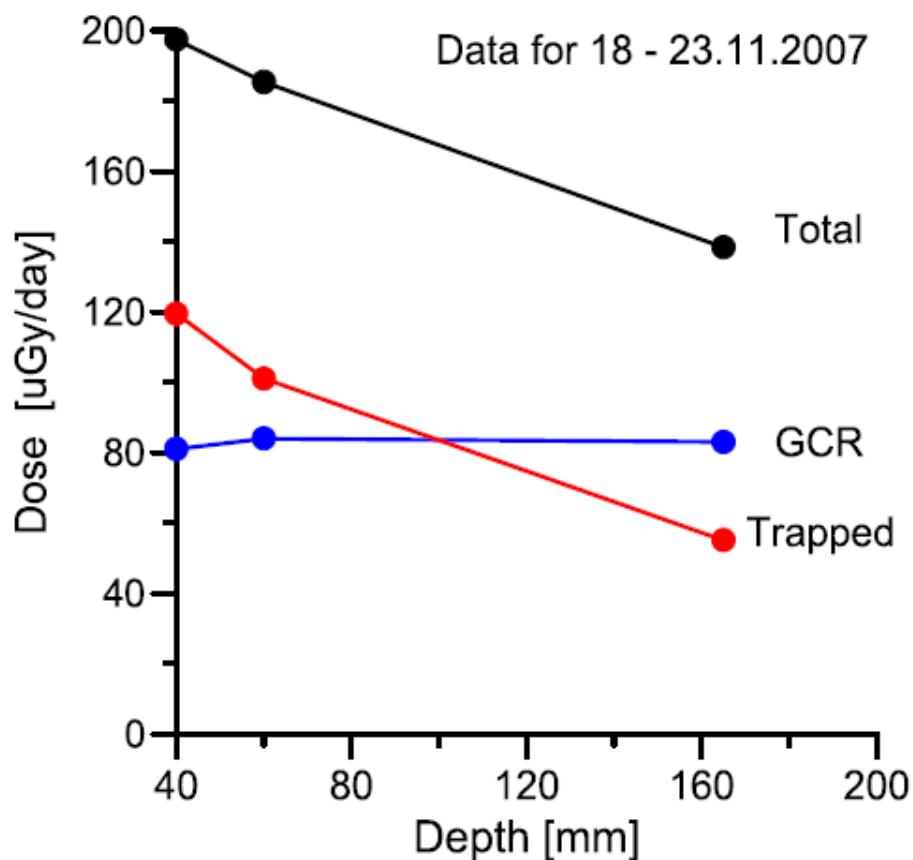


Рисунок 1.2 — Вклад в общую поглощенную дозу от ГКЛ и ЮАА. По материалам [15]

Особенно важными с точки зрения радиационной обстановки, являются приполярные области [16]. При выборе более высокоширотных и высоких орбит они требуют дополнительного внимания, так как в этих областях границы радиационных поясов Земли ближе к поверхности. Даже на небольших высотах, начиная от 300 км в интервале геомагнитных широт 55-70 наблюдается резкое возрастание интенсивности излучения и частицами, составляющими этот внешний радиационный пояс являются электроны различных энергий, их поток достигает  $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$  [17]. При солнечных событиях в этих областях создаются условия для многократного повышения потоков частиц, что может привести к необходимости специальных мер по предотвращению чрезмерной радиационной нагрузке на экипаж космического аппарата.

### **1.1.1 Вопросы, требующие детального исследования**

Происхождение и динамика потоков релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе до сих пор вызывает активный интерес мирового сообщества, несмотря на множество исследований за более чем пол века исследований [18—33]. Этот интерес определяется в первую очередь радиационной опасностью, которую представляют экстремально высокие потоки электронов для аппаратов на орbitах полярных спутников. Серьезность радиационных рисков, связанных с энергичными электронами подтверждается в проектах по построению искусственных орбитальных конструкций предназначенных для снижения заселенности внешнего электронного пояса с помощью электростатических полей [34].

Современные исследования показывают возможность проникновения электронов высоких энергий и в область внутреннего пояса [35]. Такие выводы были сделаны на основе анализа данных по потокам электронов со спутников Themis во время магнитных бурь. Благодаря нескольким приборам MagEIS на каждом КА Themis и магнитному разделению частиц по энергиям, стало возможно получать не только потоки частиц но и питч-угловое распределение. Подробный анализ динамики радиационных поясов за 2015 год показал что электроны в зазоре между

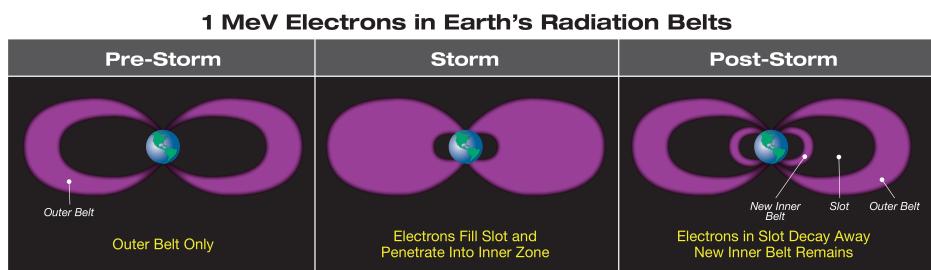


Рисунок 1.3 — Во время сильных геомагнитных штормов возможно проникновение энергичных электронов во внутренний радиационный пояс. По материалам: NASA's Goddard Space Flight Center/Mary Pat Hrybyk-Keith [37]

поясами могут существовать до десятков дней, а во внутреннем поясе до полутора лет [35].

Тем не менее существует мнение что обнаружение релятивистских электронов во внутреннем поясе на самом деле может быть аппаратурной неоднозначностью - совпадением при одновременной регистрации протонов внутреннего пояса и низкоэнергичных электронов [36]. Численное моделирование спектрометров заряженных частиц также показывает что надежное разделение протонов и электронов возможно только при очень строгих критериях отбора заложенных в логику работы приборов [1]. Сужение критериев приводит к огромному падению чувствительности прибора и действующего геометрического фактора, для некоторых энергетических каналов возможно снижение до 100 раз [1].

## 1.2 Методы регистрации дозы ионизирующих излучений

Среди методов регистрации ионизирующих излучений можно выделить несколько наиболее используемых, это газовые ионизационные детекторы, в том числе пропорциональные и газоразрядные счетчики, сцинтиляционные детекторы, полупроводниковые детекторы, трековые детекторы. Наибольшее распространение среди мониторинговых приборов на космических аппаратах получили спектрометры заряженных частиц, так как они позволяют исследовать особенности распространения частиц различных энергий в околоземном пространстве и строить на основе этих данных физические модели радиационных поясов Земли.

Первые эксперименты в космосе по измерению радиационных условий предполагали использование ионизационных камер достаточно большого разме-

ра (десятки см<sup>3</sup>) к этим приборам относятся P-16 [38] и ионизационные камеры работавшие на шаттлах [39]. Современные детекторы радиации в основном строятся на основе полупроводниковых детекторов, хотя ионизационные камеры являются удобным референсным методом, который позволяет провести непрерывный временной ряд исследований вплоть до исследований на первых ИСЗ.

### **1.3 Приборы для радиационного мониторинга в космосе**

Дозиметрические и радиационные исследования в космосе не теряют актуальности на протяжении полувека космической эры человечества, это подтверждают актуальные конференции WRMIS, COSPAR. Большая часть дозиметрических измерений в космосе происходит на космических станциях и в частности на МКС. В первую очередь детекторы радиации разделяются на пассивные и активные, хотя такое разделение условно, так как некоторые термо-люминисцентные детекторы и баббл-детекторы можно отнести к активным - они позволяют проводить быстрое считывание данных о дозах на борту космического аппарата.

#### **1.3.1 Пассивные детекторы**

Получение информации с пассивных детекторов происходит после накопления порции измерений и требует прерывания цикла измерения. По принципу регистрации излучения они подразделяются на трековые детекторы, термолюминисцентные [40; 41] и эмульсионные.

Детекторы на основе трекового детектора из тканеэквивалентного пластика CR-39 имеют малый вес, малый объем, лишены электроники, легко обрабатываются и очень дешевы в сравнении с любыми активными дозиметрами [42]. Пороговое значение LET для материала составляет 5кэВ/мкм. по воде. Когда заряженные частицы проходят через детектор CR-39, они теряют энергию за счет ионизации и разрушают молекулярные связи полимера CR-39 с образованием высоко реактивных связей вдоль своих траекторий. Эти траектории могут быть об-

наружены в виде вытравленных конусов на поверхностях детекторов CR-39 химическим травлением, эти конусы можно наблюдать с помощью микроскопа. Детекторы CR-39 чувствительны к высоким значениям LET, могут измерять спектр ЛПЭ, дифференциальный и интегральный флюенс, поглощенную и эквивалентную дозу для заряженных частиц с высоким ЛПЭ [42]. CR-39 может также измерять потоки протонов и нейtronов с высокой энергией через их вторичные заряженные частицы — осколки столкновений с малым пробегом и высоким ЛПЭ [42]. Аналогично трековым детекторам на борту МКС применяются также и термolumинисцентные детекторы например: TLD-100, -600, -700, OSLD [43]. Кроме того на БОРТУ МКС проводился эксперимент с системой темолюминисцентных датчиков Pille [44], который был оснащен считывающей системой и позволял относительно оперативно получать данные о дозах в различных позициях в модуле Звезда.

### 1.3.2 Активные детекторы

Для радиационного мониторинга в космическом пространстве используются счетчики частиц, спектрометры и дозиметры. Следует отметить что первые схемы такого рода устройств были предложены еще на заре космических исследований [45; 46] и на данный момент являются незаменимым средством любой космической миссии с участием человека.

К числу полупроводниковых дозиметров относятся приборы ДБ-8, DOSTEL, LIULIN, REM/MPT. Все эти приборы используют принцип регистрации поглощенной дозы в полупроводнике – кремнии, толщиной 300 мкм.

#### ДБ-8

Дозиметр Бортовой (ДБ) 1.4 является развитием ряда дозиметрических инструментов применявшимся на различных космических аппаратах для исследовательских целей и штатной работы. ДБ предназначен для регистрации временных



Рисунок 1.4 — Внешний вид ДБ — основных детекторных модулей системы радиационного контроля СРК

вариаций мощности поглощенной дозы и плотности потока частиц СКЛ, ГКЛ, РПЗ. ДБ является детектирующими блоками Системы контроля радиационной (СРК) обстановки ПТК и МКС.

В СРК для МКС используется четыре блока ДБ, что позволяет получить информацию о неоднородности радиационного поля в различных отсеках МКС.

Регистрируемые данные:

- Поглощенная доза в диапазоне - от  $10^{-5}$  Гр до  $10^{+1}$  Гр;
- Мощность поглощенной дозы в диапазоне - от  $10^{-10}$  Гр/с до  $5 \cdot 10^{-5}$  Гр/с;
- Плотность потока частиц в диапазоне от 1 до  $10^3$  частиц/( $\text{см}^2 \cdot \text{с}$ );

Прибор содержит 2 узла детектирования, вычислительный блок, блок управления и блок вторичного питания. Оба полупроводниковых детектора в узлах детектирования расположены параллельно, образуя телескоп, такая схема построения прибора была использована для получения информации о ЛПЭ частиц, прошедших одновременно через оба детектора.

Обмен информацией с ДБ обеспечивается по интерфейсу RS-422. Объем целевой информации 2 Мбайта в сутки. Питание ДБ осуществляется постоянным током с напряжением  $27_{-4}^{+7}$  В.

- Энергопотребление ДБ не более 2 Вт.
- Масса блока 0,25 кг.
- Габариты ДБ  $85 \times 40 \times 100$  мм.
- Ресурс ДБ 60000 ч, срок службы 12 лет.

Поглощенная доза регистрируется узлами с полупроводниковыми детекторами. Для получения информации о величине поглощенной дозы используется принцип регистрации величины заряда в объеме полупроводника, пропорционального энерговыделению в данном объеме. Методы преобразования сигналов с детекторов в цифровую форму и последующая обработка их на микроконтроллере остаются аналогичными алгоритмам, использованным в приборах ДБ-8, ДБ-8М, ДЭПРОН.

## **Liulin**

Детекторы серии Liulin используются с 1988 года, когда их первое поколение было использовано на борту космической станции МИР [47]. Liulin-4 не последний прибор в этой серии, но его простое устройство и компактные размеры обеспечивают удобство использования для многих конкретных задач. Этот спектрометр состоит из единственного кремниевого детектора, зарадочувствительного предуслителя, микроконтроллера и флэш-памяти. Насыщенный литием кремниевый детектор имеет толщину 0,3 мм и площадь  $2 \text{ см}^2$ . В приборе установлен 12-ти битный АЦП, но только 8 бит из них используется для получения 256 канального спектра энерговыделения за выбранный интервал времени накопления: от 10 до 3539 с. Амплитуда импульса определяется после предуслителя и разделяется по 256 энергетическим каналам, начинающимся с 0,02 МэВ до 20 МэВ. Выделение энергии, большее 20 МэВ записывается в наибольший энергетический канал [48] .

Для определения дозы в данном типе детектора энерговыделение в каждом канале определяется умножением счета в детекторе на энергию канала. Эти результаты делятся на массу объема детектора и суммируются для определения общей дозы по всем каналам [48] [49]. Записанная форма спектра энерговыделения может предоставить дополнительную информацию относительно природы доминирующего радиационного поля (ЮАА, ГКЛ и др. ), но не является достаточно подробной для определения ЛПЭ воздействующей радиации [47].

Размер и портативность спектрометра типа Liulin-4 делает его жизнеспособным кандидатом для активной персональной дозиметрии во время солнечно-

го события, но ограничения в возможности определения эффективной ЛПЭ и эквивалентной дозы предотвращают вытеснение методов пассивной дозиметрии. Liulin-4 существует во многих модификациях и с многими опциями и может работать как на химическом источнике тока, так и на непрерывном питании, функционировать как с внешним ЖК-дисплеем так и без него, и может включать GPS-приемник [48].

Впоследствии был разработан также Liulin-5 основным отличие которого является телескоп из трех полупроводниковых детекторов.

В данный момент приборы типа Лиулин используются на нескольких миссиях дальнего космоса как основные дозиметрические устройства [15]. Прибор Liulin-MO на ExoMars состоит уже из 4 полупроводниковых детекторов, образующих боковые грани параллелепипеда [50]. Близкий по построению эксперимент Liulin-ML будет отправлен на поверхность Марса в составе активного детектора нейтронов и гамма-излучения (ADRON).

## DOSTEL

DOSTEL – Дозиметрический полупроводниковый телескоп был разработан в 1995 году как малый телескоп частиц для использования на миссиях космических шаттлов к космической станции МИР. Прибор включает в себя два кремниевых детектора по технологии PIPS, расположенных как телескоп [51]. Каждый детектор имеет толщину 0,315 мм с чувствительной зоной 6,93 см<sup>2</sup>, зазор в 15 мм между детекторами дает геометрический фактор 824 см<sup>2</sup>ср (единица измерения определяется чувствительной площадью детектора и полем зрения) для детектирования совпадающих событий [51]. Каждый детектор соединен с зарядочувствительным усилителем через интегрирующую емкость, двух стадийным усилителем импульсов, двумя пиковыми детекторами, двумя RC-фильтрами для снижения уровня шумов и 8-ми битным АЦП. Такая компоновка позволяет проводить анализ амплитуд импульсов отдельно для высокого и низкого энергетического диапазона [51].

Когда совпадающее событие записано обоими детекторами, становится возможным определить ЛПЭ падающего излучения. Так как известно, что траекто-

рия частицы ограничена конусом возможных направлений, средняя толщина детектора может быть использована для оценки длины трека частицы. Делением энерговыделения на среднюю длину свободного пробега, для данного детектора 0,364 мм [51] с плотностью 2,33 г/см<sup>3</sup> можно получить приближенное значение ЛПЭ [52]. Результат таких вычислений нормируется на известный коэффициент для перехода от ЛПЭ кремния к ЛПЭ в воде, таким образом прибор DOSTEL записывает ЛПЭ в диапазоне от 0,1 до 240 кэВ/мкм [51].

## ТЕРС

Ткане-эквивалентные пропорциональные счетчики (ТЕРС) - микродозиметрические приборы, которые постоянно используются МКС [53], а ранее использовались на космических шаттлах [54].

Первый ТЕРС был запущен на МКС во время экспедиции 2 в 2001 году, и успешно отработал в течение 5 лет до отказа на орбите. Затем он был заменен на ТЕРС с обновленным ПО и эта версия использовалась на МКС до 2011 года. Впоследствии был разработан ТЕРС следующего поколения, который заменил существующие в то время на космической станции [53]. В новом поколении ТЕРС используется много-детекторная компоновка и сферические детекторы покрытые пластиком для увеличения диапазона детектируемых излучений включая гамма-лучи, протоны высоких энергий и ионы железа и для обеспечения лучшей устойчивости при различных размещениях и ориентациях детектора.

## REM/MPT

Существенным отличием установленного NASA на МКС прибора Radiation Environment Monitor (REM) от других полупроводниковых дозиметров является позиционно-чувствительная система считывания энерговыделений в детекторе. Эта особенность при телескопическом расположении детекторов позволяет производить значительно более точные оценки энерговыделения каждой частицы с



Рисунок 1.5 — Один из модулей ModuPIX прибора REM

помощью дополнительной информации о угле падения частиц. Каждый детектор представляет собой матрицу 256 X 256 пикселей размером 14x14 мм, и считывается со скоростью до 850 кадров/с.

Прибор REM включает сенсорные платы Medipix 3-го поколения. Medipix 1, 2 и 3-го поколения это серия пикселизованных детекторов фотонов и заряженных частиц разрабатываемых с 1990-х годов большой коллаборацией институтов под эгидой CERN. На основе данных микросхем были построены приборы регистрации радиации для МКС с 2013 года и для первых тестов многоцелевого аппарата Орион в 2014 году.

Обработка сигнала с каждого пикселя производится поэлементно и реализована на Asic микросхеме ридаут Timerix. На данный момент известно, что исследования на борту МКС продолжатся в марте 2017 году, а разработкой новой аппаратуры занимается Европейская компания Advacam, производящая микросхемы Medipix. Для этой цели разрабатывается прибор Miniaturized Particle Telescope (MPT)[\[55\]](#) - представляет собой телескоп из двух детекторов построенный на основе Timerix технологии [\[56\]](#), и по сути представляет собой два прибора REM.

Для миссии на МКС прибор оснащен двумя USB коннекторами и подключается к ноутбуку, данныечитываются ежедневно а обработка данных будет производится на Земле. В перспективе данный прибор рассматривается как основное дозиметрическое средство на борту КА Орион, полеты которого запланированы с сентября 2018 года.

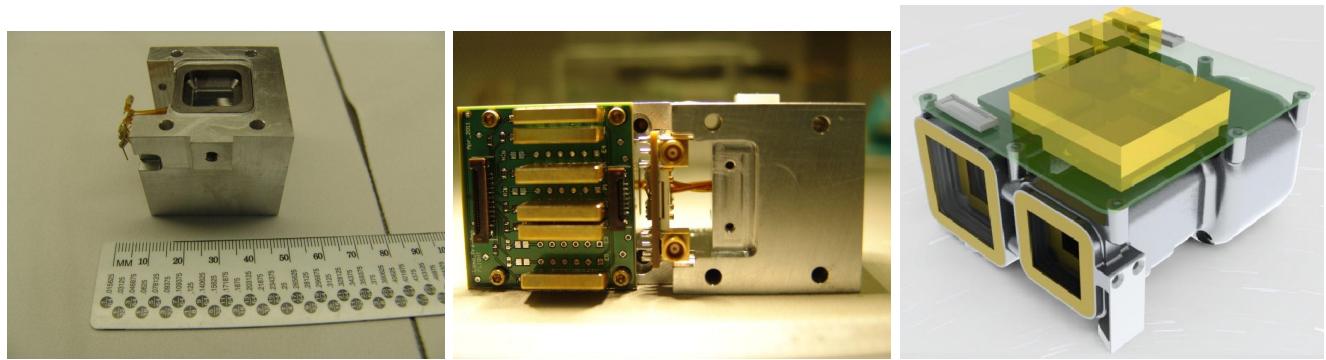


Рисунок 1.6 — Устройство телескопа детекторов для электронов с входным окном (слева). Плата предусилителей со сборкой платы электроники (в центре).

Модель прибора ELFIN (справа)

## ELFIN

Прибор ELFIN входит в состав аппаратуры КА Ломоносов и является спектрометром в отличии от других описанных приборов. Прибор состоит из двух полупроводниковых телескопов с алюминиевой и tantalовой защитой, которая по мнению изготовителей будет необходима для работы в радиационных поясах.[57]

Параметры прибора :

- Диапазон измерения электронов: 50 кэВ до 4 МэВ
- Диапазон измерения ионов: 50 кэВ до 500 кэВ
- Геометрические факторы:
  - Электроны:  $0.04\text{см}^2\cdot\text{ср}$
  - Ионы:  $0.003\text{см}^2\cdot\text{ср}$
- $dE/E < 50\%$
- Масса прибора менее 1.5 кг включая защиту детектора 1.2 см из Al+Ta
- Габариты 85 x 80 x 80 mm

В состав прибора входит магнитометр, необходимый для выяснения связи локальных магнитных условий в месте нахождения спутника и потоков электронов, покидающих радиационные пояса. С целью выявления популяции высывающихся частиц ось телескопов прибора направлена примерно в конус потерь - на 60 линейных градусов от зенита.

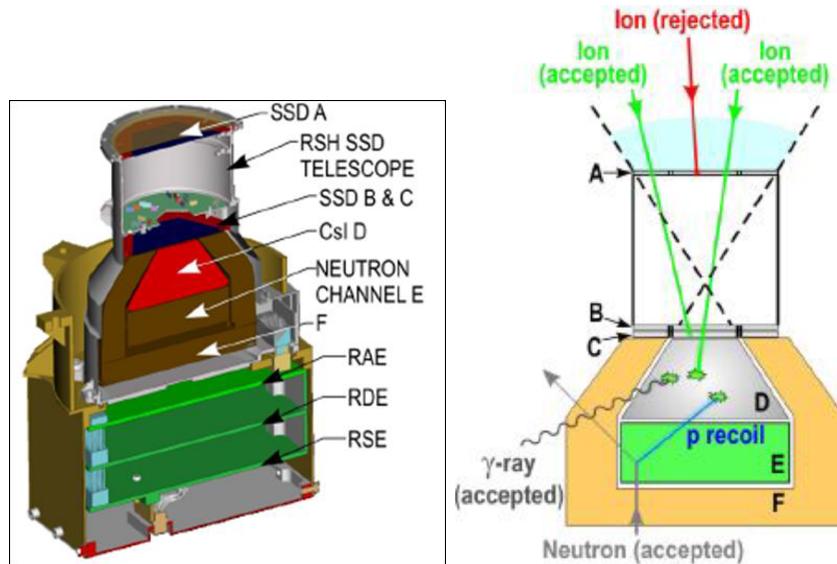


Рисунок 1.7 — Внутреннее устройство прибора RAD. Входное окно образовано 300 мкм полупроводниковыми детекторами А, В и С для определения ЛПЭ излучения. Нейтральные частицы регистрируются в кристалле CsI(D) и пластиковом сцинтилляторе (Е). Сцинтилляторы окружены антисовпадательной защищой(А).

## MSL/RAD

Прибор Radiation Assessment Detector (RAD) предназначен для оценки радиационных условий на Марсианской лаборатории Curiosity. Он состоит из детектора заряженных и нейтральных частиц[58]. Этот первый прибор для измерения спектра частиц и мощности дозы на пути к марсу и на его поверхности [59].

RAD позволяет раздельно регистрировать потоки заряженных и нейтральных частиц, так как прибор предназначен для измерения дозы на поверхности Марса, где значительный вклад в дозу вносят нейтроны и гамма кванты, образованные при взаимодействии ГКЛ с марсианской почвой [60]. В процессе разработки прибора прошел градуировку и калибровку на двух ускорителях ионов (протонов, углерода, гелия, железа), нескольких источниках ИИ и 4 источниках нейтронов и гамма-лучей энергиями от 5 до 100 МэВ [60]. Данные полученные на источниках излучений прошли сравнение с данными, полученными с помощью моделирования Монте-Карло.

Электроника прибора состоит из четырех предусилителей, данные с которых захватываются и дискриминируются с помощью ASIC модуля VIRENA,

единственное АЦП управляется модулем VIRENA и передает оцифрованные данные на FPGA, осуществлявшее цифровую обработку данных, и далее на другую FPGA, для сохранения и передачи данных.

Прибор RAD показал что доза на поверхности Марса модулируется гелиосферным магнитным полем и коррелирует с атмосферным давлением [61]. Доза в течении одного сола меняется на 10 процентов, находясь в противофазе с давлением и составляет в среднем 200 мкГр/сутки.

R-16 Pulse-type ion chamber: 1 pulse per 5 mrad; shallow and deep dose rates; assumes average LET [Mitricas et al. (2002), Badhwar (2000)]

BBND Heavy system; short-term experiment; requires  $^3\text{He}$  Koshiishi et al. (2007), Matsumoto et al. (2001)

## **SEISS**

Группа радиационных приборов SEISS установлена на GOES-R (GOES-16)[62], который запущен 19 ноября 2016 года. Пакет приборов Seiss состоит из: детектора тяжелых ионов (EHIS), детектора частиц РПЗ - высокого и низкого (MPS-HI и MPS-LO) и детектора солнечных и галактических протонов (SGPS). Планируется что данные из Seiss будут использоваться для предупреждений о опасных явлениях космической погоды, а также улучшит прогнозы потоков энергичных частиц.

## **MEPED**

Сеть полярных операционных спутников Земли (POES) полярно-орбитальных космических аппаратов представляет собой комплекс спутников с наиболее близкими орбитами к орбите Ломоносова и поэтому схожими по радиационным условиям полета. Особый интерес для магнитосферных исследований представляет подсистема Space Environmental Monitor, предназначенная для измерения потоков частиц на низкой околоземной орбите, сейчас она представ-

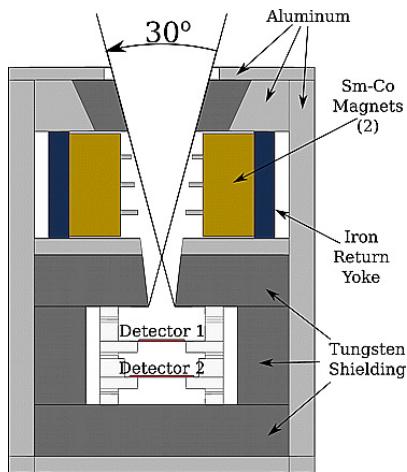


Рисунок 1.8 — Схема прибора протонного телескопа МЕПЕД, показанного в поперечном разрезе.[63]

лена в обновленной конфигурации (SEM -2), эта подсистема является содержит приборы среднего протонного и электронного детекторов (МЕПЕД). В состав МЕПЕД входят в общей сложности восемь приборов в диапазоне от 30 кэВ до 200+ МэВ (для протонов) и от 30 до 2500 кэВ (для электронов).

Интересно, что низковысотные, полярно-орбитальные спутники NOAA POES проявляют побочный отклик на релятивистские электроны в приборе МЕПЕД[63].

