

ОТЗЫВ
официального оппонента, доктора технических наук
Николаева Вадима Аркадьевича

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»

Диссертация К.О. Иноземцева посвящена разработке и применению на практике усовершенствованного метода для раздельной регистрации длиннопробежных и короткопробежных заряженных частиц космического излучения на борту возвращаемых космических аппаратов и МКС с помощью твердотельных трековых детекторов типа CR-39.

Заряженные ядерные частицы, входящие в состав первичного и вторичного компонентов космического излучения, действуют в космических аппаратах на биологические объекты и компонентную базу электроники. Для учета этого действия с целью обеспечения радиационной безопасности экипажа и сохранения работоспособности аппаратуры в ряде работ отечественных и иностранных специалистов применялись различные, в том числе, твердотельные трековые детекторы (ТТД). Однако большинство современных методов не позволяют выделить радиационный эффект от вторичного заряженного компонента, несмотря на то, что число заряженных фрагментов сопоставимо с количеством вторичных нейтронов и их радиационное действие может быть значительным (сравнимым с эффектами первичного компонента). В связи с этим поставленная в диссертационной работе задача по разработке трекового метода раздельного измерения характеристик первичного (длиннопробежного) и вторичного (короткопробежного) компонента космического излучения и оценки их потоковых и дозовых характеристик представляется весьма актуальной.

В работе получен ряд новых результатов, в первую очередь, в методическом плане: методы определения скорости травления вдоль трека и толщины стравленной поверхности детектора, а также пробегов частиц с помощью различных наборов измеряемых параметров наклонного трека на поверхности детектора и по глубине трека. Развит метод раздельной регистрации первичного и вторичного компонента космического излучения, включающий новые способы идентификации треков вторичных частиц. С помощью разработанных методов получена новая информация о вкладах сильноионизирующих короткопробежных

частиц в спектры ЛПЭ и дозы на борту космических аппаратов и на МКС в ряде космических экспериментов.

Результаты разработок внедрены в ГНЦ РФ-ИМБП РАН при выполнении опытно-конструкторских работ по заказу ПАО “РКК “Энергия” и РКЦ “Прогресс” и обладают, таким образом, большой практической значимостью.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошим согласием полученных расчетных и экспериментальных данных, в том числе, полученных в космических экспериментах и в наземных условиях на ускорителях, а также сопоставлением с результатами других исследований. Основные результаты диссертации обсуждались с ведущими специалистами на многих международных и российских конференциях, на международных рабочих совещаниях и получили положительную оценку.

Хотелось бы остановиться на ряде важных результатов, полученных в диссертационной работе.

Представляется весьма существенным обоснованный **в первой главе** вывод о том, что вторичный заряженный компонент с высокими значениями ЛПЭ по своему радиационному воздействию в некоторых случаях может давать эффект, сравнимый с эффектами первичного компонента. Отмечается также, что на сегодняшний день в измерениях на орбите наиболее удобными считаются ТТД, обладающие сравнительно высоким порогом, что исключает регистрацию первичного потока с низкими значениями ЛПЭ. Вместе с тем необходимо учитывать, что раздельная регистрация первичного и вторичного излучения с помощью травления в два этапа не доказывает принадлежности всех треков после первого травления к вторичным частицам.

Во второй главе приведены формулы, позволяющие перейти от плотности и геометрических параметров треков к потокам и спектрам ЛПЭ заряженных частиц, поглощенным и эквивалентным дозам.

Отмечается, что высокий порог регистрации ТТД исключает возможность получения информации о потоках и дозах слабоионизирующего компонента космического излучения с низкими ЛПЭ $< 10 \text{ кэВ/мкм} (\text{H}_2\text{O})$, формирующего до 90% общей поглощенной дозы, в связи с чем предлагается совместно с трековыми применять термолюминесцентные детекторы (ТЛД). Автором использовался общепринятый алгоритм совместной обработки данных ТТД и ТЛД, который позволяет определять суммарные поглощенную и эквивалентную дозы во всем диапазоне ЛПЭ.

Заявленные характеристики ТТД и ТЛД были подтверждены калибровочными измерениями на ускорителях протонов и тяжелых ионов и источнике осколков деления ^{252}Cf .

В третьей главе рассмотрена геометрия наклонных треков от длиннопробежных и короткопробежных частиц на разных стадиях травления, определены возможные измеряемые параметры, разработаны методы сканирования треков и алгоритмы обработки трековой информации.

Для длиннопробежных частиц на основе измерений ряда параметров трека в различных их наборах (в вариантах 2-D или 3-D измерений) для тяжелых ионов проведены расчеты относительной скорости травления (чувствительности) $V = V_T/V_B$, где V_T - скорость травления по оси трека, V_B - скорость травления неповрежденной поверхности детектора. Все рассмотренные подходы рассматривают единую модель развития трека в предположении $V = \text{const}$. Результаты расчетов чувствительности и толщины стравленного слоя для разных наборов использованных параметров сравнивались между собой. Показано, что предпочтительным (в широком диапазоне V) является предложенный автором набор параметров, включающий в себя измерение осей эллипса на поверхности детектора и глубину трека.

