ИНОЗЕМЦЕВ КОНСТАНТИН ОЛЕГОВИЧ

РАЗВИТИЕ МЕТОДА РАЗДЕЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛИННОПРОБЕЖНЫХ И КОРОТКОПРОБЕЖНЫХ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНЫМИ ТРЕКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Автор: Иподмув.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Государственном научном центре Российской Федерации — Институте медико-биологических проблем Российской академии наук.

Научный руководитель:

Кушин Владимир Васильевич

кандидат физико-математических наук, доцент,

и.о. с.н.с. лаборатории «Методы и средства обеспечения радиационной безопасности при космических полетах» Государственного научного центра Российской Федерации – Института медико-биологических проблем Российской академии наук, г. Москва

Научный консультант:

Шуршаков Вячеслав Александрович

кандидат физико-математических наук, с.н.с.,

в.н.с. – зав. отделом «Радиационная безопасность пилотируемых космических полетов» Государственного научного центра Российской Федерации – Института медикобиологических проблем Российской академии наук, г. Москва

Официальные Собо

Соболевский Николай Михайлович

оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,

главный научный сотрудник лаборатории нейтронных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерных исследований

Российской академии наук, г. Москва

Николаев Вадим Аркадьевич

доктор технических наук, с.н.с.,

ведущий специалист АО «Радиевый институт им.

В.Г. Хлопина», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»,

г. Москва

Защита состоится « 3 » февраля 2020 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.023.04 по защите докторских и кандидатских диссертаций Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский проспект 53, ФИАН, конферец-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического Института им. П.Н. Лебедева РАН и на сайте института: www.lebedev.ru, с авторефератом — на сайте ФИАН www.lebedev.ru.

Автореферат разослан « » 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.04, д.ф.-м.н.

Баранов Сергей Павлович

Общая характеристика работы

Из предыдущих космических экспериментов известно, что заряженные частицы высоких энергий могут генерировать значительное количество вторичных нейтронов на борту космического аппарата на низкой околоземной орбите [31]. Однако, в таких же ядерных взаимодействиях может образовываться сопоставимое число заряженных фрагментов [22]. До сих пор, при измерениях характеристик космического излучения, вторичным заряженным частицам уделялось гораздо меньше внимания по сравнению с нейтронами, несмотря на их возможно значительное влияние на электронные компоненты и биологические объекты на борту космических аппаратов.

Особенностями вторичных заряженных ядерных фрагментов являются их относительно низкие энергии, малые величины пробегов и высокие значения линейной передачи энергии (ЛПЭ). Принимая это во внимание, измерения вторичного заряженного компонента космического излучения требуют разработки и применения специальных методов и подходов. Кроме того, большинство используемых в настоящее время детекторов космического излучения (в том числе и штатных средств дозиметрического контроля экипажей МКС) не могут быть использованы для проведения подобных измерений.

Твердотельные трековые детекторы (ТТД) типа CR-39^{тм}, применяемые в течении ряда лет для дозиметрических измерений на борту (в составе научной аппаратуры) [5], представляются наиболее удобными для измерения состава, потока и дозы излучения в условиях длительного космического полета. Кроме того, ТТД могут быть использованы и для регистрации короткопробежных частиц, образующихся в объеме детектора за счет ядерных взаимодействий [22].

Настоящая работа посвящена усовершенствованию, обоснованию и практической реализации метода для раздельной регистрации длиннопробежных и короткопробежных заряженных частиц космического излучения на борту возвращаемых космических аппаратов и МКС с использованием ТТД.

Актуальность работы:

Актуальность настоящей работы обуславливается следующими факторами:

- 1) При дозиметрическом сопровождении радиобиологических космических экспериментов и при индивидуальном дозиметрическом контроле членов экипажей космических аппаратов используются данные о вкладе первичного компонента и гораздо реже о вкладе нейтронов [2]. Однако, выход вторичных заряженных частиц в актах ядерных взаимодействий первичного КИ с биологическими объектами и элементной базой соизмерим или даже превосходит выход нейтронов.
- 2) Вклад заряженных продуктов ядерной фрагментации в полную поглощенную дозу не превышает 5 % [22], однако, эта малая величина не отражает в полной мере эффекта вторичных частиц на биологические объекты и компонентную базу на борту.
- 3) Большинство современных детекторов космического излучения и штатных средств индивидуального дозиметрического контроля космонавтов не позволяют выделять вторичный заряженный компонент [6].

- 4) В литературе имеется крайне мало данных о характеристиках вторичного заряженного компонента КИ на борту КА на низкой околоземной орбите.
- 5) В измерениях вторичных продуктов ядерной фрагментации с помощью ТТД до сих пор использовались упрощенные методы сканирования треков и обработки полученных данных [3]. Развитие метода раздельной регистрации первичного и вторичного компонента космического излучения с использованием твердотельных трековых детекторов позволит улучшить оценку ее потоковых и дозовых характеристик.
- 6) В настоящее время на борту РС МКС и возвращаемых биологических спутниках проводится и планируется значительное количество радиобиологических экспериментов, требующих надежных измерений потоковых и дозовых характеристик тяжело-ядерного компонента космического излучения (в том числе и вторичного).

Цель работы:

Цель работы состояла в разработке метода раздельного измерения характеристик первичного (длиннопробежного) и вторичного (короткопробежного) компонента космического излучения и оценки их потоковых и дозовых характеристик с использованием твердотельных трековых детекторов.

Научная новизна:

- **Впервые** предложен критерий, позволяющий более простую, без использования многостадийного травления, идентификацию треков вторичных частиц, образующихся внутри детектора.
- **Впервые** предложен подход, позволяющий оценку скорости травления в треках тяжелых заряженных частиц с использованием геометрических параметров размеров осей входного эллипса и глубины трека.
- Впервые выполнен сравнительный анализ двух различных подходов к выделению вторичного заряженного компонента, и сопоставлены спектры ЛПЭ ядерных фрагментов, образующихся под действием первичных космических частиц и ускоренных протонов высоких энергий.
- **Впервые** получены экспериментальные данные о вкладе сильноионизирующих короткопробежных частиц в спектры ЛПЭ и дозы на борту КА «ФОТОН-М» №4.
- Впервые получены экспериментальные данные о вкладе сильноионизирующих короткопробежных частиц в спектры ЛПЭ и дозы в трех модулях РС МКС на спаде 24° цикла солнечной активности.
- Впервые исследованы потоки сильноионизирующих короткопробежных частиц в различных модулях РС МКС в зависимости от дозы первичного излучения и условий защищенности модулей.
- Впервые получены экспериментальные данные о динамике накопления дозы от сильноионизирующих короткопробежных частиц на борту РС МКС во время долгосрочных полетов продолжительностью от 200 до 650 суток.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

- Разработан метод раздельной оценки вклада вторичных короткопробежных сильноионизирующих частиц, образовывающихся в актах ядерной фрагментации в материале ТТД.
- Экспериментально и теоретически обоснована ограниченность возможностей общепринятого способа определения чувствительности ТТД (подразумевающего измерение размеров осей входного эллипса) при анализе треков короткопробежных частиц.
- Разработанный и апробированный метод позволяет, помимо ЛПЭ, оценивать величину пробега короткопробежных частиц вблизи пика Брега, что повышает его информативность по сравнению с другими методами.
- Характеристики вторичного заряженного компонента космического излучения, оцененные с помощью разработанного метода с применением одностадийного травления, согласуются с результатами, полученными с помощью использовавшегося ранее подхода, предполагающего применение многостадийного травления, что на практике позволяет существенно упростить процедуру съема и последующей обработки информации.
- Установлено, что вклад короткопробежных сильноионизирующих ядерных фрагментов в общую эквивалентную дозу составляет от 20 % до 35 %. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании эффектов воздействия космической радиации на биообъекты на борту биологических спутников и МКС.
- Разработанный метод внедрен в ГНЦ РФ-ИМБП РАН при выполнении СЧ ОКР по договорам с ПАО «РКК «Энергия» и «ЦСКБ-Прогресс» (Акт о внедрении № 26318-2115/855 от 15.04.2019 г.).

Достоверность:

В наземных экспериментах на ускорителях тяжелых ионов и источниках α -частиц результаты измерения чувствительности ТТД были получены с использованием различных альтернативных способов и сравнивались с доступными литературными данными, при этом: для треков длиннопробежных частиц наблюдалось разумное согласие результатов, полученных двумя усовершенствованными способами, для треков короткопробежных частиц наблюдалось разумное согласие результатов, полученных усовершенствованными способом с литературными данными. Кроме того, результаты измерения пробегов были сопоставлены с их табличными значениями и показали хорошее согласие.