### 1.3.3 Детекторы нейтронов

Достоверно известно что нейтроны также вносят ощутимый вклад в эквивалентную дозу и по разным оценкам достигает 20-30% [64], а для эффектов обусловленных ядерным взаимодействием (в том числе повреждения ДНК, эффектов пробоя в микроэлектронике и биологической эквивалентной дозе) может достигать 50-60% [65] [66]. Кремниевые детекторы имеют низкую чувствительность к нейтронному излучению, поэтому для регистрации ожидаемых в космическом пространстве потоков нейтронов [67] и используются детекторы конвертирующие нейтроны в заряженные частицы или газонаполненные счетчики [68]. Методы регистрации нейтронов с использованием конвертеров были предложены еще в 1959 году [69]. Основным недостатком данной методики регистрации является низкая эффективность конвертирования нейтронов — около 1% для плоских по-

крытий и 8% для более сложных конструкций конвертеров на основе  $^{10}\text{B}$  и  $^6\text{LiF}$  детекторов [70]. В последнее время наблюдается серьезный прогресс в создании новых детекторов такого типа и по оценкам эффективность их может достигать 40% [69].

На станциях МИР и МКС распространенной техникой регистрации нейтронного поля была дозиметрич на основе термolumинисцентных детекторах. В качестве термolumинисцентных материалов использовались пластиковые сцинтилляторы CR-39 [71], оксид алюминия с добавками  $^6\text{LiF}$ , тефлона и полиэтилена[41].

В НИИЯФ МГУ также разрабатывались приборы для контроля уровня нейтронного излучения [72] и успешно применялись на ряде спутниковых экспериментов. Данные приборы построены на принципе регистрации реакции нейтронов с  $^3\text{He}$ . Сечение взаимодействия реакции захвата нейтроны гелием велико только для тепловых нейронов, поэтому для регистрации энергичных нейтронов требуется окружение счетчиков замедлителем [73].

Особенно интересны радиобиологические исследования проведенные в ИМБП [74] на МКС с использованием тканеэквивалентного фантома Матрешка, показывающие что вклад нейтронов в дозу может достигать 28%. Исследования при этом производились по методике определения количества пузырьков в “Баббл-дозиметре” [75].

Известен нейтронный детектор для эксперимента Памела [76], он размещен непосредственно под счетчиком S4 с целью увеличения электромагнитной и адронной способности распознавания прибора Памела и расширения энергетического диапазона первичных протонов и электронов до  $10^{11} - 10^{13}$  эВ. Детектор состоит из 36 счетчиков  $^3\text{He}$ , упакованных в полиэтиленовый замедлитель толщиной до 9 см, способных детектировать тепловые нейтроны с эффективностью 10%, учитывая эффективность термализации нейтронов, образующихся в калориметре.

Размер нейтронного детектора составляет  $60 \times 55 \times 15$  см<sup>3</sup>, общий вес - 30 кг, потребляемая мощность - 10 Вт. Регистрируется всенаправленный поток частиц, за исключением углов, экранированных магнитом PAMELA, защищай из пластин Cd и Землей, а геометрический фактор достигает 900 см<sup>2</sup> ср [68]. Авторами детектора производились попытки для анализа нейтронных потоков от Солнца, однако однозначного результата получить не удалось [77]. Результаты анализа совпаде-

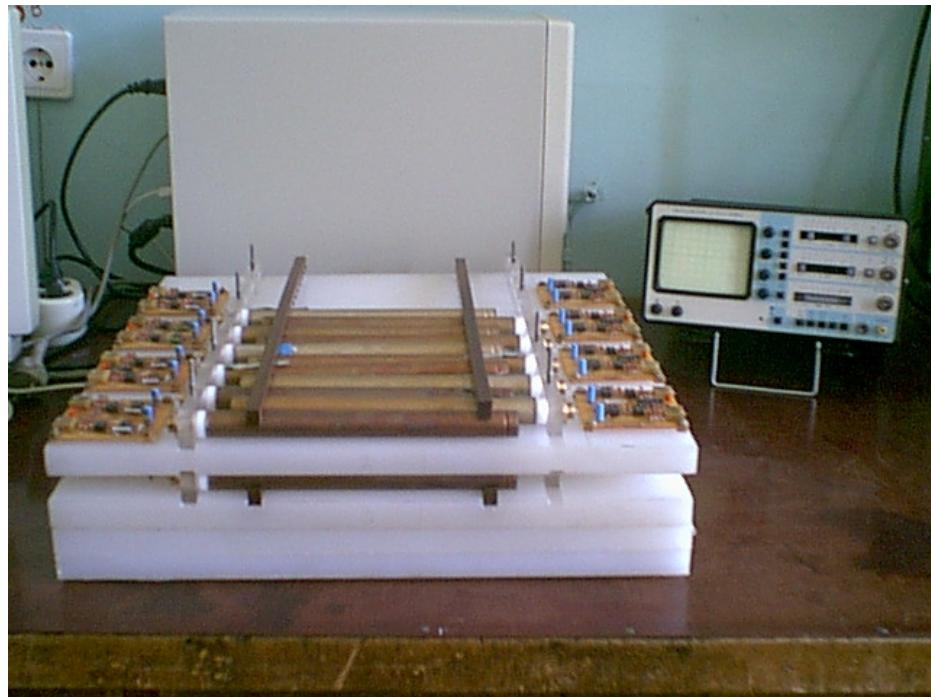


Рисунок 1.9 — Устройство кассеты нейтронных счетчиков для эксперимента PAMELA [68]

ний триггеров спектрометра и колориметра эксперимента с триггерами нейтронного детектора дают основания полагать что около 75% нейтронов образуются в массе космического аппарата [68].

Также известно что счетчики нейтронов используются на орбите Марса и позволили получить важный научный результат о наличии воды на поверхности Марса. Этот результат получен с помощью прибора HEND [78]. Аналогичные приборы для обнаружения воды с помощью регистрации потока нейтронов разработаны для работы на поверхности (DAN [79]) и орбите марса. На аппарате ExoMars2016 установлен FREND [80]. С помощью четырех гелиевых счетчиков прибор позволит регистрировать околосолнечные нейтроны 0.4–500 кэВ и заряженные частицы 0.5–10 MeV, с помощью сцинтилляционного детектора. Сужение поля зрения прибора произведено двухслойным коллиматором, внешний слой из полиэтилена замедляет нейтроны, а внутренний из  $^{10}\text{B}$  поглощает их.

Интересно что данный прибор работает в паре с дозиметрическим модулем Liulin-MO и таким образом композиция этих двух приборов представляет собой очень близкий аналог прибора ДЭПРОН.

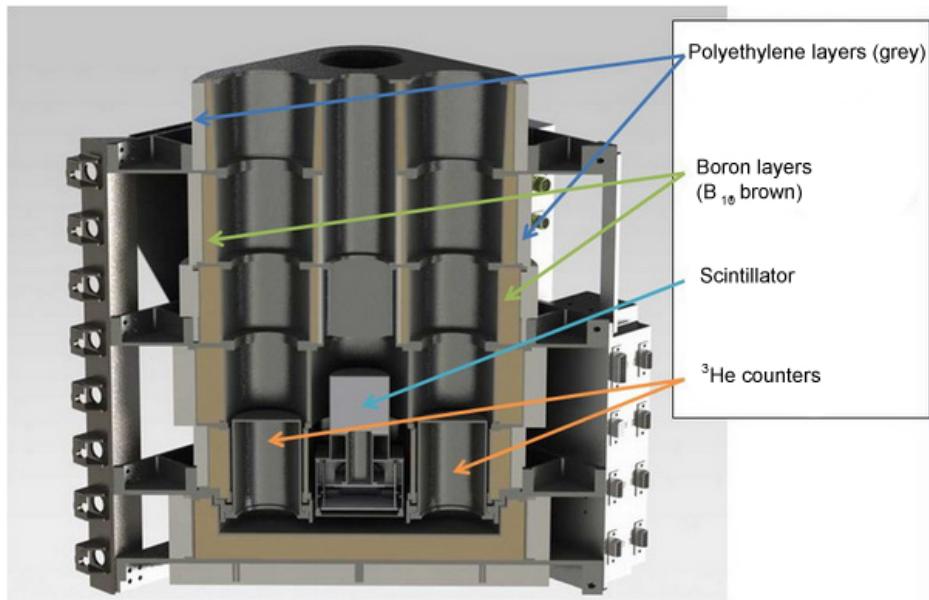


Рисунок 1.10 — Устройство прибора FREND [80]

#### 1.4 Математическое моделирование дозиметрических приборов для космических условий

Математическое моделирование широко применяется на всех этапах создания исследовательских приборов предназначенных для использования в условиях космоса. В первую очередь оно необходимо на этапе проектирования аппаратуры для выбора характеристик регистрирующих радиацию модулей исходя из поставленных экспериментальных задач [81]. На последующих шагах разработки аппаратуры математические методы используются при верификации результатов калибровочных и градуировочных испытаний на источниках ИИ и ускорителях заряженных частиц [60; 82]. Также одним из основных применений является уточнение функции отклика прибора во время штатной работы [60].

Среди математических методов моделирования взаимодействия ИИ и нейтральных излечений с материалами и детектирующими модулями приборов следует отметить наиболее используемые программные пакеты, основанные на методе Монте-Карло:

**GEANT4** комплекс программ для моделирования прохождения частиц через вещество[83], код общедоступен;

**SHIELDOSE** система расчетов доз за секционированной защитой [84], код общедоступен;

**RHITS** Система расчета перемещений частиц и тяжелых ионов, разработана в Японии и Австрии [85; 86] ;

**FLUKA** система широко использующаяся в CERN для широкого круга задач и первую очередь для медицинских приложений[87; 88].

Отдельно отметим HZETRN - код использующийся NASA для расчетов радиационных условий в космосе [89], который отличается от перечисленных программ методом расчета, в нем используется Больцмановское уравнение транспорта в прямолинейном приближении [90]. Исходный код HZETRN общедоступен на сайте NASA, как и большинство перечисленных транспортных кодов. Далее подробно рассмотрен пакет Geant4, так как в настоящей работе именно он был выбран для расчетов.

#### 1.4.1 GEANT4

Данная система математического моделирования разрабатывается для нужд работы ЦЕРН и активно используется в ряде областей науки, медицины и технологий [91]. К настоящему моменту система Geant4 развилась настолько, что от основной ветки разработки отделилось несколько специализированных продуктов, использующих только ядро системы для расчетов распространения частиц. Основные направления развития это микродозиметрические исследования(GEMAT), применение к распространению и воздействия космического излучения(GRAS, PLANETOCOSMICS ), оптимизация экранирования (MULASSIS [92] и SSAT).

Следует отметить что многие из упомянутых программ организованы в единый комплекс Spenvis, из них особенно применим для исследований характеристик приборов Geant4 Radiation Analysis for Space (GRAS) [93]. Этот пакет принимает в качестве входных данных GDML файл с моделью прибора и позволяет автоматически создавать комплексные источники космического излучения соответствующие различным орбитам полета спутников.

## 1.5 Возможности КА Ломоносов в продолжении ряда российских исследований радиационной обстановки

На многих российских пилотируемых кораблях со времен первого полета человека в космос устанавливались дозиметрические приборы, изготовленные в НИИЯФ МГУ, исчерпывающий список и результаты этих экспериментов можно найти в монографии Ю.И. Логачева 2007г [10]. Отличительной чертой данного эксперимента является возможность прозондировать более высокие широты по сравнению с орбитами таких комплексов как станция МИР и МКС.

Вторым но не менее важным моментом является уникальное сочетание многих исследовательских приборов на одном аппарате, такое сосредоточение позволяет получить уникальную информацию о множестве параметров исследуемых явлений, будь то гамма вспышки земного или неземного происхождения, или транзиентные явления в верхней атмосфере - такие как эльфы и спрайты. Дозиметрический прибор поможет отследить сбойные явления в аппаратуре КА, связанные с повышением уровня радиации и отделить их от ценных научных данных. А также, дать новую информацию о явлениях в авроральных областях, высыпаниях во внешнем радиационном поясе.

На борту спутника кроме прибора ДЭПРОН установлены два прибора позволяющие регистрировать различные компоненты радиационной нагрузки, это БДРГ — Блок детектирования рентгеновского и гамма излучения (НИИЯФ МГУ), ELFIN (UCLA и IGPP) — прибор для обнаружения высыпаний электронов и исследования магнитных полей, содержащий детектор электронов и ионов (EPD-E и EPD-I), наряду с магнитометром. Такая тройка приборов позволяет при небольшом весе проводить разносторонние измерения параметров радиационной обстановки.

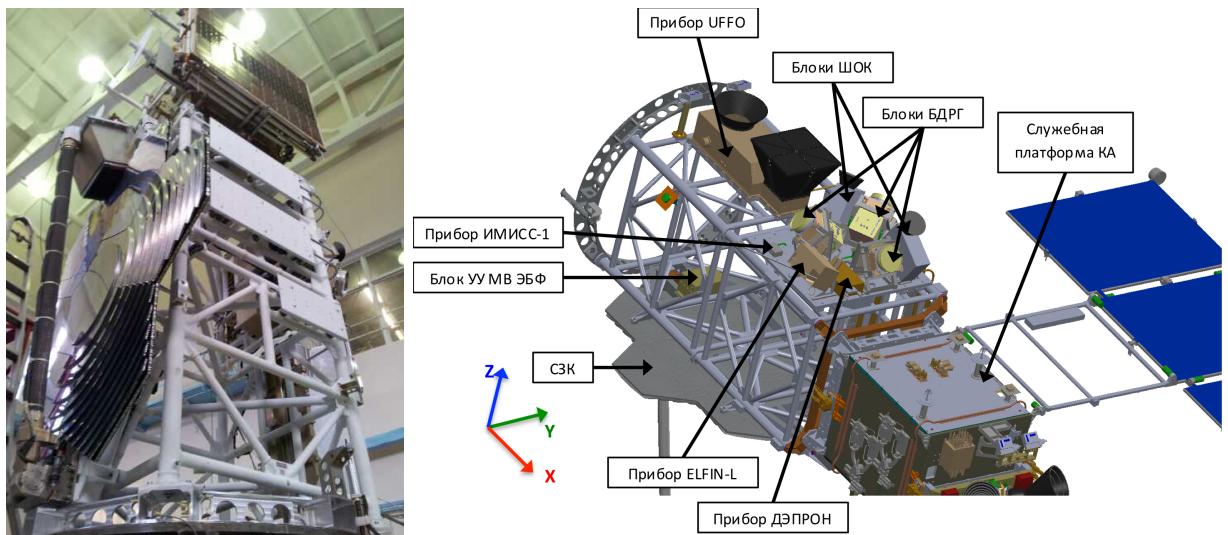


Рисунок 1.11 — Внешний вид спутника Ломоносов и относительное расположение приборов

## Глава 2. Аппаратура для проведения исследований

### 2.1 Прибор Дэпрон

Прибор Дэпрон разрабатывался как исследовательский инструмент для решения широкого круга научных задач. Основной задачей прибора является измерение мощности дозы и потоков ионизирующих излучений. Дополнительными задачами выделены регистрация нейтронов тепловых энергий и высокоэнергетических частиц. Такое сочетание решаемых задач, для прибора относительно небольшого веса, является уникальным и позволяет надеяться на получение достаточно подробной информации о радиационной обстановке на борту КА.

#### 2.1.1 Устройство прибора

В состав прибора ДЭПРОН входят два узла с полупроводниковыми детекторами и два узла с газоразрядными гелиевыми счетчиками нейтронов. Также в состав прибора входят узлы усиления и формирования сигналов от полупроводниковых и нейтронных детекторов и узел цифровой обработки сигналов.

Поглощенная доза регистрируется узлами с полупроводниковыми детекторами. Для получения информации о величине поглощенной дозы используется принцип регистрации величины заряда в объеме полупроводника, пропорционального энерговыделению в данном объеме.

$$D = \frac{E}{m} = \frac{w_i \cdot \frac{q}{e}}{m} \quad (2.1)$$

где

$D$  поглощенная доза

$E$  энергия поглощенная в чувствительном объеме

$m$  масса чувствительной зоны детектора

$w_i$  энергия формирования пары

$e$  заряд электрона

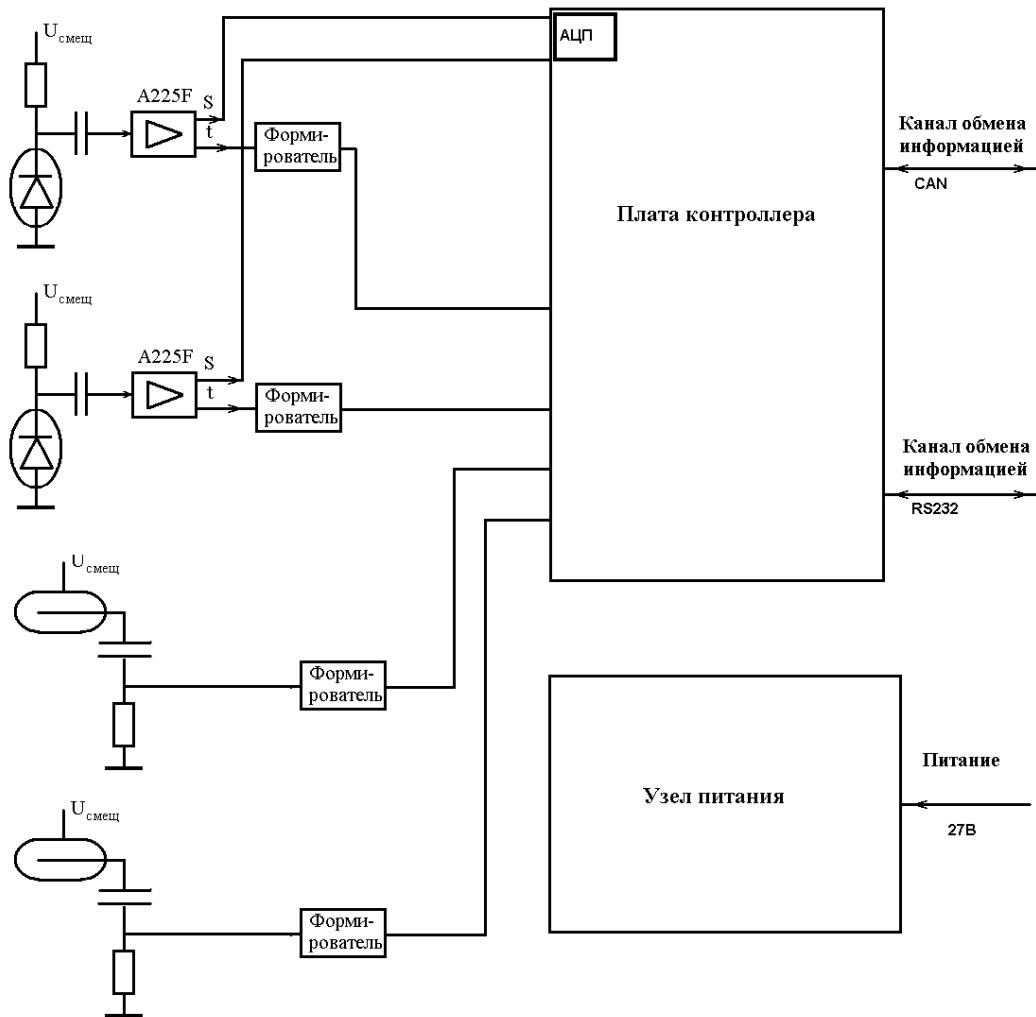


Рисунок 2.1 — Блок-схема прибора ДЭПРОН

$q$  электрический заряд образованный в чувствительном объеме  
Оба полупроводниковых детектора и скомпонованы в кассету и расположены в относительной близости друг от друга. Схема построения прибора с параллельным расположением двух полупроводниковых детекторов была использована для получения информации о ЛПЭ частиц, прошедших одновременно оба детектора. Спектр ЛПЭ зарегистрированных частиц позволяет вычислить эквивалентную дозу, используя постулированный в НРБ коэффициент качества ионизирующего излучения. Для перехода от поглощенной дозы в кремнии к эквивалентной дозе потребуется пересчет зарегистрированного спектра ЛПЭ в спектр ЛПЭ в воде, который производится умножением на коэффициент 1,21. Функциональная схема прибора ДЭПРОН показана на рисунке 2.1.

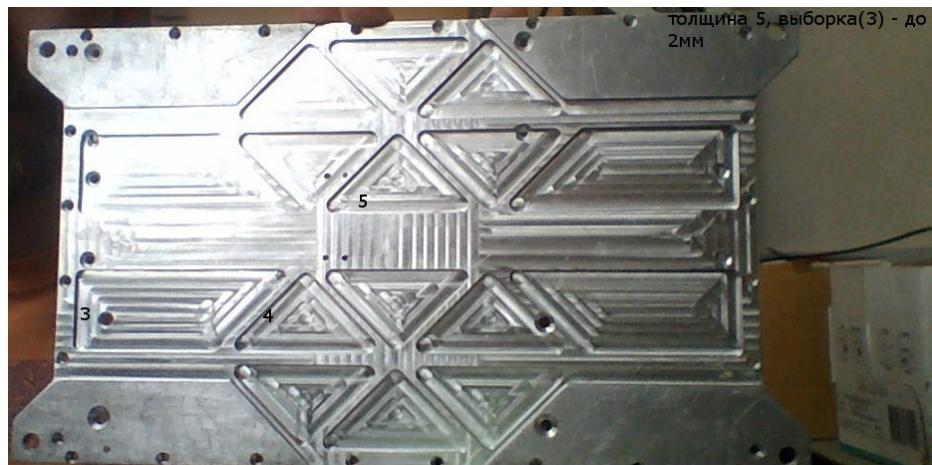


Рисунок 2.2 — Вариант размещения выборок в днище прибора ДЭПРОН.

Впоследствии данный вариант переработан исходя из конструктивных соображений крепления модулей электроники и улучшения сброса тепла от источников питания, через термо-контакт с бортом КА.

## 2.2 Конструктивные особенности прибора

Прибор состоит из одного блока, габаритный чертеж которого представлен в Приложении 1. Габаритные размеры прибора: длина 280 мм, ширина 160 мм, высота 78 мм. Масса прибора - 3 кг. Корпус прибора составлен из шести пластин Д16т – листового дюралюминия, толщиной 4,5 мм, обработанного на станке ЧПУ. В каждой пластине фрезерованы повторяющиеся выборки треугольной формы до толщины 2 мм. Выборки расположены таким образом, чтобы сформировать «ребра» жесткости в стенках прибора, как видно на рисунке 2.2. С лицевой стороны пластины корпуса оксидированы, с целью получения электропроводной поверхности всего прибора.

На лицевом торце прибора расположены два разъема СНП-333, используемых для передачи данных в БИ аппаратуры спутника (разъем X1) и для передачи питания в прибор ДЭПРОН от бортовой аппаратуры спутника (разъем X2). Также на лицевой панели находятся два разъема РС-7 предназначенные для передачи информации по каналу RS232 от прибора ИМИСС-1 (разъем X5) и сквозной передачи питания от бортовой аппаратуры к прибору ИМИСС-1 (разъем X4). Во всех перечисленных разъемах предусмотрен контроль стыковки разъемов с помощью короткозамкнутых линий, а также дублирование информационных и токонесущих линий.



Рисунок 2.3 — Внутренняя компоновка модулей прибора ДЭПРОН. Вид сверху со снятой крышкой прибора.

Дополнительно на лицевую панель прибора вынесен технологический разъем РС 19 XT3, используемый для проверки функционирования прибора в лабораторных условиях методом подачи на детекторные узлы калиброванных сигналов с генератора, а также для контроля внутренних рабочих напряжений. Проверка работоспособности прибора и подача сигналов с генератора осуществляется с помощью блока КПА, имеющему четыре экранированных канала для передачи низкоамплитудных сигналов и два светодиодных индикатора для контроля наличия рабочих напряжений +5В и +12 В в приборе ДЭПРОН. В штатном режиме работы данный разъем не подключен и закрыт заглушкой. Схема распределения линий в разъемах представлена в Приложении 2.

Платы электроники блоков усиления и формирования аналоговых сигналов располагаются в трех тонкостенных алюминиевых кассетах и выполнены в формате 11-ти контактных печатных плат размерами 34x50мм (2.3). Данный формат печатных плат распространен в производстве научной аппаратуры изготовления НИИЯФ МГУ и с успехом применяется для космической аппаратуры уже на протяжении нескольких десятков лет. Применение данного стандарта позволяет соблюсти принцип модульности построения приборов, используя отработанные в космических условиях надежные схемы, компонуя из них тракты с параметрами, заданными потребностями текущих экспериментальных задач.

В средней части рисунка последовательно располагаются три корпусных кассеты с платами электроники: левая и правая кассеты содержат платы формирователей триггерных сигналов от детекторов, центральная кассета ориентирована перпендикулярно и содержит две платы полупроводниковых детекторов и ЗЧУ, а также платы дополнительного усиления.

В нижней части рисунка находится нейтронный счетчик СИ13Н (цилиндр), экранированный 1 см оргстекла

### 2.3 Детекторы

Дозиметр заряженных частиц выполнен на кремниевых ионно-имплантированных D1 пролетных детекторах, работающих в режиме регистрации амплитуд импульсов. Детекторы изготовлены по специальному заказу НИИЯФ МГУ в ООО «Детектор-СИ» в соответствии с АБЛК.418219.402ТУ. Данные детекторы предназначены для спектрометрии и радиометрии заряженных частиц в составе пред назначенной для этих целей аппаратуры. Чувствительный элемент детектора изготовлен из высокоомного кремния n-типа по технологии ионной имплантации. Рекомендуемая схема включения детектора приведена на рисунке 2.4.

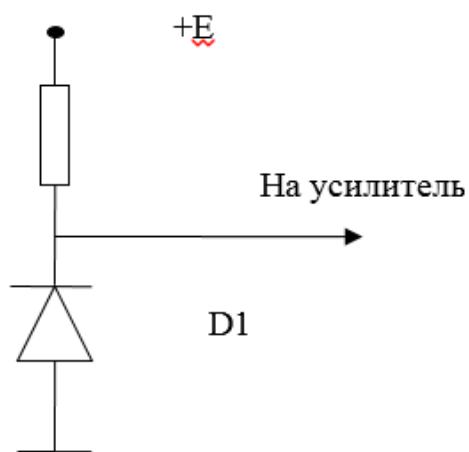


Рисунок 2.4 — Схема включения детектора.

+Еп источник напряжения;

Rсм сопротивление смещения;

D1 Детектор.

Наименование параметра	Фактические параметры
Рабочее напряжение, В	90
Обратный ток, нА	4
Энергетический эквивалент шума, кэВ	5
Постоянная времени квазигауссова формирования импульса, мкс	2
Предельно допустимое напряжение, В	130

Примечания: Аттестация производилась при 26 С.

Таблица 2.1 — Полупроводниковые детекторы прибора ДЭПРОН (по материалам ТУ)

Детекторы могут эксплуатироваться при атмосферном давлении или в вакууме до  $10^{-6}$  мм.рт.ст., таким образом подходят для размещения в не герметичном корпусе прибора ДЭПРОН. Подробные значения параметров детекторов приведены в таблице 2.1.

### 2.3.1 Телескоп детекторов

В приборе Дэпрон используются два полупроводниковых детектора. Детекторы образуют телескоп, то есть расположены параллельно на определенном расстоянии, что обеспечивает возможность регистрировать спектр ионизационных потерь. Дополнительно использование двух детекторов позволяет повысить уровень надежности всего регистрирующего тракта.

Схематично относительное расположение детекторов показано на рисунке 2.5. Расстояние между детекторами выбрано 18 мм, таким образом что телесный угол полета частиц, проходящих через оба детектора оказывается около 30 градусов.

