

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

На правах рукописи
УДК *xxx.xxx*

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 — 2016

Оглавление

	Стр.
Введение	5
Глава 1. Обзор Литературы	8
1.1 Радиационная обстановка на высокоширотных околоземных орbitах.	8
1.1.1 Вопросы, требующие детального исследования	9
1.2 Методы регистрации дозы ионизирующих излучений	9
1.3 Приборы для радиационного мониторинга в космосе	10
1.3.1 Пассивные детекторы	10
1.3.2 Активные детекторы	11
1.3.3 Детекторы нейтронов	16
1.4 Математическое моделирование дозиметрических приборов для космических условий	17
1.4.1 GEANT4	17
1.5 Возможности КА Ломоносов в продолжении ряда российских исследований радиационной обстановки	18
Глава 2. Аппаратура для проведения исследований	21
2.1 Прибор Дэпрон	21
2.1.1 Устройство прибора	21
2.2 Конструктивные особенности прибора	23
2.3 Детекторы	25
2.3.1 Телескоп детекторов	26
2.3.2 Нейтронные детекторы	28
2.4 Аналоговая обработка сигналов	29
2.5 Цифровая обработка сигналов	30
2.6 Связь с внешними системами	34
2.6.1 Питание	35
2.6.2 Программное обеспечение	36
2.6.3 Контрольная проверочная аппаратура	37

2.7 Градуировочные характеристики прибора	38
2.8 Энергетическая чувствительность прибора ДЭПРОН	39
Глава 3. Обработка информации с прибора	41
3.1 Схема обработки информации при КДИ	41
3.1.1 Отладочная программа Depron Terminal	42
3.1.2 Программа DepronExplorerView	43
3.1.3 Структура массивов (базы данных) результатов измерений .	44
3.1.4 Содержание блоков данных ДЭПРОН	45
3.1.5 Периодичность выдачи массивов данных	46
3.2 Обработка наземных данных	46
3.3 Схема обработки и распределения потоков информации полетных данных	47
3.3.1 Восстановление метки времени в массивах данных	47
Глава 4. Результаты	52
4.1 Планетарное распределение потоков частиц, мощности дозы на высоте полета КА а также потоков нейтронов	52
4.2 Распределения мощности дозы в области ЮОАА	52
4.3 Распределения мощности дозы в авроральных областях	52
4.4 Распределение мощности дозы вне радиационных поясов Земли .	53
4.5 Спектры ЛПЭ и распределение мощности эквивалентной дозы . .	53
Заключение	57
4.6 Благодарности	57
Список сокращений и условных обозначений	58
Список литературы	59
Список рисунков	61
Список таблиц	63
Приложение А. Структура данных измерений ДЭПРОН	64
A.1 Блок данных ДЭПРОН А	64
A.2 Блок данных ДЭПРОН S	65

A.3	Блок данных ДЭПРОН Н	66
A.4	Блок данных ДЭПРОН N	66
A.5	Блок данных ДЭПРОН Т	67
A.6	Команды прибора ДЭПРОН	67
A.7	Отладочные сообщения прибора ДЭПРОН	68
	Приложение Б. Листинги программного кода комплекса ДЭПРОН . . .	70

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 задачи:

1. Систематизация и обобщение характеристик радиационных условий на аналогичных орбитах (аппараты БИОН, Прогноз, Cluster) для разработки программы эксперимента;
2. Разработать бортовой дозиметр 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 и провести анализ научной информации с прибора ДЭПРОН.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Первое положение
2. Второе положение
3. Третье положение
4. Четвертое положение

Научная новизна:

1. Впервые разработан исследовательский прибор, сочетающий в едином блоке дозимтер заряженных частиц и нейтронные детекторы;
2. Впервые ...
3. Было выполнено оригинальное исследование спектрометрических свойств спектрометра электронов и протонов

Научная и практическая значимость ...

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается ... Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: Ломоносовских чтениях, международной конференции COSPAR2014, конференции ОМУС-2015 (г. Дубна).

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 нейtronов на лабораторном источнике нейtronов.

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.

Написана программа на базе пакета Geant4 для математического моделирования характеристик прибора Дэпрон, а также программы для моделирования характеристик приборов ДБ-8 и Liulin.

Автором предложена методика проведения моделирования разрабатываемого спектрометра заряженных частиц для определения его спектрометрических качеств. Создана исчерпывающая модель электронных схем спектрометра в си-

стеме Simulink. Подготовлена программа для статистических исследований регистрируемых спектрометром событий и на основе этой программы вычислены оптимальные настройки порогов прибора для протонов.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в XX печатных изданиях [**Sokolov; Gaidaenko; Lermontov; Management**], X из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК [**Sokolov; Gaidaenko**], XX — в тезисах докладов [**Lermontov; Management**].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и двух приложений. Полный объём диссертации составляет 75 страниц с 27 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 19 наименований.

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 [0].

Запуск 2-го и 3-го спутников Земли, с приборами, изготовленными в НИИ-ЯФ МГУ, показал принципиальную возможность полета человека в космос, однако, как можно заметить из данных полученных при начальных исследованиях радиационной обстановки, на орбите земли существуют отдельные области повышения радиационного фона (Рисунок ...). Существование данных областей связано с неоднородностями магнитного поля Земли и приводит к формированию области повышения потоков частиц в Южно Атлантической области [0], названной Южно-Атлантической Аномалией (ЮАА), как показано в статье Вернова С.Н.[0]. В первом приближении для описания магнитного поля Земли на высотах до 2000 км можно использовать представление модели смещенного диполя, этот подход позволяет учитывать ЮАА [Модель космоса 3 том 20стр].

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 $\text{см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) [0].

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 аппараты и их экипаж получают в ЮАА [?].

Другими, важными с точки зрения радиационной обстановки, являются приполярные области [Горчаков Е.В. **Внешний радиационный пояс и полярные сияния. Искусственные спутники Земли, 1961, вып. 9, с. 66-70.**].

При выборе более высокоширотных и высоких орбит дополнительного внимания требуют области полярных шапок, 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 $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1} \text{ стер}^{-1}$ [Исследования космических лучей и земного корпускулярного излучения при полетах ракет и спутников; УФН, т. 70, вып. 4, 585 (1960)]. 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

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, сцинтилляционные детекторы, полупроводниковые детекторы, трековые детекторы. Приборы спектрометры заряженных частиц, спектрометры нейтронов.

Первые эксперименты в космосе по измерению радиационных условий предполагали использование ионизационных камер достаточно большого размера (десятка см^3) к этим приборам относятся Р-16 и ионизационные камеры работавшие на шаттлах [Dorman 2004]. Современные детекторы радиации в основном строятся на основе полупроводниковых детекторов, хотя ионизационные каме-

ры 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 WRMISS, 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 и эмульсионные.

CR-39 тканеэквивалентный трековый детектор [0].

TLD-100, -600, -700, OSLD Люминисцентные детекторы [0].

BR&Bya type NPE FILM фотографическая эмульсия

Pille портативнаячитывающая система[(Apathy et al., 2002, Apathy et al., 2007]

EVARM детектор MOSFET

Матрешка-Р ионизационная камера [Machrafi, R., Garrow, K., Ing, H., et al. Neutron dose study with bubble detectors aboard the International Space Station as part of the MATROSHKA-R experiment. Radiation Protection Dosimetry 133 (4), 200–207, 2009]

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[Маркелов В.В., Редько В.И. Высокочувствительный дозиметр космических излучений. Космические исследования, 1982, т. 19, номер 2, с. 316-319.] и на данный момент являются незаменимым средством любой космической миссии с участием человека.

ДБ-8

Дозиметр Бортовой (ДБ) является развитием ряда дозиметрических инструментов применявшимся на различных космических аппаратах для исследовательских целей и штатной работы. ДБ предназначен для регистрации временных вариаций мощности поглощенной дозы и плотности потока частиц СКЛ, ГКЛ, РПЗ. ДБ является частью Системы контроля радиационной обстановки ПТК и 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/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$);

Внешний вид ДБ представлен на рисунке 1.1.

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.



Рисунок 1.1

- 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 [0]. 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 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 предусилителя и разделяется по 256 энергетическим каналам, начинающимся с 0,02 МэВ до 20 МэВ. Выделение энергии, большее 20 МэВ записывается в наибольший энергетический канал [0].

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 [0]. 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 [0].

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 [0].

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

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 [Beaujean, R., и др. 2002]. Каждый детектор имеет толщину 0,315 мм с чувствительной зоной 6,93 см², зазор в 15 мм между детекторами дает геометрический фактор 824 см²ср

(единица измерения определяется чувствительной площадью детектора и полем зрения) для детектирования совпадающих событий [Beaujean, R., и др. 2002]. 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 [Beaujean, R., и др. 2002].

Когда совпадающее событие записано обоими детекторами, становится возможным определить ЛПЭ падающего излучения. Так как известно, что траектория 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 [Beaujean, R., и др. 2002] с плотностью 2,33 г/см³ [Knoll GF, Radiation detection and measurement, third edition, Wiley: 2000, p802 на странице 357] можно получить приближенное значение ЛПЭ. 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 [Beaujean, R., Kopp, J., Burmeister, S., et al. Dosimetry inside MIR station using a silicon detector telescope (DOSTEL). Radiation Measurements 35, 433–438, 2002].

REM/MPT

Medipix 1, 2 и 3го 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 производится по пиксельно и реализована на Asic микросхеме-архитектуре Timepix.