Результаты космических экспериментов сравнивались с литературными данными, полученными независимо другими исследовательскими группами NIRS-QST (г. Чиба, Япония), MTA EK (г. Будапешт, Венгрия) и UJF AVCR (г. Ржеж, Чехия) и продемонстрировали разумное согласие всех измеренных величин без учета вклада вторичного компонента.

Результаты, выносимые на защиту:

- 1) Модернизированный метод раздельного измерения характеристик первичного и вторичного компонента космического излучения твердотельными трековыми детекторами.
- 2) Результаты измерений отклика ТТД при регистрации короткопробежных и длиннопробежных частиц с большими значениями dE / dx, определяемого с использованием различных наборов геометрических параметров трека.
- 3) Результаты измерения вклада ядерных фрагментов в спектры ЛПЭ и дозы на борту РС МКС и КА «ФОТОН-М» №4.

Личный вклад автора

Личный вклад автора заключается в:

- разработке метода экспериментальных исследований и верификации алгоритмов расчета параметров треков длиннопробежных и короткопробежных заряженных частиц;
- участии в космических экспериментах на борту КА «БИОН-М» №1, КА «ФОТОН-М»
 №4 и РС МКС;
- выполнении химического травления детекторов, ручного сканирования треков, разработке программных кодов, обработке экспериментальной информации и анализе полученных данных;
- участии в международном сличении данных космических экспериментов;
- разработке, подготовке и реализации программ экспериментов и участии в наземных калибровочных облучениях детекторов на ускорителях TANDETRON (*UJF AVCR*, Ржеж, Чехия) и HIMAC (*NIRS-QST*, г. Чиба, Япония);
- подготовке и оформлении полученных результатов в виде совместных публикаций, научных докладов и отчетов в период с 2014 по 2019 гг.

Апробация работы

Результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на:

- Конференции по космической биологии и авиакосмической медицине с международным участием (2014, 2016);
- Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (2015);
- Международной научно-практическая конференции «Научные исследования и эксперименты на МКС» (2015);
- Annual HIMAC Meeting (2018, 2019);
- Annual International Gravitational Physiology Meeting (2017);
- International Conference on Particle Physics and Astrophysics (2017);
- International Symposium "Physics, Engineering and Technologies for Bio-Medicine" (2016, 2018);
- Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station (2015, 2016, 2017).

Результаты диссертационной работы представлены в публикациях:

- 1) **Иноземцев К.О.**, Кушин В.В., Толочек Р.В., Шуршаков В.А. *Измерение доз и спектров линейной передачи энергии космического излучения внутри биологического спутника «Бион-М1»* // Авиакосмическая и экологическая медицина (ВАК, индексируется в БД SCOPUS), Т. 49, № 2, с. 16-22, 2015.
- 2) Кушин В.В., **Иноземцев К.О.** Исследование чувствительности трекового детектора *CR-39* к тяжелым заряженным частицам космического излучения // Приборы и техника эксперимента (ВАК, индексируется в БД SCOPUS, WoS), № 6, стр. 91-96, 2015.
- 3) **Inozemtsev K.O.**, Kushin V.V., Maklyaev E.F., Shurshakov V.A. *Measurement of linear* energy transfer spectra of high-LET space radiation inside the International Space Station modules (2013-2014) // Physics Procedia (индексируется в БД SCOPUS, WoS), Vol. 74, pp. 324-327, 2015.
- 4) **Иноземцев К.О.**, Кушин В.В., Толочек Р.В., Шуршаков В.А. *Применение комбинированного метода на основе пассивных детекторов для измерения доз космического излучения на борту КА БИОН-М1* // «Космический научный проект «БИОН-М1»: медико-биологические эксперименты и исследования» / под ред. А.И. Григорьева. М.: ГНЦ РФ-ИМБП РАН, 2016. ISBN 978-5-902119-32-6 с. 569-580.
- 5) **Inozemtsev K.O.**, Kushin V.V. *Comparative analysis of CR-39 sensitivity for different sets of measurable track parameters* // Radiation Measurements (индексируется в БД SCOPUS, WoS), Vol. 91, pp. 44-49, 2016.
- 6) **Inozemtsev K.O.**, Kushin V.V., Kodaira S., Shurshakov V.A. *Observation of fragmentation events caused by space radiation: Contribution to the LET spectrum as measured with CR-39 track detectors* // Radiation Measurements (индексируется в БД SCOPUS, WoS), Vol. 95, pp. 37-43, 2016.
- 7) Karganov M.Yu., Alchinova I.B., Yakovenko E.N., Kushin V.V., **Inozemtsev K.O.**, Strádi A., Szabó J., Shurshakov V.A., Tolochek R.V. *The "PHOENIX" Space Experiment: Study of Space Radiation Impact on Cells Genetic Apparatus on Board the International Space Station* // Journal of Physics: Conference Series (индексируется в БД SCOPUS), Vol. 784, 012024, 2017.
- 8) Strádi A., Szabó J., **Inozemtsev K.O.**, Kushin V.V., Tolochek R.V., Shurshakov V.A., Alchinova I.B., Karganov M.Yu. *Comparative radiation measurements in the Russian segment of the International Space Station by applying passive dosimeters* // Radiation Measurements (индексируется в БД SCOPUS, WoS), Vol. 106, pp. 267-272, 2017.
- 9) Алчинова И.Б., Яковенко Е.Н., Кушин В.В., **Иноземцев К.О.**, Карганов М.Ю., Баранов В.М.. *Космический эксперимент «ФЕНИКС»: предварительные итоги //* Авиакосмическая и экологическая медицина (ВАК, индексируется в БД SCOPUS), Т. 51, № 7 (специальный выпуск), с. 26-30, 2017.
- 10) **Inozemtsev K.O.**, Kushin V.V., Kodaira S., Shurshakov V.A. *On the consistency among different approaches for nuclear track scanning and data processing* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A (индексируется в БД SCOPUS, WoS), Vol. 887, pp. 133-137, 2018.

11) **Inozemtsev K.O.**, Kushin V.V., Strádi A., Ambrožová I., Kodaira S., Szabó J., Tolochek R.V., Shurshakov V.A. *Measurement of different components of secondary radiation onboard International Space Station by means of passive detectors* // Radiation Protection Dosimetry (индексируется в БД SCOPUS, WoS), Vol. 181, No.4, pp. 412-417, 2018.

Объем и структура

Диссертация изложена на 157 страницах машинописного текста, включая 14 таблиц, 50 рисунков, 20 формул, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитированной литературы из 125 наименований и одного приложения.

Содержание работы

Во введении кратко обосновывается актуальность задачи выделения вторичного заряженного компонента космического излучения на борту космических аппаратов на низкой околоземной орбите и оценки ее потоковых и дозовых характеристик с использованием твердотельных трековых детекторов (ТТД). Сформулированы цели и задачи исследования, обоснованы научная значимость и новизна исследования, а также отмечены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе кратко рассмотрены основные компоненты космической радиации на низкой околоземной орбите. По результатам предыдущих космических экспериментов [31] отмечается, что именно высокоэнергетические первичные частицы ответственны за формирование вторичного нейтронного компонента КИ на низкой околоземной орбите, при этом в литературе гораздо меньшее внимание уделяется вторичным заряженным частицам, образующимся в таких же ядерных взаимодействиях.

Основной вклад в общую поглощенную дозу принадлежит вторичным протонам (~ 5 %), вклад остальных фрагментов (*d*, *t*, ³*He*, ⁴*He* и др.) не превышает 1 % [24]. Хотя процентный вклад вторичных составляющих не кажется значительным по сравнению с долей первичного компонента, однако, он не отражает в полной мере результирующее влияние фрагментации на радиобиологические эффекты и компонентную базу электроники. Подтверждением этого служит совокупность большого количества экспериментальных значений относительной биологической эффективности, измеренных на различных биологических объектах [9]. Аналогичные выводы относятся и к воздействию вторичной космической радиации на компонентную базу электроники [32]. Таким образом, вторичный заряженный компонент с высокими значениями ЛПЭ, давая сравнительно невысокий вклад в среднюю интегральную дозу, по своему радиационному воздействию в некоторых случаях может давать эффект, сравнимый с эффектами первичного компонента.

Специфические характеристики заряженных фрагментов, такие как относительно низкие средние значения кинетической энергии, ЛПЭ и пробегов [11] накладывают существенные ограничения на выбор детектора.