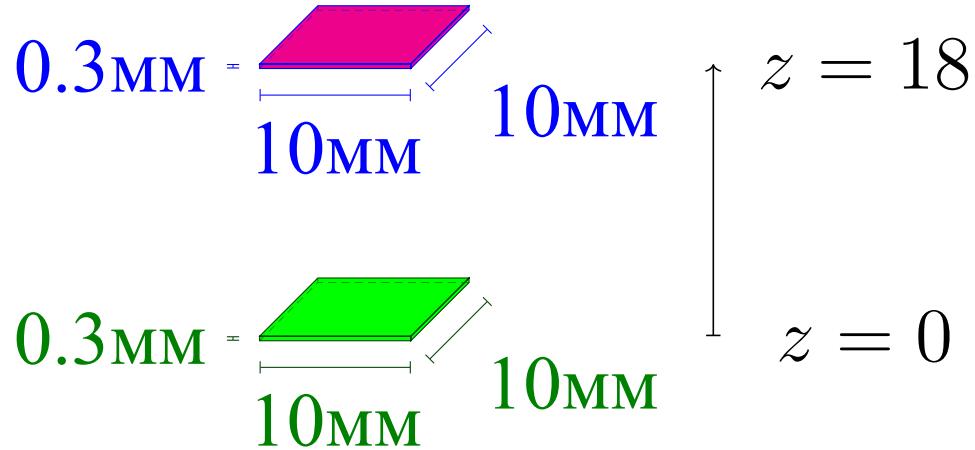


Рисунок 2.5 — Телескоп детекторов прибора ДЭПРОН, масштаб 1:2

### Расчет геометрического фактора телескопа

В соответствии с работой [94] общий геометрический фактор можно вычислить исходя из соображений затенения одного детектора вторым, что для геометрии с прямоугольными детекторами дает:

$$G = Z^2 \int_{-X_1}^{X_1} \int_{-Y_1}^{Y_1} \int_{-X_2}^{X_2} \int_{-Y_2}^{Y_2} \frac{dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{\{Z^2 + (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2\}^2}$$

Численный расчет в пакете Mathcad (рисунок 2.6) дает в результате для нашего случая геометрический фактор 0.145, так как геометрический фактор отдельного детектора равен  $4\pi$  и мы имеем два идентичных детектора, поэтому удваиваем результат интегрирования. Поправочный коэффициент для энерговыделения в телескопе детекторов 0,043, он рассчитан по соотношению 2.2, где  $S_0$  площадь чувствительной поверхности.

$$\xi = \frac{Z}{2\pi S_0} \cdot \int_{-X_1}^{X_1} \int_{-Y_1}^{Y_1} \int_{-X_2}^{X_2} \int_{-Y_2}^{Y_2} \frac{dx_1 dy_1 dx_2 dy_2}{\{Z^2 + (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2\}^{\frac{3}{2}}} \quad (2.2)$$

$Z := 1.8$

$$g1 := \frac{2}{4 \cdot \pi} \cdot Z^2 \cdot \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \frac{1}{Z^2 + (x1 - x2) \cdot (x1 - x2) + (y1 - y2) \cdot (y1 - y2)} dx1 dx2 dy1 dy2$$

$g1 = 0.145$

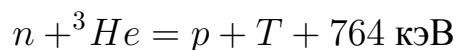
$$ksi1 := \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot 1} \cdot \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \frac{1}{\left[ Z^2 + (x1 - x2) \cdot (x1 - x2) + (y1 - y2) \cdot (y1 - y2) \right]^{\frac{3}{2}}} dx1 dx2 dy1 dy2$$

$ksi1 = 0.043$

Рисунок 2.6 — Расчет геометрического фактора телескопа в системе Mathcad

### 2.3.2 Нейтронные детекторы

Детектор нейтронов выполнен на счётчике медленных нейтронов «СИ-13Н», представляющем собой газоразрядный счетчик, работающий в режиме коронного разряда. Для обеспечения надежности используются 2 счетчика. Второй детектор нейтронов окружен замедляющей оболочкой из поликарбоната, что позволило расширить энергетический диапазон регистрируемых нейтронов. При прохождении нейтрона через газ Не-3, наполняющий счетчик, происходит ядерная реакция:



При этом энергия между тритоном и протоном может распределяться в различных соотношениях, а наиболее вероятно распределение в соответствии с массами продуктов 1:3.

Продукты реакции вызывают ионизацию газа в счётчике, что приводит к образованию газового разряда и появлению электрического импульса на электроде счетчика. Импульс поступает на вход усилителя-формирователя и, затем, поступает на регистр прерываний процессора, где используется для подсчета числа зарегистрированных нейтронов. [73]

В материалах препринта [72] сделан вывод о чувствительности  $\eta$  и геометрическом факторе счетчиков нейтронов:

$$\eta = \frac{N}{n} \quad (2.3)$$

где  $N$  счет в детекторе, а  $n$  исходный поток нейтронов. Чувствительность счетчиков зависит от энергии нейтронов и конфигурации прибора. Так как толщина материала стенок прибора незначительна по сравнению с пробегом нейтронов в алюминии, мы можем считать что счетчики нейтронов не имеют четко выраженных пиков на диаграмме направленности.

Для полного описания работы нейтронных счетчиков необходимо учитывать вероятность регистрации заряженных частиц и гамма-излучения, а также собственную радиоактивность счетчиков (0.08Зимп/с). Для прибора Дэпрон собственный фон счетчиков незначителен по сравнению со средним уровнем счета на орбите.

## 2.4 Аналоговая обработка сигналов

Платы полупроводниковых детекторов и предусилителей (внутренний номер SSD006) изготовлены методом фотолитографии в стандартном формате 34x50, использование современных миниатюрных электронных компонент позволило совместить блоки предусиления и детектирования на одной плате и закрыть единым экраном от электромагнитных помех.

Сигнал с полупроводникового детектора поступает на зарядочувствительный предусилителя A225F 2.8, фирмы АМРТЕС, специализирующейся на производстве компонент для космической промышленности.

На выходах предусилителя формируются два сигнала. Один (S-сигнал) - имеет амплитуду пропорциональную заряду, образовавшемуся в детекторе и длительность порядка 5 – 10 мкsec. Этот сигнал поступает на амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП). Второй сигнал предусилителя A225F (t-сигнал) имеет короткое, менее 0.5 мкsec, время задержки от момента прихода сигнала с детектора до максимума амплитуды и используется для запуска процесса цифровой обра-

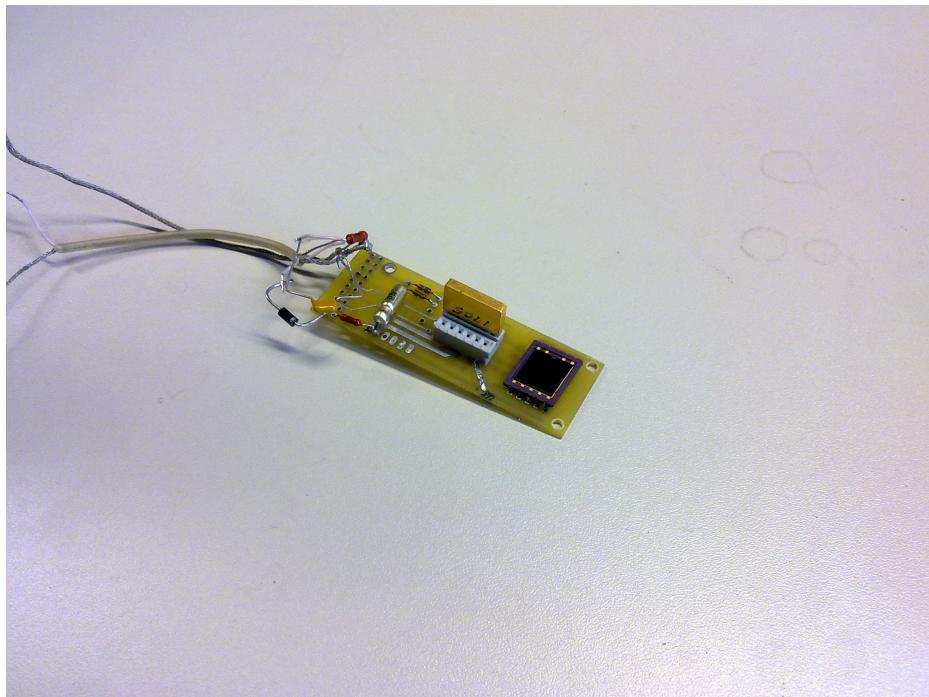


Рисунок 2.7 — Фотография прототипа модуля полупроводникового детектора-предусилителя (A225F)

ботки пришедшего импульса. Этот ( $t$ -сигнал) сигнал поступает на вход усилителя и, после усиления, поступает на регистр прерываний процессора, где используется для запуска процесса преобразования амплитуды сигнала, поступившего на АЦП, в код. Дальнейшая обработка сигналов с полупроводниковых детекторов производится микропроцессором прибора в цифровой форме.

## 2.5 Цифровая обработка сигналов

Для записи результатов измерений прибора используется внутренняя память микроконтроллера, входящего в состав узла цифровой обработки сигналов. В нее записываются, а затем передаются в Блок Информации КА «Ломоносов» кадры информации.

На этапе опытно-конструкторских разработок (при макетировании прибора ДЭПРОН) в качестве узла цифровой обработки сигнала использовался 8-битный микроконтроллер ATmega128. Данная микросхема отличается низкой потребляемой мощностью и обладает развитыми средствами ввода данных и обмена информацией, а также достаточной вычислительной мощностью. Печатная плата

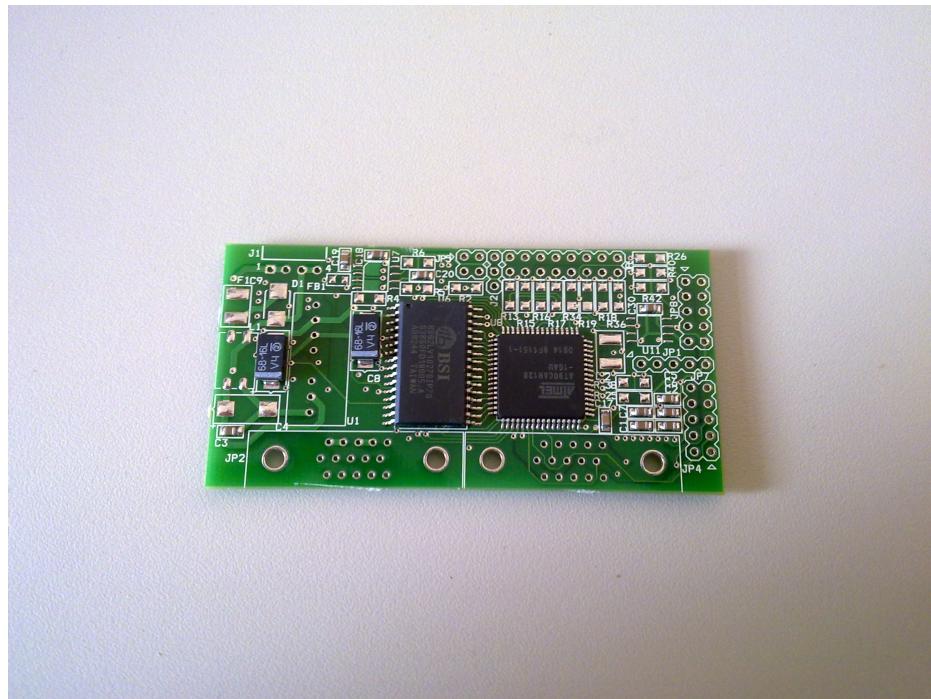


Рисунок 2.8

контроллера была разработана в НИИЯФ МГУ Н.Н. Веденькиным и Д.Г. Аксельродом. На плате расположены два АЦП, а также дополнительная память, независимый преобразователь питания и контроллер обеспечения связи по последовательному каналу (RS232). Как показали опытно-конструкторские работы, проведенные с макетом дозиметра ДЭПРОН, данный узел обеспечивает потребности по бортовой обработке сигналов от детектора по производительности, несмотря на то, что по современным меркам частота работы ядра процессора невелика - 16 MHz. Также выбранный контроллер обладает достаточным для поставленной задачи количеством входных каналов.

Для преобразования амплитуды импульсов, сформированных на выходе аналоговых трактов усиления, использовались 12-ти битные АЦП AD7495 фирмы Analog Devices со скоростью работы 1 MSPS (миллион измерений в секунду). Данные АЦП используют высокоскоростной последовательный интерфейс (SPI – Serial Peripheral Interface), который был реализован программным способом. Управление моментом захвата амплитуды входного сигнала также производилось программным способом подачей цифрового сигнала «0» на линию CS.

В первой версии платы цифровой обработки сигналов подключение обоих АЦП к контроллеру прибора производилось по независимым каналам: CS (Chip Select – Активный логический вход АЦП), SCLK (Serial Clock – логический вход АЦП), SDATA (Data Output – логический выход АЦП). Задача максимально быст-

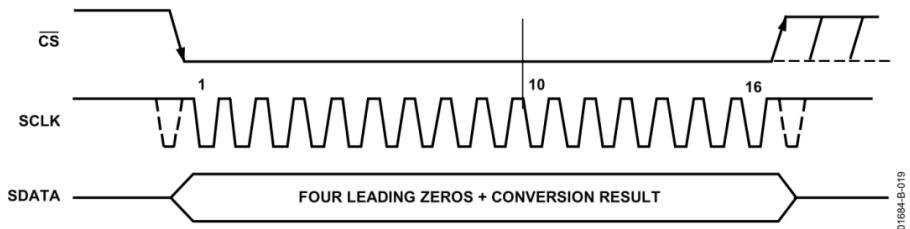


Рисунок 2.9 — Тактирование использованного в приборе ДЭПРОН режим работы АЦП (AD7495), по материалам [ ]

рого захвата сигналов с выхода предуслителя решалась включением встроенного в АЦП устройства выборки и хранения (англ. “track and hold circuit”) в момент получения контроллером сигнала от таймингового выхода предуслителя. Для этого прерывания контроллера настроены при получении такого сигнала на выдачу управляющего сигнала на вход CS АЦП, ответственного за оцифровку сработавшего канала аналоговой части прибора. Дальнейшая оцифровка амплитуды захваченного в буфере АЦП сигнала производилась после выхода из процедуры обработки прерывания, так как этот процесс отнимает значительное время. Испытания процедуры управления оцифровкой АЦП показали, что точность измерений АЦП чувствительна к временной регулярности тактирующего сигнала подаваемого на SCLK АЦП. Одной из причин таких нерегулярностей является возможность срабатывания прерывания в ПО контроллера во время исполнения процедуры генерации тактирующих импульсов, что в условиях эксплуатации прибора при высоких потоках ионизирующих излучений (например, в области ЮАА) не редкость. Временное отключение обработки прерываний может устранить данный недостаток работы прибора, однако испытания такого режима работы показали накопление необработанных прерываний в буфере контроллера, которые впоследствии обрабатывались неверно, из-за чего решено отказаться от использования этого режима.

Выявление нерегулярности тактирующего сигнала потребовало проверку этого сигнала с помощью осциллографа, снимок экрана представлен на рисунке 2.11. Дизассемблирование скомпилированного кода ПО микроконтроллера показало критические места кода, требующие изменения алгоритма генерации тактирующих импульсов и добавления промежутков простоя процессора (`_nop` – в коде “no operation”). Окончательная проверка регулярности сигнала, генерируемого выверенным кодом, производилась снятием временной развертки тактирующего

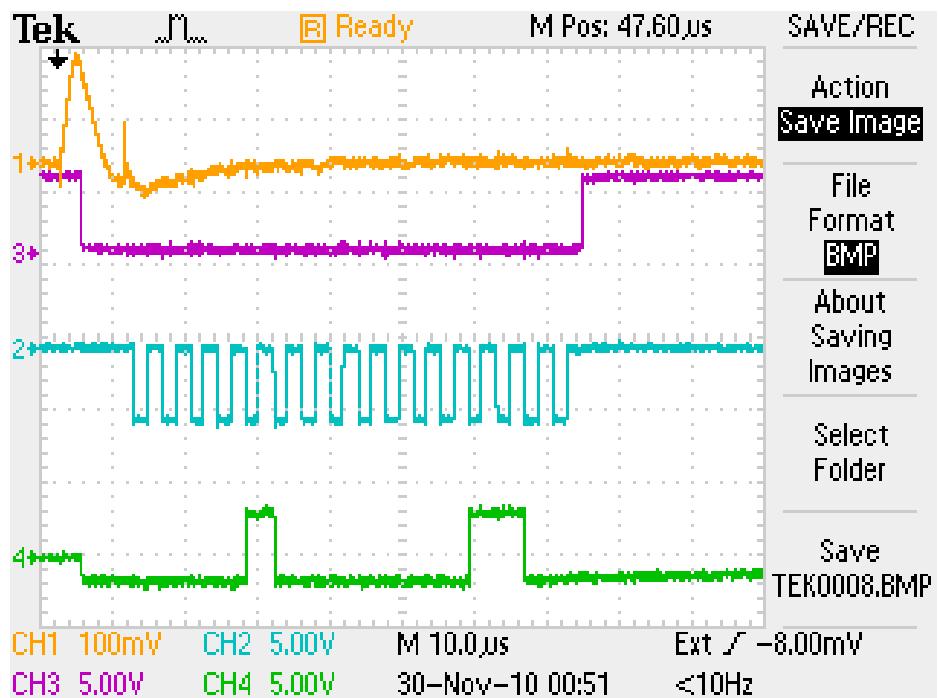


Рисунок 2.10 — Осциллографма: регулярность тактирующего сигнала, подающегося на SCLK АЦП.

сигнала на осциллографе. Данный подход использовался и при последующих отработках работы АЦП прибора ДЭПРОН.

Таким образом, в первой версии платы цифровой обработки сигналов использовались шесть независимых каналов контроллера, что ограничивало возможность подключения дополнительных информационных каналов с детекторной части прибора. Также одной из проблем данного подхода является двойная нагрузка на микроконтроллер прибора ДЭПРОН, так как управляющие сигналы генерируются программным способом. Такой подход предоставлял сомнительное преимущество в независимом управлении АЦП из программного обеспечения микроконтроллера, поэтому было принято решение изменения способа подключения АЦП.

Следующим конструктивным решением было включение обоих АЦП в параллельный режим работы, когда управляющий (CS) и тактирующий (SCLK) сигналы подаются на оба АЦП. Каналы данных (SDATA) подключены к независимым входам контроллера.

При проектировании Блоков обработки Информации (БИ) было принято решение по организации обмена по каналу CAN между дочерними приборами, входящими в Комплекс Научной Аппаратуры (КНА) «Ломоносов». Однако использованный для макетирования контроллер ATmega128, и данный контроллер

был заменен на AT90CAN128. Данное решение было продиктовано минимальными изменениями уже разработанного программного обеспечения и незначительными доработками печатных плат, необходимым для внедрения контроллера AT90CAN128.

Опыт работы с данным контроллером также показал его применимость для целей построения полноценного дозиметра ионизирующих излучений. Тем не менее, по требованию других участников проекта данный контроллер был заменен более современным и более производительным контроллером AT91SAM7X256. Всего в составе КНА насчитывается 4 прибора, в которых использована схема цифровой обработки сигнала на базе AT91SAM7X, некоторые из этих приборов испытывали нехватку производительности данного модуля до замены ЦПУ. В целях унификации разработанный аппаратуры модуль цифровой обработки сигналов и связи был заменен и в приборе ДЭПРОН. Данное изменение состава прибора повлекло за собой необходимость повторения цикла разработки программно-математического обеспечения прибора и проведения повторных калибровок АЦП и счетных каналов схемы цифровой обработки. Необходимость данных работ обусловлена принципиальным отличием архитектуры контроллера: в исходном варианте это архитектура AVR, а в окончательном ARM.

В финальном варианте цифровая обработка сигналов осуществляется с помощью микропроцессора AT91SAM7X512. Программно-математическое обеспечение ДЭПРОН функционирует на одной микропроцессорной плате SSD234. Данная плата собрана на базе микроконтроллера AT91SAM7X512 производства фирмы ATMEL, и содержит процессор ARM7 TDMI® ARM® Thumb® с 32-разрядной RISC-архитектурой команд.

Программное обеспечение процессора осуществляет регистрацию сигналов, поступающих со схем преобразования импульсов с детекторов, их преобразование и накопление, передачу результатов по каналу связи с блоком информации КА. Объем сбрасываемой информации не превышает 1 Мбайт/сутки.

## 2.6 Связь с внешними системами

*Связь с Блоком Информации «Ломоносов»*

Связь с БИ осуществляется посредством канала Controller Area Network (CAN), использующегося в качестве стандарта промышленных сетей. CAN ориентирован на объединение в единую сеть различных исполнительных устройств и датчиков. Режим передачи данных - последовательный, широковещательный, пакетный. Программные модули и аппаратные схемы разрабатывались для комплекса аппаратуры в целом Н.Н. Веденькиным и прошли проверку при доводке аппаратуры и комплексных испытаниях КНА.

Прибор ДЭПРОН формирует в рабочем режиме пакеты данных по 512 байт, которые накапливаются во внутренней памяти контроллера. Подготовленная очередь пакетов передается на БИ КА «Ломоносов», где накапливается для передачи на Землю.

Передача информации от космического аппарата происходит через сеть фиксированной спутниковой связи. Данные передаются через общественную сеть Интернет и архивируются на специально выделенном сервере данных. Альтернативно, при отсутствии подключения к спутниковой сети связи, используется канал передачи телеметрической информации с платформы КА «Ломоносов», при таком подключении данные ДЭПРОН поступают на Землю через центр управления полетами (ЦУП) и ввиду ограниченной пропускной способности этого канала данные передаются частично.

#### *Связь с прибором ИМИСС*

Связь с прибором ИМИСС-1 осуществляется по каналу RS232 (USART). Поступающая информация транслируется прибором ДЭПРОН в БИ по каналу CAN без изменений. В соответствии с расчетным объемом данных от прибора ИМИСС затраты производительности микроконтроллера ДЭПРОН на трансляцию данных в БИ будут незначительны по отношению к затратам на выполнение основных задач прибора ДЭПРОН.

#### **2.6.1 Питание**

Электропитание схем прибора ДЭПРОН осуществляется с использованием DC/DC преобразователей. Напряжение питание бортовой сети 27В, подключено через разъем X2 прибора ДЭПРОН и поступает на два преобразователя 28/12 В.

С первого преобразователя напряжение поступает на стабилизатор напряжения и далее из этого напряжения формируются номиналы: +6 В, для питания схем усилителей, формирователей и микропроцессора. Со второго преобразователя питание поступает на преобразователь +70 В, для питания полупроводниковых детекторов и на преобразователь +1200 В, для питания газоразрядных счетчиков.

## 2.6.2 Программное обеспечение

Программно-математическое обеспечение прибора ДЭПРОН состоит из программы для контроллера прибора, написанной на языке C++(C), с использованием пакета IAR Workbench® для микроконтроллеров архитектуры ARM®.

Исполняемый код программы формируется из двух файлов:

- `detector.c` – прикладные функции для работы прибора ДЭПРОН
- `main.cpp` – инициализация контроллера прибора и функции обмена информацией с БИ. В процедуре `main` этого файла работает основной бесконечный цикл программы, в котором вызываются функции обмена информацией по каналу CAN и процедура `Detectors_Handling`.

Работа прибора ДЭПРОН основана на прерываниях, которые обрабатываются по мере их поступления в процедуре `Ext_Interrupt` (см. рисунок 2.12), а ресурсоемкий разбор полученных данных и запуск АЦП происходят в процедуре `Detectors_Handling`, которая вызывается из главного цикла программы в непрерывном режиме. Данная особенность реализации приводит к возможности непредсказуемого поведения при одновременном возникновении нескольких прерываний. Для возврата к верным настройкам процессора при сбоях используется периодический вызов функции повторной инициализации портов и прерываний микроконтроллера, а также сторожевой таймер, перезагружающий контроллер.

Внешние прерывания настроены на регистрацию прохождения положительного фронта импульсов. Не подключенные электрически каналы порта ввода-вывода отключены программно, подробно подключенные прерывания перечислены в таблице 2.2.

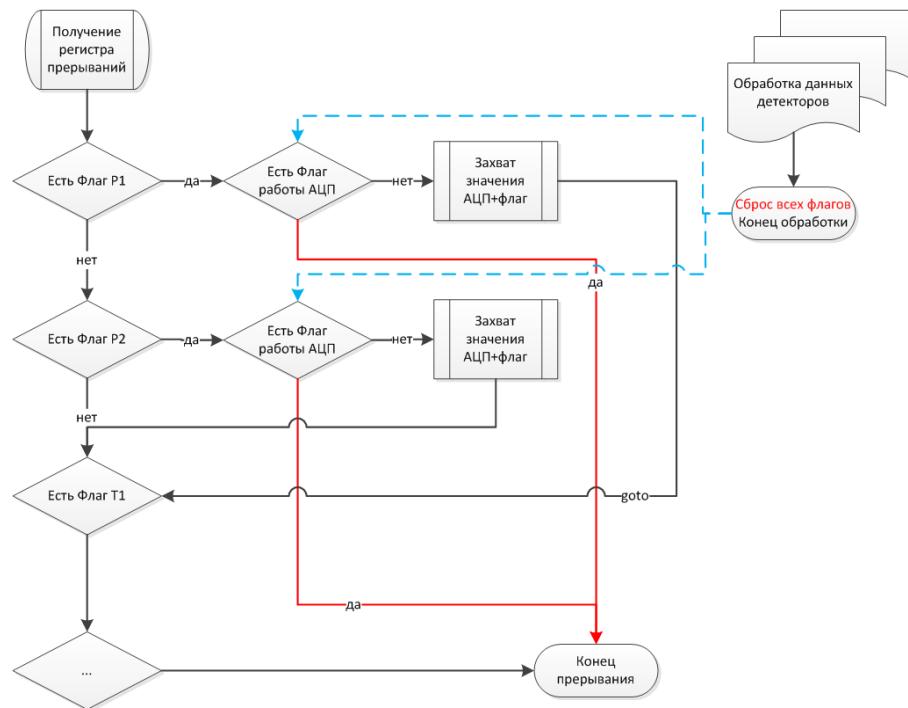


Рисунок 2.11 — Блок схема работы процедуры Ext Interrupt

Номер бита, (PB №)	Источник прерывания	Примечание	Описание
4	JP2 # 5	1-й нейтронный счетчик	
5	JP2 # 11	t-сигнал 1-го детектора	верхний п-п детектор
10	JP2 # 1	Окончание сигнала S1	
11	JP2 # 7	2-й нейтронный счетчик	
12	JP2 # 9	t-сигнал 1-го детектора	аппаратный счетчик
13	JP2 # 13	t-сигнал 2-го детектора	нижний п-п детектор
16	JP # 3	Окончание сигнала S2	не используется

Таблица 2.2 — Распределение битов в регистре прерывания

## Процедура обработки данных с детекторов

Основная часть программной обработки данных с детекторов прибора производится в процедуре Detectors\_Handling, листинг которой представлен в Приложении Б.

### 2.6.3 Контрольная проверочная аппаратура

Контрольно приемная аппаратура (КПА) прибора ДЭПРОН используется для проведения автономных испытаний прибора. КПА ДЭПРОН состоит из:

- Ноутбук (или другой персональный компьютер) с установленной операционной системой Windows XP и установленным специальным программным обеспечением (программой Depron Terminal), наличием порта RS232, либо дополнительно преобразователь интерфейсов USBRS232;
- Блока питания, обеспечивающего измерение потребляемого тока нагрузки GwINSTEK GPS-4303;
- Преобразователя интерфейсов USBRS232 (при отсутствии СОМ порта у ПК);
- Комплекта соединительных кабелей
- Блока КП – контрольно-приемного блока

Блок КП предназначен для подключения генератора и осциллографа к тестовым входам прибора ДЭПРОН, а также для контроля наличия рабочих напряжений в контурах прибора. Блок КП имеет 4 входных гнезда BNC, маркированные в соответствии с каналами прибора ДЭПРОН на которые передаются тестовые сигналы с генератора X1 и X2, на первый и второй генераторный выходы.

На лицевой панели блока КП расположены 2 светодиодных индикатора. Подключение Блока КП к прибору ДЭПРОН происходит через тестовый вход XT3 (типа PC19).

