

"УТВЕРЖДАЮ"

Проректор – Начальник Управления
научной политики и организации научных
исследований



А.А. Федянин

д.ф.-м.н., профессор

« 24 » декабря 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Иноземцева Константина Олеговича «Развитие метода раздельного измерения характеристик длиннопробежных и короткопробежных частиц космического излучения твердотельными трековыми детекторами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Космическое излучение формирует условия существования людей и электронной аппаратуры на борту космических аппаратов. Давно известно, что воздействие космических частиц существенно зависит от их типа и энергии. Существующие стандарты оценки радиационной опасности приближенно учитывают эти зависимости, но детальные микроскопические механизмы воздействия частиц на биологические объекты и электронику до сих пор не описаны.

Для изучения этих механизмов особый интерес представляют тяжёлые низко энергичные частицы – протоны, нейтроны, атомные ядра, как первичные, так и вторичные. Они имеют малые пробеги (микронных или даже субмикронных масштабов в плотных веществах) или, в случае нейтронов, создают короткопробежные частицы при взаимодействии со средой. Независимо от происхождения короткопробежные частицы приводят к высоким плотностям энерговыделения и, как следствие, к высоким вероятностям сбоев и повреждений на микро- и наноуровнях. Не все детекторы частиц пригодны для детального исследования коротких треков и особенно областей пика Брэгга. Лучше других для этого подходят твердотельные трековые детекторы (ТТД), в частности, диэлектрические трековые детекторы.

Диссертация Иноземцева К.О. посвящена развитию метода регистрации

заряженных частиц с помощью ТТД, причём особое внимание в ней уделено возможностям разделения длиннопробежных и короткопробежных заряженных частиц, а также измерению потоков, доз и спектров ЛПЭ последних.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы и приложения.

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель работы, описаны научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов, выделены основные положения, выносимые на защиту, и личный вклад автора, представлена апробация работы.

В первой главе приводятся особенности космической радиации в околоземном пространстве, констатируется преобладание процесса фрагментации ядра-мишени над процессом фрагментации ядра-снаряда на околоземных орбитах, в связи с этим ставится задача разделения заряженных частиц с длинными и короткими пробегами для детального изучения характеристик короткопробежных частиц.

Во второй главе описаны ТТД типа CR-39TM, принцип их работы, методика измерения потоков и доз космического излучения с их помощью. Приводится также методика совместного применения ТТД и термолюминесцентных детекторов (ТЛД), позволяющая получать информацию о дозах космического излучения во всем диапазоне линейной передачи энергии (ЛПЭ).

В третьей главе исследованы пределы возможностей традиционной методики ТТД, предложены и реализованы некоторые её модификации, расширяющие эти возможности: новые алгоритмы оценки чувствительности и средних скоростей травления ТТД, длины пробега частицы. Свойства алгоритмов подтверждены расчётами и результатами обработки одних и тех же экспериментальных материалов, проведённой автором и другими экспериментальными группами.

В четвертой главе представлено описание метода раздельного измерения заряженных космических частиц с длинными и короткими пробегами и его применение для обработки данных космических экспериментов. Описываются существующие способы измерения спектров ЛПЭ. Приводится разработанная автором классификация треков, используемая при ручном сканировании. Отмечается, что при полуавтоматическом сканировании возникает существенная недооценка поглощённой и эквивалентной доз от короткопробежных частиц, выявляемая при ручном сканировании.

Разработанный автором метод разделения частиц с длинными и короткими пробегами был использован при обработке космических экспериментов на

борту РС МКС и КА «ФОТОН-М» №4, что позволило оценить вклад ядерных фрагментов в суммарную эквивалентную дозу: 16-34% и 21-35%, соответственно. Этот факт подчёркивает важность аккуратной оценки эквивалентной дозы от низкоэнергичных заряженных частиц.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

Список цитируемой литературы содержит 125 пунктов.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Результаты работы неоднократно докладывались на международных конференциях, а также опубликованы в виде 11 печатных работ.

Диссертация представляет собой законченное научное исследование, существенно развивающее методику применения и интерпретации данных ТТД. Обработанные автором данные космических экспериментов прямо говорят о важности аккуратного измерения спектров ЛПЭ низкоэнергичных заряженных частиц, в частности, фрагментов ядра-мишени.

Достоверность выводов работы обеспечивается адекватной постановкой задач, использованием надёжных методов и сопоставлением результатов с расчётами и экспериментом, обработкой одного и того же экспериментального материала разными способами. Выводы работы логически следуют из ее содержания и представляются убедительными.

