

На правах рукописи

Хулапко Сергей Владимирович

**Метод определения дозовых нагрузок от нейтронного излучения на
Международной космической станции**

01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

19 АПР 2017

Автор:



Москва - 2017

На правах рукописи

Хулапко Сергей Владимирович

**Метод определения дозовых нагрузок от нейтронного излучения на
Международной космической станции**

01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Автор:



Москва - 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Государственном научном центре Российской Федерации – Институте медико-биологических проблем Российской академии наук (ГНЦ РФ – ИМБП РАН)

Научный руководитель:

Вячеслав Александрович Шуршаков, кандидат физико-математических наук, ГНЦ РФ ИМБП РАН, г. Москва

Официальные оппоненты: **Стожков Юрий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Физического института им. Лебедева РАН;

Козырев Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института космических исследований РАН

Ведущая организация: Акционерное общество «Радиевый институт имени В.Г. Хлопина»

Защита диссертации состоится "24" мая 2017 г. в 15 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.130.07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, дом 31, телефон (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>

Автореферат разослан "13" апреля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор



С.Е. Улин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Радиационная опасность обоснованно считается одним из основных факторов, препятствующих длительному пребыванию человека в космосе и ограничивающих осуществление длительных межпланетных миссий без применения специальных средств защиты. Согласно российским нормативным документам ([1], [2]) при длительных пилотируемых космических полетах должен осуществляться непрерывный контроль радиационной обстановки внутри пилотируемых космических аппаратов (ПКА) и орбитальных станций, на всех этапах космического полета необходимо отслеживать эквивалентную дозу облучения на критические органы космонавта: хрусталик глаза, кожу, кроветворную систему, центральную нервную систему (ЦНС) и т.д.

Актуальность работы. В настоящее время на борту Российского сегмента (РС) МКС мониторинг осуществляется штатными средствами: системой радиационного контроля (СРК) ([3]) и детекторы «Пилле-МКС» [4]. Кроме того, согласно долгосрочной программе научно-прикладных исследований на РС МКС проводится космический эксперимент (КЭ) «Матрешка-Р», целью которого является исследование динамики радиационной обстановки на трассе полета и в отсеках МКС.

Однако, как штатные средства радиационного контроля, так и большая часть детекторов и дозиметров КЭ «Матрешка-Р» нечувствительны к нейтронному излучению, и, следовательно, не позволяют оценить вклад нейтронов в общую эквивалентную дозу, получаемую экипажем МКС. Между тем, по различным данным этот вклад может достигать от 5 до 60% от общей дозы [5].

Актуальность настоящей работы обуславливается следующими факторами:

а) пределы доз для космонавтов существенно превышают пределы для наземного персонала, при этом непрерывный бортовой и индивидуальный контроль является обязательным. При полетах за пределы магнитосферы Земли доза облучения космонавтов будет увеличиваться;

б) необходимость разработки новых методов измерения дозовых нагрузок и новых методов защиты от ионизирующего излучения космического пространства (ИИ КП), в том числе нейтронов, при будущих межпланетных полетах;

в) невозможность регистрации нейтронного излучения в отсеках МКС имеющимися штатными средствами дозиметрического контроля и научной аппаратурой в рамках космических экспериментов;

д) большой разброс данных о вкладе нейтронного излучения в общую эквивалентную дозу внутри ПКА в зависимости от различных параметров (от 5-8% до 60%).

Цель работы состояла в разработке метода исследования основных характеристик нейтронного излучения (энергетического спектра, эквивалентной дозы и вклада в дозу от

нейтронов различной энергии) внутри отсеков МКС и анализе зависимости этих характеристик от различных факторов (гелиофизических параметров, условий защищенности модулей и параметров орбиты МКС).

Научная новизна. В диссертационной работе:

- **впервые** разработан и реализован метод, позволяющий выявить качественно новую закономерность исследуемого явления, заключающуюся в дополнительной генерации высокоэнергичных нейтронов внутри исследуемых объектов; позволяющий повысить точность измерений энергетического спектра нейтронов внутри исследуемых объектов за счет использования шести пороговых детекторов; вносящий вклад в расширение представлений и эквивалентной дозе нейтронов внутри и снаружи исследуемых физических объектов.
- **впервые** разработан и реализован метод, позволяющий изучить и провести сравнительный анализ спектра нейтронного излучения в широком энергетическом диапазоне от 100 кэВ до 50 МэВ внутри различных космических аппаратов, а также провести анализ зависимости спектра нейтронов от характеристик защищенности этих аппаратов, параметров их орбиты и солнечной активности.
- **впервые** получены экспериментальные данные об эквивалентной дозе нейтронов в модулях РС и АС МКС. Проведен анализ зависимости дозы нейтронного излучения от массы модулей и параметров солнечной активности (на примере модуля «Звезда» РС МКС);
- **впервые** получены экспериментальные данные об эквивалентной дозе нейтронов внутри шарового тканеэквивалентного фантома на борту РС МКС, определен вклад в дозу внутри фантома от нейтронов различной энергии;
- **впервые** проведено моделирование с веществом шарового тканеэквивалентного фантома на борту РС МКС, показано, что внутри фантома происходит генерация дополнительных высокоэнергичных нейтронов;
- **впервые** в рамках совместных измерений с использованием детекторов НА «Баббл-дозиметр» и НА «Люлин-5» проведена оценка вклада нейтронного излучения в общую эквивалентную дозу (с учетом заряженных частиц) внутри шарового тканеэквивалентного фантома в модуле МИМ1 РС МКС;
- **впервые** проведены измерения эквивалентной дозы нейтронного излучения в правой каюте СМ РС МКС на поверхности укладки «Шторка защитная», получены экспериментальные данные, подтверждающие ее свойства по ослаблению потока нейтронов. Проведено моделирование защитных свойств «Шторки» от нейтронного излучения методом Монте-Карло с использованием кода MCNPX, согласующееся с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- разработан и внедрен универсальный метод измерений вклада нейтронов различных энергий в дозу внутри и снаружи исследуемых объектов. Разработанный метод позволяет изучать влияние нейтронов различных энергий на исследуемые объекты, что является важным фактором для обеспечения радиационной безопасности экипажей авиационных линий, а также при космических полетах, в том числе при будущих полетах за пределы магнитосферы Земли.
- представлены методические рекомендации, предложения по дальнейшему совершенствованию радиационной защиты экипажей космических станций.
- экспериментально и теоретически доказана перспективность использования дополнительной водосодержащей защиты в качестве дополнительной защиты экипажей орбитальных станций и пилотируемых космических аппаратов от нонизирующего излучения космического пространства – эквивалентная доза от нейтронного излучения снижается до $77\pm 17\%$ от дозы в незащищенном месте. Полученное экспериментальное и теоретическое подтверждение защитных свойств дополнительной водосодержащей защиты (укладка «Шторка защитная») позволяет рекомендовать ее использование в качестве прототипа штатного средства дополнительной защиты экипажей пилотируемых космических кораблей от нонизирующих излучений космического пространства (планируется изготовление второй укладки «Шторка защитная» для размещения в каюте космонавтов на борту Российского сегмента МКС). Для вновь доставляемого на МКС многоцелевого лабораторного модуля (МЛМ) введена дополнительная защита от радиации каюты космонавта из пластин полиэтилена.

