

ОТЗЫВ
официального оппонента д.ф.-м.н. Соболевского Николая Михайловича
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»

Цель диссертации состоит в разработке метода раздельного измерения характеристик первичного (длиннопробежного) и вторичного (короткопробежного) компонента космического излучения, и оценки их потоковых и дозовых характеристик на борту космических аппаратов с использованием твердотельных трековых детекторов (ТТД).

Актуальность регистрации вторичных ядерных фрагментов связана с тем, что эти фрагменты имеют высокое значение линейной передачи энергии (ЛПЭ) в области пика Брэгга. Поэтому эффект воздействия вторичных фрагментов на биологическую ткань и компоненты электроники сравним с воздействием первичного излучения, хотя вклад вторичных фрагментов в полную поглощенную дозу не велик. Кроме того, большинство современных детекторов и штатных средств дозиметрического контроля не позволяют выделить вклад вторичных ядерных фрагментов. Поэтому в литературе мало данных о характеристиках вторичного заряженного компонента космического излучения (КИ) на борту космических аппаратов (КА).

Диссертация состоит из четырёх глав и заключения.

Первая глава содержит обзор литературы с начала 1970-х годов и до настоящего времени, который одновременно служит хорошим введением в тему диссертации. Кратко описаны основные виды космической радиации в пределах магнитосферы Земли. Рассматриваются реакции фрагментации ядер-снарядов и ядер-мишеней для разных видов космической радиации. Отмечается роль протонов радиационных поясов земли (РПЗ), вызывающих фрагментацию ядер-мишеней с образованием нескольких осколков с низкой энергией, малым пробегом и высокой ЛПЭ. Эффекты взаимодействия первичного и вторичного излучения с биологическими объектами и компонентами электроники интерпретируются с привлечением данных из области адронной терапии. Перечислены расчетные и экспериментальные методы исследования, включая компьютерное моделирование с использованием транспортных кодов и применение активных и пассивных детекторов для регистрации заряженных продуктов реакций фрагментации.

Во второй главе содержится описание конструкции и принципов применения твердотельных трековых детекторов. Описаны химический состав ТТД CR-39TM марки «TASTRAK», используемого в диссертации, механизм образования трека и его геометрия в зависимости от угла падения частицы и

условий химического травления. Знание зависимости скорости травления от ЛПЭ позволяет восстановить спектр ЛПЭ - одну из основных характеристик поля излучения. Вид этой зависимости индивидуален для каждой марки ТТД и условий травления, и является фактически эмпирической калибровочной функцией. Описана последовательность процедур, необходимых для измерения спектра ЛПЭ в конкретных условиях. Обсуждаются источники погрешности спектра ЛПЭ и способы их минимизации. Показано, как спектры ЛПЭ могут быть использованы для оценки радиационных эффектов одиночных частиц, а также для оценки поглощенной и эквивалентной дозы, накопленной детектором на борту КА. В заключение второй главы перечислены методические аспекты применения ТТД CR-39TM: область эффективности и порог регистрации, условия травления, оборудование и программное обеспечение для сканирования ТТД, результаты калибровочных облучений, совместное использование ТТД и термолюминесцентных детекторов (ТЛД).

В третьей главе описаны методы сканирования треков и алгоритмы обработки трековой информации. Применение ТТД встречает ряд трудностей из-за сложного спектрального и химического состава космического излучения, а также из-за некоторых регистрационных особенностей самих ТТД. Эти трудности, в первую очередь, касаются обработки треков короткопробежных частиц с высокой ЛПЭ в области пика Брэгга. Анализ таких событий требует специальных подходов к сканированию треков и обработке полученных данных, которые развиваются в данной главе диссертации.

Регистрация длиннопробежных и короткопробежных частиц рассматривается отдельно, начиная с первых. Даётся описание «классического» алгоритма обработки треков, разработанного в начале 1970-х годов, и его критика за сужение области чувствительности ТТД. Предложена модификация системы уравнений, связывающих измеряемые параметры трека, путём добавления нового параметра: либо проекции трека на плоскость детектора l , либо глубины трека h , что расширяет систему с двух до трёх уравнений. В результате устраняется расходимость ключевого параметра ТТД - чувствительности V - что ограничивало диапазон измерений областью $V < 5-6$ для «классического» алгоритма.

Автором была выполнена экспериментальная проверка путем облучения ТТД CR-39TM на ускорителе HIMAC (Япония) длиннопробежными тяжелыми ионами (Ar, Fe, Kr). Результаты эксперимента показали удовлетворительное согласие между собой обоих предложенных алгоритмов обработки треков и их преимущество по сравнению с «классическим» алгоритмом.