В настоящее время на борту МКС и возвращаемых биологических спутниках используется широкий арсенал средств измерений космической радиации, который условно разделен на два больших класса: пассивные и активные, при этом, все существующие активные средства измерений на орбите [6] ядерные события либо не регистрируют, либо интерпретируют их некорректно. Из группы пассивных детекторов, в настоящее время применяемых для регистрации фрагментов, как на орбите, так и в наземных ускорительных экспериментах [21] наиболее удобными считаются твердотельные (диэлектрические) трековые детекторы (ТТД), обладающие сравнительно высоким порогом, что исключает регистрацию высокоэнергичной части первичного потока с низкими значениями ЛПЭ.

Ранее было установлено, что раздельная регистрация первичного и вторичного излучения возможна, например, при обработке ТТД травлением в два этапа и сканирования после каждого травления [3]. Однако, разделение треков таким способом не является прямым свидетельством того, что все треки после первой короткой стадии травления, образованы вторичными частицами внутри детектора. Кроме того, сами ТТД крайне редко применяется для подобных исследований, и при выделении событий, относящихся к актам ядерной фрагментации, большинство исследователей используют упрощенные методы экспресс сканирования, снижая тем самым надежность и достоверность получаемых результатов.

Во **второй главе** представлена общая характеристика ТТД типа CR- $39^{\text{тм}}$ и рассматривается принцип формирования в них треков заряженных частиц. Здесь же даны определения основных регистрационных параметров, таких как относительная скорость травления $V = V_t / V_B$ (где V_t – скорость травления в треке, V_B – скорость травления необлученного материала) и минимальный порог регистрации. Показана область эффективной регистрации детектором частиц космического излучения и рассмотрены базовые алгоритмы измерения потоков и доз космического излучения. Представлено описание типового режима травления, а также оборудования и программноматематического комплекса (ПМО) для сканирования ТТД и съема трековой информации.

В данной работе в качестве основного использовался ТТД марки «TASTRAK» (Тrack Analysis Systems Ltd., Со., г. Бристоль, Великобритания), имеющий порог регистрации ~ 10 кэВ/мкм (H_2O) [30]. Травление детекторов выполнялось в 6 N растворе NaOH при температуре 70 °C, при этом, длительность травления выбиралась в зависимости от условий облучения и составляла от одного до пятнадцати часов. Отмечается, что выбранный режим является общепринятым для ТТД данной марки [25]. Последующее сканирование поверхности детекторов выполнялось на оптическом микроскопе Carl Zeiss® AxioScope.A1, оборудованном цифровой камерой 5 Мпикс с полным увеличением 100^x - 1000^x , а параметры отдельных треков измерялись с помощью ПМО «Carl Zeiss® Zen Lite 2011 (Blue edition)» [8] с надстройкой «SALINE v.4.0» (MTAEK, г. Будапешт, Венгрия).

Экспериментальная оценка величины порога регистрации детектора была выполнена по результатам калибровочного облучения протонами с энергией $E_p = 5.8$ МэВ на ускорителе TANDETRON (*UJF AVCR*, г. Ржеж, Чехия).

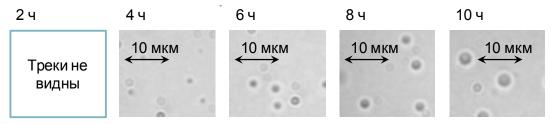


Рисунок 1 — Результаты прямого измерения порога ТТД марки «TASTRAK» при облучении протонами с энергией $E_p = 5.8$ МэВ. Последовательное травление с заданным временным интервалом в 2 часа позволяет наблюдать формирование треков частиц с ЛПЭ вблизи порога регистрации.

Было показано, что треки протонов с энергией $E_p = 5.8$ МэВ становятся уверенно различимыми (диаметр трека составляет более 1 мкм) после 6 часов травления. Измеренный порог регистрации детектора «TASTRAK» составил ~ 7 кэВ/мкм (CR-39TM) или 8 кэВ/мкм (H_2O), что согласуется с данными, заявленными производителем [30].

Экспериментальное определение скорости травления V_B было выполнено по результатам калибровочных облучений на источнике ^{252}Cf (на базе лаборатории природных источников ионизирующих излучений $\Phi \Gamma V\Pi$ НТЦ РХБГ ΦMEA России). При этом, величина V_B варьировалась от 1,29 до 1,35 мкм/час для детекторов из различных партий, что хорошо согласуется с результатами других авторов [16, 29].

Отмечается, что относительно высокий порог регистрации ТТД исключает возможность получения информации о потоках и дозах слабоионизирующего компонента космического излучения с ЛПЭ < 10 кэВ/мкм (H_2O), формирующего до 90 % общей поглощенной дозы [4]. В этом случае необходимая для оценки эффектов радиационного биологические объекты воздействия на И компонентную базу электроники дозиметрическая информация может быть восполнена с помощью других типов детекторов, например – термолюминесцентных детекторов (ТЛД). Далее приводится вариант алгоритма совместной обработки данных ТЛД и ТТД, который позволяет определять суммарные поглощенную и эквивалентную дозы во всем диапазоне ЛПЭ [12].

В данной работе в ряде случаев для оценки дозы слабоионизирующего первичного космического излучения применялись российские ТЛД марки ДТГ-4-6 на основе монокристаллов $^{Nat}LiF:Mg,Ti$ (ООО «Уралприбор», г. Пермь, РФ). Отжиг ТЛД и анализ данных осуществлялся на дозиметрическом комплексе HARSHAW-3500 с использованием специализированного ПМО «Windows Radiation Evaluation and Management System». При отжиге использовались параметры, указанные в работе [1]. Регистрационные характеристики ТЛД были экспериментально подтверждены по результатам калибровочных экспериментов на ускорителе HIMAC (NIRS-QST, г. Чиба,

Япония), выполненных автором в кооперации со специалистами *NIRS-QST* и ГНЦ РФ-ИМБП РАН. При этом, было установлено, что измеренные с помощью ТЛД дозы протонного излучения в диапазоне от 100 до 1000 мГр, находятся в хорошем согласии с результатами, полученными при калибровке на источнике γ -квантов. Кроме того, было показано, что относительная эффективность регистрации ТЛД ДТГ-4-6 может быть описано эмпирической зависимостью [12].

В **третьей главе** рассмотрены различные алгоритмы определения относительной скорости травления (чувствительности) V и представлены экспериментальные результаты их отработки на треках длиннопробежных и короткопробежных частиц.

Отмечается, что параметр V обусловлен кинетикой формирования трека в процессе химического травления [13]. При этом, основные геометрические параметры трека (рисунок 2) могут быть связаны тригонометрическими соотношениями:

$$\frac{D}{2H} = \frac{\cos \delta}{\sin \delta + \sin \theta} \tag{1}$$

$$\frac{d}{2H} = \sqrt{\frac{\sin\theta - \sin\delta}{\sin\theta + \sin\delta}} \tag{2}$$

Здесь: D и d — большая и малая оси входного эллипса соответственно; H — толщина стравленного слоя; θ — угол падения частицы; δ — половинный угол раствора конуса трека (**рисунок 2**). При этом чувствительность находится как $V = \sin^{-1} \delta$, а толщина стравленного слоя H предполагается известной и обозначается как H_0 (ее величина находится по результатам независимых измерений, как $H_0 = V_B \cdot t$, где t — время травления).

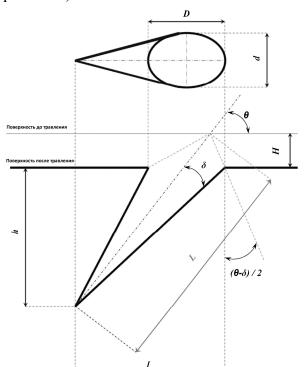


Рисунок 2 — Геометрия трека в конической (первой) фазе травления. Измеряемые параметры: d и D — малая и большая ось входного эллипса трека; H — толщина стравленного слоя; l — проекция трека на плоскость детектора; h — глубина трека. Вычисляемые параметры: θ — угол падения частицы; δ — половинный угол раствора конуса трека; L — травимая длина трека. Параметр H в некоторых подходах может рассматриваться как неизвестная величина.

Хотя решение системы уравнений $\{(1), (2)\}$ используется большинством исследователей [3, 5] как наиболее простой алгоритм нахождения искомой величины V, он является верным, если параметр V остается неизменным вдоль всей травимой длины трека и развитие трека начинается непосредственно с начальной поверхности детектора (что не выполняется для треков вторичных короткопробежных частиц). Особенностью такого подхода является неограниченный рост величины V вблизи граничных (максимальных) значений $D/2H_0$ при различных углах падения частицы θ (рисунок 3(a)).