Результаты, выносимые на защиту.

- 1) Универсальный метод измерений вклада нейтронов различных энергий в дозу внутри и снаружи исследуемых объектов. Данный метод позволяет выявить качественно новую закономерность исследуемого явления, заключающуюся в дополнительной генерации высокоэнергичных нейтронов внутри исследуемых объектов, и отличается от других методов использованием шести пороговых пузырьковых детекторов, впервые применяемых в условиях долговременных орбитальных станций и пилотируемых космических аппаратов;
- 2) Результаты измерений эквивалентной дозы нейтронного излучения в различных модулях РС и АС МКС, включая зависимость характеристик нейтронного излучения от солнечной активности и массы модулей;
- 3) Результаты измерений эквивалентной дозы нейтронного излучения в правой каюте СМ РС МКС с использованием укладки «Шторка защитная», подтверждающие эффективность ослабления потоков нейтронов;

4) Результаты расчетов ослабления потока нейтронов дополнительной защитой методом Монте-Карло с использованием кода MCNPX для условий эксперимента с укладкой «Шторка защитная»;

5) Результаты измерения дозы и энергетического спектра нейтронного излучения внутри шарового тканезквивалентного фантома в модуле МИМ1 РС МКС, оценка вклада в дозу от высокоэнергичных нейтронов.

6) Экспериментальные результаты по определению вклада от нейтронного излучения в общую эквивалентную дозу ИИ КП внутри шарового тканезквивалентного фантома в модуле МИМ1 РС МКС.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в:

- разработке программы и методов экспериментальных исследований, определении мест размещения детекторов в модулях МКС и внутри и снаружи шарового тканезквивалентного фантома;
- участии в подготовке международных экипажей, разработке исходных данных для бортовых инструкций по проведению эксперимента на борту МКС;
- обработке и анализе данных эксперимента, выполнении основного объема теоретических исследований;
- разработке геометрической модели СМ РС МКС для расчета с использованием кода MCNPX на основе данных ОАО «РКК «Энергия» и ФГУП «ЦНИИМаш»;
- проведении моделирования методом Монте-Карло с использованием кода MCNPX условий эксперимента на борту МКС с укладкой «Шторка защитная» и НА «Баббл-дозиметр»;
- проведении наземных калибровочных испытаний детекторов НА «Баббл-дозиметр» в Технологическом институте при Университете штата Онтарио, Канада;
- оформлении полученных результатов в виде публикаций и научных докладов в период с 2012 по 2015 гг.

Апробация работы.

Результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Седьмой Международный Аэрокосмический Конгресс (26 -31 августа 2012г.), г. Москва;
2. XII Конференция молодых ученых, специалистов и студентов ИМБП (16 апреля 2013г.), г. Москва;
3. XIV Конференция по космической биологии и авиакосмической медицине, посвященная 50-летию создания ИМБП (28-30 октября 2013 г.), г. Москва;

4. 10 Международная научно-практическая конференция «Пилотируемые полеты в космос» (27-28 ноября 2013 г.), Звездный городок, МО;
5. Multilateral Radiation Health Working Group meeting, Moscow, December 2013;
6. 40th scientific assembly COSPAR-2014, Moscow, 2-10 August 2014.
7. XX Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов в ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 10-14 ноября 2014 г., г. Королев, МО;
8. Ежегодный городской конкурс имени академика С.П. Королева, 22 – 26 декабря 2014 г.;
9. Международная научно-практическая конференция «Научные исследования и эксперименты на МКС», г. Москва, ИКИ РАН, 9-11 апреля 2015 г.

Результаты работы автора представлены в следующих публикациях:

1. M.B. Smith, S. Khulapko, H.R. Andrews et al. Bubble-detector measurements in the Russian segment of the International space station during 2009-12, Radiation Protection Dosimetry (индексируется в БД Scopus), 163(1), pp. 1-13, 2015;
2. Хулапко С.В., Лягушин В.И., Архангельский В.В. и др. Результаты измерения дозы и энергетического спектра нейтронов внутри Российского сегмента МКС в эксперименте «Матрешка-Р» с использованием пузырьковых детекторов в период экспедиций МКС-24/МКС-34. Авиакосмическая и экологическая медицина (индексируется в БД Scopus), т.48, №1, стр. 52-56, 2014г.;
3. M.B. Smith, S. Khulapko, H.R. Andrews et al. Bubble-detector measurements of neutron radiation in the International space station: ISS-34 to ISS-37, Radiation Protection Dosimetry (индексируется в БД Scopus), 168(2) pp. 154-166, 2016;
4. Хулапко С.В., Лягушин В.И., Архангельский В.В. и др. Определение дозы и энергетического спектра нейтронов внутри и снаружи тканезквивалентного шарового фантома в эксперименте «Матрешка-Р» на Российском сегменте Международной космической станции с использованием пузырьковых детекторов. Космическая техника и технологии, № 2 (9), стр. 51-63, 2015;
5. Хулапко С.В., Лягушин В.И., Архангельский В.В. и др. «Сравнение эквивалентной дозы от заряженных частиц и нейтронов внутри шарового тканезквивалентного фантома на борту РС МКС». Авиакосмическая и экологическая медицина (индексируется в БД Scopus), Т.50, №2, стр. 47-52, 2016г.

Объем и структура.

Диссертация изложена на 169 страницах машинописного текста, включая 30 таблиц и 135 рисунков, состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 110 наименований и трех приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении кратко обосновывается актуальность задачи определения характеристик нейтронного излучения внутри модулей МКС, в том числе внутри шарового фантома и на поверхности укладки «Шторка защитная», сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы новизна и практическая значимость результатов исследований. Излагаются основные положения, выносимые автором на защиту.

В первой главе кратко описан процесс образования вторичных нейтронов внутри космических аппаратов (КА) («каскадно-испарительная модель взаимодействия нуклонов»), по литературным данным рассмотрены основные особенности нейтронного излучения в космосе а также основные методы нейтронной дозиметрии и спектрометрии, описываются основные преимущества и недостатки каждого метода. Рассматривается новый класс детекторов на основе перегретых дисперсных систем (пузырьковых детекторов), дается описание принципов регистрации нейтронов в таких детекторах и приводятся их недостатки и преимущества по сравнению с другими детекторами.