На данный момент известно, что исследования на борту МКС продолжаются в марте 2017 году, а разработкой новой аппаратуры занимается Европейская компания Advacam. Разрабатывается прибор Miniaturized Particle Telescope

(MPT)[**Fry2016**] - представляет собой телескоп двух детекторов построенный на основе Radiation Environment Monitor (REM)[**Kroupa2015**], или проще Timepix технологии. Для миссии на МКС прибор оснащен двумя USB коннекторами и подключается к ноутбуку, данные будут сбрасываться 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.

MSL/RAD

дописать

RRMD-III Determines path length with PSDs [Doke et al. (2001, 2004)]

Liulin-5 Assumes mean-chord-length across FOV in LET calculation [Semkova et al. (2004, 2007)]

Liulin Phobos Assumes mean-chord-length; orthogonal telescopes [Dachev et al. (2009)]

CPDS Determines path length with PSDs; can determine species for C, N, and O particles [Lee et al. (2007)]

TEPC Assumes mean-chord-length for all angles; LET assumed equal to y (Lineal energy) [Badhwar et al. (1996), Gersey et al.(2002, 2007)]

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 ^3He Koshiishi et al. (2007), Matsumoto et al. (2001)

SEISS

Группа радиационных приборов SEISS установлена на GOES-R [**Goodman2013**], который планируется к запуску 19 ноября 2016 года в 17:42EST. 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). Данные из Seiss будут использоваться для предупреждений о опасных явлениях космической погоды, а также улучшит прогнозы потоков энергичных частиц.

1.3.3 Детекторы нейтронов

Достоверно известно что нейтроны также вносят ощутимый вклад в эквивалентную дозу и по разным оценкам достигает 20-30% [0], а для эффектов обусловленных ядерным взаимодействием (в том числе повреждения ДНК, эффектов пробоя в микроэлектронике и биологической эквивалентной дозе) может достигать 50-60% [0]. Полупроводниковые детекторы имеют низкую чувствительность к нейтронному излучению и их не достаточно для регистрации ожидаемых потоков нейтронов. В НИИЯФ МГУ также разрабатывались приборы для контроля уровня нейтронного излучения /[27],[0]

Особенно интересны радиобиологические исследования проведенные ИМБП [0] на МКС с использование тканеэквивалентного фантома Матрешка, показывающие что вклад нейтронов в дозу может достигать 28%. Исследования при этом производились по методике определения количества пузырьков в “Бабблдозиметре”. [26] Севастьянов В.Д., Тарновский Г.Б., Лягушин В.И. Измерение энергетического спектра нейтронов на орбитальной станции “МИР”. Космические исследования, т.35, №2, 1997, с. 216-220. [27] М.И. Панасюк, П.И. Шаврин, О.Ю. Нечаев, Л.С. Братолюбова-Целукидзе, Т.Р. Маркелова, М.А. Сергеева. Многоцелевой детекторный модуль для регистрации нейтронов в околоземном пространстве. Препринт 90-13/159 НИИЯФ МГУ, 1990 г.

Также известны счетчики нейтронов, использующиеся на орбите вокруг марса [**Sanin2012**].

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 [Luszik-Bhadra M. et . al . , 2009, Hassler D et . al . , 2008]. На последующих шагах разработки аппаратуры математические методы используются при верификации результатов калибровочных и градуировочных испытаний на источниках ИИ и ускорителях заряженных частиц [Zeitlin C et . al , 2010]. Также одним из основных применений является уточнение функции отклика прибора во время штатной работы [C. Zeitlin et al . 2010].

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[0]

SHIELD система расчетов доз за секционированной защитой

PHITS Система расчета перемещений частиц и тяжелых ионов, разработана в Японии и Австрии

FLUKA система широко использующаяся в CERN для широкого круга задач и первую очередь для медицинских приложений[0].

Далее рассмотрен только пакет Geant4, так как в настоящей работе именно этот пакет 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 тех-

нологии [0]. 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 и SSAT).

Следует отметить что многие из упомянутых программ организованы в единый комплекс Spenvis, и особенно применим для нашего случая Geant4 Radiation Analysis for Space (GRAS).

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, полный список и результаты этих экспериментов можно найти в монографии Ю.И. Логачева 2007г [0]. 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 в одном аппарате, такое сосредоточение позволяет получить уникальную информацию о всех 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 отфильтровать сбойный явления связанные с повышением уровня радиации и отделить их от ценных данных. И наоборот, 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 исследова-

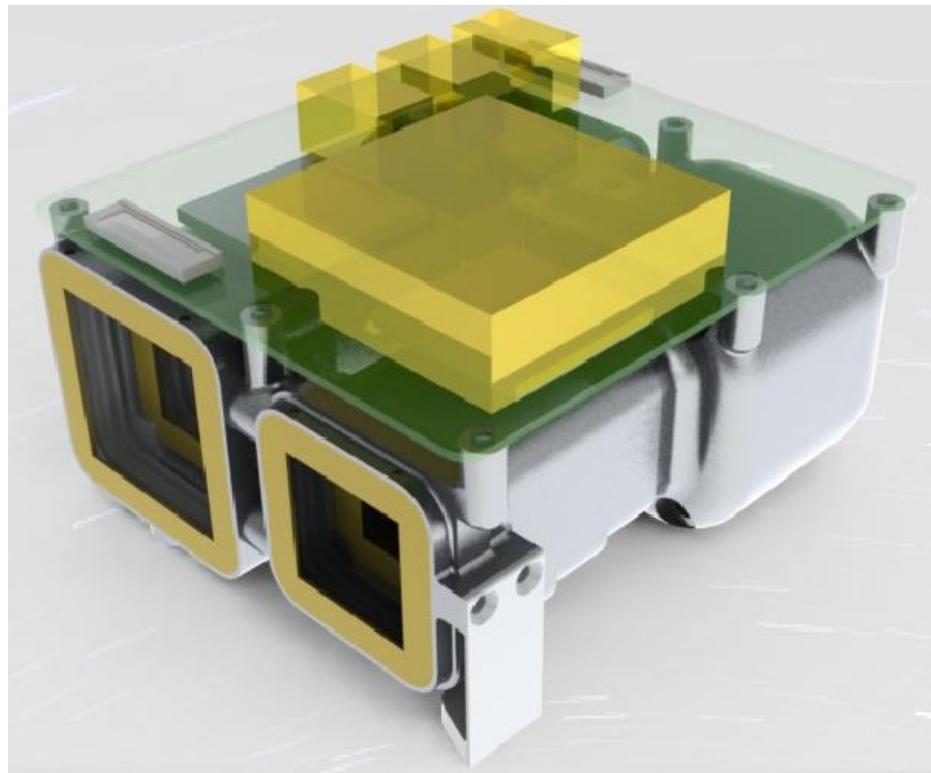


Рисунок 1.2

ния магнитных полей содержащий детектор электронов и ионов (EPD-E и EPD-I), наряду с магнитометром. Такая тройка приборов позволяет при небольшом весе проводить измерения множества параметров радиационной обстановки.

Параметры прибора ELFIN:

Two sensors to differentiate electron and ion populations Electron range: 50keV to 4Mev Ion range: 50keV to 500keV Aluminum and Tantalumshielding: Usable in radiation belt Geometric Factors: Electron: 0.04cm²sr Ion: 0.003cm²sr dE/E < 50The mass is < 1.5kg including 1.2cm-thick Al+Ta wall detector vault but no cover Small module size 85 x 80 x 80 mm