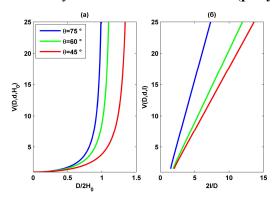


Рисунок 3 — Графическое представление значений чувствительностей V, рассчитанных для различных наборов измеряемых параметров для заданных углов падения θ .

Одной из альтернатив этому способу, является измерение дополнительного параметра l – проекции трека на плоскость детектора (рисунок 2), впервые предложенное в работе [13], однако до сих пор не применявшееся для анализа треков космического излучения. При этом, параметр H предполагается неизвестной величиной, а система уравнений $\{(1), (2)\}$ дополняется выражением:

$$\frac{l}{H} = \frac{\cos \theta}{\sin \delta} + tg \frac{\theta - \delta}{2} \tag{3}$$

Отмечается, что чувствительность, найденная из уравнений $\{(1)$ - $(3)\}$, демонстрирует плавный рост во всем диапазоне значений безразмерного параметра 2l/D для различных значений угла θ (рисунок 3(6)).

В качестве второй альтернативы, впервые предлагается оригинальный подход, требующий дополнительное измерение глубины трека h вместо проекции l (рисунок 2). В этом случае уравнения (1) и (2) также остаются неизменными, но уравнение (3) заменяется на:

$$\frac{h}{H} = \frac{\sin \theta}{\sin \delta} - 1 \tag{4}$$

Далее приводятся решения систем уравнений $\{(1)-(2)\}$, $\{(1)-(3)\}$ и $\{(1)$, (2), $(4)\}$ и обсуждается точность измерения параметров и погрешности для каждого из трех подходов. Подчеркивается, что все уравнения получены в рамках единой модели эволюции трека, основанной на предположении V = const, что предполагает соответствие

всех неизвестных переменных вне зависимости от способа их вычисления: $V(D,d,H_0)$ = V(D,d,l) = V(D,d,h) и $H(D,d,l) = H(D,d,h) = H_0$.

Сравнительный анализ трех рассмотренных методов сканирования и обработки трековой информации выполнен по результатам калибровки на ускорителе НІМАС (рисунок 4).

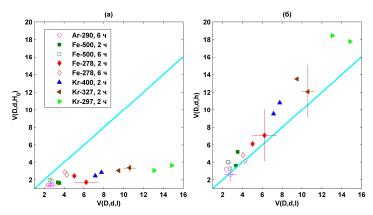


Рисунок 4 – Сравнение чувствительностей, полученных различными способами. Сплошные линии отвечают условию полного совпадения значений V. Тип ионов, энергия (через дефис, в единицах МэВ/нуклон) и время травления (в часах) указаны в легенде.

Аналогичные сравнения были выполнены для второго вычисляемого параметра – H, при этом обнаружено, что отношения толщин стравленного слоя $H(D,d,l) / H_0 < 1$ для треков частиц с величинами 2 < V < 15 (рисунок 5).

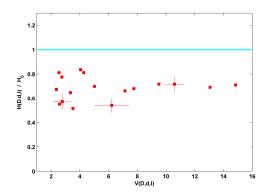


Рисунок 5 – Отношения параметров Рисунок 6 – Сравнение толщин стравленного H(D,d,l) / H_0 , полученные для треков с различными величинами V(D,d,l).

слоя H, вычисленных с использованием различных наборов измеряемых параметров. Сплошная линия отвечает условию полного совпадения.

Кроме того, было показано, что оба метода H(D,d,h) и H(D,d,l), с учетом ухудшения точности измерения параметра h по сравнению с точностью измерения параметра l, дают близкие результаты (рисунок 6).

По результатам эксперимента отмечается, что разумное соответствие всех методов наблюдается только в области относительно малых чувствительностей V < 5, в области больших значений V, дающими разумно согласующиеся результаты, могут считаться только подходы V(D,d,h) и V(D,d,l). Кроме того, трек вторичной частицы, образовавшийся в объеме ТТД, будет характеризоваться отношением параметров H(D,d,l) / $H_0 < 0.7$ (рисунок 5).

Далее, по аналогии с предыдущим случаем, рассмотрено геометрическое описание трека короткопробежной частицы с энергией вблизи пика Брэгга ($V \neq \text{const}$) и приводятся его основные геометрические параметры (**рисунок 7**).

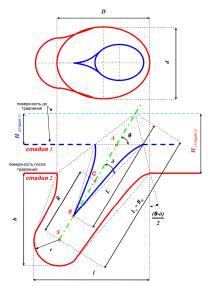


Рисунок 7 – Геометрическое описание эволюции трека короткопробежной частицы травления основные В процессе И измеряемые параметры: $d, D, H, h, l, \theta, \delta, L$ – аналогично **рисунку** 2, r – радиус сферы на конце трека, L_r – пробег частицы в материале детектора, отрезок наблюдаемая длина трека, комментарии относительно параметра R и отрезка CSприводятся далее.

Отмечается, что в данном случае профиль трека, хотя и описывается системой интегральных уравнений, где в качестве основного параметра заложена функция V(R), описывающая изменение скорости травления в зависимости от величины ее остаточного пробега R [23], однако, применение этого описания на практике представляется затруднительным, а порой и невозможным. Одной из альтернатив этому подходу является использование упрощения, когда скорость травления полагается неизменной вдоль траектории, при этом измеренная величина V и остальные вычисляемые параметры могут рассматриваться как усредненные вдоль длины трека (для треков в первой стадии) или пробега частицы (для треков во второй стадии). Очевидно, что такой подход вносит неопределенность в результаты эксперимента, тем не менее, обоснованность замещения переменной вдоль траектории чувствительности V на ее среднее значение обсуждалось в течение ряда лет в работах [7, 10, 20]. Констатируется, что подобный «упрощенный» подход может быть использован для анализа треков вторичных космических частиц, при этом в базовой системе уравнения (1) и (2) — остаются неизменными, уравнение (3) замещается уравнением (5), и, кроме того дополнительно вводится уравнение (6):

$$l = L_r \cdot \cos(\theta) + r + H \cdot tg\left(\frac{\theta - \delta}{2}\right) \tag{5}$$

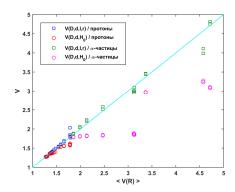
$$H = L_r \cdot \sin(\delta) + r \tag{6}$$

Система уравнений {(1), (2), (5), (6)} справедлива уже для обеих стадий развития трека (рисунок 7). Применимость данного подхода для анализа параметров треков короткопробежных частиц была выполнена экспериментально и по результатам модельных расчетов на треках короткопробежных частиц: протонов с энергиями от 1 до 2 МэВ и ядер углерода с энергиями от 10 до 18 МэВ — облучение на ускорителе TANDETRON; а также α-частиц с начальными энергиями 5,15 (²³⁹Pu) и 2,75 МэВ (после их замедления в лавсановом фильтре) — облучение на базе ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА России.

Моделирование было выполнено для треков протонов с энергиями 1, 1,5 и 2 МэВ, приходящих в детектор извне под углами 60° и 75° , и α -частиц с энергиями 2,75 и 5,15 МэВ, приходящих в детектор извне под углами 58° и 66° .

Показано, что, как и для случая $V = {\rm const}$ (**рисунок 4**), результаты расчета значений V(D,d,l,r) и $V(D,d,H_0)$ совпадают друг с другом лишь в области малых скоростей, при этом в области больших скоростей, соответствующих пику Брэгга, наблюдается существенное расхождение. Однако, результаты расчета значений V(D,d,l,r) и < V(R) > практически полностью совпадают во всем диапазоне значений, при этом наблюдаемое незначительное расхождение в области пика Брэгга объясняется ухудшением точности определения V(D,d,l,r) за счет использования дополнительного параметра r [20]. Экспериментальная проверка (**рисунок 9**), выполненная по аналогии с работой автора [20], показала разумное согласие экспериментальных и эмпирических значений средних скоростей травления (с учетом погрешности измерений), что также подтверждает возможность применения данного подхода для измерения средних значений V (а следовательно и ЛПЭ) для треков вторичных короткопробежных частиц в космических экспериментах.