Проводится также обзор теоретических и экспериментальных работ по определению характеристик нейтронных полей внутри различных типов КА: орбитальных станций «Салют» и «Мир» (Севастьянов, Лягушкин, Дудкин, Богомолов и др.), космических кораблей (КК) «Спейс-шаттл» (G.D. Vadhwag и др.), возвращаемых спутников «Космос» и «Бион» (Дудкин и др.). Отмечается ряд общих закономерностей для всех типов КА: явная зависимость между солнечной активностью и потоком вторичных нейтронов (уменьшение солнечной активности ведет к увеличению потока нейтронов); возрастание потока вторичных нейтронов с увеличением толщины защиты КА, причем вклад нейтронов в общую эквивалентную дозу может достигать 60%, при этом энергетический спектр становится более «жестким»; пики энергетического спектра нейтронов в диапазоне энергии около 1 МэВ и 10-20 МэВ, которые относятся к «испарительным» и нейтронам прямого взаимодействия соответственно.

Отмечается, что в отличие от обширных измерений на ОС «Мир» и КК «Спейс-шаттл» на момент начала экспериментальных исследований в рамках данной диссертации внутри МКС характеристики нейтронных полей практически не изучены. По состоянию на начало 2015г. автору удалось обнаружить информацию лишь о нескольких работах (исключая работы по НА «Баббл-дозиметр»), где предпринимались попытки измерения характеристик нейтронных полей внутри МКС. В расчетных работах, как, например, в [6] и [7] использовалась упрощенная модель модулей МКС и средняя толщина защиты 20 г/см². В то же время по различным данным, толщина защиты на МКС может варьироваться в широких пределах от 1 до 100 г/см² [8], [9].

Также отмечается, что на момент начала исследований в рамках данной диссертации отсутствовали данные измерений на МКС эквивалентной дозы от нейтронов внутри фантомов, включая данные о вкладе нейтронов в общую эквивалентную дозу, а также отсутствовали

данные по ослаблению дозы нейтронного излучения дополнительной защитой, установленной в отсеке модуля МКС. Делаются выводы, что разработка метода и проведение измерений являются актуальной и до сих пор не решенной научной задачей.

Во второй главе приводится описание метода исследования дозовых нагрузок от нейтронного излучения внутри отсеков МКС с использованием НА «Баббл-дозиметр» и другой научной аппаратуры из состава КЭ «Матрешка-Р» (НА «Комплект фантом», НА «Люлин-5», укладка «Шторка защитная»). Приводится описание компьютерных кодов MCNPX и Geant4, используемых для расчетов радиационных условий в правой каюте СМ РС МКС и внутри шарового фантома. Дается подробное описание и состав НА «Баббл-дозиметр»: спектрометрических (позволяющих оценивать вклад в полную дозу от нейтронов в шести диапазонах энергии от 60 кэВ до 50 МэВ) и интегральных дозиметрических детекторов (рисунок 1), считывающего пульта НА «Баббл-дозиметр» (рисунок 2).

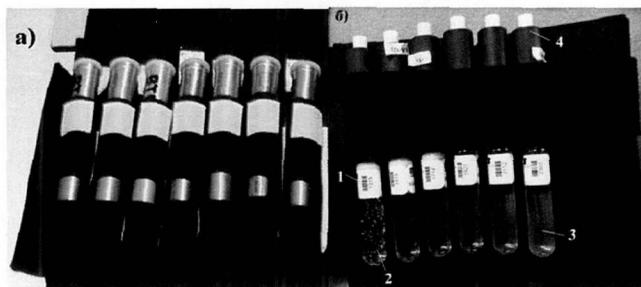


Рисунок 1 – Укладка с восемью детекторами в металлических чехлах (а) и детекторы в «Дополнительной укладке», подготовленные к работе (б). 1 – четырехзначный код детектора, 2 – пузырьки в геле детектора, 3 – колба с гелем (измерительная часть), 4 – крышка-поршень для активации детекторов



Рисунок 2 – Пульт НА «Баббл-дозиметр». 1 – ЖК-дисплей, 2 – гнездо для детекторов, 3 – слот для карты памяти, 4 – тумблер включения/выключения, 5 – индикатор питания сети, 6 – гнездо для предохранителя

Приводится описание установки и процесса калибровки детекторов на $AmBe$ источнике

нейтронов, рассмотрены вопросы температурной стабилизации детекторов для использования в космических условиях. Обсуждается чувствительность детекторов НА «Баббл-дозиметр» к высокоэнергичным протонам, ТЗЧ и высокоэнергичным нейтронам. Обосновывается использование корректирующего коэффициента 1,62 при использовании дозиметрических детекторов в космических условиях по итогам калибровки на ускорителе CERF.

Приводится описание расчетных и экспериментальных работ, по итогам которых делается вывод о незначительном вкладе от протонов (менее 2% [10]) и ТЗЧ в общую дозу, определяемую детекторами НА «Баббл-дозиметр». Определяется минимальный порог линейной передачи энергии (ЛПЭ) (около 100 кэВ/мкм), при котором начинают образовываться пузырьки в детекторах.

Описывается метод определения эквивалентной дозы от нейтронов по показаниям спектрометрических детекторов НА «Баббл-дозиметр» (с использованием функции отклика детекторов) и конверсионным коэффициентам из отчетов комиссий ICRP-74 [11] и NCRP-38 [12].

Приводится описание метода проведения КЭ в целом на борту МКС: циклограмма работ космонавтов с НА «Баббл-дозиметр», методы измерений внутри модулей МКС, внутри и на поверхности шарового фантома (одновременно с НА «Люлин-5»), а также на поверхности укладки «Шторка защитная».

В **третьей главе** представлены основные результаты измерений на борту МКС с использованием НА «Баббл-дозиметр». Показано, что энергетический спектр нейтронов во всех модулях Российского и Американского сегментов МКС (рисунок 3) имеет одинаковые особенности – отчетливо выделяются пики в потоках нейтронов в районе энергии 1 МэВ и 15-50 МэВ, при этом вклад в дозу от высокоэнергичных нейтронов (с энергией более 15 МэВ) может варьироваться в значительных пределах.

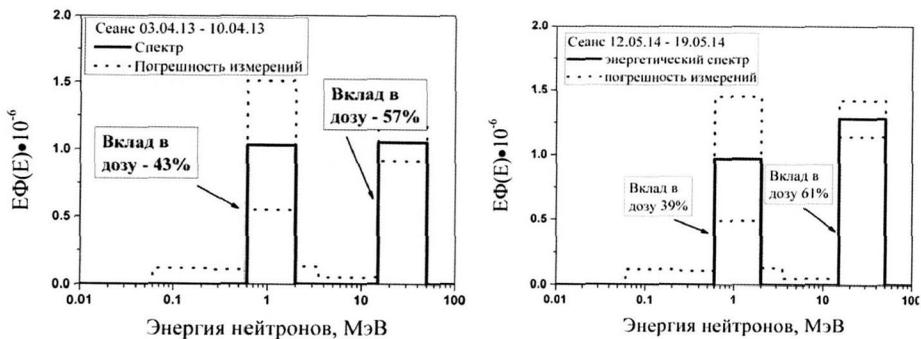


Рисунок 3 – Усредненный энергетический спектр в модулях РС (а) и АС (б) МКС

Полученные результаты подтверждают данные с других КА, на которых наблюдались пики в этих же диапазонах энергии.