К недостаткам работы можно отнести:

а) Почти всюду в тексте диссертации термин «длиннопробежная частица» используется как синоним термина «первичная частица», «короткопробежная» – как синоним «вторичная». Во введении автор перечисляет основные составляющие космических лучей в магнитосфере Земли: солнечные космические лучи, частицы радиационных поясов и галактические космические лучи. Суммарный диапазон энергий тяжёлых заряженных частиц простирается от ~ 1 МэВ до ~ 1 ЭэВ (без учёта метагалактических космических лучей). Поэтому в качестве короткопробежных (=низкоэнергичных) могут выступать и первичные частицы, прошедшие через стенки КА и детектор без неупругих взаимодействий, а в качестве длиннопробежных (=энергичных) – вторичные энергичные частицы от ещё более энергичных первичных, провзаимодействовавших в конструкциях КА. Таким образом, однозначных соответствий «длиннопробежная» – «первичная» и «короткопробежная» – «вторичная», вообще говоря, нет. Справедливости ради надо отметить, что автор сам отмечает условность этих соответствий (стр. 32 и 33).

б) Некоторое беспокойство вызывает интерпретация рис. 4.8: «... поток короткопробежных частиц плавно увеличивается с ростом величины $D_{\text{low-LET}}$...».

Понятно, что поглощённая доза длиннопробежных частиц сама по себе не является причиной того или иного значения интегрального потока короткопробежных частиц, но у них есть одна общая причина – поток первичных частиц определённого состава и энергетического спектра. Более корректно в этом случае говорить о сильной положительной корреляции интегрального потока короткопробежных частиц с поглощённой дозой длиннопробежных частиц. Это затрагивает формулировку второго вывода к главе 4 и второго вывода в Заключение.

в) В тексте содержатся два рис. 4.10 и нет рис. 4.12, хотя по контексту правильную нумерацию можно угадать.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не влияют на общую высокую оценку работы.

Содержание диссертационной работы было заслушано и обсуждено на семинаре Факультета космических исследований МГУ им М.В.Ломоносова 20 ноября 2019 года.

Диссертация К.О. Иноземцева удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК, а её автор безусловно заслуживает присвоения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Отзыв составили:

д. ф.-м. н., профессор

Галкин Владимир Игоревич

к. ф.-м. н.

Морозов Олег Вячеславович

Подписи сотрудников МГУ В.И. Галкина и О.В. Морозова заверяю,

Декан Факультета космических исследований МГУ

к.ф.-м.н.



Сазонов Василий Викторович

Телефон: +7 (495) 939-21-13

Факс: +7 (495) 932-88-73

Почтовый адрес: Факультет космических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, строение 52, 2-й учебный корпус, этаж 8.

E-mail: v_i_galkin@mail.ru, oleg@space.support

Список публикаций в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации за последние
5 лет:

- [1] Исследования земли с борта российского сегмента МКС/ Соловьёв В. А., Сорокин И. В., Сазонов В. В. // Земля и вселенная. — 2018. — № 2. — С. 19–37.
- [2] Метод определения параметров первичной частицы широкого атмосферного ливня высокогорной установкой // Борисов А.С., Бахромзод Р., Батраев В.В. и др. / Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия — 2018. — № 2. — С. 56–63.
- [3] Wide-Field Gamma-Spectrometer BDRG: GRB Monitor on-board the Lomonosov Mission / Svertilov S.I., Panasyuk M.I., Bogomolov V.V. et al. // Space Science Reviews. — 2018. — Vol.214, № 1. — P. 8.
- [4] Особенности оценки радиационной стойкости космической микро- и наноэлектроники / М. В. Анохин, В. И. Галкин, О. В. Морозов, В. В. Сазонов // Космическая техника и технологии. — 2017. — Т. 3, № 18. — С. 24–33.
- [5] Научно прикладные исследования на Международной космической станции и новые технологии управления полётом / В. А. Соловьёв, В. Е. Любинский, А. В. Марков, И. В. Сорокин // Вестник Российской академии наук. — 2017. — Т. 87, № 6. — С. 495–504.
- [6] CORONAS-F observation of gamma-ray emission from the solar flare on 2003 October 29 / Kurt V.G., Yushkov B. Yu., Karel Kudela et al. // New Astronomy. — 2017. — Vol. 56. — P. 102-112.
- [7] Метод мюонной радиографии для фундаментальных и прикладных исследований / Александров А.Б., Владимиров М.С., Галкин В.И. и др. // Успехи физических наук. — 2017. — Т. 187, № 12. — С. 1375–1392.
- [8] The sun and heliosphere explorer – the interhelioprobe mission / V. D. Kuznetsov, L. M. Zelenyi, I. V. Zimovets et al. // Geomagnetism and Aeronomy. — 2016. — Vol. 56, no. 7. — P. 781–841.
- [9] Instruments to study fast neutrons fluxes in the upper atmosphere with the use of high-altitude balloons / Iyudin A.F., Bogomolov V.V., Golovanov I.A. et al. // Advances in Space Research. — 2015. — Vol. 56, № 10. — P. 2073–2079.
- [10] Обеспечение безопасности экипажей космических аппаратов при управлении их полётом / Любинский В. Е., Соловьёв В. А. // Космонавтика и ракетостроение. — 2015. — № 1(80). — С. 195–201.