Экспериментальная проверка данного подхода при измерениях пробегов, была выполнена на треках протонов, α -частиц и ядер C, наблюдавшихся во второй фазе травления, и показала разумное согласие измеренных средних значений с табличными значениями [33]. Так, например: для протонов с энергией 1 МэВ: $L_r(D,d,l,r)=15,84\pm2,54$ мкм в CR-39TM (табличное значение 19,81), для ядер ⁴He (α -частиц) с энергией 5,15 МэВ: $L_r(D,d,l,r)=28,95\pm4,35$ мкм в CR-39TM (табличное значение 30,54), для ядер ¹²C с энергией 10 МэВ: $L_r(D,d,l,r)=9,31\pm1,08$ мкм в CR-39TM (табличное значение 10,96).



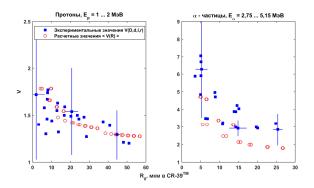


Рисунок 8 Сравнение значений скоростей травления V(D,d,l,r)И $V(D,d,H_0)$, рассчитанных для модельных треков короткопробежных частиц, и расчетных средних значений скорости V(R). Сплошная линия условию полного отвечает ИΧ совпадения: $V(D,d,l,r) = V(D,d,H_0) =$ < V(R) >.

Рисунок 9 — Сравнение экспериментальных значений скоростей травления V(D,d,l,r) со средними значениями скорости < V(R) >, рассчитанных с использованием эмпирических функции [14] — для протонов, и [15] — для α -частиц.

Далее, отмечается, что при продолжительном травлении треков во второй стадии (рисунок 7), форма трека становится слишком сложной и практически непригодной для анализа. Для анализа параметров таких треков предлагается использование того же подхода в предположении: l = D и $d = 2 \cdot r$, которое, хотя и не позволяет рассчитывать параметр V, тем не менее дает возможность оценить величину пробега $L_r(D,d,l,r)$. Данный подход был экспериментально отработан на треках α -частиц с энергией 2,75 МэВ и произвольной вторичной короткопробежной частицы, выбранной среди данных космического эксперимента [19]. Сравнение результатов измерений параметра $L_r(D,d,l,r)$ для второй и третьей стадий травления показало их хорошее согласие. Дальнейший анализ применимости этого подхода был выполнен по результатам модельных расчетов. При этом оцененное значение пробега может наилучшим образом соответствовать табличной величине, если выполняется соотношение вида $R_{\theta} \approx H_{\theta} / \sin \theta$, (при этом точность подобной оценки будет составлять не менее 10 %).

Кроме того, на примере модельных расчетов рассмотрен случай, когда короткопробежная частица вылетает из детектора (здесь, в отличие от предыдущих случаев, при описании используется функция V(R) резко уменьшающаяся вдоль траектории частицы). Показано, что расчетные величины $V(D,d,H_0)$ превышают V(D,d,l). Как и для предыдущих случаев, наилучшим образом соответствуют друг другу величины V(D,d,l) и < V(R)>, однако, условие полного совпадения для них уже не выполняется.

В четвертой главе приводится описание и основные результаты применения метода раздельного измерения первичного и вторичного компонента космического излучения для анализа данных космических экспериментов.

Во вводной части рассмотрены основные общепринятые подходы, применяемые при измерении характеристик космического излучения с использованием ТТД. Сравнение этих подходов было выполнено на примере спектров ЛПЭ, измеренных автором [1] и научными группами *МТА ЕК* [28] и *UJF AVCR* [4] на борту КА «БИОН-М» №1. В этих измерениях учитывались только треки длиннопробежных первичных частиц. Отмечается, что рассмотренные способы измерения спектров, хотя и дают воспроизводимые результаты [26], которые могут описываться распространенными моделями космического излучения [17], но, тем не менее, являются малоинформативными ввиду отсутствия данных о вкладе вторичных заряженных частиц (которые пропускаются или не могут быть распознаны как вторичные в процессе сканирования и обработки данных).

Дальнейшее развитие способа измерения спектров ЛПЭ было направлено на усовершенствование отбора треков вблизи порога регистрации, и реализации усовершенствованных методов сканирования треков, описанных в главе 3 с учетом всех наблюдаемых в детекторе событий (в том числе, отвечающим вторичным частицам).

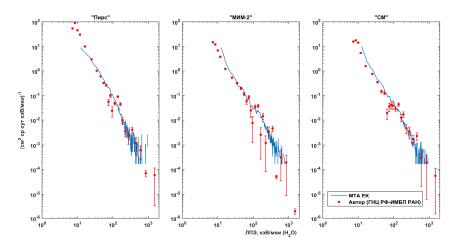


Рисунок 10 — Сравнение дифференциальных спектров ЛПЭ, измеренных на борту РС МКС научной группой $MTA\ EK$ и автором. Предварительные результаты опубликованы в работе [27].

Сравнение экспериментальных данных, полученных автором с использованием предложенных улучшений, с результатами MTA EK продемонстрировали согласие в диапазоне 20-1000 кэВ/мкм (H_2O) (рисунок 10). При этом, наблюдаемые различия в спектрах в области ЛПЭ < 20 кэВ/мкм (H_2O) обусловлены неопределенностью калибровочных функций, использовавшихся в методе MTA EK для обработки данных двух-стадийного травления. Выявленное различие в дозовых величинах в ~15 % для суммарной поглощенной дозы, и 8-18 % для суммарной эквивалентной дозы [27] может быть отнесено на счет вклада вторичных короткопробежных частиц и тяжелых ядер ГКЛ. Дальнейшие усилия были направлены на совершенствование методики раздельного

измерения вторичного компонента КИ, который фактически игнорируется в методе MTA EK [25], или анализируется с применением некорректного в данном случае «классического» подхода в работах [3, 5].

Далее, приводятся распределения плотностей треков вторичных заряженных частиц по пробегам, полученные в рамках КЭ «Матрешка-Р» на борту РС МКС. Установлено, что величины пробегов вторичных заряженных частиц, рождающихся как в различных материалах «локальной защиты», так и в самом ТТД на различной глубине, не превышают 30 мкм, при этом наблюдаемая плотность треков с пробегами от 10 до 30 мкм практически не меняется с увеличением толщины стравленного слоя. Показано, что для надежного выделения вторичных частиц, образовавшихся внутри ТТД, достаточно выполнения следующих условий: использования в качестве локальной защиты легких материалов, вытравливания поверхностного слоя толщиной ~ 10 мкм и исключения при сканировании сильно перетравленных треков (наблюдающихся в третьей стадии развития, например, событие 7c на рисунке 11).

Далее приводится описание усовершенствованного метода выделения вторичного заряженного компонента, основанного на ручном сканировании и отборе событий, а также обработке трековой информации с применением расширенного подхода (D,d,l,r). Идентификация треков вторичных частиц при этом возможна по анализу отношения параметров H(D,d,l) / H_0 и формы трека в соответствии с авторской классификацией (рисунок 11). Классификация составлена по результатам наблюдения большого количества треков в детекторах, экспонировавшихся на борту КА «БИОН-М» №1 [1], КА «ФОТОН-М» №4 [18] и РС МКС [17].

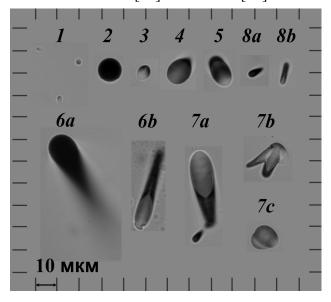
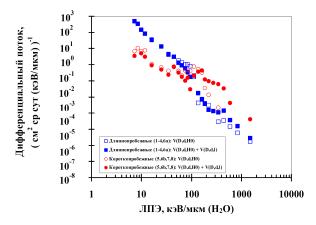


Рисунок 11 – Микрофотографии типичных событий, наблюдаемых в ТТД типа CR-39тм после экспозиции на околоземной орбите. Здесь: события 1, 2, 3, 4, 6a – треки длиннопробежных легких и тяжелых ядер с различными ЛПЭ и углами вхождения в детектор, события 5, 6b, 7a, 7b, 7c, 8a, 8b – треки вторичных частиц с различными ЛПЭ, наблюдаемые как виде многотрековых событий («звезд»), так и отдельно. События типа 7*c* при сканировании не учитываются.