На примере измерений в Служебном модуле «Звезда» МКС установлена зависимость дозы нейтронного излучения от гелиофизических параметров (числа Вольфа) и параметров орбиты МКС (рисунки 4 и 5).

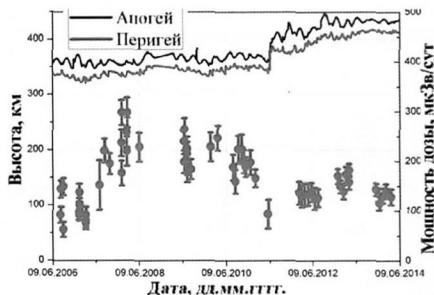


Рисунок 4 – Зависимость мощности дозы от нейтронного излучения внутри Служебного модуля «Звезда» от параметров орбиты МКС

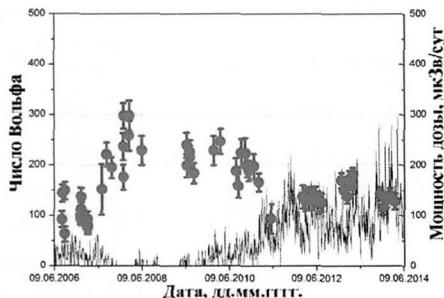


Рисунок 5 – Зависимость мощности дозы от нейтронного излучения внутри Служебного модуля «Звезда» от числа Вольфа

Как следует из рисунка 5, имеется четкая зависимость изменения характеристик нейтронов от солнечной активности: колебания среднесуточной мощности дозы находятся в противофазе с колебаниями среднего числа Вольфа. Данный эффект можно объяснить влиянием потоков ГКЛ на образование вторичных нейтронов. Отмечается, что влияние высокоэнергичных протонов РПЗ на образование вторичных нейтронов не является очевидным. Выделить при рассмотрении результаты данные от РПЗ не представляется возможным, так как сеанс измерений обычно длился около семи суток, и за это время МКС пересекает область ЮАА множество раз. Однако, из рисунка 4 четко видно, что, несмотря на увеличение высоты орбиты МКС и, как следствие, более глубокое «погружение» станции в РПЗ (и увеличение потоков высокоэнергичных протонов), доза от нейтронов практически не увеличивается. Таким образом можно сделать вывод о незначительном вкладе протонов РПЗ в образование нейтронного поля в отсеках по сравнению с вкладом ГКЛ.

На основании полученных результатов делается вывод, что основным источником образования нейтронов внутри модулей являются тяжелые заряженные частицы ГКЛ, но не протоны РПЗ. Данный вывод приобретает крайнюю актуальность в связи с будущими межпланетными полетами: за пределами магнитосферы Земли потоки ГКЛ существенно увеличатся, и поэтому следует ожидать увеличения дозы вторичного нейтронного излучения.

Возрастание потоков протонов высокой энергии, связанные мощными СКЛ в межпланетном пространстве, также могут приводить к генерации дополнительных вторичных нейтронов.

Отмечается, что из-за малой статистической информации подтвердить это утверждение в других модулях МКС не удастся. Необходимые данные будут получены при продолжении измерений в различных модулях космических станций в течение следующего цикла солнечной активности.

Обобщение результатов измерений во всех модулях МКС (рисунок 6), показывает что наибольшая доза нейтронного излучения наблюдается в самых «тяжелых» модулях МКС – «Звезда» (масса модуля около 20 295 кг, мощность дозы на различных панелях от 155 ± 16 мкЗв/сут до 190 ± 23 мкЗв/сут) PC МКС, Columbus (масса модуля около 12 200 кг, мощность дозы 156 ± 14 мкЗв/сут) и USLab (масса модуля около 14 500 кг, мощность дозы 170 ± 14 мкЗв/сут) AC МКС. В то же время наименьшая доза регистрировалась в модулях «Рассвет» (масса модуля около 8 004 кг, мощность дозы 137 ± 14 мкЗв/сут) и «Поиск» (масса модуля около 3 670 кг, мощность дозы 111 ± 13 мкЗв/сут) PC МКС. Эти данные подтверждают гипотезу о том, что увеличение массы КА (и, соответственно, толщины защищенности КА) ведет к увеличению вклада от нейтронов в общую дозу от ИИ КП.

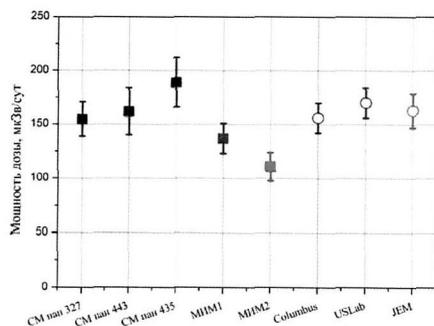


Рисунок 6 - Усредненная мощность дозы в модулях МКС

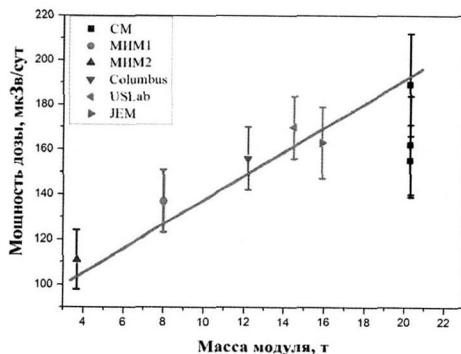


Рисунок 7 – Зависимость мощности дозы нейтронного излучения от массы модулей МКС

Отмечается, что полученные результаты сходятся с данными из других работ, в которых указывалось, что доза от вторичных нейтронов напрямую зависит от массы КА [5], [13], [14], причем зависимость мощности дозы от нейтронов от массы модулей хорошо аппроксимируется линейной функцией (рисунок 7). Для модулей МКС до настоящего времени были получены только теоретические данные [6]. Таким образом, полученные данные можно считать впервые полученным экспериментальным подтверждением расчетных работ.

В главе также представлены данные измерений спектра нейтронов на поверхности и в каналах шарового фантома (рисунки 8 и 9).