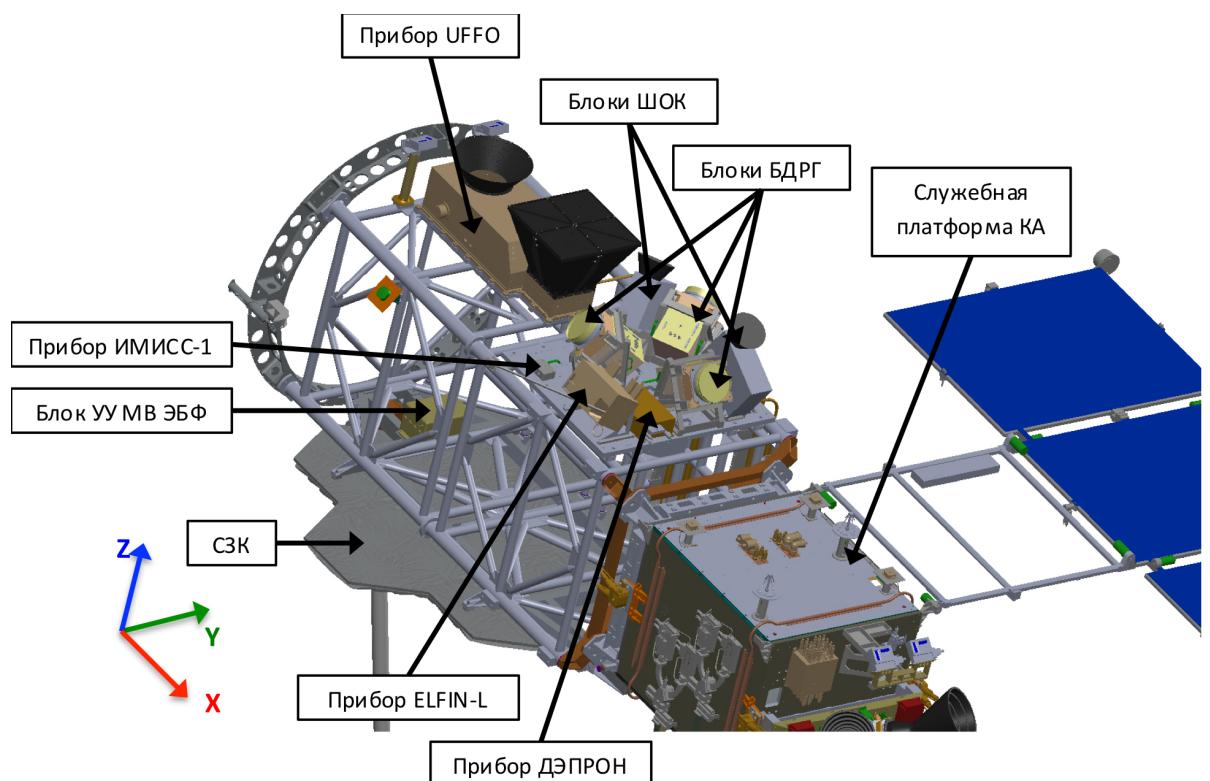


Рисунок 1.3 — Внешний вид спутника Ломоносов

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

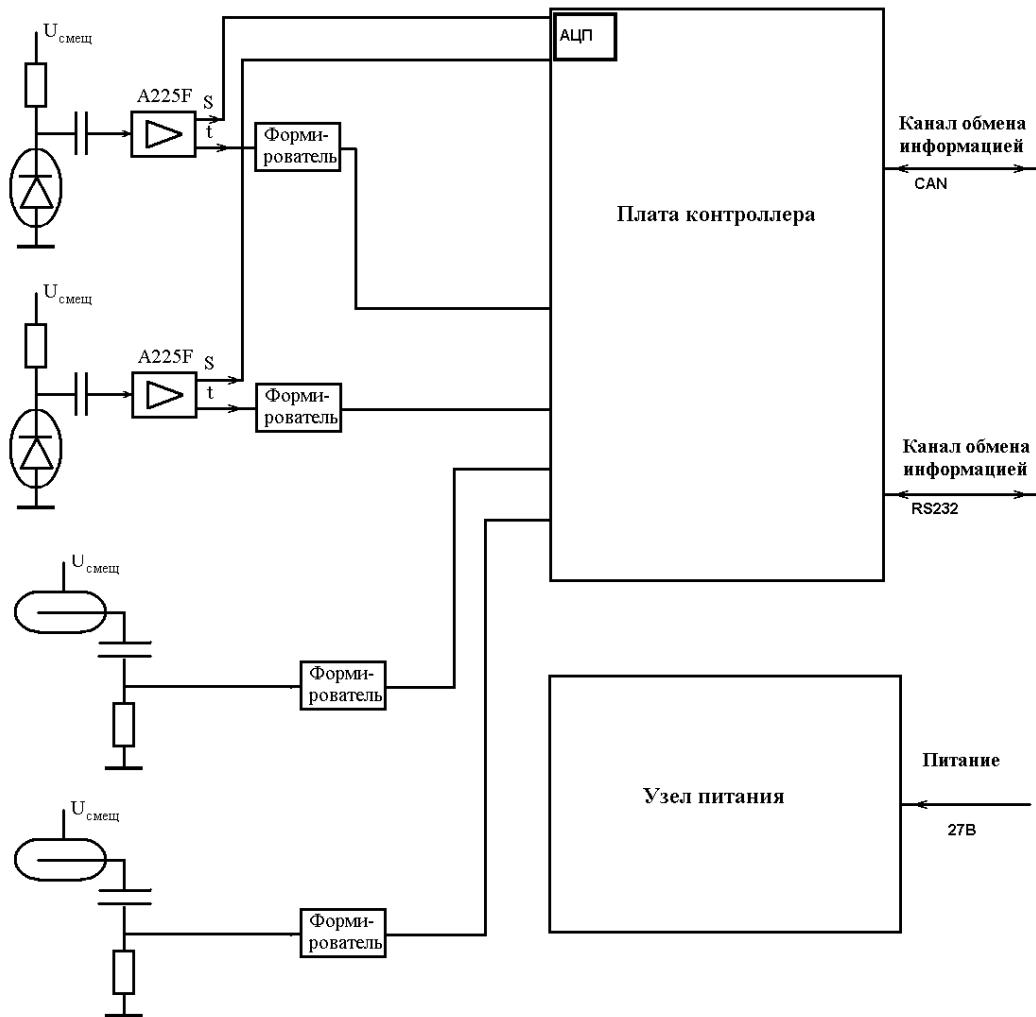


Рисунок 2.1 — Блок-схема прибора ДЭПРОН

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.

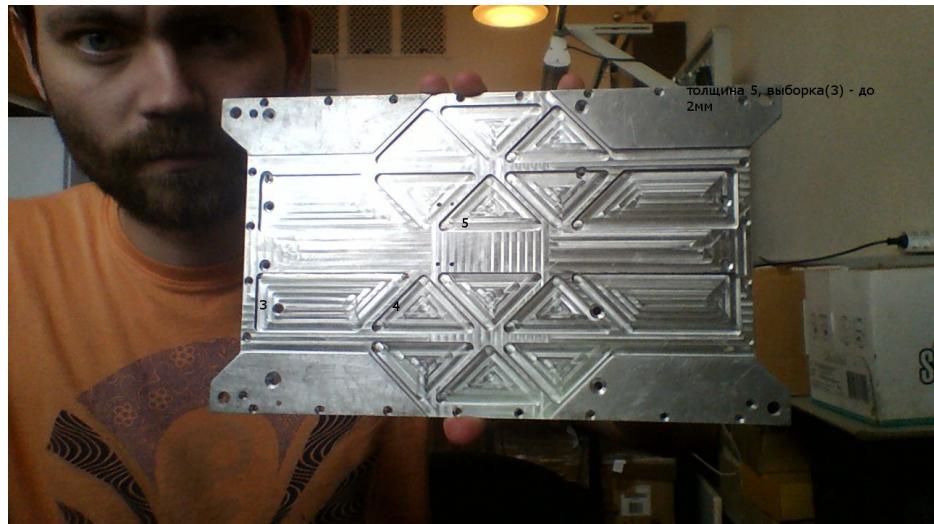


Рисунок 2.2 — Вариант размещения выборок в днище прибора ДЭПРОН.

Впоследствии данный вариант переработан исходя из конструктивных соображений крепления модулей электроники и улучшения теплосброса источников питания, через термоконтакт 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 контрольстыковки разъемов с помощью

короткозамкнутых линий, а также дублирование информационных и токонесущих линий.

Дополнительно на лицевую панель прибора вынесен технологический разъем РС 19 ХТЗ, 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



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

2.3 Детекторы

Дозиметр заряженных частиц выполнен на кремниевых ионно-имплантированных Д1 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.

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.

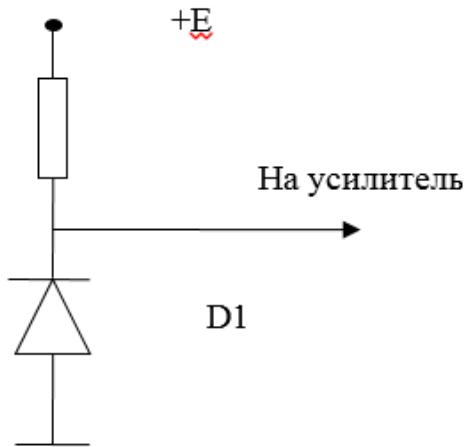


Рисунок 2.4 — Схема включения детектора.

+Еп источник напряжения;

Rcm 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)

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.

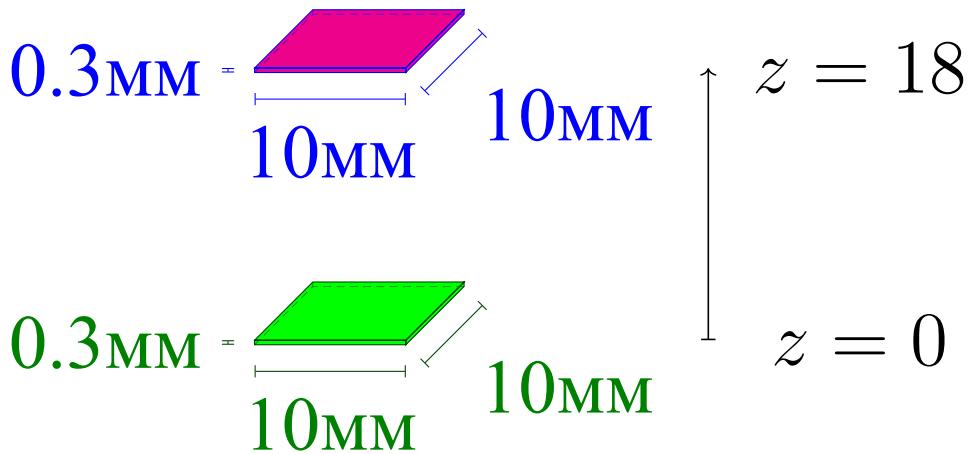


Рисунок 2.5 — Телескоп детекторов прибора ДЭПРОН, масштаб 1:2

Расчет геометрического фактора телескопа

В соответствии с работой :[Analytical derivation of the geometric factor of a particle detector having circular or rectangular geometry G R Thomas and D M Willis SRC, Radio and Space Research Station, Ditton Park, Slough, SL3 9JX MS received 12 October 1971, in revised form 18 November 1971] 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 4π 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.