Далее приводится описание эксперимента на борту КА «ФОТОН-М» №4 и процедуры получения экспериментальных данных. Детекторы «TASTRAK» травились в 6 N растворе *NaOH* при температуре 70° С в течение 6 ч, после чего сканирование треков выполнялось вручную на оптическом микроскопе Carl Zeiss® AxioScope.A1 с общим

увеличением $100^{X} - 1000^{X}$, оснащенным 5-мегапиксельной цифровой камерой с помощью ПМО «Carl Zeiss® Zen Lite 2011 (Blue Edition)» [8]. Результаты измерений дифференциальных спектров ЛПЭ, полученные различными методами обработки трековых данных (рисунок 12), продемонстрировали разумное согласие для первичного компонента. Однако, для вторичного компонента сходство данных наблюдалось только в области ЛПЭ < 100 кэВ/мкм (H_2O). В области ЛПЭ > 100 кэВ/мкм (H_2O) подход V(D,d,l) дал более высокие значения потоков по сравнению с «классическим» методом $V(D,d,H_0)$, при этом разница составила примерно один порядок величины.



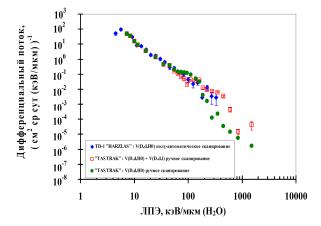


Рисунок 12 — Дифференциальные спектры ЛПЭ, измеренные различными методами в ручном сканировании ТТД СR-39^{тм} «TASTRAK» (сборка СПД-2). В скобках указаны типы треков (в соответствии с классификацией на рисунке 11), учтенные в процессе сканирования.

Рисунок 13 — Спектры ЛПЭ, измеренные двумя видами ТТД с применением различных способов сканирования треков и обработки данных. Ручное сканирование выполнено автором, полуавтоматическое — специалистами *NIRS-QST*. Оба детектора экспонировались в одной и том же сборке (СПД-2).

Сравнение спектров ЛПЭ, измеренных в полуавтоматическом сканировании ТТД TD-1 «HARZLAS» специалистами *NIRS-QST* и при ручном сканировании ТТД «TASTRAK» автором (**рисунок 13**), показало совпадение экспериментальных точек за исключением области ЛПЭ > 100 кэВ/мкм (H_2O), где ручное сканирование дает большие значения потока. Этот результат достигается путем учета треков короткопробежных вторичных частиц (**рисунок 11**), которые пропускаются при полуавтоматическом анализе.

Далее, приводятся результаты отработки методики на данных, полученных в экспериментах на борту РС МКС. Показано, что вид спектров первичных и вторичных частиц с ЛПЭ > 100 кэВ/мкм (H_2O) на борту РС МКС подобен спектрам, измеренным на борту КА «ФОТОН-М» №4.

Совместная обработка данных ТТД и ТЛД в соответствии с алгоритмом [12] позволила оценить суммарные поглощенные и эквивалентные дозы, а также вклад в них вторичного заряженного компонента. В результате нескольких серий экспериментов были

получены данные, иллюстрирующие динамику одновременного накопления доз от первичного и вторичного космического излучения на борту РС МКС [19].

Показано, что интегральные потоки короткопробежных частиц в модулях РС МКС увеличиваются по мере накопления дозы первичного слабоионизирующего компонента КИ (рисунок 14). Наибольшие потоки вторичных частиц были зарегистрированы в модуле «Пирс», а в модулях «СМ» и «МИМ-2» они оказались приблизительно одинаковыми. Результаты могут быть объяснены с учетом того, что вторичные частицы были образованы под действием слабоионизирующих (высокоэнергетических) первичных частиц, поток которых в модуле «Пирс» оказался выше из-за его относительно «слабой» защиты.

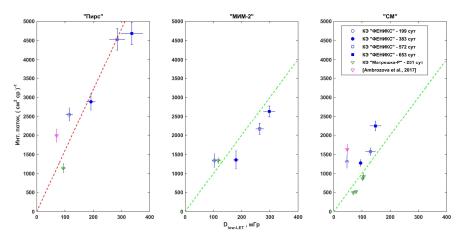


Рисунок 14 — Сравнение интегральных потоков короткопробежных вторичных частиц с ЛПЭ > 10 кэВ / мкм (H_2O), измеренных в различных модулях и миссиях на борту РС МКС автором [19] и научной группой *UJF AVCR* [3]. Прямые линии приводятся для наглядности.

Обоснованность надежности результатов, полученных предложенным методом, подтверждается путем сравнения с результатами измерений общепринятым способом [3]. Этот подход, часто называемый «метод совпадений», основан на анализе эволюции формы каждого отдельного трека при многократном (не менее двух раз) травлении детектора (рисунок 15). В этом подходе событие может быть идентифицировано как вторичное, если трек появился на одной из последующих стадий травления с ЛПЭ больше величины порога регистрации ТТД (частица образовалась внутри детектора) или стал перетравленным (частица остановилась в объеме детектора). В дополнение к многостадийного травления общепринятой методике [3], автор применял использовавшийся ранее анализ трековых данных [18], который был выполнен уже без отслеживания выполнения условия $H(D,d,l) / H_0 < 0,7$ (рисунок 5).

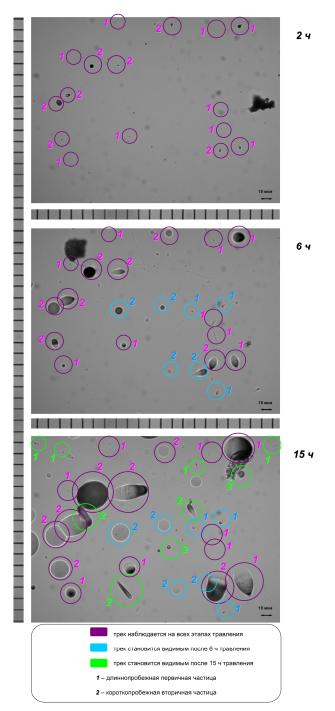


Рисунок 15 — Принцип выделения первичных и вторичных частиц при трех стадийном травлении, использовавшийся для получения данных рисунка 16. Данные снимки были получены для одной и той же области на поверхности ТТД после травлений продолжительностью 2, 6 и 15 часов. Толщина стравленного слоя составила 2,7, 8,1 и 20,2 мкм соответственно.

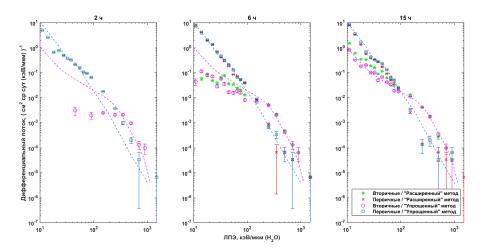


Рисунок 16 — Спектры первичных и вторичных частиц, измеренные на борту РС МКС различными методами. Пунктирные линии представлены для наглядности и представляют «опорный» уровень, выбранный по отношению к данным, полученным методом [18] после 15 часов травления. Детекторы экспонировались в модуле «МИМ-2» на панели № 103 в течение 653 суток, начиная с 24 ноября 2014 года [19].

Отмечается, что спектры длиннопробежных первичных частиц, измеренные после 6 и 15 часов травления двумя способами, практически не отличаются друг от друга. Небольшое различие наблюдается в спектре, измеренном после короткого сеанса травления (2 ч). При этом, поток частиц с малыми значениями ЛПЭ < 30 кэВ/мкм (H_2O) наблюдается ниже «опорного» уровня, и наоборот, поток частиц с большими значениями ЛПЭ > 80 кэВ/мкм (H_2O) превышает «опорный» уровень. В первом случае, часть треков со значениями ЛПЭ, близкими к порогу регистрации детектора, не успевают развиться до видимого размера. Во втором случае, часть короткопробежных частиц (возможно, попадающих в детектор извне) не может быть отделена от первичных [19].

С другой стороны, спектры вторичных короткопробежных частиц, измеренные после 2, 6 и 15 часов травления различными методами заметно отличаются друг от друга. Например, постепенное увеличение потока вторичных частиц при значениях ЛПЭ < 100 кэВ/мкм (H_2O) может наблюдаться при использовании одного и того же метода с увеличением времени травления. Спектры вторичных частиц, измеренные после 6 и 15 часов двумя различными способами, незначительно отличаются друг от друга. При этом, в случае длительного травления в 15 часов применение «метода совпадений» позволяет выделить несколько большее количество вторичных частиц с малыми значениями ЛПЭ < 80...100 кэВ/мкм (H_2O). Все подобные события можно отнести на счет вторичных протонов (в том числе и протонов отдачи), дейтронов и ядер группы He, образующихся при фрагментации ядер C и O в объеме детектора.