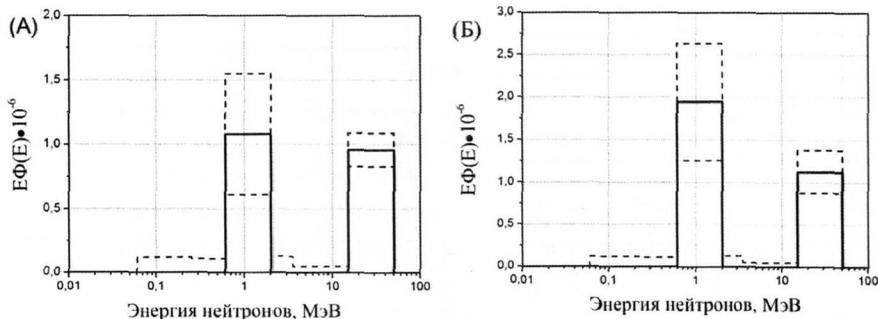


Рисунок 8 – Энергетический спектр нейтронов на поверхности шарового фантома в модуле МИМ1. — энергетический спектр; --- погрешность измерений. Измерения проводились с 30.05.13 по 02.08.13. Средняя высота орбиты МКС – 400 км.

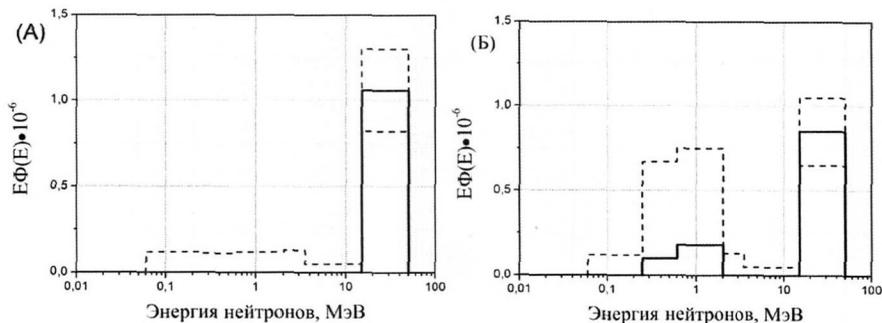


Рисунок 9 – Энергетический спектр нейтронов внутри шарового фантома в модуле МИМ1. — энергетический спектр; --- погрешность. Измерения проводились с 28.06.13 по 30.08.13. Средняя высота орбиты МКС – 400 км.

Отмечается, что данные на поверхности фантома (рисунки 8А и 8Б) хорошо согласуются с данными измерений как в Американском, так и Российском сегментах МКС – отчетливо выделяются пики в энергетическом спектре в диапазоне энергии 0,6-2 МэВ и 15-50 МэВ. В работах [10] и [15] по измерениям в отсеках станции «Мир» и МКС было показано, что 40% и более от полной дозы нейтронного излучения приходится на нейтроны с энергией выше 15 МэВ. Аналогичные результаты наблюдаются и в измерениях на поверхности фантома (доля дозы от нейтронов с энергией 15-50 МэВ составляет от 34% до 56% в двух сеансах измерений).

В экваториальных же каналах шарового фантома (рисунки 9А и 9Б) спектр нейтронов более «жесткий» - пики в диапазоне энергии около 1 МэВ «размазаны», и вклад нейтронов с энергией выше 15 МэВ существенно увеличивается и составляет уже от 86% до 100%. Этот

результат можно объяснить эффективным замедлением низкоэнергичных нейтронов на атомах водорода, входящего в состав фантома, выведением их в более низкую часть спектра (менее 60 кэВ) и поглощением в веществе фантома при одновременной генерации дополнительных высокоэнергичных нейтронов в веществе фантома.

Для проверки вышеуказанной гипотезы была проведена оценка скоростей поглощения для нейтронов различных энергий. Показано, что вероятность потерять энергию для нейтронов существенно уменьшается (практически линейно) с увеличением энергии нейтронов (рисунок 10). Скорость, с которой нейтроны теряют свою энергию при столкновении с атомами вещества танкеэквивалентного шарового фантома, определялась по формуле:

$$R_{\text{погл}}^n = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \{ \sigma_{H_2}(E) * N_{H_2} + \sigma_{O_2}(E) * N_{O_2} + \sigma_{N_2}(E) * N_{N_2} + \sigma_C(E) * N_C \} \Phi_n(E) dE, \quad (1)$$

где E_{\min} и E_{\max} - минимальная и максимальная энергии нейтронов, в идеальном случае

$$E_{\min}=0 \text{ и } E_{\max}=\infty,$$

$\sigma_i(E)$ – полное сечение взаимодействия (сумма сечений рассеяния и поглощения) с нейтроном i -го элемента, входящего в состав фантома (водород, кислород, азот или углерод), зависящее от его энергии,

N_i – количество атомов соответствующего элемента в фантоме,

$\Phi_n(E)$ – флюенс падающих нейтронов.

Сечения взаимодействия с нейтронами для указанных элементов были получены с использованием открытой базы данных «Janis 4.0» Агентства по ядерной энергетике ОЭСР [16].

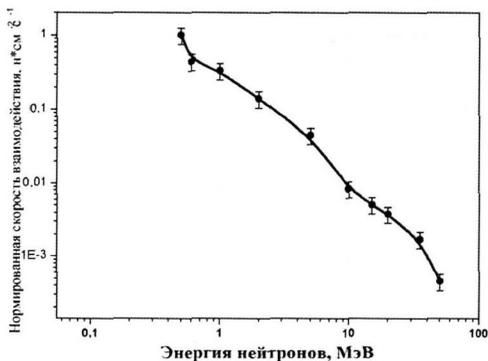


Рисунок 10 – Скорость взаимодействия нейтронов различной энергии с атомами вещества фантома (нормированная на скорость для нейтронов с энергией 500 кэВ)

Предположение о том, что внутри фантома происходит дополнительная генерация вторичных нейтронов, подтверждает и моделирование методом Монте-Карло с использованием кодов MCNPX [17] и Geant4 [18].

На рисунке 11 приведены энергетические спектры нейтронов, протонов и альфа-частиц на поверхности шарового тканезквивалентного фантома, полученные с использованием кода Geant4 [18]. На рисунке 11б приведен спектр нейтронов внутри фантома, произведенных от падающих нейтронов, протонов и альфа-частиц. При этом для удобства сравнения с экспериментальными данными спектры представлены в «летаргической» форме.

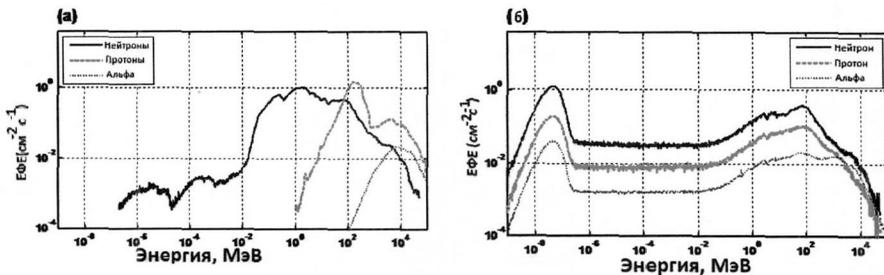


Рисунок 11 – Энергетический спектр нейтронов, протонов и альфа-частиц на поверхности (а) шарового тканезквивалентного фантома, и энергетический спектр нейтронов, рожденных внутри фантома от нейтронов, протонов и альфа-частиц (б).