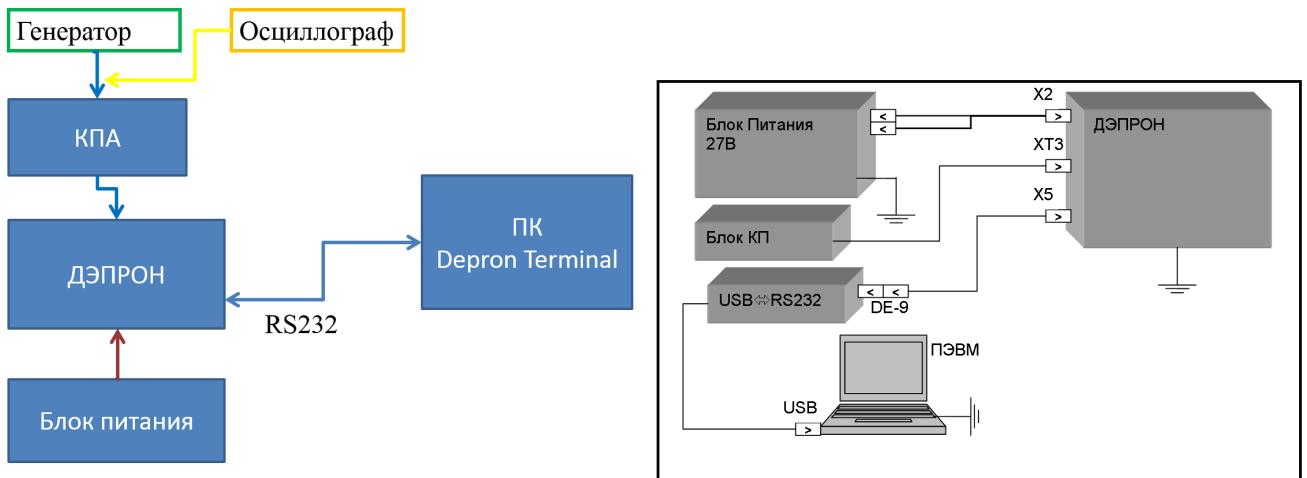


Рисунок 2.12 — Схема подключения КПА для проверки функционирования прибора ДЭПРОН.

## 2.7 Градуировочные характеристики прибора

Градуировка прибора ДЭПРОН проводится с использованием известной зависимости 2.4

$$D = \frac{E}{m} = \frac{w_i \cdot \frac{q}{e}}{m} = \frac{w_i \cdot \Delta U \cdot \sum K \cdot C}{m \cdot e \cdot \eta} = V \cdot \sum K \quad (2.4)$$

по материалам «ПРИБОР ДЭПРОН, В.В. Бенгин, О.Ю. Нечаев, И.А. Брильков, А. Амельшин, В. Петров» представленной на рабочем совещании «Universat» (Университетские спутники), 7-10 июня в МГУ им. М.В. Ломоносова

где

$K$  выходной сигнал АЦП

$C$  входная емкость системы детектор-предусилитель

$\eta$  суммарный градуировочный коэффициент тракта усиления до АЦП

$\Delta U$  шаг дискретизации АЦП

Большая часть величин в этой формуле известна, а экспериментально были определены недостающие величины. Данная работа была проведена Сиволаповым Виктором под руководством Бенгина В.В. 2.14, опираясь на полученные результаты можно провести расчет энергетических коэффициентов для получения величин дозы.

Детектор1: 3,4141 КэВ/канал

Детектор2: 4 КэВ/канал -

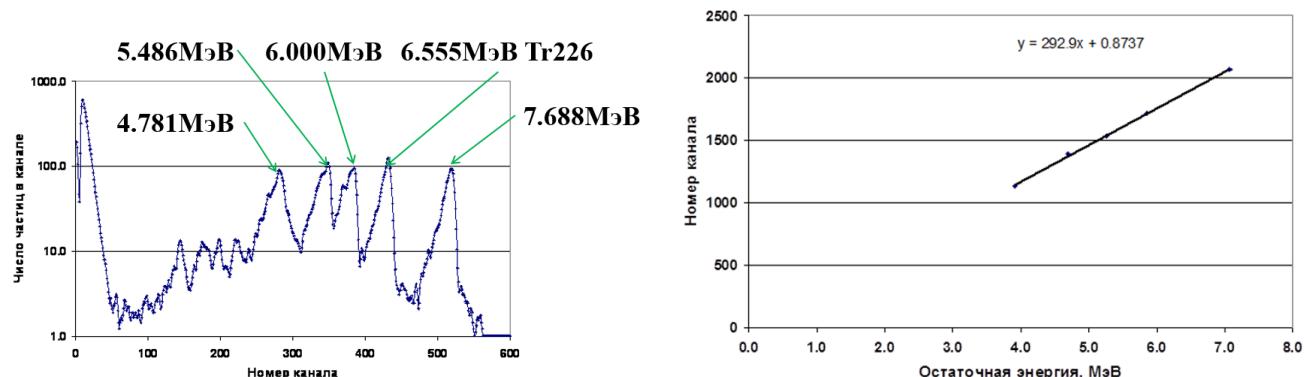


Рисунок 2.13 — Градуировка прибора на ИИ. Слева спектр энерговыделения для источника Ra-226, отмечены пики соответствующие основным энергетическим линиям Ra и продуктов его распада. Справа показана зависимость энергии альфа-пика от номера канала для значений толщины тормозящего слоя вещества 0.0013 г/см<sup>2</sup> (соответствует 5.58 мкм кремния или 1.04 см воздуха).

В ходе калибровок получено, что одной единице по дозе детектора 1 соответствует 135 счетных импульсов в детектору 1, получается что умножив 135 на 3,4141 КэВ/канал получаем энергетический эквивалент 3687 КэВ/(дозовый импульс)

Так как мы имеем квадратный детектор с размерами 10мм \* 10мм\* 300мкм, оценим массу чувствительного объема детектора, подобрав значения толщины тормозящего слоя вещества 0.0013 г/см<sup>2</sup>. Такая масса соответствует 5,58 мкм кремния или 1,04 см воздуха, а масса детектора соответственно: 0,0687г.

Дет1: 8,69 пГр/кодАЦП 0,06952 = наноГрей/импульс(умноженное на 8)

Дет2: 9,32 пГр/кодАЦП 0,07456 = наноГрей/импульс(умноженное на 8)

В программе микроконтроллера Дэпрон с целью сокращения передачи не информативных каналов АЦП был сделан сдвиг на 3 разряда при записи в спектр энерговыделения, такая операция близка к операции деления на 8.

Независимый расчет дал результат для коэффициентов для первого детектора 0,0633 наноГрей/импульс, для второго - 0,0742 наноГрей/импульс. С учетом коэффициента 8 это близко к полученным результатам.

## 2.8 Энергетическая чувствительность прибора ДЭПРОН

В процессе разработки прибор не проходил в полном объеме испытаний на спектральную чувствительность к различным типам излучений, были проведены только калибровки детектирующих узлов на радиоактивных источниках.

Наиболее чувствительный информационный параметр при работе ДЭПРОН — скорость счета детектора 1. Проведем оценку минимальной энергии заряженных частиц к которым данный детектор чувствителен. Так как детектор закрыт сверху алюминиевой крышкой толщиной 2 мм, он должен быть чувствителен к протонам с энергией больше 20 МэВ и электронам с энергией больше примерно 0,5 МэВ, а также - возможно - к тормозному излучению. Порог дискриминации сигналов с детектора около 100 КэВ. Тем не менее вопрос уточнения границы чувствительности по минимальным энергиям продолжает оставаться важным и на первом этапе были проведены оценки с помощью данных по проникновению электронов и протонов с сайта NIST [95], физическая модель лежащая в основе этих данных основывается на теории Бете[96] с поправкой Штернхаймера [97] на плотность вещества и подробно описана в ряде статей этого института [98; 99].

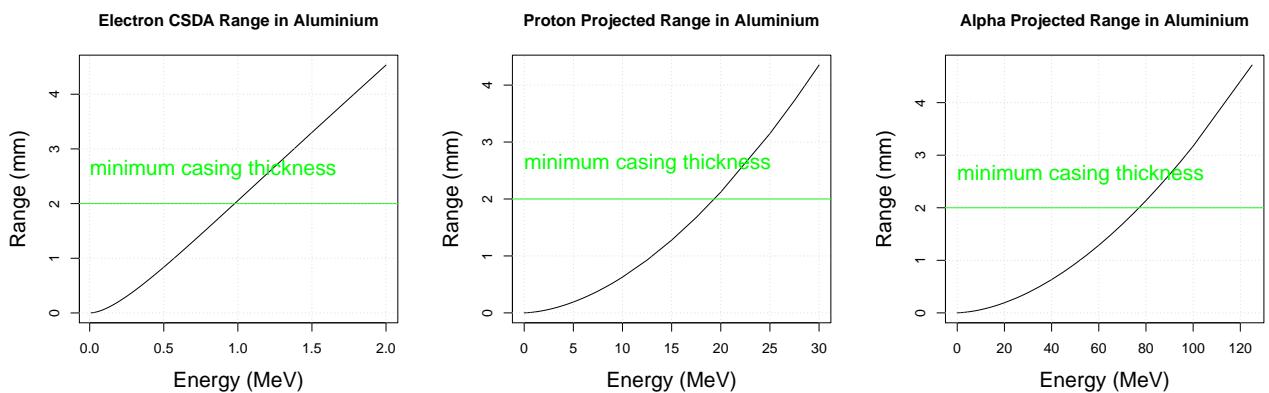


Рисунок 2.14 — Графики средних пробегов заряженных частиц для алюминия.

Представлены величины: “CSDA range” — глубина в приближении непрерывного замедления “Projected range” — среднее значение глубины, на которую заряженная частица проникает в процессе замедления до остановки

Пользуясь представленными зависимостями, для уточненной минимальной толщины корпуса прибора — она составляет 2,5 мм, что составляет 0,65 г/см<sup>2</sup>, бы-

ла повышена предварительная оценка порога низких энергий которые способен регистрировать ДЭПРОН по электронам до 1 МэВ и по протонам до 20 МэВ. Для ядер гелия прибор чувствителен начиная с 90 МэВ. Так как эти зависимости могут использоваться только для средних пробегов частиц, для оценки функции энергетической чувствительности требуется более подробный анализ, который может быть произведен с помощью Монте-Карло моделирования.

## 2.9 Моделирование функций отклика прибора в geant4

Первично для расчетов прибора Дэпрон использовался FTFP\_BERT так как этот лист предлагается для физики высоких энергий и космической физики. Однако этот список физических явлений очень посредственно описывает поведение тепловых нейтронов и особенно регистрацию в гелиевых счетчиках. Поэтому для моделирования работы нейtronных детекторов был использован лист физических явлений QGSP\_BIC\_HP [100]. QGSP - основной список физики, использующий кварк-глюонную струнную модель для высокоэнергетических взаимодействий протонов, нейтронов, пионов, каонов и ядер. Взятый нами физический лист QGSP\_BIC\_HP подобен QGSP, но отличается расчетом бинарного каскада Geant4 для первичных протонов и нейтронов с энергиями ниже 10 ГэВ, таким образом, заменяя использование LEP-модели для протонов и нейтронов. По сравнению с моделью LEP бинарный каскад лучше описывает образование вторичных частиц, образующихся во взаимодействиях Протонов и нейтронов с ядрами. QGSP\_BIC\_HP отличается от QGSP\_BIC добавлением использования базы данных по взаимодействиям нейтронов высокой точности (NeutronHP) для транспортировки нейтронов ниже 20 МэВ и до тепловых энергий. Именно этот список физических явлений рекомендуется для применения в моделировании защиты от радиации и медицинских приложений [100].

Для моделирования функционирования нейтронных детекторов необходимо создавать специфический список учитываемых физических явлений по мнению Gregor Simmer[101]. Список должен включать упругие и неупругие взаимодействия для нейтронов низких энергий. Выбранный список QGSP\_BIC\_HP соот-

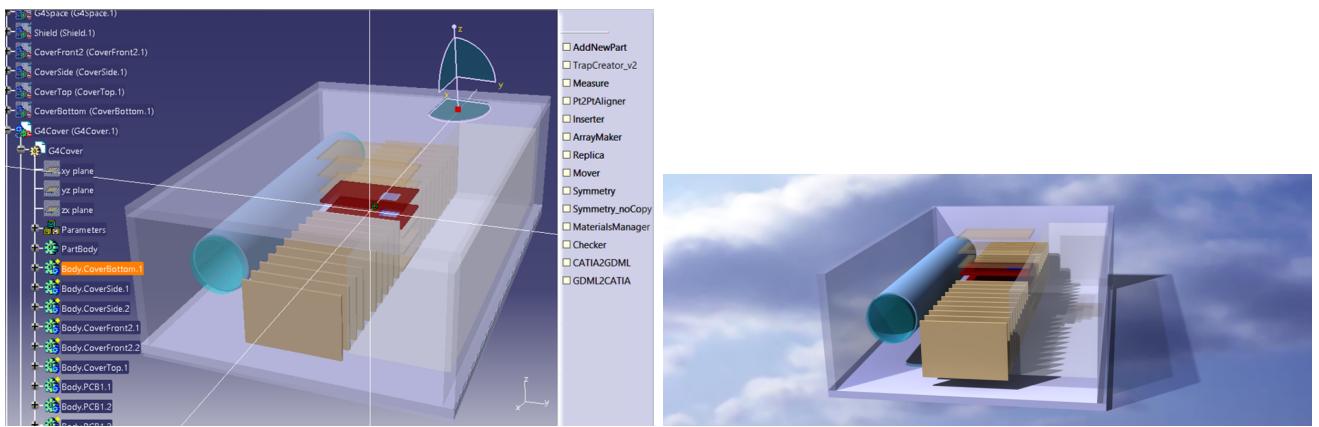


Рисунок 2.15 — Подготовка модели прибора в CAD системе. Для наглядности часть деталей, составляющих корпус модели показаны полупрозрачными.

ветствует этим требованиям. С полным списком зарегистрированных процессов при моделировании нейтронных счетчиков можно ознакомиться [B.0.2](#).

С помощью набора макросов “CATIA-GDML geometry builder”[[102](#); [103](#)] была подготовлена геометрия прибора Дэпрон для использования в среде geant4. Это программное средство значительно упрощает первоначальное построение в CAD системе 3d модели исследуемых приборов на основе комбинации геометрических примитивов. Геометрические примитивы из которых происходит построение модели не являются нативными для CAD Catia, поэтому построение модели целиком производится с помощью макросов, и система проектирования используется для отображения построенной модели и расстановки составляющих объемов [2.17](#).

Наиболее важным моментом подготовки модели перед импортом в geant4 является ассоциация каждому объему материала, достаточно точно и полно описывающее атомный состав и плотность веществ. Опытным путем получено, что большее значение имеет точное описание близлежащих к детекторам материалов и объемов. Однако не следует пренебречь точностью описания материалов корпуса, так как все частицы РПЗ и ГКЛ вынуждены проходить через стенки прибора. В случае прибора Дэпрон первая версия gdml файла описывала стенки прибора как металлический алюминий, а последующий переход к описанию материала корпуса как дюралюминия привел к значительному увеличению числа вторичных частиц на потоке протонного излучения и гамма излучения, несмотря на то, что количество атомов примесей в сплаве Д16т не превышает 7%. Так как гелиевые счетчики заполнены  $^3He$  под давлением в 5 атмосфер, для целей моделирования наполнение счетчиков описано в gdml файле таким образом: 1) Определен He3

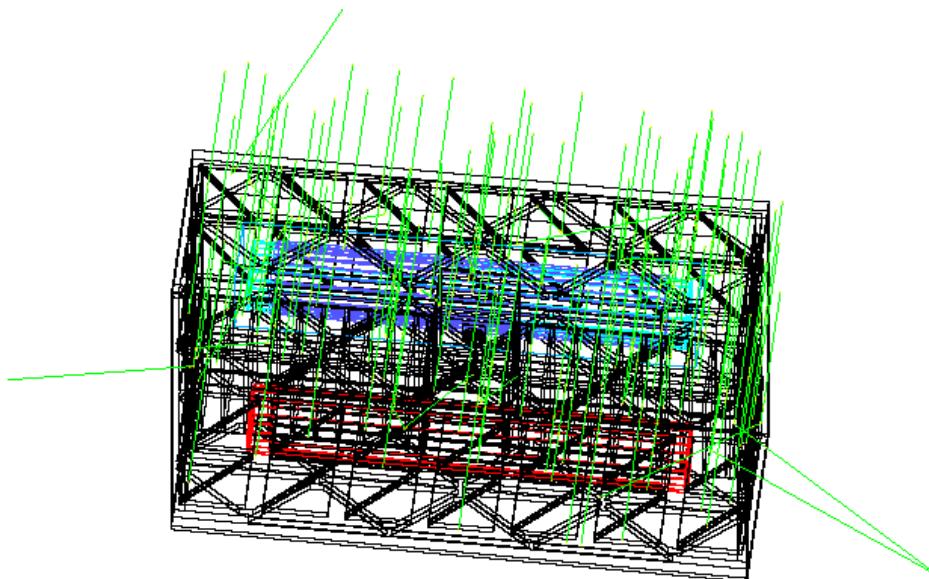


Рисунок 2.16 — Моделирование работы нейтронных счетчиков в Geant4. Голубым цветом показан счетчик, окруженный защитой из плексигласа(название чувствительного объема по файлу геометрии si13n1), а красным - счетчик без защиты, si13n2

как изотоп 2) Определен элемент He3, состоящий из этого изотопа (100% He3) 3)  
Из элемента определен материал газ He3.

Тестовый источник излучения для проверки чувствительности нейтронных детекторов был представлен как набор последовательных монохроматических линий нейтронного излучения с плоскости на расстоянии 10 см от верхней крышки прибора. Шаг по энергии между соседний линиями подобран чтобы на каждый порядок приходилось по 3 монолинии. Итоговая схема моделирования 27 линий с  $10^5$  нейтронов в каждом пакете потребовала 32 минут процессорного времени на виртуальной машине geant4.9.6 с 4-мя ядрами Intel i7 3,4 ГГц. На рисунке 2.18 показаны гистограммы, отражающие отношение зарегистрированных в счетчиках нейтронов к потоку нейтронов, прошедших через тело счетчика. По определению 2.3 эта величина соответствует функции чувствительности. Фактом регистрации нейтрона в детекторе при моделировании считалось энерговыделение в объеме за- полняющего газа более 500 кэВ. При сравнении профилей чувствительности не защищенного и окруженного оргстеклом нейтронных детекторов можно заметить что пик чувствительности более защищенного детектора находится на 0,005 эВ, а для защищенного этот пик находится на 0,5 эВ энергии нейтронов.

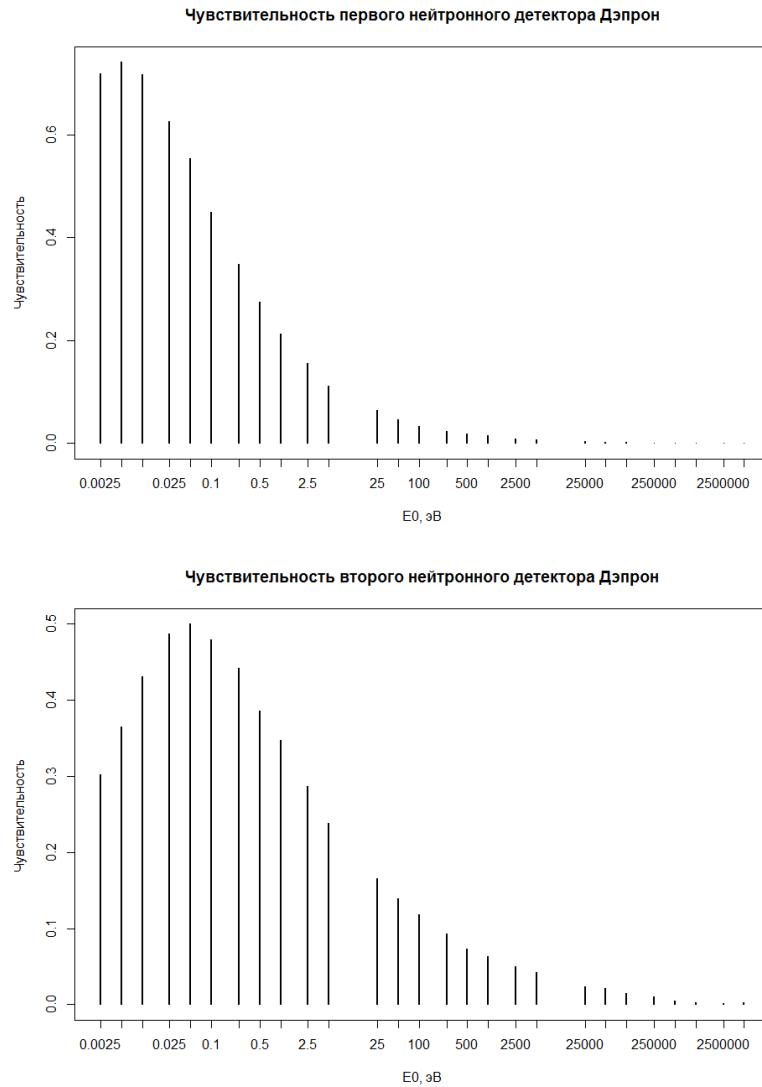


Рисунок 2.17 — Профили чувствительности нейтронных счетчиков по итогам моделирования прибора Дэпрон.

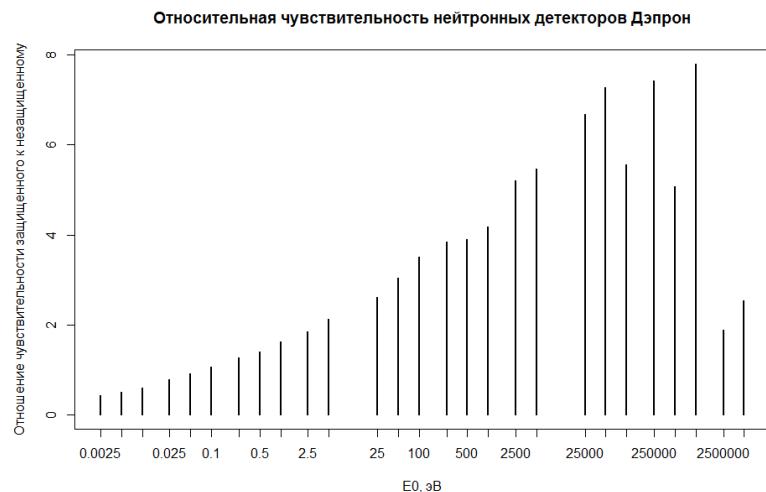


Рисунок 2.18 — Оценка относительной чувствительности нейтронных детекторов при различных энергиях нейтронов.

Для энергий нейтронов в десятки эВ чувствительность защищенного детектора превышает незащищенный в несколько раз (более 4 раз). Таким образом на основании данных о сравнительном счете в детекторах прибора можно делать предположения о сравнительном соотношении нейтронов различных энергий в общем потоке.

## Глава 3. Обработка информации с прибора

Отладка программного обеспечения и проверка обработки сигналов от датчиков на этапе конструкторских работ производилась подключением канала RS232 к последовательному (СОМ) порту персонального компьютера. Программное обеспечение контроллера формирует отладочные посылки и массивы тестовых данных и отправляет по интерфейсу USART, реализованному на всех использовавшихся контроллерах. Такой способ передачи тестовых данных выбран как максимально приближенный к условиям реального функционирования прибора.

Автономные испытания ДЭПРОН проходили с момента создания первых версий ПМО до ноября 2011. В ходе этих испытаний были проведены основные калибровки усилительных трактов прибора с помощью генератора сигналов и с помощью источников ионизирующего излучения.

Отработка работы прибора в комплексе научной аппаратуры позволяет использовать штатный способ передачи информации по каналу CAN, в таком случае критерием работы прибора является выдача от БИ содержательных блоков информации с меткой, соответствующей прибору ДЭПРОН.

### 3.1 Схема обработки информации при КДИ

Для обработки данных и отладки работы прибора ДЭПРОН были использованы специально разработанные программные средства. Поскольку отладка прибора ДЭПРОН производится подключением по каналу RS232 а при работе в штатном режиме передача данных ведется по каналу CAN, для взаимодействия с прибором были написаны две различные программы.

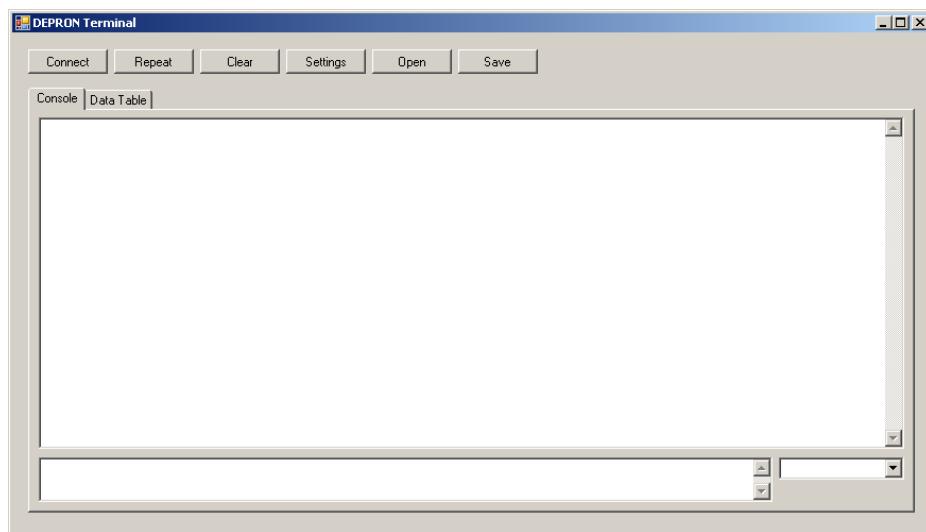


Рисунок 3.1 — Интерфейс программы **Depron Terminal**

### 3.1.1 Отладочная программа Depron Terminal

Данная программа предназначена для отладки прибора во время лабораторных испытаний, проверки работоспособности прибора при приемо-сдаточных работах. Программа была написана в средстве разработки ПО Microsoft Visual Studio на языке C#, с использованием фреймворка .NET3.5. Пользовательский интерфейс программы построен на основе WinForms, поэтому отличается консервативностью и достаточно низкими аппаратными требованиями.

Программа позволяет:

- Подключаться к прибору ДЭПРОН по каналу RS232 (с использованием СОМ порта)
- Принимать и отображать тестовые данные сформированные прибором ДЭПРОН
- Сохранять запись потока данных на жесткий диск ПК (в фоновом режиме и по запросу)
- Открывать сохраненные данные с носителя информации
- Посыпать команды на прибор ДЭПРОН (в том числе с заданной периодичностью)

Данная программа была использована как основа для разработки отладочной программы для дозиметрических блоков ДБ-8м. Основные принципы работы новой программы, названной **DB8m Terminal** были сохранены и она обеспечивает те же базовые функции. Дополнительно программа обеспечивает возможность

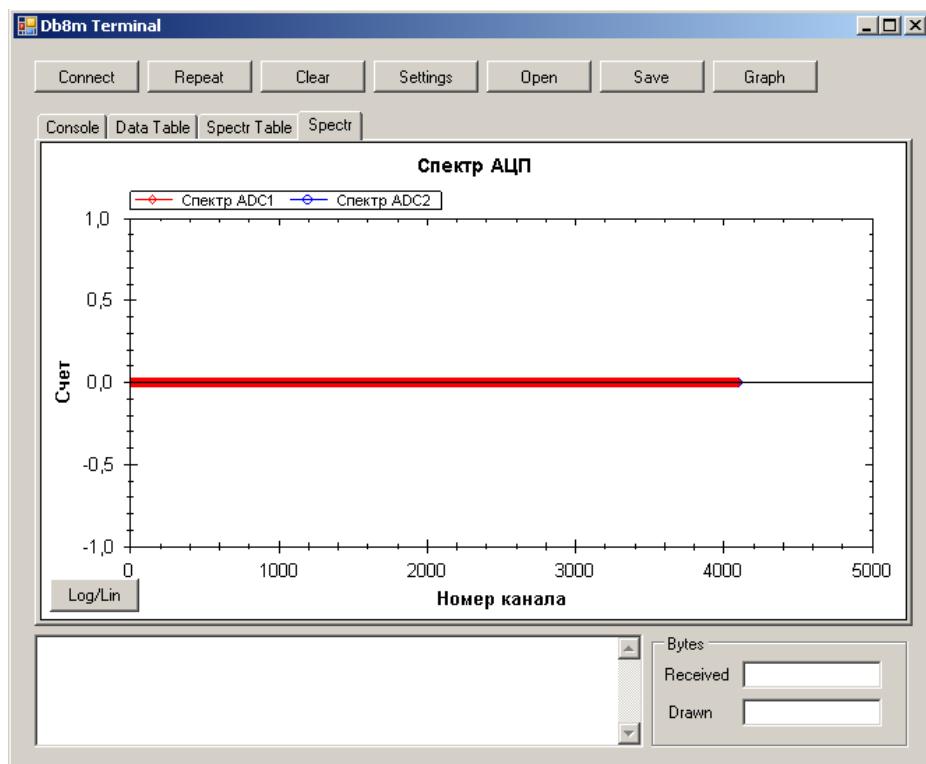


Рисунок 3.2 — Интерфейс программы **DB8mTerminal**

накопления спектров энерговыделения по детекторам ДБ-8м и отображения их в графическом виде, в режиме реального времени.