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

$Z := 1.8$

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

$g1 = 0.145$

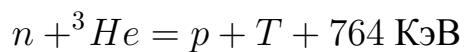
$$ksi1 := \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot 1} \cdot \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \frac{1}{\left[Z^2 + (x1 - x2) \cdot (x1 - x2) + (y1 - y2) \cdot (y1 - y2) \right]^{\frac{3}{2}}} dx1 dx2 dy1 dy2$$

$ksi1 = 0.043$

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:



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. [0]

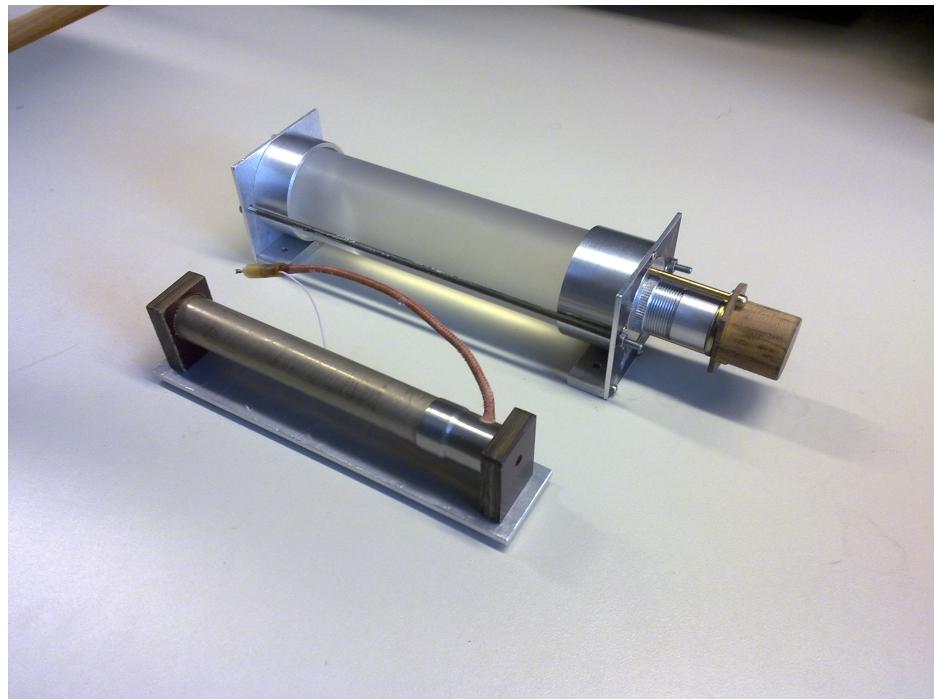


Рисунок 2.7

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 предуслеления и детектирования на одной плате и закрыть единым экраном от электромагнитных помех.

Сигнал с полупроводникового детектора поступает на зарядочувствительный предусилителя A225F, фирмы AMPTEC, 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 обработки 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

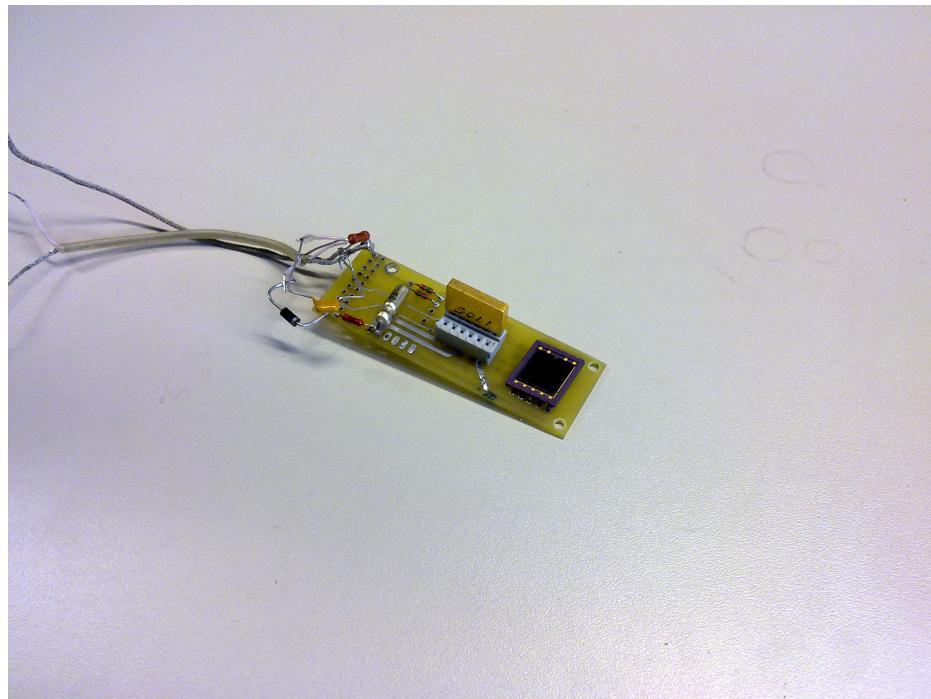


Рисунок 2.8 — Рисунок А225F

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 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, прове-

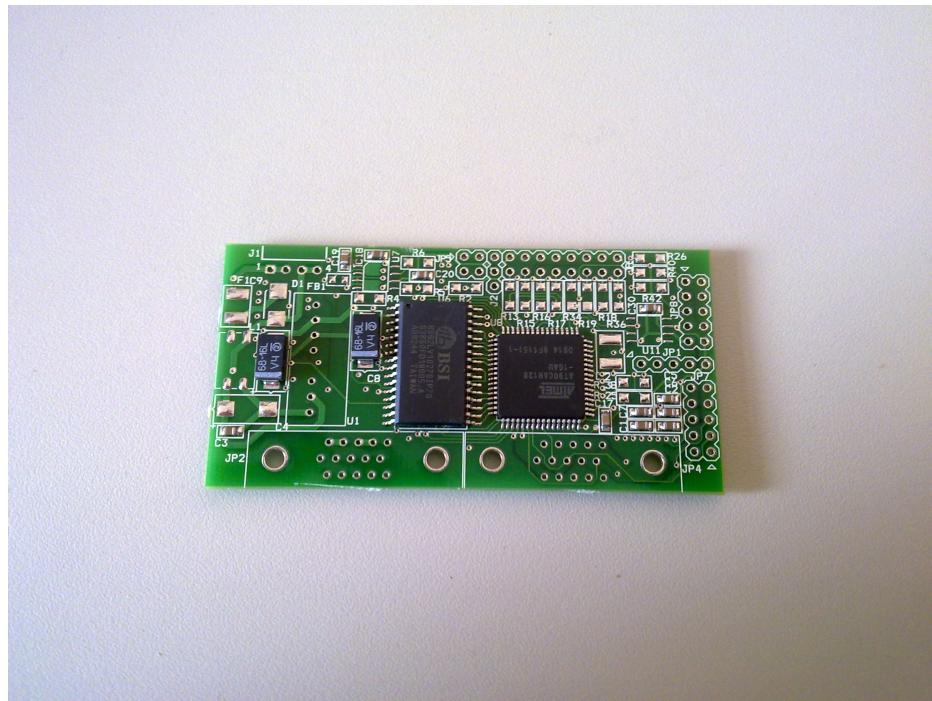


Рисунок 2.9

данные 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 быстрого захвата сигналов с выхода предусилителя решалась включением встроенного в АЦП устройства выборки и хранения (англ. “track and hold circuit”) в момент получения контроллером сигнала от таймингового выхода предусилителя. Для этого прерывания контроллера настроены при получении такого сигнала на

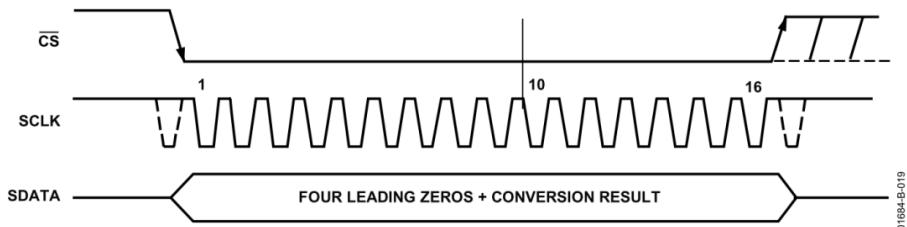


Рисунок 2.10 — Тактирование использованного в приборе ДЭПРОН режим работы АЦП (AD7495), по материалам: «1 MSPS, 12-Bit ADCs AD7475/AD7495», One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A., 2005
Analog Devices, Inc.

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

Рисунок Блок схема подключения АЦП к контроллеру версия 1.