Полученные результаты говорят о том, что основная часть нейтронов внутри фантома рождается в ходе реакций типа (n, xn) . Протоны и альфа-частицы также создают дополнительное нейтронное излучение внутри фантома в ходе реакций типа (p, xn) (α, xn), однако этот вклад меньше вклада от нейтронов. Учитывая, что минимальный вклад вносят альфа-частицы, можно сделать предположение, что от ТЗЧ вклад будет еще менее заметным.

По итогам моделирования с использованием кода MCNPX [17] были сделаны выводы, аналогичные выводам при моделировании с использованием Geant4: в веществе фантома на борту МКС происходят два конкурирующих процесса:

1. Эффективное замедление нейтронов, особенно низкоэнергичных, в веществе фантома. Это явление не представляется удивительным, если учесть, что в фантоме содержание водорода и углерода составляет около 65%;
2. В то же время в фантоме происходит генерация вторичных высокоэнергичных нейтронов в ходе реакции типа (n, xn) .

Мощность эквивалентной дозы внутри и снаружи шарового фантома составляет в среднем 98 ± 13 мкЗв/сут и 154 ± 13 мкЗв/сут соответственно. Отношение дозы на поверхности фантома к

дозе в экваториальных каналах (рисунок 12) составляет в разных экспедициях от 0,64 [19] до 0,77 [20], что соответствует результатам моделирования [17] и [18].

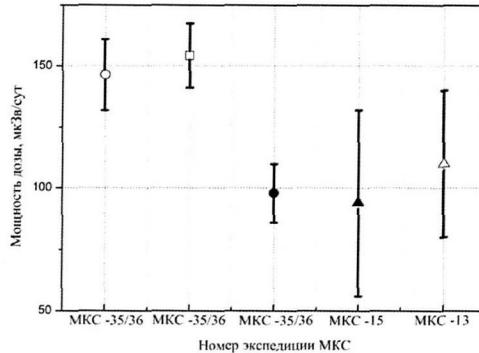


Рисунок 12 - Мощность дозы от нейтронного излучения внутри шарового фантома, на его поверхности и в запанельном пространстве модуля МИМ1 РС МКС.

○ – в запанельном пространстве МИМ1; □ – на поверхности фантома (МКС-35/36); ● – в каналах фантома (МКС-35/36); ▲ – в каналах фантома (МКС-15); △ – на поверхности фантома (МКС-13)

Полученные данные подтверждают опасность нейтронного излучения высоких энергий при космических полетах. В наземных условиях, где энергетический спектр нейтронов не столь широк, как в космическом пространстве, доза, которую получают внутренние органы и системы человека (ЦНС, ЖКТ, КТС), существенно меньше дозы, например, на его коже. В то же время при космических полетах нейтроны с энергией в десятки МэВ проникают в центр фантома (а значит, достигают внутренних органов человека), практически не замедляясь. Делается вывод, что из всего широкого энергетического спектра нейтронов основное поражающее воздействие на такие органы и системы человека, как ЦНС, ЖКТ и КТС, оказывают именно нейтроны с энергией выше 15 МэВ, причем в космических условиях нагрузка от нейтронов на внутренние органы человека существенно выше, чем на Земле.

Приводятся данные совместных измерений внутри фантома с использованием детекторов НА «Баббл-дозиметр» и «Люлин-5» для определения вклада нейтронов в общую эквивалентную дозу внутри фантома (рисунок 13). Отмечается, что полученные данные (вклад от нейтронов в общую дозу варьируется от 18% до 28%) хорошо согласуются с ранее полученными результатами, например с [21], где показано, что доза от нейтронного излучения составляет около 30% от полной дозы, определяемой американским прибором TERC.

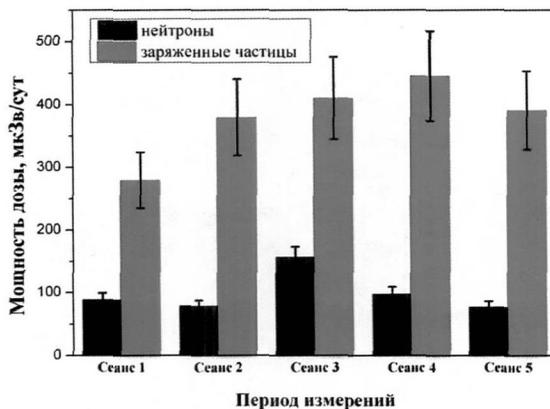


Рисунок 13 – Усредненные мощности доз от различных компонент ИИ внутри шарового фантома, определенные с использованием НА «Баббл-дозиметр» и НА «Люлин-5»

В заключительной части главы приводятся данные измерений на накопителях укладки «Шторка защитная» и на панели 443 правой каюты СМ РС МКС, рядом со «Шторкой», на незащищенном месте. По результатам измерений дозиметрических детекторов НА «Баббл-дозиметр» установлено, что усредненная мощность дозы нейтронного излучения на среднем накопителе шторки составляет 161 ± 19 мкЗв/сут; усредненная мощность дозы на панели 443 (незащищенное место) составляет 210 ± 39 мкЗв/сут. Мощность дозы на поверхности шторки составляет $77 \pm 17\%$ от мощности дозы в незащищенном месте на панели 443. Этот результат хорошо согласуется с ранее полученными данными в модуле ЖЕМ АС МКС, где мощность дозы нейтронного излучения на поверхности емкостей с водой составляла $72 \pm 17\%$ от мощности дозы на незащищенном месте. Полученные результаты измерений для нейтронного излучения дополняют ранее полученные данные [22], где сообщалось о том, что «Шторка защитная» ослабляет эквивалентную дозу от заряженных частиц на $37 \pm 7\%$.

Для теоретической проверки экспериментальных данных на базе Технологического института при университете штата Онтарио (University of Ontario Institute of Technology, UOIT) лично автором настоящей диссертации было проведено моделирование радиационных условий внутри Служебного модуля РС МКС с использованием кода MCNPX.

Для задания упрощенной геометрической модели СМ РС МКС использовались открытые данные с интернет - страниц ОАО «РКК «Энергия» [23] и Центра управления полетами ФГУП ЦНИИмаш [24]. Рабочий отсек (РО) СМ состоит из двух цилиндров разных диаметров, соединенных между собой коническим переходником. В зоне большого диаметра РО

расположены две персональные каюты, в одной из которых располагается укладка «Шторка защитная».