Графическое отображение спектров реализовано с использованием компонента ZedGraph. Введение такой возможности значительно ускорило калибровку и градуировку прибора на источниках радиационного излучения, так что может быть рекомендовано для программ аналогичной направленности.

### 3.1.2 Программа DepronExplorerView

Данная программа предназначена для просмотра и обработки данных прибора полученных во время комплексных испытаний или во время штатной работы прибора. Аналогично Depron Terminal, данная программа была написана в средстве разработки ПО Microsoft Visual Studio на языке c# с использованием фреймворка .NET3.5. Пользовательский интерфейс программы построен на основе WPF.

На момент комплексных испытаний прибора ДЭПРОН программа DepronExplorerView позволяет отображать все типы бинарных данных, получен-

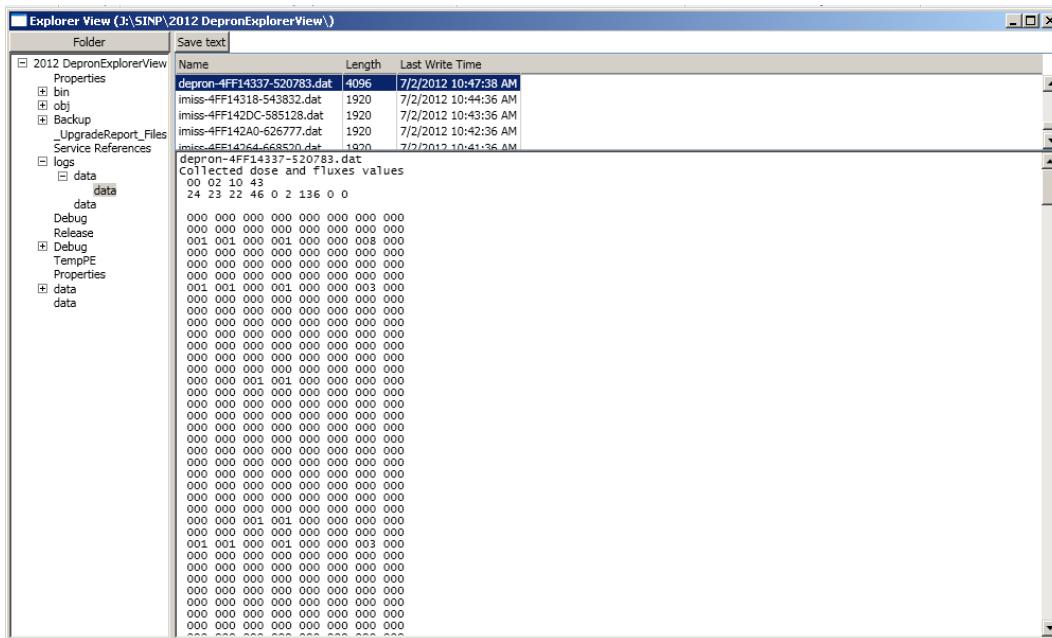


Рисунок 3.3 — Интерфейс программы **DepronExplorerView**

ных от прибора ДЭПРОН, в таблично-текстовой форме и сохранять полученные данные в текстовые файлы. Для удобства использования интерфейс программы выполнен в стиле файлового менеджера.

Подготовленная программа активно использовалась при всех испытаниях прибора ДЭПРОН в комплексе аппаратуры спутника, а также будет использоваться при предполетных проверках на космодроме Восточный.

### 3.1.3 Структура массивов (базы данных) результатов измерений

Результаты измерений прибора ДЭПРОН формируется в массивы информации размером 512 байт.

Каждое сообщение состоит из следующих полей:

- начало сообщения;
- категория;
- длина сообщения;
- данные.

Поле “начало сообщения” содержит 2 байта:

- байт DLE – 11110000;
- байт STX – 11111111.

На момент написания в программе ДЭПРОН используются нестандартные значения для байт DLE и STX, поэтому во избежание путаницы в дальнейших версия ПО ДЭПРОН будут использоваться общепринятые значения этих байт.

Поле “категория” состоит из одного байта (CAT). При обмене с БИ используются варианты сообщений: А, С, Н, Н. Коды сообщений соответствуют таблице ASCII: А - 01000001, С - 01010011, Н - 01001000, Н – 01001110.

Поле “длина сообщения” содержит 1 байт (LEN) по умолчанию передается “\0”, что означает общую длину посылки 512 байт.

В ином случае значение длины равно общему числу байт сообщения, исключая поле “начало сообщения”.

Поле “данные” (RECORD) содержит данные в соответствии с описанием передаваемых сообщений и их спецификацией.

Общая структура сообщений выглядит следующим образом:

Начало сообщения (DLE,STX)	Категория(CAT)	Длина(LEN)	Данные (RECORD)
Метка 1	Метка 2		
2 байта	2 байта	508 байт	

### 3.1.4 Содержание блоков данных ДЭПРОН

Прибор ДЭПРОН в процессе штатной работы формирует несколько типов массивов информации, которые соответствуют различным типам измерений:

- дозиметрические измерения потока ионизирующих излучений;
- измерения спектров потока ионизирующих излучений;
- запись данных высокоэнергетичных событий в детекторах;
- измерение временного характера кратковременных нейтронных явлений;

Также прибор ДЭПРОН формирует ответ на пришедшую команду от БИ.

Типы массивов данных прибора ДЭПРОН:

- блок данных ДЭПРОН А Collected dose and fluxes values
- блок данных ДЭПРОН С Energy deposition spectra
- блок данных ДЭПРОН Н High Amplitude Data
- блок данных ДЭПРОН Н Neutron burst data

- блок данных ДЭПРОН Т квитанция на полученную команду

### **3.1.5 Периодичность выдачи массивов данных**

Блок данных	Содержание	Периодичность
A	Величины поглощенной дозы и потоков частиц	1 мин.
S	Спектр энерговыделения	5 мин.
H	Данные о высокоэнергетичных событиях	По мере накопления данных
N	Данные по нейтронным вспышкам	По мере накопления данных, но не более 10 массивов в минуту
T	Квитанция на полученную команду	По мере поступления команд

### **3.2 Обработка наземных данных**

В процессе наземных отработок прибор ДЭПРОН включался автономно при калибровке и в процессе проведения испытаний в комплексе аппаратуры.

В конце 2011 года прибор был передан на отработку в комплексе научной аппаратуры и далее работа с ним происходила по штатному каналу

Включения на стенде космодрома Восточный проходили 2016-03-13, 2016-03-14, 2016-03-15, 2016-03-16.

В результате обработки данных, полученных в результате включений прибора ДЭПРОН на стенде космодрома ВОСТОЧНЫЙ, подтверждено прибор работает в штатном режиме и регистрирует естественный радиационный фон помещения. В данных присутствуют массивы информации по величинам поглощенной дозы и потоков частиц, и спектры энерговыделения в детекторах прибора, состав массивов соответствует разработанному протоколу обмена. Эти массивы выдаются прибором, в соответствии с заданной периодичностью – 1 и 5 минут соответственно. Два дополнительных блока данных не выдаются прибором до заполнения массивов высокоэнергетичных событий и нейтронных всплесков, которые в условиях естественного радиационного фона на Земле не встречаются.

По данным в блоках А фоновый счет в п/п детекторе 1 - 108 частиц за 4 часа, и в детекторе 2 - 90, за тот же временной промежуток. Счет в детекторе нейтронов 2 – 38, в детекторе 1 – 12 частиц за промежуток 4 часа.

**обработать наземные данные**

### **3.3 Схема обработки и распределения потоков информации полетных данных**

#### **3.3.1 Восстановление метки времени в массивах данных**

В процессе обработки данных полученных во время летных испытаний прибора ДЭПРОН было выяснено, что во временных метках массивов информации имеются ошибочные значения, происхождение которых связано с отсутствием календаря в ПО микроконтроллера ДЭПРОН. Так как в ПО не были заложены длительности месяцев года, при наступлении нового месяца метки времени продолжают приходить с номером предыдущего месяца к числу дней прибавляется дополнительный и возникают ошибочные даты: 2016-05-32 и 2016-05-33. На рисунке 3.4 видно наличие пробелов при наступлении нового месяца, так как невозможно автоматическое распознание меток времени. Наличие таких отклонений должно быть исправлено отправлением метки времени в прибор от БИ в первую минуту нового месяца. Однако пока такая процедура не проводилась был накоплен значительный объем измерений и для их верной привязки к действительным датам был разработан алгоритм и реализован на языке R, листинг кода представлен в Б.1.

При привязке секундных данных к баллистическим данным была обнаружена еще одна проблема с метками времени в данных ДЭПРОН, связанная с постоянным уходом приборных часов. Для решения этой проблемы также был разработан алгоритм Б.2 и успешно применен для восстановления меток времени

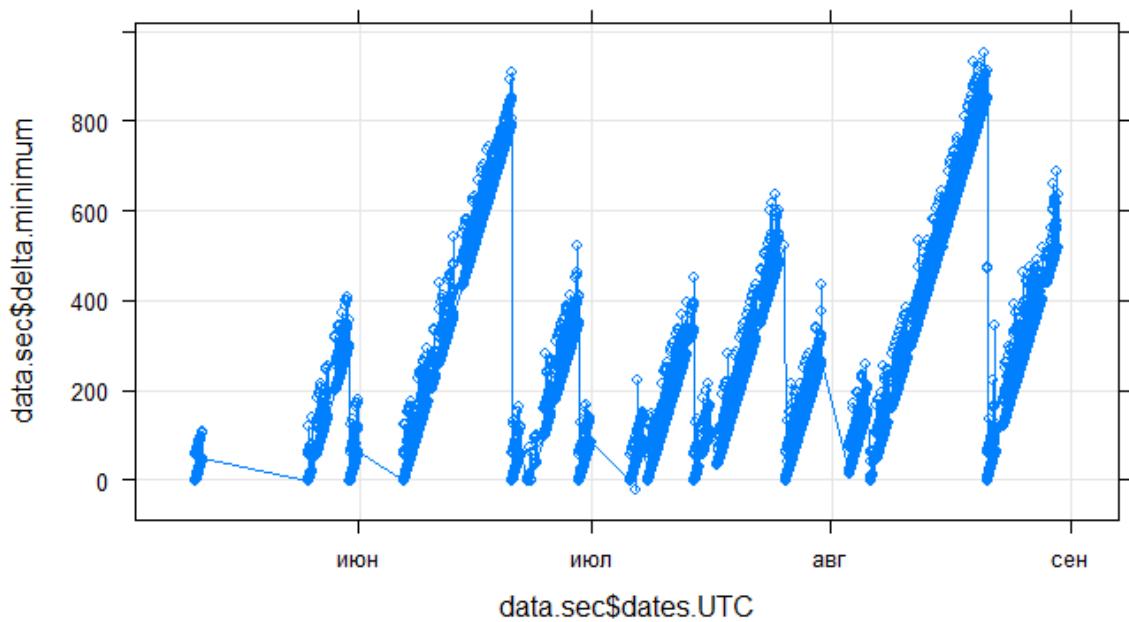


Рисунок 3.4 — Временной ряд разницы приборного времени и меток начала записи в файл. Показаны первые шесть месяцев после запуска спутника Ломоносов, отключения прибора соответствуют циклограмме летных испытаний, а пробелы в данных в начале месяца соответствуют ошибочным номерам дня в месяце.

## Описание алгоритма восстановления дат

На первом этапе бинарные данные каждого сброса распаковываются в текстовый вид с получением таблицы с колонками: YYYY-MM-DD hh:mm:ss-1s, count.h, count1, count2, count.both, n1, n2, dose1, dose2, filename, timestamp. Далее осуществляется разделение текстового поля с меткой времени — YYYY-MM-DD hh:mm:ss-1s на дату и время, а после полученное поле date на год, месяц и день - обозначенные year, month, day соответственно.

Создается поле dates имеющее тип данных ISODate исходя только из полей даты года и месяца, а день месяца устанавливается первый. Далее к полю dates добавляется число дней из поля day, минус один день. В последнюю очередь в поле dates выставляется приборное время, отделенное в начале алгоритма.

## Описание алгоритма восстановления метки времени

Приборное время ДЭПРОН установлено на третий часовой пояс и соответствует Московскому времени, поэтому для унификации базы данных получено поле dates.UTC соответствующее приборному времени смещенному на 3 часа.

Далее в результате ручного анализа данных было найдено что за сутки внутренние часы ДЭПРОН уходят вперед на 57 секунд, что хорошо видно на графике [3.4](#) поэтому был введена поправка kt:

$$kt = (56.77315002)/86400$$

Далее с использованием полученной поправки из времени UTC получено скорректированное приборное время, хотя это время смещено относительно действительного всемирного времени это смещение меняется каждый раз при выключениях прибора в ходе программы исследований [3.5](#).

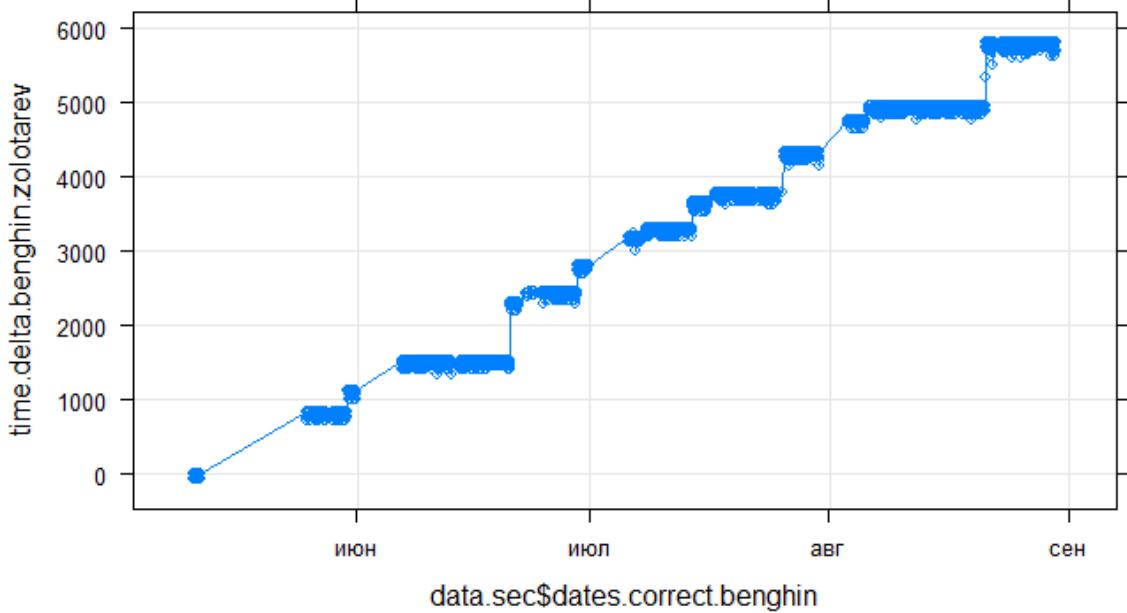


Рисунок 3.5 — Временной ряд разницы калиброванного приборного времени и меток начала записи в файл.

Для автоматического определения этого смещения необходимо привязать его к независимому источнику точного времени - в качестве такого рассмотрены метки времени начала записи в бинарный файл данных БИ а также метки окончания записи файловой системы. Оказалось что разница времени меток последней записи сильно разнится относительно всех других меток, видимо по причине буферизации записи в файл данных, поэтому в качестве реперного времени выбрано время создания файла, которое записано в названии каждого файла как POSIXtime в виде шестнадцатеричного числа.

После получения разницы “горизонтального” приборного времени с временем начала записи в файл (поле `time.delta.file.start`) мы рассчитываем минимум (`delta.minimum`) этой разницы для каждого файла бинарных данных. Анализ распределения минимумов показал что моменты “перескоков” приборного времени из-за выключений приводят к разницам более двух минут, таким образом времена выключений были отсеяны от минутных или двухминутных пропусков в при записи в бинарных файлах данных. На основе данных о перескоках времени составлен массив `data.sec.switches`, который записывается в отдельный файл и также исходный массив секундных данных разбивается на участки без выключений прибора.

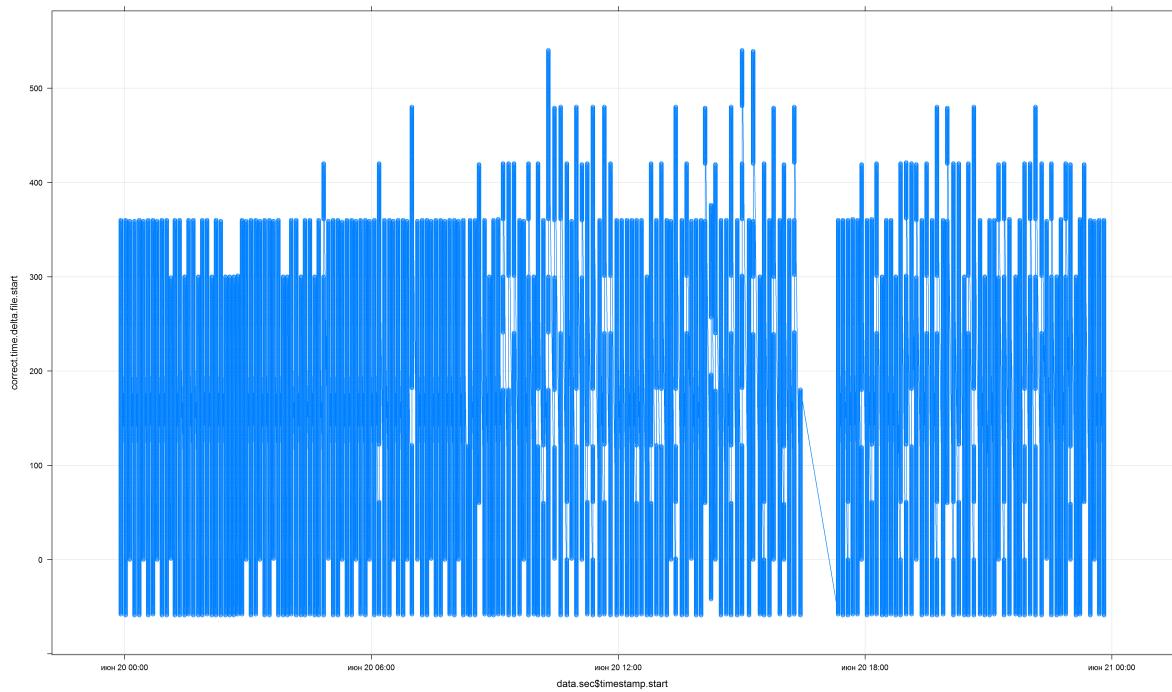


Рисунок 3.6 — Пример восстановления меток времени 20 июня 2016 года

Для каждого участка непрерывной работы были найдены наиболее часто встречающиеся значения смещений `mfv.delta` — мода разниц. И в соответствии с этими значениями скорректировано приборное время.

Последней операцией производится смещение полученного правильного времени на 59 секунд назад, так как прибор присваивает метку времени массиву данных по окончании периода измерения длительностью 1 минута для массивов А и 5 минут для массивов S.

Итоговый график сдвигов времени в массивах для одного из дней работы прибора представлен на рисунке 3.6. По оси ординат отложен сдвиг метки времени в блоке данных, длительность которых около 6 минут. Можно заметить что полученные массивы данных после 9:00 начинают иметь пробелы по времени - выпавшие данные измерений длительностью одна минута, эта особенность связана с загруженностью канала приема-передачи, таким образом пробелы в этих данных сказывается на ухудшении подробной посекундной записи, но поминутная запись данных содержит интегральную информацию по всем счетчикам потоков и дозы.

## Глава 4. Результаты

В результате полугода работы прибора ДЭПРОН накоплен большой массив информации - 25 тысяч файлов бинарных данных, общим объемом 100 МБайт. Первичные данные были распакованы и сохранены в текстовом виде. Далее информация прибора ДЭПРОН была визуализирована с помощью пакета *lattice* и базовой графической системы R. В первую очередь для каждого дня работы прибора были построены карты скоростей счета в детекторе 14.1. В процессе построения пространственного распределения было обнаружено расхождение методов времени ДЭПРОН и всемирного времени. Разработанное решение проблемы привязки данных подробно рассматривается в разделе 3.3.

Аналогично картам были построены долготные зависимости скоростей счета в первом детекторе, эти графики позволили оперативно заметить резкие всплески потоков частиц во внешнем радиационном поясе. Также для каждого дня были построены карты скоростей счета в координатах Мак-Илвайна, рассчитанным по модели IGRF.

### 4.1 Планетарное распределение потоков частиц, мощности дозы на высоте полета КА а также потоков нейтронов

При последующей обработке данных были построены графики географического распределения скоростей счета во всех детекторах прибора - двух полупроводниковых и двух нейtronных счетчиков. Цветовая схема для карт подобрана таким образом, чтобы максимальные значения были отображены красным цветом а минимальные синим, между конечными точками цвет изменяется по градиенту. Цветовая палитра квантизирована на 20 дискретных цветов. Каждому значению полученной дозы ставится в соответствие индекс в массиве цветов, который вычисляется по формуле:

$$i_{color} = \{8 * \log 10(I) + 1 + 1, 8 * \log 10(I) + 1 + 1 < n; n, 8 * \log 10(I) + 1 + 1 \geq n\}$$

На картах каждый маркер представляет результаты измерений детекторов за одну секунду. В качестве маркера выбран незакрашенный круг, так как в отличие от точки или линии он позволяет покрыть некоторую площадь на графике. Размер маркера подобран исходя из соображений заметания определенной площади, так как при полете по орбите спутник покрывает 7,5 км каждую секунду. Маркеры частично перекрываются, особенно в полярных областях и наилучшие результаты по отображению были получены при использовании частичной прозрачности. Для простоты отображения выбрана прямоугольная проекция карты по широте и долготе, поэтому на различных широтах площадь отображаемой поверхности не искажена. Это обстоятельство таким образом лишь условно соответствует величине траектории вдоль которой производилось измерение.

## **4.2 Распределения мощности дозы в области ЮАА**

Временные серии скоростей счета и мощности дозы, полученные с Дэпрон для 14:30 29 Августа 2016 года. Возрастание скоростей счета и доз связано с пересечением ЮАА. Точками показаны измерения с детекторов с секундным разрешением, сплошными линиями отражено сглаживание данных треугольным фильтром.

## **4.3 Распределения мощности дозы в авроральных областях**

Приполярные области отличаются высокой вариабельностью потоков частиц и соответственно доз. В основном повышенные потоки регистрируются в первом полупроводниковом детекторе, что говорит о невысоких энергиях частиц в этих потоках.

Рассмотреть зависимости дозы в L-B координатах разделив при этом утреннее в вечернее местное магнитное время (MLT) о наличии магнитной бури следить по индексам A(e) A(l), причем по мнению Антоновой стоит выбрать спокойный период.