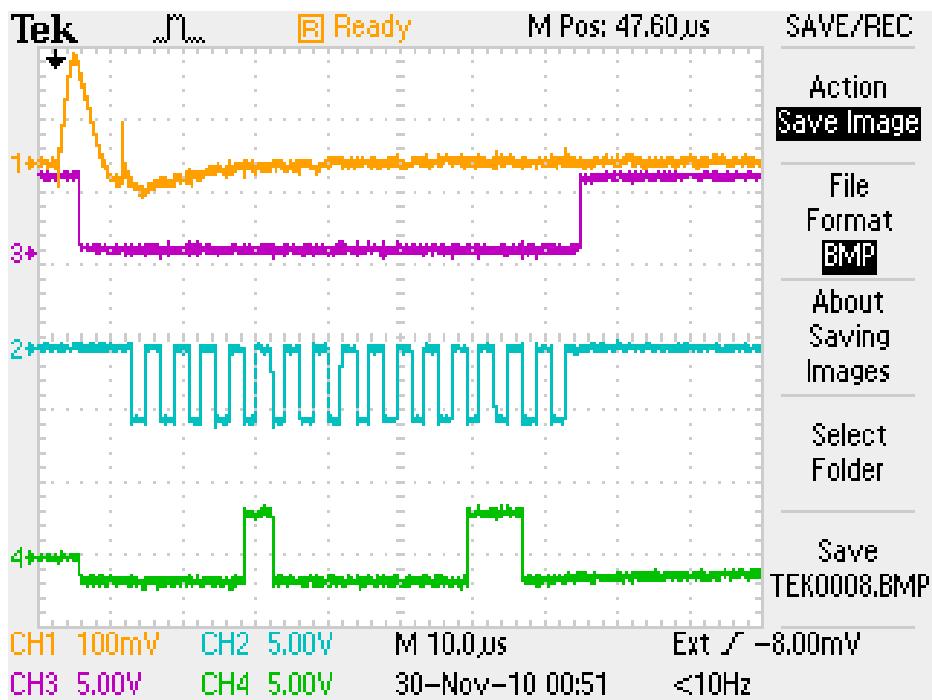


Рисунок 2.11 — Осциллографма: регулярность тактирующего сигнала, подающегося на SCLK АЦП.

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.

Рисунок Блок схема подключения АЦП к контроллеру версия 2.

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 минималь-

ными 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 отрабатывает постоянно.

Таблица Распределение битов в регистре прерывания

Процедура обработки данных с детекторов

Основная часть программной обработки данных с детекторов прибора производится в процедуре `Detectors_Handling` **Б Блок схема работы процедуры `Detectors_Handling`**

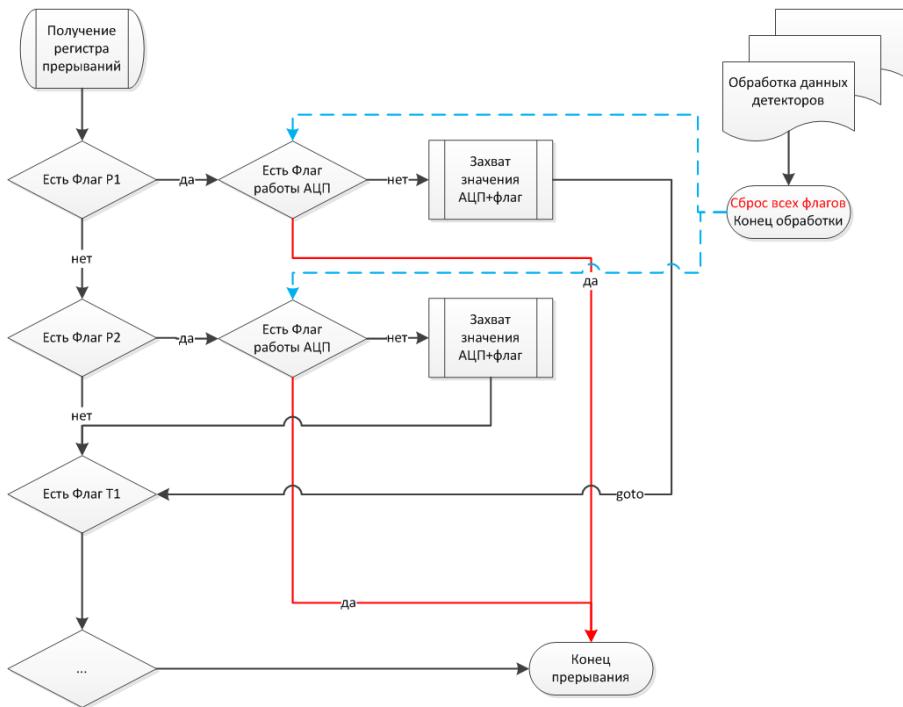


Рисунок 2.12 — Блок схема работы процедуры Ext Interrupt, требует обновления!

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

Рис.1. Схема подключения КПА для проверки функционирования прибора ДЭПРОН.

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 промаркированных в соответствии с каналами прибора ДЭПРОН на которые передаются тестовые сигналы с генератора:

- X1
- X2...

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

2.7 Градуировочные характеристики прибора

Градуировка прибора ДЭПРОН проводится с использованием известной зависимости [2.3](#)

$$D = \frac{E}{m} = \frac{w_i \cdot \frac{q}{e}}{m} = \frac{w_i \cdot \Delta U \cdot \sum K \cdot C}{m \cdot e \cdot \eta} = V \cdot \sum K \quad (2.3)$$

по материалам «ПРИБОР ДЭПРОН, В.В. Бенгин, О.Ю. Нечаев, И.А. Брильков, А. Амелошкин, 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

η суммарный градуировочный коэффициент тракта усиления до АЦП

ΔU шаг дискретизации АЦП

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

Детектор1: 3,4141 КэВ/канал

Детектор2: 4 КэВ/канал - очень большой разброс по калибровкам - не могу понять почему: 15.4 – 16.3 КэВ/канал. **Необходимо найти исходные данные калибровок.**

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/см². 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 типа излучений, были проведены только калибровки детектирующих узлов на радиоактивных источниках.

По соображениям Бенгина В.В. наиболее чувствительный параметр — скорость счета детектора 1. 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 проведе-

ны оценки с помощью данных по проникновению электронов и протонов с сайта NIST [0], физическая модель лежащая в основе этих данных основывается на теории Бете[0] с поправкой Штернхаймера [0] на плотность вещества и подробно описана в ряде статей этого института [0].

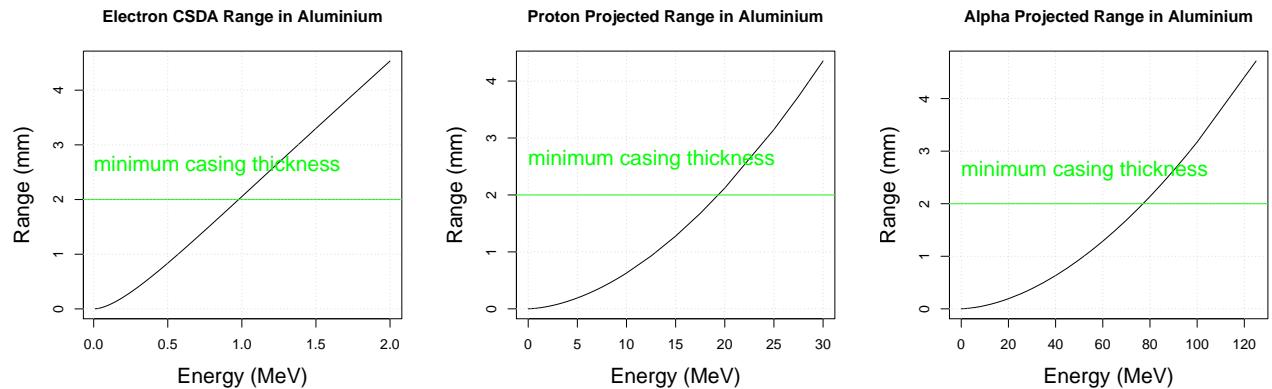


Рисунок 2.13 — Графики средних пробегов заряженных частиц для алюминия.

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 $0,65 \text{ г/см}^2$, была повышена предварительная оценка порога нижних 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.

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.