Служебный модуль был задан в виде цилиндра радиусом 200 см, ограниченного с двух сторон плоскостями, перпендикулярными оси цилиндра таким образом, чтобы его длина составляла 400 см. Пространство каюты, где располагалась шторка, выделялось с использованием шести плоскостей, перпендикулярных осям X, Y и Z.

Три накопителя шторки задавались в виде параллелограммов со следующими габаритами: верхний накопитель – $43,6 \times 50,5 \times 10,0 \text{ см}^3$, средний накопитель – $63,2 \times 65,8 \times 10,0 \text{ см}^3$, нижний накопитель – $60,0 \times 71,9 \times 10,0 \text{ см}^3$.

В качестве упрощенной модели детекторов НА «Баббл-дозиметр» использовались две сферические поверхности радиусом 1 см. При этом, для полной аналогии с реальным расположением детекторов на шторке и на панели 443 правой каюты СМ РС МКС, в модели детекторы располагались на одной плоскости, однако один из детекторов был закрыт средним накопителем шторки, а второй – нет. На рисунке 14 показана упрощенная геометрия, используемая при моделировании.

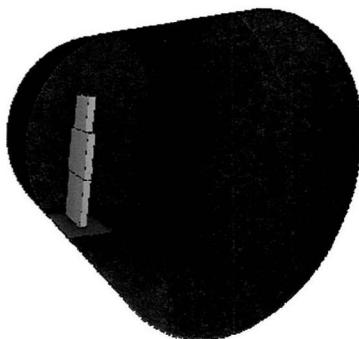


Рисунок 14 – Упрощенная модель укладки «Шторка защитная» в правой каюте СМ РС МКС «в разрезе». Детекторы и стены каюты условно не показаны

Так как основным наполнителем НА «Шторка защитная» являются влажные полотенца и салфетки из средств личной гигиены космонавтов, то в качестве материала шторки задавалась вода с плотностью $0,62 \text{ г/см}^3$. В качестве материала каюты космонавта выбирался воздух с плотностью $0,0012 \text{ г/см}^3$. В качестве исходного спектра нейтронного излучения внутри СМ РС МКС использовался спектр, полученный для станции «Мир» в работе Лягушина и др. [13].

Изотропный источник нейтронов был задан в виде сферы диаметра 140 см, испускающей нейтроны внутрь (вектор нормали задавался равным минус единице). В работе [25] дана оценка средней плотности потока нейтронов внутри модулей ОС «Мир» составляет $5,21 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

Учитывая площадь поверхности источника, задаваемого в модели, а так же длительность измерений НА «Баббл-дозиметр», для корректного определения среднесуточной мощности дозы от нейтронного излучения в исходном файле был задан флюенс, равный $2 \cdot 10^{11}$ нейтронов.

Для определения дозы использовались конверсионные коэффициенты из отчета [11]. Полученное отношение мощности дозы на поверхности «Шторки» к мощности дозы рядом со шторкой составляет $73 \pm 19\%$, что отлично сходится с экспериментальными данными как на «Шторке защитной» (где отношение составляет $77 \pm 17\%$), так и между емкостями с водой в модуле JEM AC MKC (отношение $72 \pm 17\%$).

На основании вышеперечисленных данных делается вывод о том, что укладка «Шторка защитная» действительно эффективно ослабляет нейтронное излучение и может являться эффективным средством дополнительной защиты для космонавтов во время космических полетов. Кроме того, для уменьшения дозы от нейтронов в каютах космонавтов можно рекомендовать ввести дополнительную защиту из водородсодержащих материалов, например панели из полиэтилена или любого другого подобного материала.

В заключении сформулированы основные полученные результаты и выводы.

Основные результаты:

1. Разработан и внедрен универсальный метод измерений вклада нейтронов различных энергий в дозу внутри и снаружи исследуемых объектов, который позволяет изучать влияние нейтронов различных энергий на исследуемые объекты.

2. Впервые были изучены характеристики нейтронных полей (эквивалентная доза и вклад в дозу от нейтронов различных энергий) во всех основных модулях РС и AC MKC.

3. Определена мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения внутри и на поверхности шарового тканеэквивалентного фантома НА «Комплект фантом» и впервые оценен вклад в общую дозу от нейтронов различной энергии. Предложена гипотеза, объясняющая полученные результаты.

4. В ходе параллельных измерений внутри фантома с использованием НА «Баббл-дозиметр» и НА «Люлин-5» в модуле МИМ1 РС MKC впервые определен вклад от нейтронного излучения в общую эквивалентную дозу внутри фантома (включая заряженный компонент).

5. Экспериментально проверены свойства укладки «Шторка защитная» по ослаблению потока нейтронов. Полученные данные подтверждены по результатам моделирования методом Монте-Карло с использованием кода MCNPX.

Выводы:

1. Во всех модулях MKC наблюдаются два ярко выраженных пика в спектре нейтронов в диапазоне энергии $0,6 - 2,0$ МэВ и $15 - 50$ МэВ. При этом вклад в общую дозу от нейтронов с энергией более 15 МэВ может существенно изменяться как в разных модулях, так и в одном модуле в разных сеансах измерений;

2. Наибольшая мощность дозы наблюдается в «тяжелых» модулях МКС: Служебном модуле «Звезда» РС МКС, модулях Columbus, USLab AC МКС. В то же время наименьшая доза регистрировалась в «легких» модулях «Рассвет» и «Поиск» РС МКС. Полученные данные являются экспериментальным подтверждением теоретических работ, где утверждается, что увеличение массы КА ведет к увеличению потока вторичных нейтронов внутри этого КА. Для МКС такие данные получены впервые, они также хорошо сходятся с данными для других типов КА;

3. Колебания мощности эквивалентной дозы от нейтронов внутри модулей МКС находятся в «противофазе» с солнечной активностью.

4. Энергетический спектр нейтронов внутри шарового фантома более «жесткий», чем на его поверхности: если на поверхности фантома вклад от нейтронов с энергией 15-50 МэВ в общую дозу составляет от 34% до 56%, то внутри фантома вклад нейтронов с энергией выше 15 МэВ существенно увеличивается и составляет уже от 86% до 100%. Данный факт объясняется дополнительной генерацией высокоэнергичных нейтронов в результате взаимодействия первичных частиц (нейтронов, протонов, тяжелых заряженных частиц) с веществом фантома по реакциям типа (n, xn) , (p, xn) . Данная гипотеза подтверждается расчетами методом Монте-Карло в программах MCNPX и Geant 4.

5. Вклад нейтронов в общую эквивалентную дозу (с учетом заряженной компоненты) внутри фантома составляет от 18% до 28%.