При регистрации короткопробежных частиц, в отличие от предыдущего случая, чувствительность V нельзя считать постоянной вдоль всей длины трека. В случае изменяющейся V профиль трека описывается известной из литературы системой интегральных уравнений общего вида, учитывающих изменение скорости травления вдоль траектории частицы. При этом формирование трека в процессе травления распадается на два этапа, второй из которых относится к области пика Брэгга, для которой вводится дополнительный параметр r – радиус

сферы на конце трека. Однако применение этого подхода на практике затруднительно. Поэтому приходится идти на упрощения, когда скорость травления не меняется вдоль траектории, а чувствительность V и другие вычисляемые параметры рассматриваются как усредненные вдоль трека. Поскольку такой подход может искажать результаты, его применимость при обработке треков короткопробежных частиц проверялась автором путем эксперимента и модельных расчетов.

Детекторы CR-39TM марки «TASTRAK» облучались протонами и ядрами ¹²C на ускорителе TANDETRON (г. Ржеж, Чехия) и α -частицами радиоизотопа ²³⁹Ru в ФГУП НТЦ РХБГ ФМБА (Москва) под разными углами при энергиях до 2 МэВ/нуклон. После облучения детекторы обрабатывались с использованием процедур, описанных в разделах 2.4 и 2.5. Дополнительно было выполнено численное моделирование параметров треков частиц в программной среде MatLab® согласно описанному в диссертации общему алгоритму. Представлен подробный анализ результатов эксперимента и модельных расчетов.

Общий вывод из третьей главы состоит в том, что при измерении чувствительности ТТД можно использовать разные методы сканирования треков и обработки данных, основанные на единой модели развития трека. Однако выбор подхода зависит от особенностей конкретной задачи, энергии и типа частицы, угла падения, точки входа или рождения частицы, и может требовать калибровки в каждом конкретном случае.

В четвёртой главе приводятся результаты измерений спектров ЛПЭ первичного и вторичного компонента космического излучения. Даётся сравнение результатов автора и других экспериментальных групп (Венгрия, Чехия, Япония). Измерения проводились на борту МКС и КА «ФОТОН-М» №4 и «БИОН-М» №1. Для спектров ЛПЭ длиннопробежных частиц, измеренных на борту КА «БИОН-М» №1, наблюдается разумное согласие с результатами зарубежных коллег. Отмечается, что «классический» алгоритм обработки треков не позволяет распознать и выделить треки короткопробежных частиц, тогда как подход автора, изложенный в разделе 3.3 диссертации, позволяет это сделать. Указаны условия выделения вторичных частиц, образующихся непосредственно в объеме ТТД, из анализа их пробегов.

Предложена классификация треков различного происхождения в детекторах ТТД. Представлены и описаны микрофотографии типичных событий. Эксперименты по измерению спектров ЛПЭ на КА «ФОТОН-М» №4, с использованием ТТД «TASTRAK» CR-39TM и TD-1 «HARZLAS» (японская группа), демонстрируют преимущества подхода автора, по сравнению с «классическим» подходом, при разделении и обработке треков различного происхождения. Продемонстрирован также высокий вклад короткопробежных частиц в суммарную эквивалентную дозу (до 35%).

Разработанный автором метод исследования вторичного компонента КИ был применен на борту МКС. Измерения спектров ЛПЭ проводились автором и чешской группой с использованием разных ТТД и ТЛД, и различных методов сканирования треков и обработки данных. Оценены величины поглощенной и

эквивалентной дозы. Измерения проводились в трёх разных модулях МКС. Установлено, что интегральный поток короткопробежных вторичных частиц увеличивается с ростом поглощенной дозы первичного излучения, что согласуется с данными чешской группы.

В заключение четвёртой главы обосновывается предложенный автором «упрощенный» метод раздельного измерения первичного и вторичного компонента КИ. Этот метод использует однократное травление ТТД и расширенный анализ трековых данных, когда кроме большой D и малой d осей входного эллипса измеряется полная проекция трека на поверхность детектора l и, если требуется, радиус закругления на конце трека r . «Упрощенный» метод сопоставляется с «расширенным» методом. Последний также использует расширенный анализ трековых данных, но дает более детальную оценку потока вторичных короткопробежных частиц благодаря многостадийному травлению детектора с измерением параметров треков после каждого травления. «Упрощенный» метод с одностадийным травлением может применяться как инструмент экспресс-анализа. Оба метода, «упрощенный» и «расширенный», дают лучшие результаты при увеличении времени травления до 15 часов.

Подведем итоги. В диссертации представлен разработанный автором метод раздельного измерения первичного длиннопробежного и вторичного короткопробежного компонента космического излучения и оценки их потоковых и дозовых характеристик с использованием твердотельных трековых детекторов CR-39TM. Метод верифицирован в экспериментах на ускорителях и космических аппаратах. Для длиннопробежных частиц результаты автора согласуются с данными других групп.