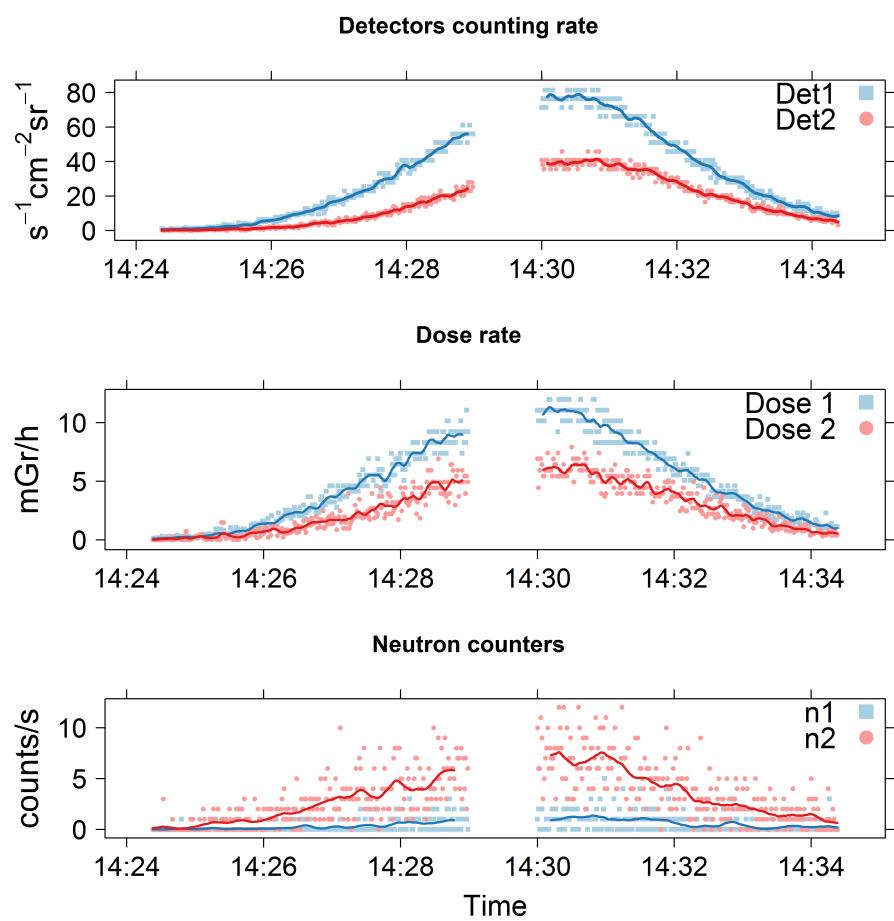


Рисунок 4.1 — Временные серии скоростей счета и мощности дозы при пересечении внутреннего радиационного пояса

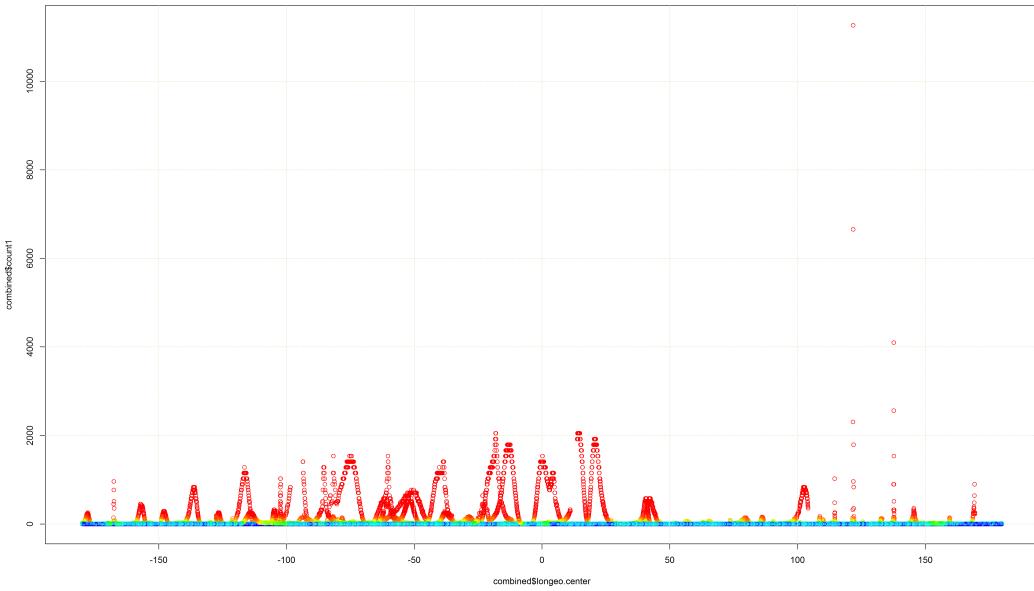


Рисунок 4.2 — Географическое распределение потоков заряженных частиц в первом полупроводниковом детекторе

Построены зависимости  $B(t)$  для  $L$  из диапазонов от 4-5, 5-6, 6-7.  
На рисунке 4.3 показаны Счет в детекторах прибора

#### 4.4 Распределение мощности дозы вне радиационных поясов Земли

#### 4.5 Спектры ЛПЭ и распределение мощности эквивалентной дозы

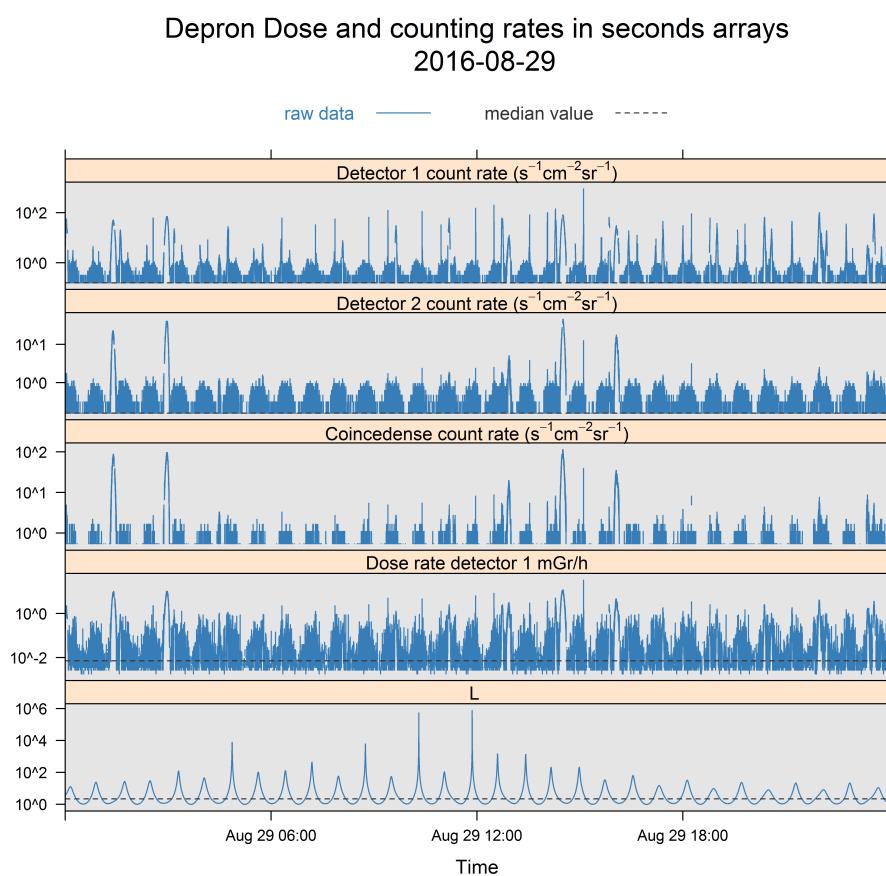


Рисунок 4.3 — Временные серии в детекторах прибора.

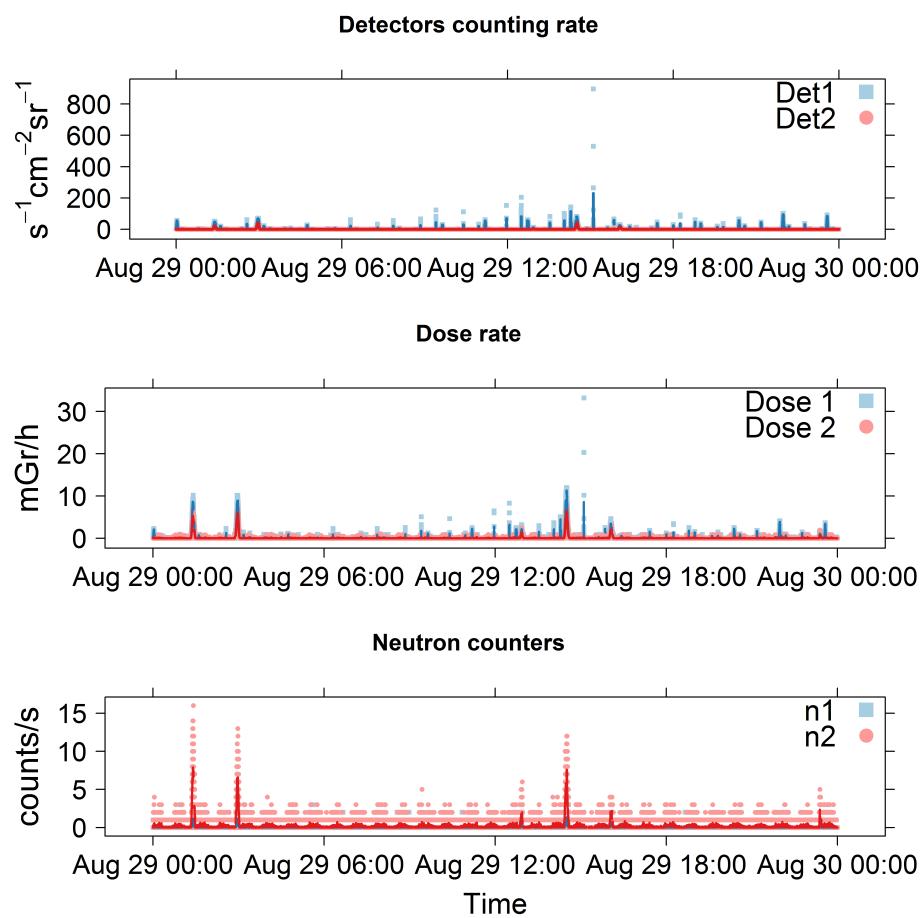


Рисунок 4.4

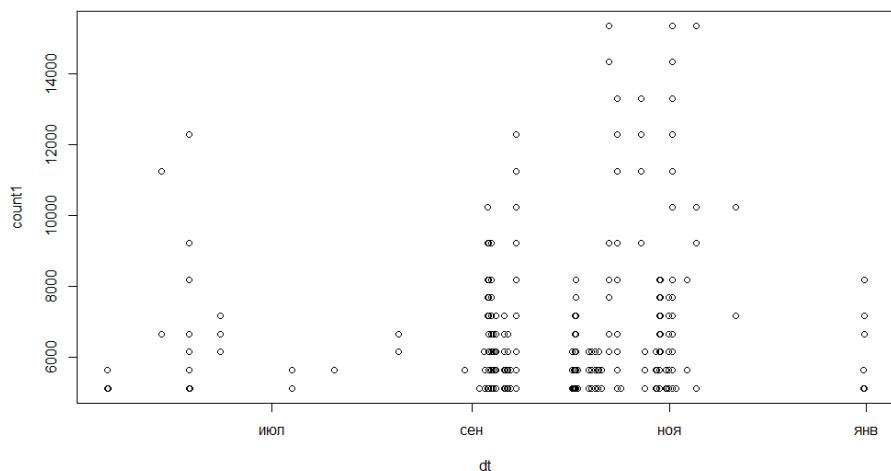


Рисунок 4.5

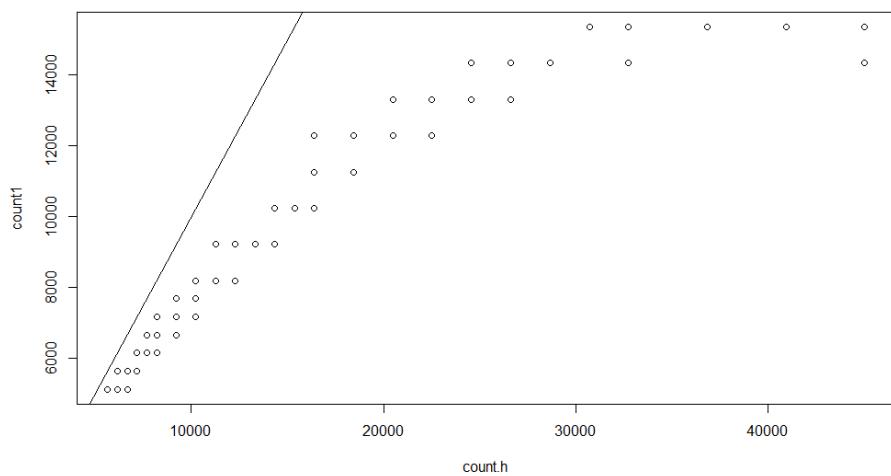


Рисунок 4.6

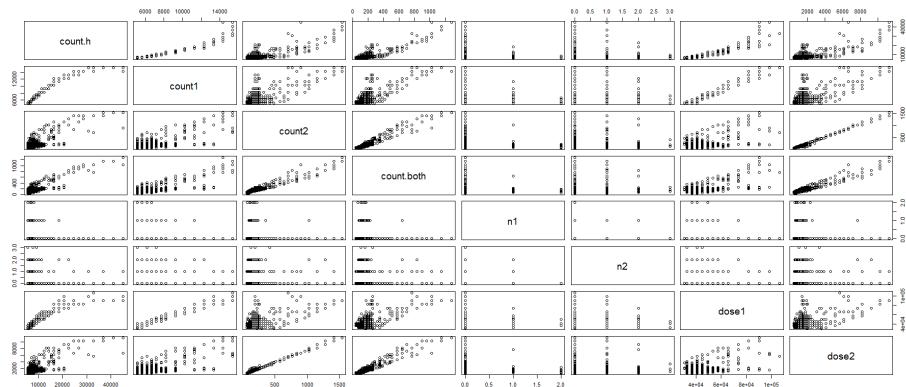


Рисунок 4.7

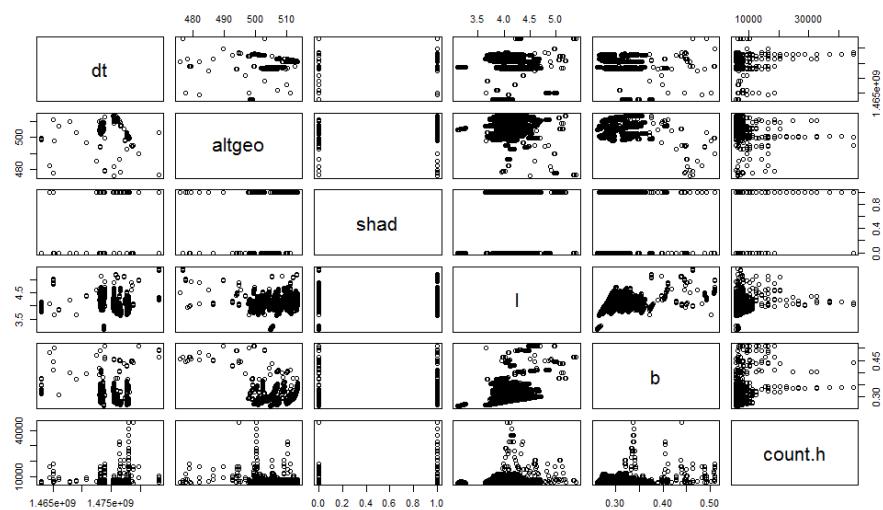


Рисунок 4.8

## Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа литературных данных о радиационной обстановке на низковысотных орбитах и результатов космических экспериментов по изучению радиационных условий космического пространства разработаны требования к дозиметрической измерительной аппаратуре;
2. Для выполнения поставленных задач был создан активный дозиметр нового типа с возможностью регистрации нейтронов тепловых энергий;
3. Численные исследования показали, что
4. Приближенные оценки показали, что полупроводниковые детекторы прибора чувствительны к электронам энергий более 0,5 МэВ и протонам с энергиями более 5 МэВ;
5. Математическое моделирование показало что максимум функции чувствительности нейтронный счетчиков соответствует энергии нейтронов 0,005 МэВ и 0,05 МэВ детекторов различной защищенности;

## 4.6 Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю Бенгину В.В. прошедшему огромный путь вместе с диссертантом, и поддерживавшим словом и делом каждый момент времени.

Также Золотарев И.А. выражает благодарность Панасюку М.И., давшему возможность включиться в большой образовательный проект - создание спутника Ломоносов и разрабатывать аппаратуру радиационного мониторинга. Также автор благодарен обучению которое обеспечили все участники коллaborации космического эксперимента: Яшин И.В., Петров В.Л., Амелюшкин А.М. и другие. Автор благодарен коллегам лаборатории Нечаеву О.Ю. и Братолюбовой Л.С. за руководство и поддержку. Особую благодарность автор выражает Нечаеву О.Ю. и Смирнову Л.А. за то что они, своими руками, создали надежный прибор, который лег в основу настоящей диссертационной работы.



Рисунок 4.9 — Коллаборация космического эксперимента Ломоносов

Автор благодарен за всемерную поддержку при подготовке диссертации Логачева Ю.И., Южкова Б.Ю. и Оседло В.И. и всех сотрудников отдела ОКФИ НИИЯФ МГУ.

В заключение хочется отметить что данная работа была бы невозможна без всемерной поддержки жены автора Золотаревой Любови Святославовны.

## **Список сокращений и условных обозначений**

**АЦП** - Аналогово-цифровой преобразователь

**ГКЛ** - галактическое космическое излучение

**ДЭПРОН** - Дозиметр Электронов, ПРОтонов и Нейтральных излучений

**ДБ** - Дозиметр Бортовой

**ИСЗ** - искусственный спутник Земли

**КА** - космический аппарат

**ЮАА** - Южно-Атлантическая Аномалия

**POES** - Polar Operational Environmental Satellites

## Список литературы

1. Numerical Simulation of Metrological Characteristics of Cosmic Radiation Detectors / I. A. Zolotarev [и др.] // Inorganic Materials: Applied Research. — 2017. — Т. 8, № 2. — С. 222—228. — DOI: [10.1134/S2075113317020241](https://doi.org/10.1134/S2075113317020241).
2. Optimization of measurements of the Earth's radiation belt particle fluxes / M. I. Panasyuk [и др.] // Cosmic Research (English translation of Kosmicheskie Issledovaniya). — Russian Federation, 2017. — Т. 55, № 2. — С. 79—87. — DOI: [10.1134/S0010952516060071](https://doi.org/10.1134/S0010952516060071).
3. Operational radiation monitoring in near-Earth space based on the system of multiple small satellites / M. I. Panasyuk [и др.] // Cosmic Research (English translation of Kosmicheskie Issledovaniya). — Russian Federation, 2015. — Т. 53, № 6. — С. 423—429. — DOI: [10.1134/S0010952515060039](https://doi.org/10.1134/S0010952515060039).
4. Численное моделирование метрологических характеристик детекторов космических излучений / И. А. Золотарев [и др.] // Перспективные материалы. — М., 2016. — № 11. — С. 16—24.
5. Моделирование характеристик детектора космических излучений / И. А. Золотарев [и др.] // Труды XVII Межвузовской научной школы молодых специалистов. — 2016.
6. Development of multispacecraft system for radiation monitoring / M. I. Panasyuk [и др.] // International Worksop. — 2016.
7. Создание и подготовка к запуску комплекса научной аппаратуры для астрофизических и космофизических исследований на борту спутника Ломоносов / В. Л. Петров [и др.] // Космодром Восточный и перспективы развития российской космонавтики: тезисы докладов Всероссийской молодёжной научно-практической конференции 05-06 июня 2015 г., г. Благовещенск). — Самарский государственный аэрокосмический университет Самара, 2015. — С. 150.
8. University satellites development program / M. I. Panasyuk [и др.] // 33-rd Annual Seminar Physics of Auroral Phenomena. — Apatity, 2010. — С. 65.

9. University satellites development program / M. I. Panasyuk [и др.] // Physics of Auroral Phenomena, Proc. XXXIII Annual Seminar. — Apatity, 2011. — C. 140—143.
10. Логачев Ю. И. Исследование космоса в НИИЯФ МГУ. Первые 50 лет космической эры. — КДУ Москва, 2007. — С. 176.
11. Обнаружение внутреннего радиационного пояса на высоте 320 км в районе южно-атлантической магнитной аномалии. / С. Н. Вернов [и др.] // ДАН СССР. — 1961. — Т. 140, № 5. — С. 1041—1044.
12. Peck E. D., Wilkinson D. C. A New Product for Visualizing Energetic Particle Data from NOAA ‘ s POES Satellites // Fall AGU. — 2008.
13. Лишневский Э. А. Вариации радиационной обстановки на международной космической станции на фазе спада 23-го цикла солнечной активности: дис. ... канд. / Лишневский Э А. — 2014. — С. 134.
14. Results of monitoring variations of absorbed dose rate onboard the International Space Station during the period 2005–2011 / A. E. Lishnevskii [и др.] // Cosmic Research. — 2012. — Т. 50, № 5. — С. 391—396. — DOI: [10.1134/S0010952512050036](https://doi.org/10.1134/S0010952512050036). — URL: <http://link.springer.com/10.1134/S0010952512050036>.
15. Overview of the Liulin type instruments for space radiation measurement and their scientific results / T. P. Dachev [и др.]. — 2015. — DOI: [10.1016/j.lssr.2015.01.005](https://doi.org/10.1016/j.lssr.2015.01.005).
16. Горчаков Е. Внешний радиационный пояс и полярные сияния // Искусственные спутники Земли. — 1961. — № 9. — С. 66—70.
17. Вернов С., Чудаков А. Исследования космических лучей и земного корпускулярного излучения при полетах ракет и спутников // УФН. — 1960. — Т. 70, № 4. — С. 585.
18. Dose variation during solar minimum / M. S. Gussenhoven [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1997. — Т. 44, № 6. — С. 2161—2168. — DOI: [10.1109/23.659031](https://doi.org/10.1109/23.659031). — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=659031>.

19. *Borovsky J. E., Denton M. H.* Magnetic field at geosynchronous orbit during high-speed stream-driven storms: Connections to the solar wind, the plasma sheet, and the outer electron radiation belt // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2010. — Т. 115, № 8. — DOI: [10.1029/2009JA015116](https://doi.org/10.1029/2009JA015116).
20. *Holeman E., Mullen E. G., Brautigam D. H.* Dose variation during solar minimum // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1991. — Т. 38, № 6. — С. 1671—1677. — DOI: [10.1109/23.124161](https://doi.org/10.1109/23.124161).
21. *Miyoshi Y., Kataoka R.* Solar cycle variations of outer radiation belt and its relationship to solar wind structure dependences // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2011. — Т. 73, № 1. — С. 77—87. — DOI: [10.1016/j.jastp.2010.09.031](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.031).
22. Forecasting and remote sensing outer belt relativistic electrons from low Earth orbit / Y. Chen [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2016. — Т. 43, № 3. — С. 1031—1038. — DOI: [10.1002/2015GL067481](https://doi.org/10.1002/2015GL067481).
23. On the storm-time evolution of relativistic electron phase space density in Earth's outer radiation belt / D. L. Turner [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2013. — Т. 118, № 5. — С. 2196—2212. — DOI: [10.1002/jgra.50151](https://doi.org/10.1002/jgra.50151).
24. Solar cycle variation of outer belt electron dose at low-earth orbit / D. H. Brautigam [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. Т. 48. — 2001. — С. 2010—2015. — ISBN 0018-9499-48. — DOI: [10.1109/23.983164](https://doi.org/10.1109/23.983164).
25. *Borovsky J. E., Denton M. H.* On the heating of the outer radiation belt to produce high fluxes of relativistic electrons: Measured heating rates at geosynchronous orbit for high-speed stream-driven storms // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2010. — Т. 115, № 12. — DOI: [10.1029/2010JA015342](https://doi.org/10.1029/2010JA015342).
26. Low altitude edge of the inner radiation belt: Dose models from the APEX satellite / M. S. Gussenhoven [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 1995. — Т. 42, 6 pt 1. — С. 2035—2042. — DOI: [10.1109/23.489250](https://doi.org/10.1109/23.489250).
27. *Borovsky J. E., Cayton T. E.* Entropy mapping of the outer electron radiation belt between the magnetotail and geosynchronous orbit // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2011. — Т. 116, № 6. — DOI: [10.1029/2011JA016470](https://doi.org/10.1029/2011JA016470).

28. A long-lived relativistic electron storage ring embedded in Earth's outer Van Allen belt. / D. N. Baker [и др.] // Science. — 2013. — Т. 340, № 6129. — С. 186—90. — DOI: [10.1126/science.1233518](https://doi.org/10.1126/science.1233518). — URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23450000>.
29. Low altitude dose measurements from APEX, CRRES and DMSP / E. G. Mullen [и др.] // Life Sciences and Space Research Xxv(2). Т. 21. — 1998. — С. 1651—1660. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S027311779800009X> % 7B % 5C % %7D5Cnpapers3://publication/uuid/5C8ACFEA-2D3D-4C3F-9FB8-123FD47FA59F.
30. Global time-dependent chorus maps from low-Earth-orbit electron precipitation and Van Allen Probes data / Y. Chen [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2014. — Т. 41, № 3. — С. 755—761. — DOI: [10.1002/2013GL059181](https://doi.org/10.1002/2013GL059181).
31. Dropouts of the outer electron radiation belt in response to solar wind stream interfaces: global positioning system observations / S. K. Morley [и др.] // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2010. — Т. 466, № 2123. — С. 3329—3350. — DOI: [10.1098/rspa.2010.0078](https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0078).
32. Potapov A. S., Tsegmed B., Ryzhakova L. V. Solar cycle variation of "killer" electrons at geosynchronous orbit and electron flux correlation with the solar wind parameters and ULF waves intensity // Acta Astronautica. — 2014. — Т. 93. — С. 55—63. — DOI: [10.1016/j.actaastro.2013.07.004](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.004).
33. Denton M. H., Borovsky J. E., Cayton T. E. A density-temperature description of the outer electron radiation belt during geomagnetic storms // Journal of Geophysical Research. — 2010. — Т. 115, A1. — С. 1—20. — DOI: [10.1029/2009JA014183](https://doi.org/10.1029/2009JA014183). — URL: <http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JA014183.shtml>.
34. Hoyt R., Cash M. Reduction of Trapped Energetic Particle Fluxes in Earth And Jovian Radiation Belts, Final Report on NASA Institute for Advanced Concepts Phase I Project: тех. отч. — 2007. — С. 70.
35. The hidden dynamics of relativistic electrons (0.7–1.5 MeV) in the inner zone and slot region / S. G. Claudepierre [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2017. — Т. 122, № 3. — С. 3127—3144. — DOI: [10.1002/2016JA023719](https://doi.org/10.1002/2016JA023719).

36. *Selesnick R. S.* Measurement of inner radiation belt electrons with kinetic energy above 1 MeV // Journal of Geophysical Research A: Space Physics. — 2015. — Т. 120, № 10. — С. 8339—8349. — DOI: [10.1002/2015JA021387](https://doi.org/10.1002/2015JA021387).
37. *Johnson-Groh M.* Relativistic Electrons Uncovered with NASA's Van Allen Probes. — 2017. — URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/relativistic-electrons-uncovered-with-nasa-s-van-allen-probes> (дата обр. 23.05.2017).
38. Radiation dose measurements aboard the Mir using the R-16 instrument / V. G. Mitricas [и др.] // Radiation Measurements. — 2002. — Т. 35, № 5. — С. 515—525. — DOI: [10.1016/S1350-4487\(02\)00084-7](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(02)00084-7).
39. *Dorman L. I.* Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground. Т. 303. — Dordrecht : Springer Netherlands, 2004. — (Astrophysics and Space Science Library). — ISBN 978-94-015-6987-3. — DOI: [10.1007/978-1-4020-2113-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2113-8). — URL: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-2113-8>.
40. Personal neutron dosimetry in the space station MIR and the space shuttle / M. Luszik-Bhadra [и др.] // Radiation Measurements. — 1999. — Т. 31, № 1. — С. 425—430. — DOI: [10.1016/S1350-4487\(99\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(99)00133-X).
41. Studies on new neutron-sensitive dosimeters using an optically stimulated luminescence technique / M. S. Kulkarni [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. — 2011. — Т. 269, № 13. — С. 1465—1470. — DOI: [10.1016/j.nimb.2011.02.087](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.02.087).
42. Radiation dosimetry for high LET particles in low Earth orbit / D. Zhou [и др.] // Acta Astronautica. — 2008. — Т. 63, № 7—10. — С. 855—864. — DOI: [10.1016/j.actaastro.2008.04.002](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2008.04.002).
43. Radiation measured for MATROSHKA-1 experiment with passive dosimeters / D. Zhou [и др.] // Acta Astronautica. — 2010. — Т. 66, № 1—2. — С. 301—308. — DOI: [10.1016/j.actaastro.2009.06.014](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2009.06.014).
44. TL dose measurements on board the Russian segment of the ISS by the "Pille" system during Expedition-8, -9 and -10 / I. Apáthy [и др.] // Acta Astronautica. — 2007. — Т. 60, 4—7 SPEC. ISS. — С. 322—328. — DOI: [10.1016/j.actaastro.2006.09.037](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2006.09.037).

45. *Markelov V., Red'ko V.* Vysokochuvstvitel'nyj dozimetr kosmicheskikh izluchenij. // Cosmic Research. — 1982. — T. 19, № 2. — C. 316—319.
46. *Markelov V., Red'ko V.* Dozimetr ionizirujushhih izluchenij. — 1978.
47. *Caffrey J. A., Hamby D. M.* A review of instruments and methods for dosimetry in space. — 2011. — DOI: [10.1016/j.asr.2010.10.005](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.10.005).
48. Calibration results obtained with Liulin-4 type dosimeters / T. Dachev [и др.] // Advances in Space Research. — 2002. — T. 30, № 4. — C. 917—925. — DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00411-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00411-8).
49. Response calculations for silicon-based direct-reading dosimeters for use at the international space station (ISS) / M. Luszik-Bhadra [и др.] // Radiation Measurements. — 2010. — T. 45, № 10. — C. 1548—1552. — DOI: [10.1016/j.radmeas.2010.08.026](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.08.026). — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.08.026>.
50. Radiation environment investigations during ExoMars missions to Mars - Objectives, experiments and instrumentation / J. Semkova [и др.] // Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences. — 2015. — T. 68, № 4. — C. 485—496.
51. Dosimetry inside MIR station using a silicon detector telescope (DOSTEL) / R. Beaujean [и др.] // Radiation Measurements. — 2002. — T. 35, № 5. — C. 433—438. — DOI: [10.1016/S1350-4487\(02\)00074-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(02)00074-4).
52. *Knoll G. F.* Radiation Detection and Measurement. — Wiley, 2000. — C. 816. — ISBN 9780471073383. — URL: <https://books.google.ru/books?id=HKBVAAAAMAAJ>.
53. *Perez-Nunez D., Braby L. A.* Replacement Tissue-Equiv Alent Proportional Counter for the International Space Station // Radiation Protection Dosimetry. — 2011. — T. 143, № 2. — C. 394—397.
54. *Badhwar G. D.* Shuttle radiation dose measurements in the International Space Station orbits. // Radiation research. — 2002. — T. 157, № 1. — C. 69—75. — DOI: [10.1667/0033-7587\(2002\)157\[0069:SRDMIT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1667/0033-7587(2002)157[0069:SRDMIT]2.0.CO;2).
55. *Fry D.* Miniaturized Particle Telescope ( MPT ). — 2016.