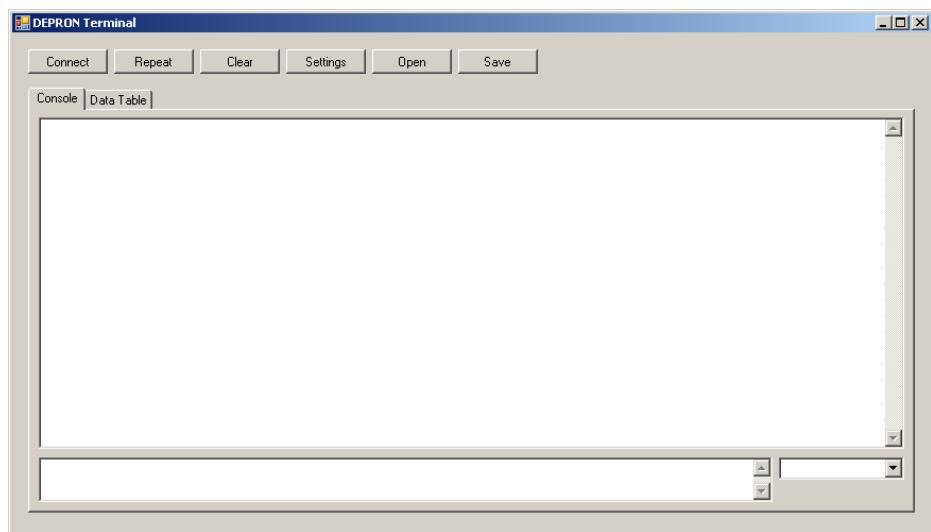


Рисунок 3.1 — Интерфейс программы **Depron Terminal**

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

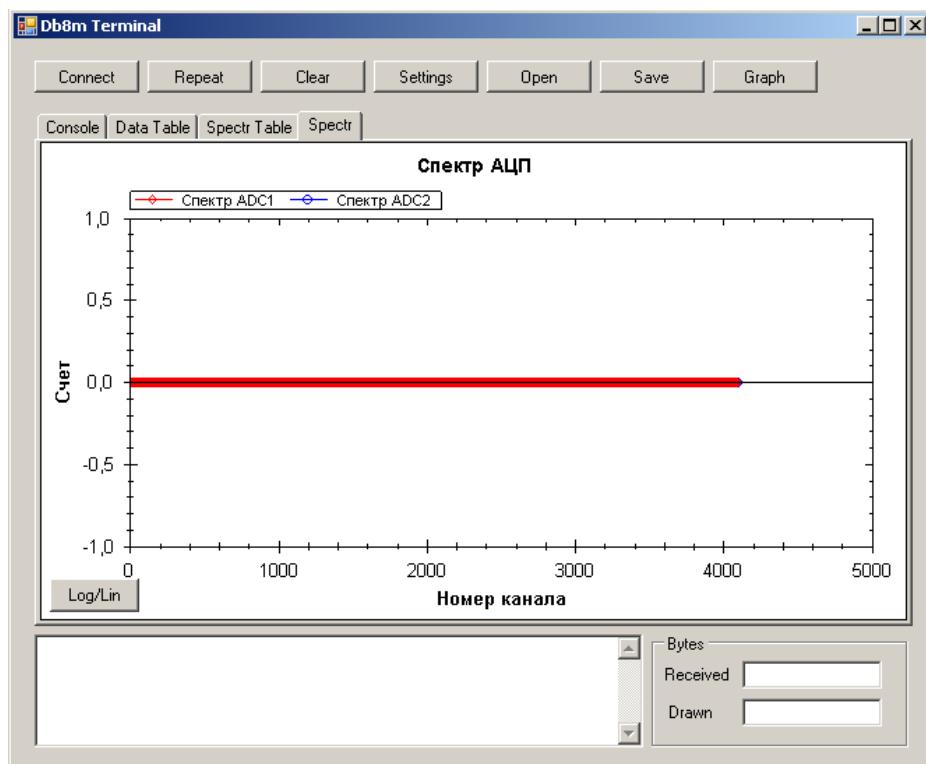


Рисунок 3.2 — Интерфейс программы **DB8mTerminal**

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-

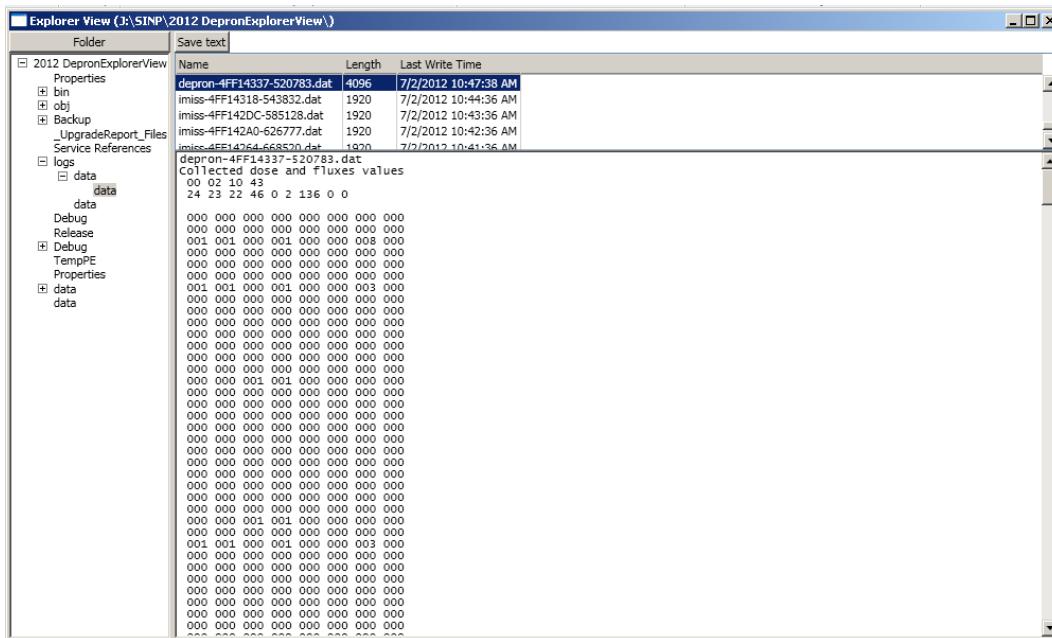


Рисунок 3.3 — Интерфейс программы **DepronExplorerView**

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

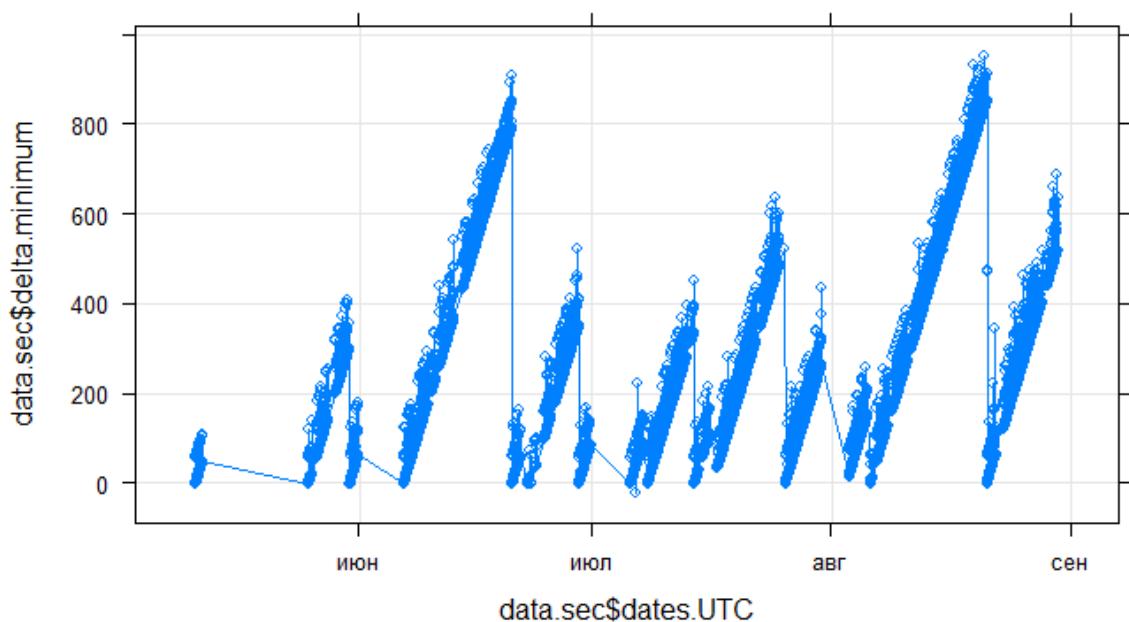


Рисунок 3.4 — Временной ряд разницы приборного времени и меток начала записи в файл. Показаны первые шесть месяцев после запуска спутника Ломоносов, отключения прибора соответствуют циклограмме летных испытаний, а пробелы в данных в начале месяца соответствуют ошибочным номерам дня в месяце.

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](#).

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

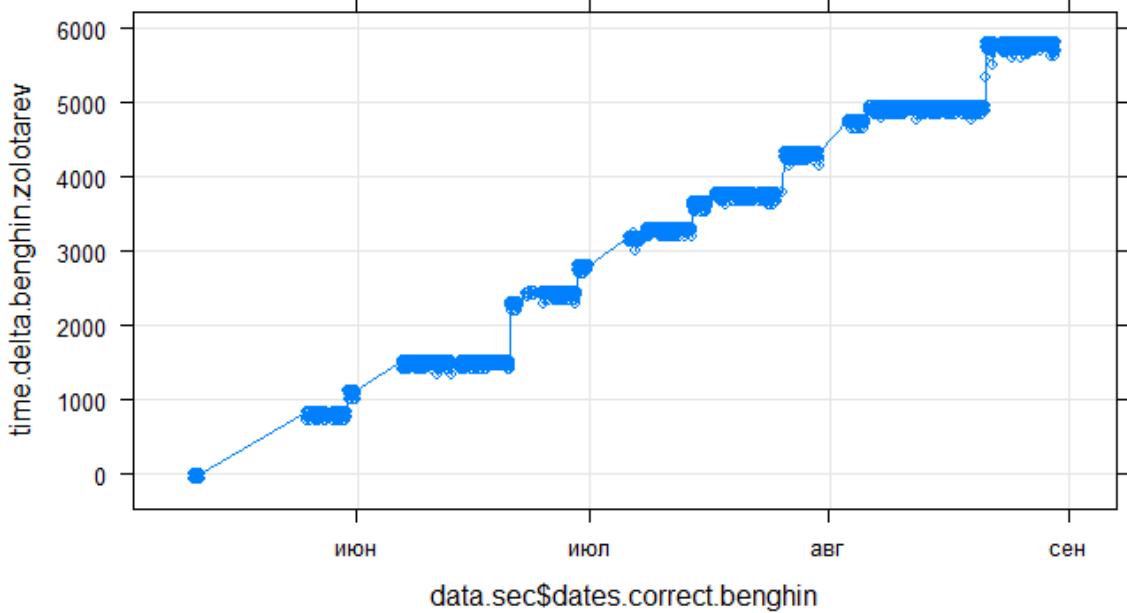


Рисунок 3.5 — Временной ряд разницы калиброванного приборного времени и меток начала записи в файл.

ния записи файловой системы. Оказалось что разница времени меток последней записи сильно отличается 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.

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.