В случае вторичных короткопробежных частиц, метод автора позволяет надежно выделить их вклад в поток и дозу. В области ЛПЭ выше 100 кэВ/мкм поток вторичных частиц превышает поток первичных и растет с ростом поглощенной дозы первичного излучения. Вклад вторичных частиц в суммарную поглощенную дозу составляет 2-3%, и 20-30% – в суммарную эквивалентную дозу. Последняя оценка, полученная прямым измерением, превышает в полтора раза непрямые оценки других авторов. Предложен и обоснован «упрощенный» метод измерений, использующий одностадийное травление ТТД. Данные о вкладе вторичных частиц КИ могут быть использованы для оценки радиационного воздействия на биологические объекты и космонавтов при планировании долгосрочных экспедиций на борту МКС.

Диссертация не лишена недостатков в плане представления результатов. В разделе 4.5.3 «Результаты и обсуждение» два разных рисунка имеют номер 4.10, стр. 125 и 128. Причем последний указан в тексте на стр. 127 как рисунок 4.11. Рисунок на стр. 129 указан ошибочно дважды, в подписи и в тексте, как рисунок 4.11, хотя его правильный номер 4.12 согласно ссылке в тексте на стр. 128. Встречаются ссылки на несуществующие номера разделов. Стр. 77: ошибочная ссылка на п. 2.1.4 и 2.1.5 вместо п. 2.4 и 2.5. Стр. 94: ошибочная ссылка на п. 2.1.3

вместо п. 2.2. Стр. 103, 106, 121: то же, что на стр. 77. Стр. 122: то же, что на стр. 94. Имеется заметное число чисто грамматических опечаток.

Сделанные замечания не снижают ценности работы автора. Содержание диссертации отражено в одиннадцати публикациях в отечественных и международных физических журналах, удовлетворяющих требованиям ВАК. Диссертация выполнена на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-квалификационную работу и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Её автор, Иноземцев Константин Олегович, безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.01 – «приборы и методы экспериментальной физики». Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник Лаборатории нейтронных исследований
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)
117312 Москва, Проспект 60-летия Октября 7а

e-mail: sobolevs@inr.ru
+7(917)507-1769

Sobolev

Соболевский Николай Михайлович
18 декабря 2019 г.

Подпись Соболевского Н.М. удостоверяю

Заместитель директора Института

д. ф.-м. н.

М.В. Либанов



Список основных работ Н.М. Соболевского
по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

- 1) A. Luehr, M. Priegnitz, F. Friedler, W. Enghardt, N. Sobolevsky, N. Bassler. *Dependence of simulated positron emitter yields in ion beam cancer therapy on modeling nuclear fragmentation.* Appl. Radiat. Isot. 83B (2014) 165-170.
- 2) V.T. Taasti, H. Knudsen, M.H. Holzscheiter, N. Sobolevsky, B. Thomsen, N. Bassler. *Antiproton annihilation physics in the Monte Carlo particle transport code SHIELD-HIT12A.* Nucl. Instr. Meth. B 347 (2015) 65-71.
- 3) Л.Н. Латышева, Н.М. Соболевский, Э.А. Коптелов, Р.Д. Илич. *Математическое моделирование нейтронного спектрометра СВЗ-100 ИЯИ РАН.* Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2015, № 11, с. 9-13.
- 4) K.V. Manukovsky, O.G. Ryazhskaya, N.M. Sobolevsky, A.V. Yudin. *Neutron Production by Cosmic-Ray Muons in Various Materials.* Physics of Atomic Nuclei 79 (2016) 631-640.
- 5) Н.М. Соболевский. *Метод Монте-Карло в задачах взаимодействия частиц с веществом.* Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2017, 203 с. ISBN 978-5-9221-1723-4.
- 6) J.W. Norbury, T.C. Slaba, N. Sobolevsky, B. Reddell. *Comparing HZETRN, SHIELD, FLUKA and GEANT transport codes.* Life Science and Space Research 14 (2017) 64-73.
- 7) J.W. Norbury, N. Sobolevsky, C.M. Werneth. *SHIELD and HZETRN Comparison of Pion Production Cross Sections.* Nucl. Instr. Meth. B 418 (2018) 13-17.
- 8) С.А. Гаврилов, Л.Н. Латышева, С.Г. Лебедев, Н.М. Соболевский, А.В. Фешенко. *Стенд для изучения воздействия протонного облучения на микросхемы: оценка потоков частиц, активации и мощности дозы.* Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2018, № 10, с. 102-107.