56. A semiconductor radiation imaging pixel detector for space radiation dosimetry / M. Kroupa [и др.] // Life Sciences in Space Research. — 2015. — Т. 6. — С. 69—78. — DOI: [10.1016/j.lssr.2015.06.006](https://doi.org/10.1016/j.lssr.2015.06.006).
57. *Vassilis Angelopoulos Y. S.* Elfin-Lomo.igpp.ucla.edu. — URL: <http://elfin-lomo.igpp.ucla.edu/?photos.shtml> (дата обр. 07.02.2017).
58. Calibration and Characterization of the Radiation Assessment Detector (RAD) on Curiosity / C. Zeitlin [и др.] // Space Science Reviews. — 2016. — Т. 201, № 1—4. — С. 201—233. — DOI: [10.1007/s11214-016-0303-y](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0303-y). — URL: <http://link.springer.com/10.1007/s11214-016-0303-y>.
59. The Martian surface radiation environment – a comparison of models and MSL/RAD measurements / D. Matthiä [и др.] // Journal of Space Weather and Space Climate. — 2016. — Т. 6. — А13. — DOI: [10.1051/swsc/2016008](https://doi.org/10.1051/swsc/2016008). — URL: <http://www.swsc-journal.org/10.1051/swsc/2016008>.
60. Space Radiation Dosimetry with the Radiation Assessment Detector ( RAD ) on the Mars Science Laboratory ( MSL ) / C. Zeitlin [и др.] // WRMIS, — 2010. — С. 22.
61. Dependence of the Martian radiation environment on atmospheric depth: Modeling and measurement / J. Guo [и др.] // Journal of Geophysical Research: Planets. — 2017. — Т. 122, № 2. — С. 329—341. — DOI: [10.1002/2016JE005206](https://doi.org/10.1002/2016JE005206).
62. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM) / S. J. Goodman [и др.] // Atmospheric Research. — 2013. — Т. 125—126. — С. 34—49. — DOI: [10.1016/j.atmosres.2013.01.006](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.006).
63. A Monte Carlo simulation of the NOAA POES Medium Energy Proton and Electron Detector instrument / K. Yando [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2011. — Т. 116, А10. — n/a—n/a. — DOI: [10.1029/2011JA016671](https://doi.org/10.1029/2011JA016671). — URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/2011JA016671>.
64. Differential neutron energy spectra measured on spacecraft in low Earth orbit. / V. E. Dudkin [и др.] // International Journal Of Radiation Applications And Instrumentation. Part D, Nuclear Tracks And Radiation Measurements. — 1990. — Т. 17, № 2. — С. 87—91. — URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11537519>.

65. *Armstrong T. W., Colborn B. L.* Predictions of secondary neutrons and their importance to radiation effects inside the international space station // Radiation Measurements. — 2001. — Т. 33, № 3. — С. 229—234. — DOI: [10.1016/S1350-4487\(00\)00152-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(00)00152-9).
66. *Benton E. R., Benton E. V., Frank A. L.* Neutron dosimetry in low-earth orbit using passive detectors // Radiation Measurements. — 2001. — Т. 33, № 3. — С. 255—263. — DOI: [10.1016/S1350-4487\(01\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00047-6).
67. *Esteban S. M.* Development of Advanced Silicon Sensors for Neutron Detection and Microdosimetry: дис. ... канд. / Esteban Sergi Martí. — 2016. — С. 229. — URL: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/399780/sem1de1.pdf?sequence=1%7B%5C&%7DisAllowed=y>.
68. *Stozhkov Y.* The in-flight performance of the PAMELA Neutron Detector // 30TH INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE. — 2007. — С. 325—328.
69. *McGregor D. S., Bellinger S. L., Kenneth Shultz J.* Present status of microstructured semiconductor neutron detectors // Journal of Crystal Growth. — 2013. — Т. 379. — С. 99—110. — DOI: [10.1016/j.jcrysGro.2012.10.061](https://doi.org/10.1016/j.jcrysGro.2012.10.061).
70. Characterization of 3D and planar Si diodes with different neutron converter materials / R. Mendicino [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2015. — Т. 796. — С. 23—28. — DOI: [10.1016/j.nima.2015.04.026](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.04.026). — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215004994>.
71. {F}ast neutron dosimetry with {CR}-39: {S}tudy of various materials using electrochemical etching / W. G. Alberts [и др.] // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. — 1991. — Т. 19, № 1—4. — С. 437—442. — DOI: [10.1016/1359-0189\(91\)90237-C](https://doi.org/10.1016/1359-0189(91)90237-C).
72. Многоцелевой детекторный модуль для регистрации нейтронов в околоземном пространстве / М. Панасюк [и др.]. — Москва, 1990.

73. Measurements of neutron fluxes with energies from thermal to several MeV in near-Earth space: SINP results / P. I. Shavrin [и др.] // Radiation Measurements. — 2002. — Т. 35, № 5. — С. 531—538. — DOI: [10.1016/S1350-4487\(02\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(02)00086-0).
74. *Shurshakov V., Semkova J., Academy B.* Comparison of dose equivalents from charged particles and neutrons inside the spherical tissue-equivalent phantom on ... — 2016.
75. Сравнение эквивалентной дозы от заряженных частиц и нейтронов внутри шарового тканеэквивалентного фантома на борту российского сегмента Международной Космической Станции / С. Хулапко [и др.] // Авиакосмическая и Экологическая Медицина. — 2016. — Т. 50, № 2. — С. 47—52.
76. The PAMELA space experiment / W. Menn [и др.] // Advances in Space Research. — 2013. — Т. 51, № 2. — С. 209—218. — DOI: [10.1016/j.asr.2011.06.030](https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.06.030). — arXiv: [0905.2551](https://arxiv.org/abs/0905.2551).
77. *Goryacheva V. S., Voronov S. A., Mikhailov V. V.* International Conference on Recent Trends in Physics 2016 (ICRTP2016) // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Т. 755. — С. 011001. — DOI: [10.1088/1742-6596/755/1/011001](https://doi.org/10.1088/1742-6596/755/1/011001). — URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/755/i=1/a=011001?key=crossref.0cdd0e5fffab2dd74a68d0f9f4f1296b>.
78. Global distribution of near-surface hydrogen on Mars / W. C. Feldman [и др.] // Journal of Geophysical Research E: Planets. — 2004. — Т. 109, № 9. — С. 1—13. — DOI: [10.1029/2003JE002160](https://doi.org/10.1029/2003JE002160).
79. Dynamic Albedo of Neutrons (DAN) experiment onboard NASA's Mars Science Laboratory / I. G. Mitrofanov [и др.] // Space Science Reviews. — 2012. — Т. 170, № 1—4. — С. 559—582. — DOI: [10.1007/s11214-012-9924-y](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9924-y).
80. FINE RESOLUTION EPITHERMAL NEUTRON DETECTOR (FREND) FOR MAPPING MARTIAN WATER FROM THE ESA'S TGO. / I. G. Mitrofanov [и др.] // Concepts and Approaches for Mars Exploration. — 2012. — С. 3—4.
81. The Mars Science Laboratory ( MSL ) Mission / D. Hassler [и др.] // WRMISS. — 2008. — С. 20.

82. Electronic personal neutron dosimeters for energies up to 100 MeV: Calculations using the PHITS code / M. Luszik-Bhadra [и др.] // Radiation Measurements. — 2008. — Т. 43, № 2—6. — С. 1044—1048. — DOI: [10.1016/j.radmeas.2007.10.047](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2007.10.047).
83. Geant4 developments and applications / J. Allison [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2006. — Т. 53, № 1. — С. 270—278. — DOI: [10.1109/TNS.2006.869826](https://doi.org/10.1109/TNS.2006.869826).
84. *Seltzer S. M.* SHIELDOSE: A Computer Code for Space-Shielding Radiation Dose Calculations: tex. отч. / National Bureau of Standards, NBS Technical Note 1116 U.S. Government Printing Office. — Washington, D.C., 1980.
85. PHITS-a particle and heavy ion transport code system / K. Niita [и др.] // Radiation Measurements. — 2006. — Т. 41, № 9—10. — С. 1080—1090. — DOI: [10.1016/j.radmeas.2006.07.013](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.07.013).
86. Applicability of particle and heavy ion transport code PHITS to the shielding design of spacecrafts / T. Sato [и др.] // Radiation Measurements. — 2006. — Т. 41, № 9—10. — С. 1142—1146. — DOI: [10.1016/j.radmeas.2006.07.014](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.07.014).
87. The physics models of FLUKA: status and recent development / A. Fasso [и др.] // arXiv. — 2003. — Т. hep-ph. — С. 10. — arXiv: [0306267](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0306267) [hep-ph]. — URL: <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0306267>.
88. The FLUKA Code: Developments and challenges for high energy and medical applications / T. T. Böhlen [и др.] // Nuclear Data Sheets. — 2014. — Т. 120. — С. 211—214. — DOI: [10.1016/j.nds.2014.07.049](https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.049).
89. *Heinbockel J. H., Slaba T. C.* Comparison of Radiation Transport Codes , HZETRN , HETC and FLUKA , Using the 1956 Webber SPE Spectrum: tex. отч. — 2009. — С. 35. — January.
90. *Wilson J. W.* HZETRN: Description of a free-space ion and nucleon transport and shielding computer program: tex. отч. — 1995. — С. 1—148.
91. GEANT4 - A simulation toolkit / S. Agostinelli [и др.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2003. — Т. 506, № 3. — С. 250—303. — DOI: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8). — arXiv: [1005.0727v1](https://arxiv.org/abs/1005.0727v1).

92. MULASSIS: A Geant4-based multilayered shielding simulation tool / F. Lei [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. Т. 49 И. — 2002. — С. 2788—2793. — ISBN 0018-9499-49. — DOI: [10.1109/TNS.2002.805351](https://doi.org/10.1109/TNS.2002.805351).
93. GRAS: A general-purpose 3-D modular simulation tool for space environment effects analysis / G. Santin [и др.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. — 2005. — Т. 52, № 6. — С. 2294—2299. — DOI: [10.1109/TNS.2005.860749](https://doi.org/10.1109/TNS.2005.860749).
94. Thomas G. R., Willis D. M. Analytical derivation of the geometric factor of a particle detector having circular or rectangular geometry // Journal of Physics E: Scientific Instruments. — 1972. — Т. 5, № 3. — С. 260. — URL: <http://stacks.iop.org/0022-3735/5/i=3/a=024>.
- . Analog Devices I. 1 MSPS, 12-Bit ADCs AD7475/AD7495. — Norwood, 2005.
95. NIST ESTAR. — URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> (дата обр. 15.11.2016).
96. Bethe H. Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie // Annalen der Physik. — 1930. — Т. 397, № 3. — С. 325—400. — DOI: [10.1002/andp.19303970303](https://doi.org/10.1002/andp.19303970303).
97. Sternheimer R. M. The density effect for the ionization loss in various materials // Physical Review. — 1952. — Т. 88, № 4. — С. 851—859. — DOI: [10.1103/PhysRev.88.851](https://doi.org/10.1103/PhysRev.88.851).
98. Bichsel H. Stopping power and ranges of fast ions in heavy elements // Physical Review A. — 1992. — Т. 46, № 9. — С. 5761—5773. — DOI: [10.1103/PhysRevA.46.5761](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.46.5761).
99. Ashley J. C., Ritchie R. H., Brandt W. Z13 effect in the stopping power of matter for charged particles // Physical Review B. — 1972. — Т. 5, № 7. — С. 2393—2397. — DOI: [10.1103/PhysRevB.5.2393](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.5.2393).
100. Wright D. Physics I : Physics Lists // Geant4 Tutorial at Stanford. — 2014. — С. 1—23.
101. Simmer G., Xu S. Thermal Neutron interacting with Helium-3. — 2007. — URL: <http://hypernews.slac.stanford.edu/HyperNews/geant4/get/hadronprocess/731.html?inline=-1> (дата обр. 03.05.2017).

102. CATIA-GDML geometry builder / S. Belogurov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2011. — Т. 331, № 3. — С. 32035. — DOI: [10.1088/1742-6596/331/3/032035](https://doi.org/10.1088/1742-6596/331/3/032035). — URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/331/i=3/a=032035?key=crossref.12350018e7cf8573c8071ff58dcc8be%7B%5C%7D5Cnpapers2://publication/doi/10.1088/1742-6596/331/3/032035>.
103. Development and application of CATIA-GDML geometry builder / S. Belogurov [и др.] // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. — Т. 513, № 2. — С. 022003. — DOI: [10.1088/1742-6596/513/2/022003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/513/2/022003). — URL: <http://stacks.iop.org/1742-6596/513/i=2/a=022003?key=crossref.82746fb44796d979be4870eed2aba543>.

## Список рисунков

1.1 Измерения потоков электронов $>300$ кэВ на спутнике POES [12] . . . . .	<b>9</b>
1.2 Вклад в общую поглощенную дозу от ГКЛ и ЮОАА. По материалам [15] . . . . .	<b>9</b>
1.3 Образование долгоживущего внутреннего электронного пояса . . . . .	<b>11</b>
1.4 Внешний вид ДБ — основных детекторных модулей системы радиационного контроля СРК . . . . .	<b>14</b>
1.5 Один из модулей ModuPIX прибора REM . . . . .	<b>18</b>
1.6 Устройство телескопа детекторов для электронов с входным окном (слева). Плата предусилителей со сборкой платы электроники (в центре). Модель прибора ELFIN (справа) . . . . .	<b>19</b>
1.7 Внутреннее устройство прибора RAD. . . . .	<b>20</b>
1.8 Схема прибора протонного телескопа МЕПЕД, показанного в поперечном разрезе.[63] . . . . .	<b>22</b>
1.9 Устройство кассеты нейтронных счетчиков для эксперимента PAMELA [68] . . . . .	<b>24</b>
1.10 Устройство прибора FREND [80] . . . . .	<b>25</b>
1.11 Внешний вид спутника Ломоносов и относительное расположение приборов . . . . .	<b>28</b>
2.1 Блок-схема прибора ДЭПРОН . . . . .	<b>30</b>
2.2 Вариант размещения выборок в днище прибора ДЭПРОН. . . . .	<b>31</b>
2.3 Внутренняя компоновка модулей прибора ДЭПРОН. Вид сверху со снятой крышкой прибора. . . . .	<b>32</b>
2.4 Схема включения детектора. . . . .	<b>33</b>
2.5 Телескоп детекторов прибора ДЭПРОН, масштаб 1:2 . . . . .	<b>35</b>
2.6 Расчет геометрического фактора телескопа в системе Mathcad . . . . .	<b>36</b>
2.7 Гелиевый счетчик нейтронов и кожух из органического стекла внутри которого помещается второй счетчик нейтронов. . . . .	<b>37</b>
2.8 Фотография прототипа модуля полупроводникового детектора-предусилителя (A225F) . . . . .	<b>38</b>
2.9 . . . . .	<b>39</b>

2.10 Тактирование использованного в приборе ДЭПРОН режим работы АЦП (AD7495), по материалам [] . . . . .	40
2.11 Осциллограмма: регулярность тактирующего сигнала, подающегося на SCLK АЦП. . . . .	41
2.12 Блок схема работы процедуры Ext_Interrupt . . . . .	45
2.13 Схема подключения прибора при калибровке . . . . .	47
2.14 Градуировка прибора на ИИ . . . . .	48
2.15 Графики средних пробегов заряженных частиц для алюминия. Представлены величины: “CSDA range” — глубина в приближении непрерывного замедления “Projected range” — среднее значение глубины, на которую заряженная частица проникает в процессе замедления до остановки . . . . .	50
2.16 Модель прибора ДЭПРОН . . . . .	51
2.17 Моделирование работы нейтронных счетчиков в Geant4. . . . .	52
2.18 Профили чувствительности нейтронных счетчиков по итогам моделирования прибора Дэпрон. . . . .	53
2.19 Оценка относительной чувствительности нейтронных детекторов при различных энергиях нейтронов. . . . .	54
3.1 Интерфейс программы <b>Depron Terminal</b> . . . . .	56
3.2 Интерфейс программы <b>DB8mTerminal</b> . . . . .	57
3.3 Интерфейс программы <b>DepronExplorerView</b> . . . . .	58
3.4 Временной ряд разницы приборного времени и меток начала записи в файл. . . . .	62
3.5 Временной ряд разницы калиброванного приборного времени и меток начала записи в файл. . . . .	64
3.6 Пример восстановления меток времени 20 июня 2016 года . . . . .	65
4.1 Временные серии скоростей счета и мощности дозы при пересечении внутреннего радиационного пояса . . . . .	68
4.2 Географическое распределение потоков заряженных частиц в первом полупроводниковом детекторе . . . . .	69
4.3 Временные серии в детекторах прибора. . . . .	70
4.4 . . . . .	71
4.5 . . . . .	71

4.6	.....	72
4.7	.....	72
4.8	.....	72
4.9	Коллаборация космического эксперимента Ломоносов	74

**Список таблиц**

2.1	Полупроводниковые детекторы прибора ДЭПРОН (по материалам ТУ) . . . . .	34
2.2	Распределение битов в регистре прерывания . . . . .	46

## Приложение А

### Структура данных измерений ДЭПРОН

#### А.1 Блок данных ДЭПРОН А

Данные (RECORD)							
Время				Аппаратный счетчик детекто- ра1	Счет детектора 1	Счет детектора 2	Счет детектора 2
месяц	день	час	мин				
1 байт	1 байт	1 байт	1 байт	2 байта	2 байта	2 байта	2 байта

Продолжение:

Данные (RECORD)					
Нейтронный счетчик 1	Нейтронный счетчик 2	Доза по первому детектору	Доза по второму детектору	Доза совпадений	Массивы секундной динамики 2
2 байта	2 байта	4 байта	4 байта	4 байта	480 байт

Блок массивов секундной динамики содержат шестьдесят массивов, содержащих приращения значений счетчиков за секунду, сжатых алгоритмом логарифмического сжатия, разработанным В.В. Бенгиным.

Массив секундной динамики			
Аппаратный счетчик детектора 1	Счет детектора 1	Счет детектора 2	Счет совпадений 1
1 байт	1 байт	1 байт	1 байт

Продолжение:

Массив секундной динамики			
Нейтронный счетчик 1	Нейтронный счетчик 2	Доза по первому детектору	Доза по второму детектору
1 байт	1 байт	1 байт	1 байт

## A.2 Блок данных ДЭПРОН S

Данные (RECORD)									
Спектр детектора 1	Время				Спектр детектора 2	Счетчик детектора 1	Спектр совпаде- ний 1	Счетчик детектора 2	Спектр совпаде- ний2
	месяц	день	час	мин					
124 байта	1 байт	1 байт	1 байт	124 байта	4 байта	124 байта	4 байта	124 байта	4 байта

Вместо длины сообщения LEN для данного массива в заголовок записывается номер массива спектров (0-255).

Каждый передаваемый спектр содержит число зарегистрированных импульсов, попадающих в соответствующий энергетический канал детектора. Количество энергетических диапазонов 62, верхние границы каналов выбраны с помощью алгоритма логарифмического преобразования номера канала.

Канал №	Код АЦП						
2	16	18	160	34	640	50	2560
3	24	19	176	35	704	51	2816
4	32	20	192	36	768	52	3072
5	40	21	208	37	832	53	3328
6	48	22	224	38	896	54	3584
7	56	23	240	39	960	55	3840
8	64	24	256	40	1024	56	4096
9	72	25	288	41	1152	57	4608
10	80	26	320	42	1280	58	5120
11	88	27	352	43	1408	59	5632
12	96	28	384	44	1536	60	6144
13	104	29	416	45	1664	61	6656
14	112	30	448	46	1792	62	7168
15	120	31	480	47	1920	63	7680
16	128	32	512	48	2048		
17	144	33	576	49	2304		

Таким образом, массивы спектров состоят из 62 четырехбайтных целых значений, порядок которых соответствует приведенному набору каналов.

### A.3 Блок данных ДЭПРОН Н

Данные (RECORD)					
Время		Индекс массива высоких амплитуд(по умолчанию значение 63)		Массивы данных по высоким амплитудам	
месяц	день				
1 байт	1 байт	2 байта			63 массива по 8 байт

Структура записи в массивы данных по высоким амплитудам:

Массив данных по высоким амплитудам					
Код АЦП 1	Код АЦП 2	Время события			
		Код таймера	секунда	минута	час
2 байта	2 байта	1 байт	1 байт	1 байт	1 байт

### A.4 Блок данных ДЭПРОН Н

Информация по зарегистрированным нейтронным всплескам представлена в виде блока данных, состоящего из 127 массивов по 4 байта каждый. Структура записи в массив данных по нейтронным всплескам :

32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16
Время дня в секундах																

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
НД	Количество тиков таймера после предыдущего нейтронного импульса														

НД – номер сработавшего нейтронного детектора:

01 – срабатывание первого детектора

10 – срабатывание второго детектора

11 – срабатывание обоих детекторов

## **А.5 Блок данных ДЭПРОН Т**

В общей структуре сообщения для данного блока данных не выдается длина сообщения LEN, вместо этого передается ‘\0’.(Исправлено 27.02.2013)

Данный блок данных генерируется в ответ на пришедшее по каналу CAN от БИ командное сообщение, либо по мере заполнения выходного буфера при работе в режиме отладки прибора ДЭПРОН.

## **А.6 Команды прибора ДЭПРОН**

Для управления работой прибора ДЭПРОН предусмотрено 6 типов команд:

- Сброс настроек к заводским параметрам
  - Увеличение временного диапазона для нейтронных последовательностей
  - Уменьшение временного диапазона для нейтронных последовательностей
  - Увеличение полосы фильтра шумов протонных каналов
  - Уменьшение полосы фильтра шумов протонных каналов
  - Увеличение интервала времени сглаживания

№	Команда	Описание команды
1	Clr	сброс настроек к заводским параметрам
2	Tn+	увеличение интервала между моментами регистрации нейтронов
3	Tn-	уменьшение интервала между моментами регистрации нейтронов
4	Psnr+	увеличение допустимого протонного фона
5	Psnr_-	уменьшение допустимого протонного фона
6	Alpha+	увеличение интервала времени сглаживания

Ответный массив информации от прибора ДЭПРОН.

Где:

D tick - интервал времени меньше которого считается, что идет один нейтронный всплеск, мсек/6

Psnr - максимальный уровень протонного фона, выше которого нейтронные всплески не регистрируются.

Alfa - константа экспоненциального сглаживания для расчета фона протонов

## A.7 Отладочные сообщения прибора ДЭПРОН

Для проверки работы таймера высоких амплитуд и последовательности выполнения программного кода прибора ДЭПРОН существует возможность выдачи последовательностей измеренных временных промежутков, маркированных по названиям выполняемых блоков программного кода. Такая выдача происходит во время включения прибора ДЭПРОН в отладочном режиме, для этого необходима прошивка контроллера с объявленным макросом DEBUGTIME.

Измерение времени выполнения блоков происходит с помощью таймера прибора ТС1. Информация записывается последовательно в блоки данных ДЭПРОН Т, каждый пакет имеет размер 4 байта, первые два байта отведены под идентификационные символы, последние два байта содержат накопленное значение таймера ТС1, который настроен на работы с частотой 20 МГц.

Данные (RECORD)								
Пакет таймера 1			Пакет таймера 2	Пакет таймера 3				
Символ 1	Символ 2	Значение таймера						
1 байт	1 байт	2 байта	4 байт	4 байта				

Таблица определения выполненных блоков по маркирующим символам пакета таймера.