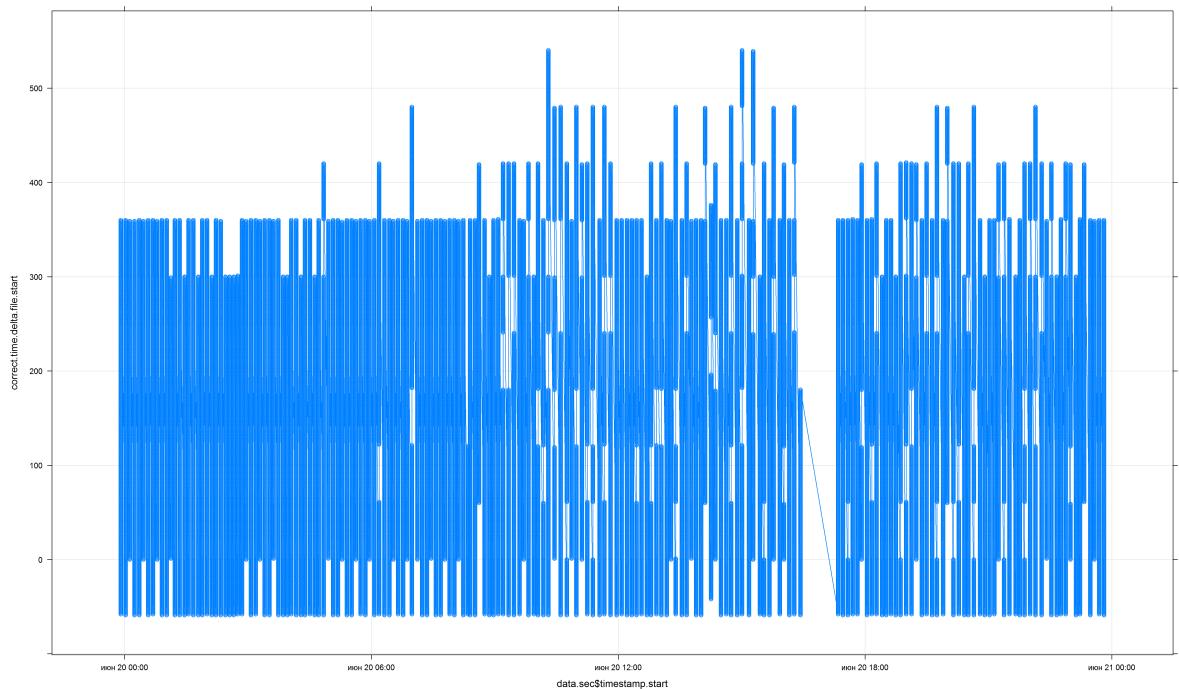


Рисунок 3.6 — Пример восстановления меток времени 20 июня 2016 года

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.

Глава 4. Результаты

В результате полугода работы прибора ДЭПРОН накоплен большой массив данных - 25 тысяч файлов бинарных данных, общим объемом 100 МБайт. Первичные данные были распакованы и сохранены в текстовом виде. Далее информация от прибора 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. 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 МакИлвайна,

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

4.2 Распределения мощности дозы в области ЮАА

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 При первичной обработке данных были построены графики 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.