6. Укладка «Шторка защитная» ослабляет поток нейтронов до $77 \pm 17\%$ от мощности дозы на незащищенной панели рядом со шторкой. Полученные результаты подтверждаются при моделировании условий в правой каюте СМ РС МКС с использованием кода MCNPX. По результатам моделирования отношение эквивалентных доз на поверхности НА «Шторка защитная» и незащищенной панели рядом со шторкой составляет $73 \pm 19\%$.

По результатам работы предлагается дать следующие рекомендации:

1. Учитывая результаты изучения свойств укладки «Шторка защитная» при планировании будущих пилотируемых экспедиций за пределы магнитосферы Земли ввести в «радиационном убежище» дополнительную защиту из «легких» водородсодержащих материалов;

2. Ввести в состав перспективных средств контроля радиационной обстановки ПКА прибор, определяющий характеристики нейтронного излучения (дозиметр-спектрометр);

Список цитированных трудов:

1. Методические указания МУ 2.6.1.44-03-2013 "Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах"
2. ГОСТ 25645.202-83 "БРЭКАКП. Требования к индивидуальному и бортовому дозиметрическому контролю"
3. Лшневский А.Э., Панасюк М.И., Нечаев О.Ю. и др. Доклад на тему "Вариации радиационной обстановки на Международной космической станции за период 2001-2011 гг. по данным Системы радиационного контроля" // — Москва, Седьмой международный аэрокосмический конгресс, 26-31 августа 2012г.
4. Шафиркин В.Г., Акатов Ю.А., Архангельский В.В. и др., "Оценка радиационной опасности для членов экипажей орбитальной станции МИР и Международной космической станции на основе данных бортового и индивидуального дозиметрического контроля.," *Авиакосмическая и экологическая медицина*, Том 36, Выпуск 6, 2002. — с. 46-50.
5. Badhwar G.D., Keith J.E., Cleghorn T.F., "Neutron measurements onboard the space shuttle," *Radiation measurements*, Том 33, 2001. — с. 235-241.
6. Armstrong T.W., Colborn B.L., "Predictions of secondary neutrons and their importance to radiation effects inside the international space station," *Radiation measurements*, Выпуск 33, 2001. — с. 229-234.
7. El-Jaby S., Lewis B., Tomi L., "A model for predicting the radiation exposure for mission planning aboard the International Space Station," *Advances in Space Research*, 2014. — с. 1125-1134.
8. Koontz S.L., Boeder P.A., Pankop C. et al. *Radiation Effects Data Workshop // The ionizing radiation environment on the International Space Station: performance vs. expectations for avionics and materials*, 2005. — с. 110-116.
9. Межпланетные и орбитальные космические полеты. радиационный риск для космонавтов. Радиобиологическое обоснование / Шафиркин А.В., Григорьев Ю.Г. — Экономика, 2009.
10. Smith M.B., Akatov Yu., Andrews H.R. et al., "Measurements of the neutron dose and energy spectrum on the International space station during expeditions ISS-16 to ISS-21," *Radiation Protection Dosimetry*, Том 153, Выпуск 4, 2013. — с. 509-533.
11. 74. ICRP Publication, "Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation," 1996.
12. publication, NCRP-38, "Protection Against Neutron Radiation," 1971.
13. Lyagushin V.I., Dudkin V.E., Potapov Yu.V., Sevastianov V.D., "Russian measurements of neutron energy spectra in the Mir orbital station," *Radiation measurements*, Том 33, 2001. — с. 313-319.
14. Dudkin V.E., Potapov Yu.V., Akopova A.B. et al., "Differential neutron energy spectra measured on spacecraft in low Earth orbit," *Nuclear Tracks Radiation Measurements*, Том 17, Выпуск 2, 1990. — с. 87-91.
15. H., Ing, "Neutron measurements using bubble detectors - terrestrial and space," *Radiation Measurements*, Том 33, 2001. — с. 275-286.
16. Сайт международного атомного агентства. [Электронный ресурс], <http://www.oecd-nea.org/janis/>
17. Machrafí R., Tasbaz A., Kovalchouk V., et al. 16th Workshop on Radiation monitoring for the International Space Station // *Neutron production onboard the International Space Station*. — Prague, 2011.
18. Smith M.B., Khulapko S., Andrews H.R., et al., "Bubble-detector measurements of neutron radiation in the International space station: ISS-34 to ISS-37," *Radiation Protection Dosimetry*, 2015. — с. 1-13.
19. Хулапко С.В., Лягушин В.И., Архангельский В.А. и др., "Определение дозы и н

- энергетического спектра нейтронов внутри и снаружи тканезквивалентного шарового фантома в эксперименте "Матрешка-Р" на Российском сегменте МКС с использованием пузырьковых детекторов," *Космическая техника и технологии*, № 2 (9), стр. 52-63, 2015
20. Черных И.В., Лягушин В.И., Акатов Ю.А. и др. Результаты измерения дозы нейтронов внутри Российского сегмента Международной космической станции в эксперименте "Матрешка-Р" с использованием пузырьковых детекторов// *Авиакосмическая и экологическая медицина*, 44, 3, 2010. — с. 12-17.
 21. Smith M.B., Khulapko S., Andrews H.R., "Bubble-detector measurements in the Russian segment of the International Space Station during 2009-12," *Radiation Protection Dosimetry*, 2014. — с. 1-14.
 22. Kodaira S., Tolochek R.V., Ambrozova I. et al., "Verification of shielding effect by the water-filled materials for space radiation in the International Space Station using passive dosimeters," *Advances in Space research*, Том 53, 2014. — с. 1-7.
 23. Официальная страница ОАО "РКК "Энергия" им. С.П. Королева. [Электронный ресурс], <http://www.energia.ru>
 24. Сайт Центра управления полетами ФГУП ЦНИИМАШ. [Электронный ресурс], <http://www.mcc.rsa.ru/>
 25. Севастьянов В.Д., Тарновский Г.Б., Лягушин В.И., "Измерение энергетического спектра нейтронов на орбитальной станции Мир," *Космические исследования*, Том 35, Выпуск 2, 1997. — с. 216-220.

Список сокращений:

АС	- американский сегмент;
ГКЛ	- галактические космические лучи;
ЖКТ	- желудочно-кишечный тракт;
ИИ КП	- ионизирующее излучение космического пространства;
КА	- космический аппарат;
КТС	- кроветворная система;
КЭ	- космический эксперимент;
МКС	- Международная космическая станция;
НА	- научная аппаратура;
ПКА	- пилотируемый космический аппарат;
ОЭСР	- организация стран экономического сотрудничества и развития;
РПЗ	- радиационные пояса Земли;
СМ	- Служебный модуль;
СРК	- система радиационного контроля;
ТЗЧ	- тяжелая заряженная частица;
ЦНС	- центральная нервная система;
ЮАА	- Южно-атлантическая магнитная аномалия

Отпечатано в типографии
«Абрис-М» г. Королев
www.abris-m.ru

Тираж - 100 экз.
Объем: 7 п. л.