Символ 1	Символ 2	Выполненный блок
A	D	Выполнен блок External_ADC_Read_Double
E	0x01	Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока P1
E	0x02	Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока P2
E	0x04	Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока N1
E	0x08	Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока N2
E	0x10	Выполнен блок Ext_Interrupt, вхождение блока T2
D	0	Выполнен блок Detectors_Handling, Detectors_Flugs пустое
D	1	Выполнен блок Detectors_Handling, до вызова External_ADC_Read_Double
D	2	Выполнен блок Detectors_Handling, после вызова External_ADC_Read_Double и до конца функции
N	0	Выполнен блок New_Secunde_Handler (вызов Data_CAN_Sending и Command_Handler каждую секунду)
N	1	Выполнен блок New_Secunde_Handler (сохранение текущей дозы каждую секунду)
N	2	Выполнен блок New_Secunde_Handler (отправка накопленных за минуту данных и каждые пять минут спектра)

## Приложение Б

### Листинги программного кода комплекса ДЭПРОН

По причине проблем с поддержкой кириллицы (она встречается в комментариях и печатаемых сообщениях), комментарии не отображены [Б.1](#). Процедура `Detectors_Handling` является основной процедурой цифровой обработки данных детекторов Дэпрон.

```

void Detectors_Handling(void)
{
    int J, K;
5   if (!Detectors_Flugs) {
        long interrupt_register = AT91C_BASE_PIOB->PIO_ISR;
        return;
    }

    Temporal_buff.FLUGS = Detectors_Flugs;
10  if (Detectors_Flugs & Detec_Flug_ADC) {
        dataADC = External_ADC_Read_Double();
        Temporal_buff.ADC_code = dataADC;
    } else dataADC = 0;

15  if (Detectors_Flugs & Detec_Flug_compar) {
        Prot_Comp_1++; Prot_Comp_2++;
        J= (((dataADC+3)>>3) & 0X00000FFF);
        Dose_Comp_1+=J;
        K= Digital_Compression(J);
20  if (K<2) K=2; if(K>63) K=63;
        Spectra[2][K]++;
        J= (((dataADC+0x00030000)>>19) & 0X00000FFF); //(short)
        Dose_Comp_2+=J;
        K= Digital_Compression(J);
25  if (K<2) K=2; if(K>63) K=63;
        Spectra[3][K]++;
        }

30  } else {
        if ((Detectors_Flugs & Detec_Flug_P1)&&( dataADC & 0X00003FF0)) {
            J= (((dataADC+3)>>3) & 0X00000FFF);
        }
    }
}

```

```

    Dose_1+=J;  Prot_1++;
    K= Digital_Compression(J);
35   if (K<2) K=2; if(K>63) K=63;
    Spectra[0][K]++;
}

if ((Detectors_Flugs & Detec_Flug_P2)&&( dataADC & 0X3FF00000)) {
    J= (((dataADC+0x00030000)>>19) & 0X00000FFF);
40   Dose_2+=J;  Prot_2++;
   K= Digital_Compression(J);
   if (K<2) K=2; if(K>63) K=63;
   Spectra[1][K]++;
}

45 }

if (Detectors_Flugs & Detec_Flug_N1) {
    Neutron_1 += Neut_1;
    Neut_1 = 0;
}
50

if (Detectors_Flugs & Detec_Flug_N2) {
    Neutron_2 += Neut_2;
    Neut_2 = 0;
}

55

// if(Temporal_buff.interr_reg & Detector_Interrupt_t1) {
if(Detectors_Flugs & Detec_Flug_T1_stop) {
    if(High_Ampl_Buffer.ind==0) {
        High_Ampl_Buffer.day[0]= t_info.day;
60      High_Ampl_Buffer.day[1]= t_info.Mounth;
    }
    High_Ampl_Buffer.HA[High_Ampl_Buffer.ind].ADC_code = dataADC;
    High_Ampl_Buffer.HA[High_Ampl_Buffer.ind].ta[0] = tick_1;
    High_Ampl_Buffer.HA[High_Ampl_Buffer.ind].ta[1] = t_info.secunde;
65    High_Ampl_Buffer.HA[High_Ampl_Buffer.ind].ta[2] = t_info.minute;
    High_Ampl_Buffer.HA[High_Ampl_Buffer.ind].ta[3] = t_info.hour;
    High_Ampl_Buffer.ind++;
    if(High_Ampl_Buffer.ind>62) Send_High_Ampl_Buffer();
}

70 //For Neutron burst
    unsigned long N_T;
    unsigned short millisec_time = AT91C_BASE_TC2->TC_CV;
    millisec_time = millisec_time >>3;    //40 kHz / 8 = 5 kHz

```

```

    if ((Pronon_Fon < Proton_Level) && (N_ind > 0) && (Detectors_Flugs & Detec-
        Flug_Neutron)) {
75      if (((millisec_time - Old_Tick_2) < D_tick_2) && (Old_Sec == t_info.day_
            second)) {
            N_T = t_info.day_second << 15;
            N_T |= Old_Tick_2 & 0x00001fff;
            if (Detectors_Flugs & Detec_Flug_N1) N_T |= 0x00002000;
            if (Detectors_Flugs & Detec_Flug_N2) N_T |= 0x00004000;
80            Neutron_Bunch.neutron_t[i_n_t++] = N_T;
            if (i_n_t > 126) Send_Neutron_Bunch();
        }
    }
    Old_Sec = t_info.day_second;
85    Old_Tick_2 = millisec_time;

    Detectors_Flugs = 0;
90}

```

Листинг Б.1 Алгоритм коррекции даты в начале нового месяца на языке R

```

# date correction

5 data.sec<-separate(data.sec, 'YYYY-MM-DD hh:mm:ss-1s', c("date", "time"),
sep=' ')
data.sec<-separate(data.sec, 'date', c("year", "month", "day"),
sep='-', convert = TRUE)
# изготовлениедатыизгодаимесяца , первогоднямесяца 12:00 поумолчанию

10 data.sec$dates <- ISOdate(data.sec$year, data.sec$month, 1)
# получениеправильногодняизднякоторыйвышелзаграницымесяца
data.sec$dates <- data.sec$dates + (as.integer(data.sec$day) - 1) * 60*60*24
# установка 00:00
data.sec$dates <- data.sec$dates - 60*60*12
15 # установкаверменипочасамприбора
data.sec$dates <- data.sec$dates + parse_time(data.sec$time)

```

Листинг Б.2 Алгоритм коррекции ухода приборных часов на R

```

# time correction-----



data.sec <- data.sec%>%
5 mutate(dates.UTC = data.sec$dates - 60*60*3 )

data.sec <- data.sec[, (-17:-22)]



# константапостоянногоуходачасовприбора
10 kt = (56.77315002) /86400

# вычитаниепостоянногоуходачасовприбора
data.sec <- data.sec %>%
mutate(dates.correct.benghin = dates.UTC - ceiling(
15 kt* (dates.UTC - min(dates.UTC)))
))

# восстановлениевремениначалазаписивфайл
data.sec$timestamp.start <- gsub("depron-", "0x", data.sec$filename)
20 data.sec$timestamp.start <- gsub(".dat", "", data.sec$timestamp.start)
data.sec$timestamp.start <- as.POSIXct(as.integer(data.sec$timestamp.start),
origin="1970-01-01", 'GMT' )

# восстановлениевремнипоследнейзаписивфайл
25 data.sec$timestamp.end <-
  as.POSIXct(strptime(data.sec$timestamp, format="%d.%m.%Y %H:%M"))


# получениразностимеждуначаломфайлаигоризонтальнымприборнымвременем
data.sec$time.delta.file.start <- as.numeric(data.sec$dates.correct.benghin -
30 data.sec$timestamp.start ,
units = "secs")

data.sec <- data.sec %>%
  group_by(filename) %>%
35 distinct(filename) %>%
  summarise(delta.minimum = min(time.delta.file.start)) %>%
  left_join(data.sec, ., by = 'filename')


# table(data.sec$delta.minimum)
40 data.sec$time.correct.zolotarev <- data.sec$dates.correct.benghin -
  data.sec$delta.minimum

```

```

# отборперескоковвременивприбореболее      120 с -
меньшиезначениявозможныпринормальноработе
,
45 # большиетолькоприотключенияхпитания
data.sec <-mutate(data.sec, lag.delta = delta.minimum - lag(delta.minimum))




data.sec.switches <-filter(data.sec, abs(lag.delta) >120)

50 data.sec <-  data.sec %>%
  mutate(switches = cut(data.sec$dates.UTC,
  breaks = c(min(data.sec$dates.UTC),
  data.sec.switches$dates.UTC,
  max(data.sec$dates.UTC ))))

55
# xy1 <- xypplot( delta.minimum + switches ~ timestamp.start , data = data.sec,
#                   type = c("o","g"))
# plot(xy1)

60 # plot(table(data.sec$delta.minimum))
# table(data.sec$delta.minimum)
# median(data.sec$delta.minimum)
# mfv(data.sec$delta.minimum)

65 library('modeest')
if(nrow(data.sec.switches)>0) {
  data.sec <-  data.sec %>%
    group_by(switches)  %>%
    mutate(mfv.delta =max(mfv(delta.minimum)) )
70 }
if(nrow(data.sec.switches)== 0) {
  data.sec <-  data.sec %>%
    mutate(mfv.delta =max(mfv(delta.minimum)) )
}

75
data.sec <-  data.sec %>%
  mutate(dates.correct = dates.correct.benghin - mfv.delta)

#
# минусминутакакданныеприходятпоокончанииминуты
80 data.sec$dates.correct <- as.POSIXct(data.sec$dates.correct, 'GMT') - 59

data.sec$dates.correct.copy <- as.POSIXct(data.sec$dates.correct, 'GMT')
```

```
# последняя проверка
# получение разности между началом файла и правильным временем
85 data.sec$correct.time.delta.file.start <- as.numeric(data.sec$dates.correct -
data.sec$timestamp.start, units = "secs")
```

## Приложение В

### Листинги программного кода моделирования ДЭПРОН

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>

<gdml xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
      xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://service-spi.web.cern.ch/service-spi/
      app/releases/GDML/schema/gdml.xsd">
5 <define>
<position name="central" x="0" y="0" z="0" unit="mm"/>
<rotation name="identity" x="0" y="0" z="0" unit="degree"/>
<variable name="DEGtoRAD" value="1.74532925199433E-02"/>
</define>
10 <materials>

<isotope name="he3_iso" Z="2" N="3">
<atom type="A" value="3.0160293"/>
</isotope>
15

<element name="he3_ele" >
<fraction n="1" ref="he3_iso" />
</element>
20

<material formula="he" name="He3" >
<D value="0.00066975" />
<fraction n="1" ref="he3_ele" />
25 </material>

<material name="PCB" state="solid">
<D value="2.31" unit="g/cm3"/>
30 <!--//pcbNchip Cu9Si5C460H5060138 epoxy + silicon + copper
//weight ratio 57.7:4:1
density = 2.31*g/cm3;
pcbNchip = new G4Material(name="Pcb&Chip", density, nElem=5);
pcbNchip->AddElement(elH, nAtoms=506);
35 pcbNchip->AddElement(elC, nAtoms=460);

```

```

pcbNchip->AddElement(elO, nAtoms=138);
pcbNchip->AddElement(elSi, nAtoms=5);
pcbNchip->AddElement(elCu, nAtoms=9);-->
<fraction n="0.056951255" ref="G4_H"/>
40 <!-- 1.00794*506=510.01764-->
<fraction n="0.616957286" ref="G4_C"/>
<!-- 12.011*460=5525.06-->
<fraction n="0.246547658" ref="G4_O"/>
<!-- 15.9994*138=2207.9172-->
45 <fraction n="0.015680874" ref="G4_Si"/>
<!-- 28.0855*5=140.4275-->
<fraction n="0.063862928" ref="G4_Cu"/>
<!-- 63.546*9=571.914-->
<!-- Total 8955.33634-->
50 </material>

<material name="D16" state="solid">
<D value="2.77" unit="g/cm3"/>
<!--//aluminium alloy d16
55 Fe Si Mn Cr Ti Al Cu Mg Zn Other --
<0.5 <0.5 0.3 - 0.9 <0.1 <0.15 90.9 - 94.7 3.8 - 4.9 1.2 - 1.8 <0.25 all
other 0.05; total 0.15 Ti+Zr < 0.2
G4Material::AddMaterial WARNING !! for D16 sum of fractional masses 0.0874738
is not 1 - results may be wrong
-->
<fraction n="0.0050" ref="G4_Fe"/>
60 <fraction n="0.0050" ref="G4_Si"/>
<fraction n="0.0090" ref="G4_Mn"/>
<fraction n="0.9302" ref="G4_Al"/>
<fraction n="0.0490" ref="G4_Cu"/>
<fraction n="0.0018" ref="G4_Mg"/>
65 </material>

</materials>
<solids>
<trd name="CoverVytochka_PartBody" x1="(1.5)*2" x2="(1.5)*2" y1="(30)*2" y2="
(3)*2" z="(13.5)*2" lunit="mm"/>
70 <trd name="CoverVytochka2_PartBody" x1="(1.5)*2" x2="(1.5)*2" y1="(20)*2" y2="
(0.001)*2" z="(10)*2" lunit="mm"/>
<box name="PCB1_PartBody" x="(0.75)*2" y="(25)*2" z="(17)*2" lunit="mm"/>
<box name="PCB2_PartBody" x="(20)*2" y="(40)*2" z="(0.75)*2" lunit="mm"/>

```

```

<tube name="PCB3hole_PartBody" rmin="0" rmax="5" z="(0.75)*2" startphi="0"
      deltaphi="360" lunit="mm" aunit="degree"/>
<box name="PCB3_PartBody" x="(0.75)*2" y="(25)*2" z="(17)*2" lunit="mm"/>
75 <tube name="si13tube_PartBody" rmin="15" rmax="16" z="(85)*2" startphi="0"
      deltaphi="360" lunit="mm" aunit="degree"/>
<tube name="si13n_PartBody" rmin="0" rmax="15" z="(95)*2" startphi="0" deltaphi
      ="360" lunit="mm" aunit="degree"/>
<box name="Detector_PartBody" x="(5)*2" y="(5)*2" z="(0.15)*2" lunit="mm"/>
<box name="Detector_PartBody" x="(5)*2" y="(5)*2" z="(0.15)*2" lunit="mm"/>
<box name="G4Space_PartBody" x="(100)*2" y="(16)*2" z="(16)*2" lunit="mm"/>
80 <box name="Shield_PartBody" x="(110)*2" y="(24.5)*2" z="(24.5)*2" lunit="mm"/>
<box name="CoverFront2_PartBody" x="(2.5)*2" y="(75)*2" z="(35)*2" lunit="mm"/>
<box name="CoverSide_PartBody" x="(125)*2" y="(2.5)*2" z="(35)*2" lunit="mm"/>
<box name="CoverTop_PartBody" x="(125)*2" y="(80)*2" z="(2.5)*2" lunit="mm"/>
<box name="CoverBottom_PartBody" x="(125)*2" y="(80)*2" z="(2.5)*2" lunit="mm"/>
      >
85 <box name="casset_cover_front_PartBody" x="(0.05)*2" y="(25)*2" z="(17)*2"
      lunit="mm"/>
<box name="casset_cover_top_PartBody" x="(50)*2" y="(26)*2" z="(0.15)*2" lunit=
      "mm"/>
<box name="casset_cover_side_PartBody" x="(50)*2" y="(0.25)*2" z="(17)*2" lunit
      ="mm"/>
<box name="cassete_cover_top_vert_PartBody" x="(0.15)*2" y="(26)*2" z="(33)*2"
      lunit="mm"/>
<box name="casset_cover_side_vert_PartBody" x="(17)*2" y="(0.25)*2" z="(33)*2"
      lunit="mm"/>
90 <box name="G4Cover_PartBody" x="(125)*2" y="(80)*2" z="(41)*2" lunit="mm"/>

```

## B.0.1 Список использованных материалов для создания модели в geant4

\*\*\*\*\* Table : Nb of materials = 14 \*\*\*\*\*

Material: He3 density: 0.670 kg/m<sup>3</sup> RadL: 1.061 km Nucl.Int.Length: 757.722 m  
 Imean: 41.800 eV temperature: 273.15 K pressure: 1.00 atm  
 ---> Element: he3\_ele () Z = 2.0 N = 3.0 A = 3.02 g/mole  
 ---> Isotope: he3\_iso Z = 2 N = 3 A = 3.02 g/mole abundance: 100.00 %  
 ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

Material: PCB density: 2.310 g/cm<sup>3</sup> RadL: 15.331 cm Nucl.Int.Length: 34.052 cm  
 Imean: 78.639 eV  
 ---> Element: H (H) Z = 1.0 N = 1.0 A = 1.01 g/mole  
 ---> Isotope: H1 Z = 1 N = 1 A = 1.01 g/mole abundance: 99.99 %  
 ---> Isotope: H2 Z = 1 N = 2 A = 2.01 g/mole abundance: 0.01 %  
 ElmMassFraction: 5.70 % ElmAbundance 45.26 %  
 ---> Element: C (C) Z = 6.0 N = 12.0 A = 12.01 g/mole  
 ---> Isotope: C12 Z = 6 N = 12 A = 12.00 g/mole abundance: 98.93 %  
 ---> Isotope: C13 Z = 6 N = 13 A = 13.00 g/mole abundance: 1.07 %  
 ElmMassFraction: 61.70 % ElmAbundance 41.15 %

---> Element: O (O) Z = 8.0 N = 16.0 A = 16.00 g/mole  
 ---> Isotope: O16 Z = 8 N = 16 A = 15.99 g/mole abundance: 99.76 %  
 ---> Isotope: O17 Z = 8 N = 17 A = 17.00 g/mole abundance: 0.04 %  
 ---> Isotope: O18 Z = 8 N = 18 A = 18.00 g/mole abundance: 0.20 %  
 ElmMassFraction: 24.65 % ElmAbundance 12.34 %

---> Element: Si (Si) Z = 14.0 N = 28.1 A = 28.09 g/mole  
 ---> Isotope: Si28 Z = 14 N = 28 A = 27.98 g/mole abundance: 92.23 %  
 ---> Isotope: Si29 Z = 14 N = 29 A = 28.98 g/mole abundance: 4.68 %  
 ---> Isotope: Si30 Z = 14 N = 30 A = 29.97 g/mole abundance: 3.09 %  
 ElmMassFraction: 1.57 % ElmAbundance 0.45 %

---> Element: Cu (Cu) Z = 29.0 N = 63.6 A = 63.55 g/mole  
 ---> Isotope: Cu63 Z = 29 N = 63 A = 62.93 g/mole abundance: 69.17 %  
 ---> Isotope: Cu65 Z = 29 N = 65 A = 64.93 g/mole abundance: 30.83 %  
 ElmMassFraction: 6.39 % ElmAbundance 0.81 %

Material: G4\_H density: 0.084 kg/m3 RadL: 7.528 km Nucl.Int.Length: 4.212 km  
 Imean: 19.200 eV temperature: 273.15 K pressure: 1.00 atm

---> Element: H (H) Z = 1.0 N = 1.0 A = 1.01 g/mole  
 ---> Isotope: H1 Z = 1 N = 1 A = 1.01 g/mole abundance: 99.99 %  
 ---> Isotope: H2 Z = 1 N = 2 A = 2.01 g/mole abundance: 0.01 %  
 ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

Material: G4\_C density: 2.000 g/cm3 RadL: 21.349 cm Nucl.Int.Length: 40.077 cm  
 Imean: 81.000 eV

---> Element: C (C) Z = 6.0 N = 12.0 A = 12.01 g/mole  
 ---> Isotope: C12 Z = 6 N = 12 A = 12.00 g/mole abundance: 98.93 %  
 ---> Isotope: C13 Z = 6 N = 13 A = 13.00 g/mole abundance: 1.07 %  
 ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

Material: G4\_O density: 1.332 mg/cm3 RadL: 257.138 m Nucl.Int.Length: 662.215 m  
 Imean: 95.000 eV temperature: 273.15 K pressure: 1.00 atm

---> Element: O (O) Z = 8.0 N = 16.0 A = 16.00 g/mole  
 ---> Isotope: O16 Z = 8 N = 16 A = 15.99 g/mole abundance: 99.76 %  
 ---> Isotope: O17 Z = 8 N = 17 A = 17.00 g/mole abundance: 0.04 %  
 ---> Isotope: O18 Z = 8 N = 18 A = 18.00 g/mole abundance: 0.20 %  
 ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

Material: G4\_Si density: 2.330 g/cm3 RadL: 9.366 cm Nucl.Int.Length: 45.635 cm  
 Imean: 173.000 eV

---> Element: Si (Si) Z = 14.0 N = 28.1 A = 28.09 g/mole  
 ---> Isotope: Si28 Z = 14 N = 28 A = 27.98 g/mole abundance: 92.23 %  
 ---> Isotope: Si29 Z = 14 N = 29 A = 28.98 g/mole abundance: 4.68 %  
 ---> Isotope: Si30 Z = 14 N = 30 A = 29.97 g/mole abundance: 3.09 %  
 ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

Material: G4\_Cu density: 8.960 g/cm3 RadL: 1.436 cm Nucl.Int.Length: 15.576 cm  
 Imean: 322.000 eV

---> Element: Cu (Cu) Z = 29.0 N = 63.6 A = 63.55 g/mole  
 ---> Isotope: Cu63 Z = 29 N = 63 A = 62.93 g/mole abundance: 69.17 %  
 ---> Isotope: Cu65 Z = 29 N = 65 A = 64.93 g/mole abundance: 30.83 %  
 ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

Material: D16 density: 2.770 g/cm3 RadL: 8.237 cm Nucl.Int.Length: 38.462 cm  
 Imean: 172.393 eV

---> Element: Fe (Fe) Z = 26.0 N = 55.9 A = 55.85 g/mole  
 ---> Isotope: Fe54 Z = 26 N = 54 A = 53.94 g/mole abundance: 5.84 %  
 ---> Isotope: Fe56 Z = 26 N = 56 A = 55.93 g/mole abundance: 91.75 %  
 ---> Isotope: Fe57 Z = 26 N = 57 A = 56.94 g/mole abundance: 2.12 %  
 ---> Isotope: Fe58 Z = 26 N = 58 A = 57.93 g/mole abundance: 0.28 %  
 ElmMassFraction: 0.50 % ElmAbundance 0.25 %

---> Element: Si (Si) Z = 14.0 N = 28.1 A = 28.09 g/mole  
 ---> Isotope: Si28 Z = 14 N = 28 A = 27.98 g/mole abundance: 92.23 %  
 ---> Isotope: Si29 Z = 14 N = 29 A = 28.98 g/mole abundance: 4.68 %  
 ---> Isotope: Si30 Z = 14 N = 30 A = 29.97 g/mole abundance: 3.09 %  
 ElmMassFraction: 0.50 % ElmAbundance 0.50 %

```

--> Element: Mn (Mn) Z = 25.0 N = 55.0 A = 54.94 g/mole
--> Isotope: Mn55 Z = 25 N = 55 A = 54.94 g/mole abundance: 100.00 %
ElmMassFraction: 0.90 % ElmAbundance 0.46 %

--> Element: Al (Al) Z = 13.0 N = 27.0 A = 26.98 g/mole
--> Isotope: Al27 Z = 13 N = 27 A = 26.98 g/mole abundance: 100.00 %
ElmMassFraction: 93.02 % ElmAbundance 96.43 %

--> Element: Cu (Cu) Z = 29.0 N = 63.6 A = 63.55 g/mole
--> Isotope: Cu63 Z = 29 N = 63 A = 62.93 g/mole abundance: 69.17 %
--> Isotope: Cu65 Z = 29 N = 65 A = 64.93 g/mole abundance: 30.83 %
ElmMassFraction: 4.90 % ElmAbundance 2.16 %

--> Element: Mg (Mg) Z = 12.0 N = 24.3 A = 24.31 g/mole
--> Isotope: Mg24 Z = 12 N = 24 A = 23.98 g/mole abundance: 78.99 %
--> Isotope: Mg25 Z = 12 N = 25 A = 24.99 g/mole abundance: 10.00 %
--> Isotope: Mg26 Z = 12 N = 26 A = 25.98 g/mole abundance: 11.01 %
ElmMassFraction: 0.18 % ElmAbundance 0.21 %

```

Material: G4\_Fe density: 7.874 g/cm<sup>3</sup> RadL: 1.757 cm Nucl.Int.Length: 16.977 cm  
Imean: 286.000 eV

```

--> Element: Fe (Fe) Z = 26.0 N = 55.9 A = 55.85 g/mole
--> Isotope: Fe54 Z = 26 N = 54 A = 53.94 g/mole abundance: 5.84 %
--> Isotope: Fe56 Z = 26 N = 56 A = 55.93 g/mole abundance: 91.75 %
--> Isotope: Fe57 Z = 26 N = 57 A = 56.94 g/mole abundance: 2.12 %
--> Isotope: Fe58 Z = 26 N = 58 A = 57.93 g/mole abundance: 0.28 %
ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

```

Material: G4\_Mn density: 7.440 g/cm<sup>3</sup> RadL: 1.968 cm Nucl.Int.Length: 17.870 cm  
Imean: 272.000 eV

```

--> Element: Mn (Mn) Z = 25.0 N = 55.0 A = 54.94 g/mole
--> Isotope: Mn55 Z = 25 N = 55 A = 54.94 g/mole abundance: 100.00 %
ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

```

Material: G4\_Al density: 2.699 g/cm<sup>3</sup> RadL: 8.896 cm Nucl.Int.Length: 38.877 cm  
Imean: 166.000 eV

```

--> Element: Al (Al) Z = 13.0 N = 27.0 A = 26.98 g/mole
--> Isotope: Al27 Z = 13 N = 27 A = 26.98 g/mole abundance: 100.00 %
ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

```

Material: G4\_Mg density: 1.740 g/cm<sup>3</sup> RadL: 14.386 cm Nucl.Int.Length: 58.242 cm  
Imean: 156.000 eV

```

--> Element: Mg (Mg) Z = 12.0 N = 24.3 A = 24.31 g/mole
--> Isotope: Mg24 Z = 12 N = 24 A = 23.98 g/mole abundance: 78.99 %
--> Isotope: Mg25 Z = 12 N = 25 A = 24.99 g/mole abundance: 10.00 %
--> Isotope: Mg26 Z = 12 N = 26 A = 25.98 g/mole abundance: 11.01 %
ElmMassFraction: 100.00 % ElmAbundance 100.00 %

```

Material: G4\_AIR density: 1.205 mg/cm<sup>3</sup> RadL: 303.921 m Nucl.Int.Length: 710.137 m  
Imean: 85.700 eV temperature: 273.15 K pressure: 1.00 atm

```

--> Element: C (C) Z = 6.0 N = 12.0 A = 12.01 g/mole
--> Isotope: C12 Z = 6 N = 12 A = 12.00 g/mole abundance: 98.93 %
--> Isotope: C13 Z = 6 N = 13 A = 13.00 g/mole abundance: 1.07 %
ElmMassFraction: 0.01 % ElmAbundance 0.02 %

```

```

--> Element: N (N) Z = 7.0 N = 14.0 A = 14.01 g/mole
--> Isotope: N14 Z = 7 N = 14 A = 14.00 g/mole abundance: 99.63 %
--> Isotope: N15 Z = 7 N = 15 A = 15.00 g/mole abundance: 0.37 %
ElmMassFraction: 75.53 % ElmAbundance 78.44 %

```

```

--> Element: O (O) Z = 8.0 N = 16.0 A = 16.00 g/mole
--> Isotope: O16 Z = 8 N = 16 A = 15.99 g/mole abundance: 99.76 %
--> Isotope: O17 Z = 8 N = 17 A = 17.00 g/mole abundance: 0.04 %
--> Isotope: O18 Z = 8 N = 18 A = 18.00 g/mole abundance: 0.20 %
ElmMassFraction: 23.18 % ElmAbundance 21.07 %

```

```

--> Element: Ar (Ar) Z = 18.0 N = 40.0 A = 39.95 g/mole
--> Isotope: Ar36 Z = 18 N = 36 A = 35.97 g/mole abundance: 0.34 %
--> Isotope: Ar38 Z = 18 N = 38 A = 37.96 g/mole abundance: 0.06 %
--> Isotope: Ar40 Z = 18 N = 40 A = 39.96 g/mole abundance: 99.60 %
ElmMassFraction: 1.28 % ElmAbundance 0.47 %

```

```

Material: G4_PLEXIGLASS      density: 1.190 g/cm3   RadL: 34.075 cm   Nucl.Int.Length: 62.751 cm
Imean: 74.000 eV

---> Element: C (C) Z = 6.0 N = 12.0 A = 12.01 g/mole
---> Isotope: C12 Z = 6 N = 12 A = 12.00 g/mole abundance: 98.93 %
---> Isotope: C13 Z = 6 N = 13 A = 13.00 g/mole abundance: 1.07 %
ElmMassFraction: 59.98 % ElmAbundance 33.33 %

---> Element: H (H) Z = 1.0 N = 1.0 A = 1.01 g/mole
---> Isotope: H1 Z = 1 N = 1 A = 1.01 g/mole abundance: 99.99 %
---> Isotope: H2 Z = 1 N = 2 A = 2.01 g/mole abundance: 0.01 %
ElmMassFraction: 8.05 % ElmAbundance 53.33 %

---> Element: O (O) Z = 8.0 N = 16.0 A = 16.00 g/mole
---> Isotope: O16 Z = 8 N = 16 A = 15.99 g/mole abundance: 99.76 %
---> Isotope: O17 Z = 8 N = 17 A = 17.00 g/mole abundance: 0.04 %
---> Isotope: O18 Z = 8 N = 18 A = 18.00 g/mole abundance: 0.20 %
ElmMassFraction: 31.96 % ElmAbundance 13.33 %

```

## B.0.2 Список процессов для нейтронов использованных при моделировании в geant4

```

-----
Hadronic Processes for neutron

Process: hadElastic
Model:          hElasticCHIPS: 19.5 MeV ---> 100 TeV
Model:          NeutronHPElastic: 0 eV ---> 20 MeV
Cr_sctns:       NeutronHPElasticXS: 0 eV ---> 20 MeV
Cr_sctns:       ChipsNeutronElasticXS: 0 eV ---> 100 TeV
Cr_sctns:       GheishaElastic: 0 eV ---> 100 TeV

Process: neutronInelastic
Model:          QGSP: 12 GeV ---> 100 TeV
Model:          FTFP: 9.5 GeV ---> 25 GeV
Model:          Binary Cascade: 19.9 MeV ---> 9.9 GeV
Model:          NeutronHPInelastic: 0 eV ---> 20 MeV
Cr_sctns:       NeutronHPInelasticXS: 0 eV ---> 20 MeV
Cr_sctns:       Barashenkov-Glauber: 0 eV ---> 100 TeV
Cr_sctns:       Barashenkov-Glauber: 0 eV ---> 100 TeV
Cr_sctns:       GheishaInelastic: 0 eV ---> 100 TeV

Process: nCapture
Model:          NeutronHPCapture: 0 eV ---> 20 MeV
Model:          nRadCapture: 19.9 MeV ---> 100 TeV
Cr_sctns:       NeutronHPCaptureXS: 0 eV ---> 20 MeV
Cr_sctns:       G4NeutronCaptureXS: 0 eV ---> 100 TeV
Cr_sctns:       NeutronHPCaptureXS: 0 eV ---> 20 MeV
Cr_sctns:       GheishaCaptureXS: 0 eV ---> 100 TeV

Process: nFission
Model:          NeutronHPFission: 0 eV ---> 20 MeV
Model:          G4LFission: 19.9 MeV ---> 2.88022e+295 J
Cr_sctns:       NeutronHPFissionXS: 0 eV ---> 20 MeV
Cr_sctns:       GheishaFissionXS: 0 eV ---> 100 TeV

```