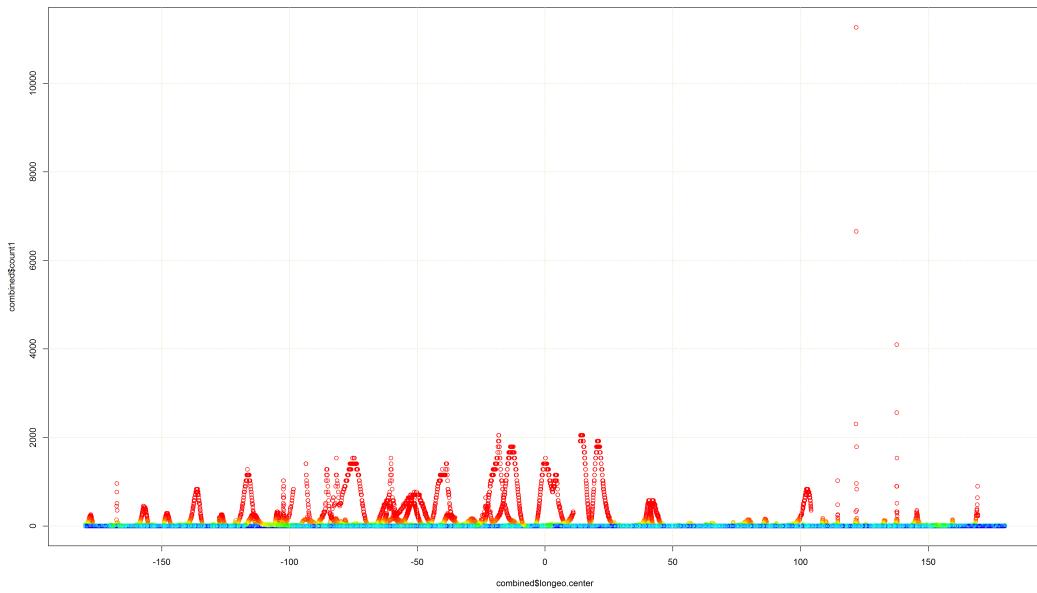


Рисунок 4.1

Рисунок 4.2

4.4 Распределение мощности дозы вне радиационных поясов Земли

4.5 Спектры ЛПЭ и распределение мощности эквивалентной дозы

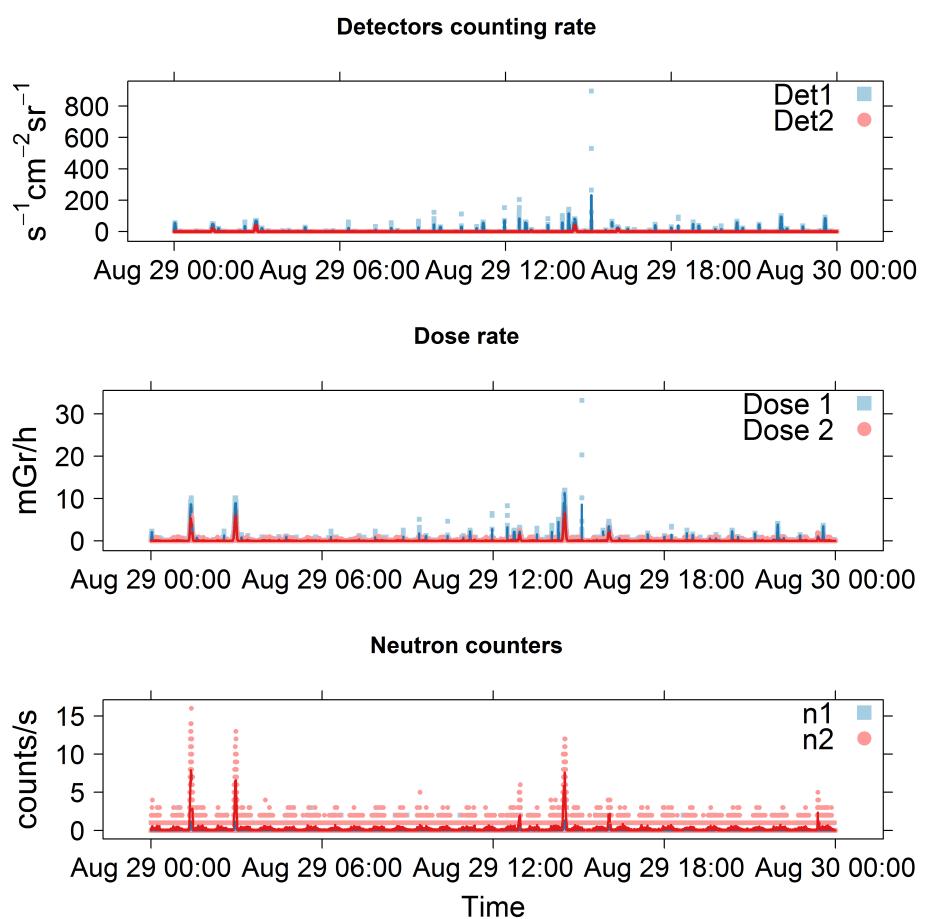


Рисунок 4.3

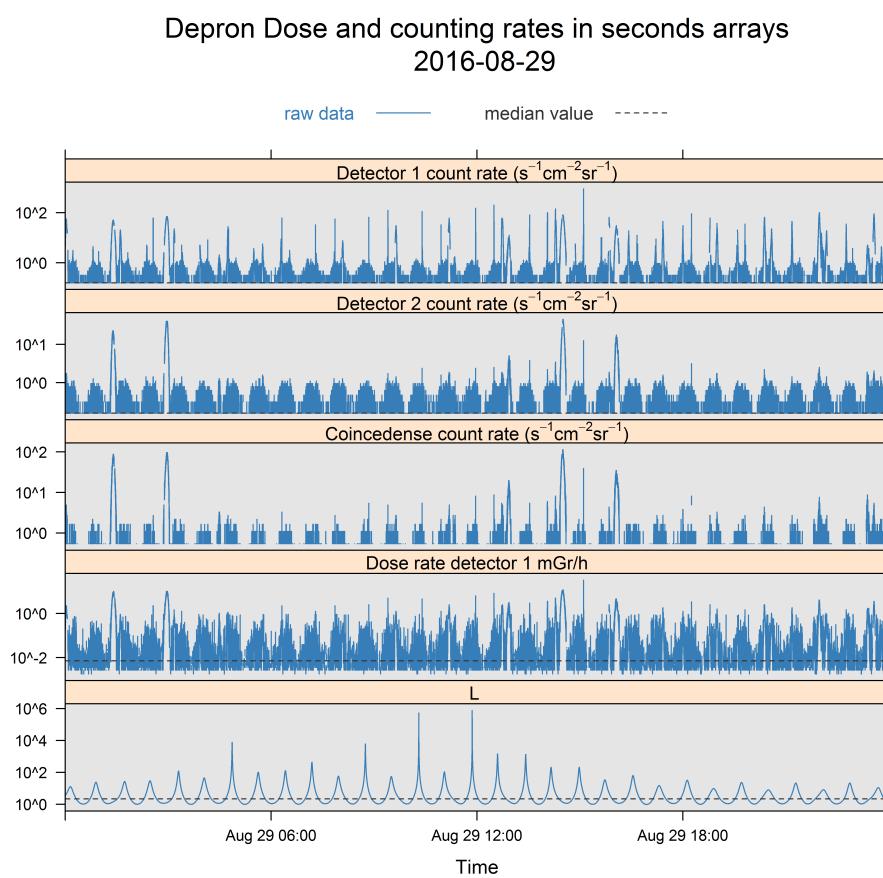


Рисунок 4.4

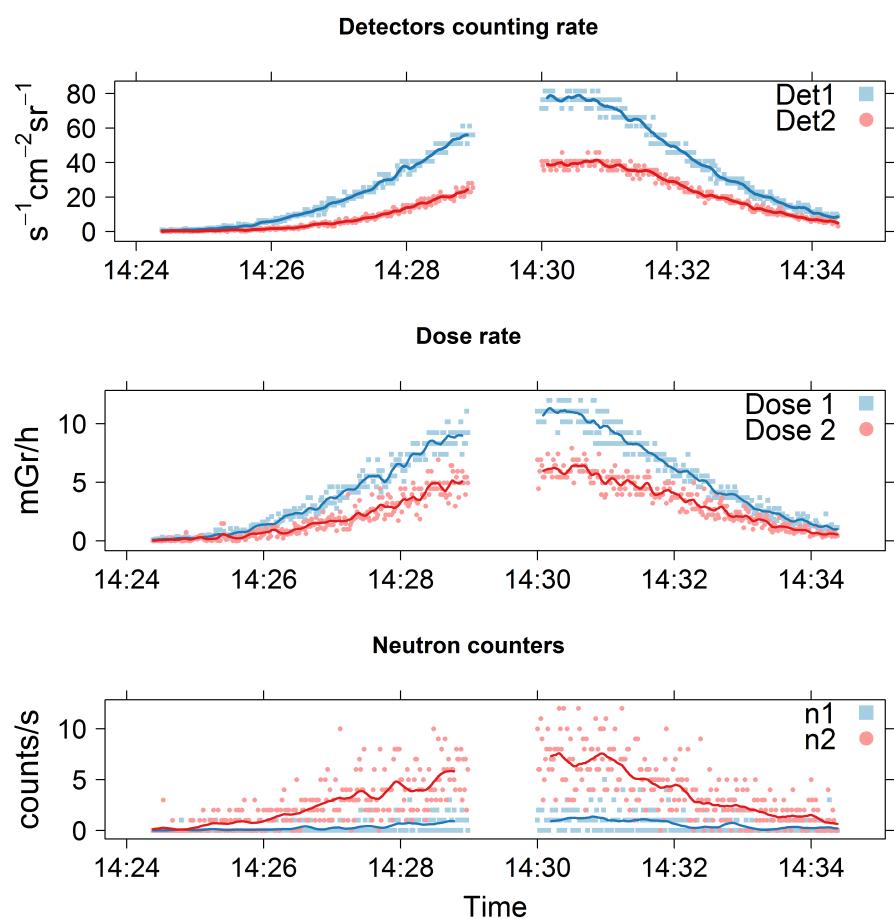


Рисунок 4.5

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем.

1. На основе анализа ...
2. Численные исследования показали, что ...
3. Математическое моделирование показало ...
4. Для выполнения поставленных задач был создан ...

4.6 Благодарности

Данная работа была бы невозможна без всемерной поддержки моей жены Золотаревой Любови Святославовны.

Список сокращений и условных обозначений

АЦП - Аналогово-цифровой преобразователь

ДЭПРОН - Дозиметр Электронов, Протонов и Нейтральных излучений

ДБ - Дозиметр Бортовой

ЮАА - Южно-Атлантическая Аномалия

КА - космический аппарат

Список литературы

0. *Логачев Ю. И.* Исследование космоса в НИИЯФ МГУ. Первые 50 лет космической эры. — КДУ Москва, 2007. — С. 176.
0. Discovery of an internal radiation belt at an altitude of 320 km in region of South Atlantic magnetic anomaly / S. Vernov [и др.] // Doklady Akademii nauk SSSR. — 1961. — Т. 140, № 5. — С. 1041—&.
0. 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).
0. 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).
0. 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).
0. Calibration results obtained with Liulin-4 type dosimeters / T. Dachev [и др.] // Advances in Space Research. — 2002. — Т. 30, № 4. — С. 917—925. — DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00411-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00411-8).
0. 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>.
0. 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).
0. 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).

0. *Shurshakov V., Semkova J., Academy B.* Comparison of dose equivalents from charged particles and neutrons inside the spherical tissue- equivalent phantom on ... — 2016.
0. 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).
0. The physics models of FLUKA: status and recent development / A. Fasso [и др.] // arXiv. — 2003. — Т. hep-ph. — С. 10. — arXiv: [0306267 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0306267). — URL: <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0306267>.
0. 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).
0. 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).
0. *NIST ESTAR*. — URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> (дата обр. 15.11.2016).
0. *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).
0. *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).
0. *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).
0. *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).

Список рисунков

1.1		12
1.2		19
1.3	Внешний вид спутника Ломоносов	20
2.1	Блок-схема прибора ДЭПРОН	22
2.2	Вариант размещения выборок в днище прибора ДЭПРОН.	23
2.3	Внутренняя компоновка модулей прибора ДЭПРОН. Вид сверху со снятой крышкой прибора.	25
2.4	Схема включения детектора.	26
2.5	Телескоп детекторов прибора ДЭПРОН, масштаб 1:2	27
2.6	Расчет геометрического фактора телескопа в системе Mathcad	28
2.7		29
2.8	Рисунок A225F	30
2.9		31
2.10	Тактирование использованного в приборе ДЭПРОН режим работы АЦП (AD7495), по материалам: «1 MSPS,12-Bit ADCs AD7475/AD7495», One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A., 2005 Analog Devices, Inc.	32
2.11	Осциллограмма: регулярность тактирующего сигнала, подающегося на SCLK АЦП.	33
2.12	Блок схема работы процедуры Ext_Interrupt, требует обновления!	37
2.13	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	40
3.1	Интерфейс программы Depron Terminal	42
3.2	Интерфейс программы DB8mTerminal	43
3.3	Интерфейс программы DepronExplorerView	44
3.4	Временной ряд разницы приборного времени и меток начала записи в файл.	48

3.5	Временной ряд разницы калиброванного приборного времени и меток начала записи в файл.	50
3.6	Пример восстановления меток времени 20 июня 2016 года	51
4.1	Потокизаряженных частиц в детекторе 1	53
4.2		53
4.3		54
4.4		55
4.5		56

Список таблиц

2.1 Полупроводниковые детекторы прибора ДЭПРОН (по материалам ТУ)	26
---	----

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` [описание](#)

```

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;
20    K= Digital_Compression(J);
        if (K<2) K=2; if(K>63) K=63;
        Spectra[2][K]++;
        J= (((dataADC+0x00030000)>>19) & 0X00000FFF); //(<short>)
25    Dose_Comp_2+=J;
        K= Digital_Compression(J);
        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;
56      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)
# , 12:00

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

```

Листинг Б.2 Алгоритм коррекции ухода приборных часов на R

```

\end{ListingEnv}
\begin{lstlisting}[language={Renharmed}, ]
# time correction
5
data.sec <- data.sec%>%
  mutate(dates.UTC = data.sec$dates - 60*60*3)

data.sec <- data.sec[,-(17:-22)]
10
#
kt = (56.77315002) /86400

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

20 #
  data.sec$timestamp.start <- gsub("depron-", "0x", data.sec$filename)
  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')
25
#
data.sec$timestamp.end <-
  as.POSIXct(strptime(data.sec$timestamp, format="%d.%m.%Y %H:%M"))

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

35 data.sec <- data.sec %>%
  group_by(filename) %>%
  distinct(filename) %>%
  summarise(delta.minimum = min(time.delta.file.start)) %>%
  left_join(data.sec, ., by = 'filename')
40
# table(data.sec$delta.minimum)
  data.sec$time.correct.zolotarev <- data.sec$dates.correct.benghin -

```

```

data.sec$delta.minimum

45 # 120  —

,
#
data.sec <- mutate(data.sec, lag.delta = delta.minimum - lag(delta.minimum))
table(data.sec$lag.delta)
50 data.sec.switches <- filter(data.sec, abs(lag.delta) >120)

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) )))

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

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

library('modeest')

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

data.sec <- data.sec %>%
  mutate(dates.correct = dates.correct.benghin - mfv.delta)
80

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

```

```
85 | data.sec$dates.correct.copy <- as.POSIXct(data.sec$dates.correct, 'GMT')
| #
| #
| data.sec$correct.time.delta.file.start <- as.numeric(data.sec$dates.correct -
| data.sec$timestamp.start, units = "secs")
```