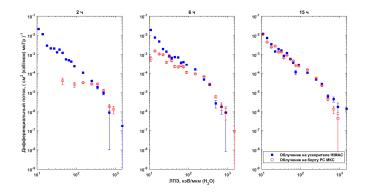


Рисунок 17 — Дифференциальные потоки вторичных частиц, измеренные методом [18] в космическом эксперименте и на ускорителе НІМАС при облучении протонами с энергией 230 МэВ. Нормировка величины потока приводится по аналогии с работой [21].

Сопоставление спектров вторичных частиц, полученных в космическом эксперименте со спектрами ядерных фрагментов, полученных на пучке протонов с энергией 230 МэВ продемонстрировало совпадение результатов в области ЛПЭ > 250 кэВ/мкм (H_2O) вне зависимости от времени травления (**рисунок 17**). Расхождение, наблюдаемое в области ЛПЭ < 200 кэВ/мкм (H_2O) сокращается с увеличением времени травления. После продолжительного травления в 15 часов спектры практически полностью совпадают друг с другом во всем диапазоне ЛПЭ. Наблюдаемые расхождения экспериментальных точек в области малых ЛПЭ можно объяснить ограниченностью возможности выделить среди всех событий треки вторичных космических частиц, имеющие малые видимые размеры (и значения ЛПЭ) в связи с их полной идентичностью трекам первичных частиц, приходящих в детектор извне.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования:

- 1) Разработан метод раздельного измерения вторичного и первичного заряженных компонентов космического излучения и оценки их потоковых и дозовых характеристик с применением твердотельных трековых детекторов типа CR-39TM.
- 2) Результаты отработки метода на треках ускоренных длиннопробежных тяжелых ионов, а также протонов и ядер углерода низких энергий и α-частиц показали возможность раздельного измерения вторичных частиц, образующихся в объеме детектора, и оценки для их средних значений ЛПЭ и величин пробегов при одностадийном травлении ТТД. Кроме того, была подтверждена надежность измерения параметров треков длиннопробежных частиц.
- 3) Применение метода в рамках нескольких космических экспериментов на борту РС МКС и КА «ФОТОН-М» №4 позволило оценить потоковые и дозовые характеристики вторичного короткопробежного компонента, при этом установлено, что: поток вторичных заряженных частиц превышает поток первичных в диапазоне ЛПЭ > 100 кэВ/мкм (H_2O); потоки вторичных заряженных частиц зависят от поглощенной дозы первичного слабоионизирующего космического излучения и условий защищенности КА; вклад ядерных фрагментов в суммарную поглощенную дозу космического излучения составляет 2-3 %, такой же вклад в суммарную эквивалентную дозу достигает 20-30 %.

Выводы:

- 1) В измерениях чувствительности ТТД можно использовать различные методы сканирования треков и обработки данных, которые основаны на единой модели развития трека. Однако, результаты, полученные различными способами, не могут быть рассмотрены как полностью соответствующие друг другу даже для треков конической формы, развитие которых начинается с начальной поверхности детектора с постоянной скоростью травления. Результаты более хорошо согласуются друг с другом в области малых значений V < 5. С практической точки зрения наблюдаемое расхождение обуславливает необходимость выполнения отдельных калибровок для каждого метода.
- 2) При сравнении различных способов измерения величины V наиболее надежными могут считаться методы V(D,d,h) и V(D,d,l), дающие близкие значения V во всем диапазоне измерений. Упрощенный метод $V(D,d,H_0)$ в области больших значений V занижает результаты в связи с недостаточно высокой точностью измерений.
- 3) Измерения проекции трека l и глубины погружения h позволяют оценивать толщину стравленного слоя H (другими словами, глубину, на которой началось формирование трека), что может быть использовано для идентификации треков вторичных частиц, образованных внутри детектора.
- 4) В случае переменной вдоль траектории V, результаты измерения чувствительности, полученные методом V(D,d,l), могут рассматриваться как усредненные вдоль травимой длины трека (или пробега, в случае когда трек наблюдается во второй фазе).
- 5) Для треков остановившихся частиц, наблюдающихся во второй и даже третьей фазе травления, метод V(D,d,l,r) позволяет оценить величину пробега в материале детектора. Полученные в треках α -частиц, протонов и ядер ^{12}C величины пробегов находятся в разумном согласии с табличными значениями.
- 6) Предложен способ анализа трековой информации для обработки данных космических экспериментов, который позволяет получать информацию о потоке вторичных короткопробежных частиц, обусловленных ядерными взаимодействиями первичного космического излучения с материалом ТТД. При этом показано, что подход V(D,d,l) (по сравнению со стандартным методом $V(D,d,H_0)$) дает более высокие значения измеряемого потока в диапазоне ЛПЭ > 100 кэВ/мкм (H_2O).
- 7) Применение разработанного метода в космических экспериментах на борту РС МКС и КА «ФОТОН-М» № 4 показали что: вклад ядерных фрагментов в спектр ЛПЭ является наиболее значительным в диапазоне 100-1000 кэВ/мкм (*H*₂*O*), по видимому, вне зависимости от параметров орбиты, условий защищенности и солнечной активности, что хорошо согласуется с выводами других авторов [3, 5, 22]; предположительно, поток ядерных фрагментов зависит от дозы первичных слабоионизирующих частиц, при этом характер этой зависимости может меняться в различных условиях защиты; вклад ядерных фрагментов в суммарную поглощенную дозу варьируется от 2 до 6 % и составляет 16-34 % от суммарной эквивалентной дозы на борту РС МКС, аналогичные вклады на борту спутника «ФОТОН-М» № 4 были оценены в пределах 3-4 % от суммарной поглощенной дозы и 21-35 % от суммарной эквивалентной дозы.

- 8) Дальнейшее развитие метода и его отработка показали, что поток первичных длиннопробежных частиц в ТТД на глубине более 8 мкм не зависит от метода анализа событий. С другой стороны, эффективность метода выделения вторичных частиц может зависеть от времени травления и способа их анализа.
- 9) Сравнение предложенного метода с общепринятым способом выделения вторичных частиц, основанным на применении многостадийного травления и анализа эволюции развития каждого отдельного трека [3], дает близкие результаты, что позволяет существенно облегчить процедуру сканирования детекторов и обработки экспериментальных данных.
- 10) Поток вторичных короткопробежных частиц, выделенных с помощью предлагаемого подхода, сопоставим с потоком продуктов ядерной фрагментации, измеренным на пучке протонов высоких энергий. Вклад таких событий в эксперименте на ускорителе составляет от 3 до 4 % в суммарную поглощенную дозу, такой же вклад в общую эквивалентную дозу достигает 30-33 %.
- 11) Полученные результаты свидетельствуют о существенном вкладе в эквивалентную дозу продуктов ядерной фрагментации, образованных в материале ТТД (близком по составу к биологической ткани) под действием, в основном, протонов высоких энергий. Эти данные могут быть полезны при анализе результатов радиобиологических космических экспериментов, оценке последствий воздействия космической радиации на организм космонавтов, а также при планировании долгосрочных пилотируемых космических полетов.

Список цитированных работ:

- 1 Иноземцев, К.О., и др. Измерение доз и спектров линейной передачи энергии космического излучения внутри биологического спутника «БИОН-М1» [Текст] / К.О. Иноземцев, В.В. Кушин [и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2015. Т. $49. \mathbb{N} \ 2. \mathbb{C}. 16-22.$
- 2 Шафиркин, А.В., Григорьев, Ю.Г. Межпланетные и орбитальные космические полеты. Радиационный риск для космонавтов (радиобиологическое обоснование) / А.В. Шафиркин, Ю.Г. Григорьев М.: ЗАО «Издательство «Экономика», 2009 639 с. ISBN 978-5-282-02948-2.
- 3 Ambrožová, I., et al. Contribution of different particles onboard ISS measured with track etched detectors [Text] / I. Ambrožová, M. Davídková [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. 2018. Vol. 180. Issues 1-4. pp. 138-141.
- 4 Ambrožová, I., et al. Cosmic radiation monitoring at low-Earth orbit by means of thermoluminescence and plastic nuclear track detectors [Text] / I. Ambrožová, K. Pachnerová Brabcová [et al.] // Radiation Measurements. 2017. Vol. 106. pp. 262-266.
- 5 Benton, E.R., et al. Passive dosimetry aboard the Mir Orbital Station: internal measurements [Text] / E.R. Benton, E.V. Benton [et al.]. // Radiation Measurements. 2002. Vol. 35. Issue 5. pp. 439-455.
- 6 Caffrey, J.A., Hamby, D.M. A review of instruments and methods for dosimetry in space [Text] / J.A. Caffrey, D.M. Hamby // Advances in Space Research. 2011. Vol. 47. Issue 4. pp. 563-574.

- 7 Caresana, M., et al. Determination of *LET* in PADC defectors through the measurement of track parameters [Text] / M. Caresana, M. Ferrarini [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2012. Vol. 683. pp. 8-15.
- 8 Carl Zeiss® Quick Guide Zen 2.3 (Blue Edition), 2016. First Steps with Zen [Электронный текст данных]. Режим доступа: URL: http://applications.zeiss.com/C125792900358A3F/0/A90E83CDDA35BAEAC12580360044143 8/\$FILE/ZEN2 3-First steps.pdf (последний доступ 19-05-2019).
- 9 Friedrich, T., et al. Systematic analysis of RBE and related quantities using a database of cell survival experiments with ion beam irradiation [Text] / T. Friedrich, U. Scholz [et al.] // Journal of Radiation Research. 2013. Vol. 54. Issue 3. pp. 494-514.
- 10 Fromm, M. Light MeV-ions etching studies in a plastic track detector [Text] / M. Fromm // Radiation Measurements. 2005. Vol. 40. Issues 2-6. pp. 160-169.
- Hagiwara, M., et al. Differential cross sections on fragment $(2 \le Z \le 9)$ production for carbon, aluminum and silicon induced by tens-of-MeV protons [Text] / M. Hagiwara, T. Sanami [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. -2012. Vol. 49. Issue 6. pp. 571-587.
- 12 Hajek, M., et al. Convolution of TLD and SSNTD measurements during the BRADOS-1 experiment onboard ISS (2001) [Text] / M. Hajek, T. Berger [et al.] // Radiation Measurements. 2008. Vol. 43. Issue 7. pp. 1231-1236.
- 13 Henke, R.P., Benton, E.V. On geometry of tracks in dielectric nuclear track detectors [Text] / R.P. Henke, E.V. Benton // Nuclear Instruments and Methods. 1971. Vol. 97. Issue 3. pp. 483-489.
- 14 Hermsdorf, D. Evaluation of the sensitivity function V for a registration of α-particles in PADC CR-39 solid state nuclear track detector material [Text] // D. Hermsdorf // Radiation Measurements. 2009. Vol. 44. Issue 3. pp. 283-288.
- 15 Hermsdorf, D. Measurement and comparative evaluation of the sensitivity V for protons and hydrogen isotopes registration in PADC detectors of type CR-39 [Text] / D. Hermsdorf // Radiation Measurements. 2009. Vol. 44. Issues 9-10. pp. 806–812.
- 16 Hermsdorf, D., et al. Measurement of bulk etch rates for poly-allyl-diglycol carbonate (PADC) and cellulose nitrate in a broad range of concentration and temperature of NaOH etching solution [Text] / D. Hermsdorf, M. Hunger, S. Starke // Radiation Measurements. 2007. Vol. 42. Issue 1. pp. 1-7.
- 17 Inozemtsev, K.O., et al. Measurement of linear energy transfer spectra of high-LET space radiation inside the International Space Station modules (2013-2014) [Text] / K.O. Inozemtsev, V.V. Kushin [et al.] // Physics Procedia. 2015. Vol. 74. pp. 324-327.
- 18 Inozemtsev, K.O., et al. Observation of fragmentation events caused by space radiation: Contribution to the LET spectrum as measured with CR-39 track detectors [Text] / K.O. Inozemtsev, V.V. Kushin [et al.] // Radiation Measurements. 2016. Vol. 95. pp. 37-43.
- 19 Inozemtsev, K.O., et al., Measurement of different components of secondary radiation onboard International Space Station by means of passive detectors [Text] / K.O. Inozemtsev, V.V. Kushin [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. 2018. Vol. 181. No. 4. pp. 412-417.
- 20 Inozemtsev, K.O., Kushin V.V. Comparative analysis of CR-39 sensitivity for different sets of measurable track parameters [Text] / K.O. Inozemtsev, V.V. Kushin // Radiation Measurements. 2016. Vol. 91. pp. 44-49.

- 21 Kodaira, S., et al. Contribution to dose in healthy tissue from secondary target fragments in therapeutic proton, He and C beams measured with CR-39 plastic nuclear track detectors [Text] / S. Kodaira, H. Kitamura [et al.] // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. Article number 3708.
- 22 Kushin, V.V. Measurement of LET distribution and absorbed dose from secondary particles on board the spacecraft [Text] / V.V. Kushin // Radiation Protection Dosimetry. 2010. Vol. 141. No. 2. pp. 199–204.
- 23 Nikezic, D., Yu, K.N. Three-dimensional analytical determination of the track parameters: over-etched tracks [Text] / D. Nikezic, K.N. Yu // Radiation Measurements. 2003. Issue 1. Vol. 37. pp. 39-45.
- 24 Paganetti, H., Nuclear interactions in proton therapy: dose and relative biological effect distributions originating from primary and secondary particles [Text] / H. Paganetti // Physics in Medicine and Biology. 2002. Vol. 47. Issue 5. pp. 747–764.
- 25 Pálfalvi, J.K. Fluence and dose of mixed space radiation by SSNTDs achievements and constraints [Text] / J.K. Palfalvi // Radiation Measurements. 2009. Vol. 44. Issues 9-10. pp. 724-728.
- 26 Sihver, L., et al. Radiation environment onboard spacecraft at LEO and in deep space [Text] / L. Sihver, S. Kodaira [et al.] // 2016 IEEE Aerospace Conference. 2016. pp. 1-9. doi:10.1109/AERO.2016.7500765State.
- 27 Strádi, A., et al. Comparative radiation measurements in the Russian segment of the International Space Station by applying passive dosimeters [Text] / A. Strádi, J. Szabó [et al.] // Radiation Measurements. 2017. Vol. 106. pp. 267-272.
- 28 Strádi, A., et al. Dose measurements on the BION-M1 satellite applying passive detector packages [Текст] // «Космический научный проект «БИОН-М1»: медико-биологические эксперименты и исследования» / под ред. А.И. Григорьева. М.: ГНЦ РФ-ИМБП РАН, 2016. ISBN 978-5-902119-32-6 с. 599-606.
- 29 Szabó, J., Pálfalvi, J.K. Calibration of solid state nuclear track detectors at high energy ion beams for cosmic radiation measurements: HAMLET results [Text] / J. Szabó, J.K. Pálfalvi // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. 2012. Vol. 694. pp. 193–198.
- 30 Tastrak PADC: [Электронный pecypc] // Track Analysis Systems Ltd., г. Бристоль. 2015. URL: http://www.tasl.co.uk/plastics.php. (Дата обращения 19.05.2019).
- 31 Tret'yakov V.I., et al. The First Stage of the "BTN_Neutron" Space Experiment onboard the Russian Segment of the International Space Station [Text] / V.I. Tret'yakov, I.G. Mitrofanov [et al.] // Cosmic Research. 2010. Vol. 48. No. 4. pp. 285-299.
- 32 Zebrev, G.I., Galimov, A.M. Compact Modeling and Simulation of Heavy Ion-Induced Soft Error Rate in Space Environment: Principles and Validation [Text] / G.I. Zebrev, A.M. Galimov // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2017. Vol. 64. Issue 8. pp. 2129-2135.
- 33 Ziegler, J.F., et al. SRIM The stopping and range of ions in matter (2010) [Text] / J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. 2010. Vol. 268. Issues 11-12. pp. 1818-1823.

Список сокращений

ГКЛ Галактические космические лучи

ГНЦ РФ- Государственный Научный Центр Российской Федерации – Институт

ИМБП РАН медико-биологических проблем Российской Академии Наук

КА Космический аппарат
 КИ Космическое излучение
 КЭ Космический эксперимент
 ЛПЭ Линейная передача энергии

МКС Международная космическая станция

НА Научная аппаратура

ОБЭ Относительная биологическая эффективность
 ПМО Программно-математическое обеспечение
 ПТК Перспективный транспортный корабль

РПЗ Радиационный пояс Земли

РС Российский сегмент

СПД Сборка пассивных детекторов

СЧ ОКР Составная часть опытно-конструкторской работы

ТЛД Термолюминесцентный детекторТТД Твердотельный трековый детекторHIMAC Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba

МТА ЕК Центр энергетических исследований Венгерской академии наук

(г. Будапешт, Венгрия)

NIRS-QST Национальный институт радиологических наук (г. Чиба, Япония)

TANDETRON Tandem accelerator

UJF AVCR Институт ядерной физики Чешской академии наук (г. Ржеж, Чехия)