Для короткопробежных частиц вблизи пика Брэгга характерна переменная величина V_T , а следовательно, и V . В этом случае возможно приближение, в котором вместо переменной величины V используется усредненное по длине трека значение. Для описания формы трека в этом случае на первой и второй стадии травления развита система уравнений и введены новые параметры. Применимость данного подхода для треков короткопробежных частиц проверялась путем экспериментальных измерений и модельных расчетов на треках протонов, альфа-частиц и ядер углерода. Проверки подтвердили возможность применения данного подхода для измерения средних значений V (а следовательно, и ЛПЭ), а также пробегов для треков вторичных короткопробежных частиц в космических экспериментах.

Вместе с тем отмечается, что толщина стравленного слоя, определенная по формуле $H_0 = V_B t$, где t - время травления, заметно не соответствует значению H , определенному из решения системы уравнений, использующей измеряемые параметры треков, и причина этого не ясна.

В связи с этим можно сделать замечание о том, что в диссертации ничего не сообщается об оценке факторов (а в случае необходимости об их подавлении или учете), влияющих на значение V_B в ходе травления, которое *a priori* предполагается постоянным. Однако известно, что значение V_B при длительном травлении поверхности детектора может постепенно уменьшаться из-за образования слоя продуктов травления, мешающего подходу свежего травителя к поверхности детектора. Для устранения этого эффекта, влияющего на величину H_0 , в разных работах применялось медленное травление, дискретное травление с промыванием детектора, механическое или ультразвуковое перемешивание раствора,

механическая очистка травимой поверхности и т.п.

С другой стороны, расчетная величина H зависит от применяемой модели образования трека. В некоторых работах (например, П.Ю. Апеля) отмечалось, что двухзонная модель травления трека, оперирующая всего двумя параметрами V_T и V_B , не всегда пригодна для описания треков в пластиках. В трехзонной модели образования трека кроме V_T и V_B необходимо вводить третий параметр V_{int} , влияющий на величины D и d , (а следовательно и H), описывающий промежуточное значение скорости травления, происходящего между осью трека и неповрежденной поверхностью. Возможно, что выше отмеченные факторы являются причиной наблюдаемого отличия H_0 от H .

В четвертой главе описан метод раздельного измерения первичного и вторичного компонентов космического излучения и приведены основные результаты его применения. Использованы ТТД и ТЛД, облученные в ряде космических экспериментов. Модельные наземные эксперименты выполнялись на ускоренных протонах высоких энергий. В отличие от общепринятых подходов, в которых учитываются треки только длиннопробежных частиц, автором диссертации проводился анализ всех зарегистрированных в детекторе треков, в том числе, вблизи порога регистрации, отвечающим вторичным частицам. При этом производилось измерение параметров, наиболее подходящих для данного типа треков.

Упрощенный метод выделения вторичного заряженного компонента при одностадийном травлении ТТД основан на ручном сканировании и отборе событий с измерениями параметров трека как на поверхности (размеры осей эллипса), так и внутри детектора на второй стадии травления (горизонтальная проекция трека и радиус скругленной части конца трека). Идентификация треков вторичных частиц при этом возможна по анализу выбранных параметров и формы треков в соответствии с авторской классификацией. Последняя составлена по результатам наблюдения большого количества треков в детекторах, экспонировавшихся на борту двух космических аппаратов и МКС. В классификации представлены типичные треки, с одной стороны, длиннопробежных легких и тяжелых ядер с различными ЛПЭ и углами вхождения в детектор, и с другой стороны, треки вторичных частиц с различными ЛПЭ, наблюдаемые как в виде “звезд”, так и отдельно.

Автором также модернизирован расширенный метод распознавания и выделения треков вторичных короткопробежных частиц, основанный на анализе эволюции формы каждого отдельного трека в ходе его травления (не менее двух раз).

Применение разработанных методов в нескольких космических экспериментах позволило оценить потоковые и дозовые характеристики вторичного короткопробежного компонента, при этом установлено, что в диапазоне $LPE > 100 \text{ кэВ/мкм} (H_2O)$ поток вторичных заряженных частиц превышает поток первичных, а вклад ядерных фрагментов в

суммарную эквивалентную дозу достигает 20-30%.

Диссертационная работа аккуратно оформлена, написана хорошим языком, ей свойственны точные и краткие формулировки. Некоторое недоумение вызывает порядок ссылок в текстах диссертации и автореферата: они не приведены по порядку номеров, как это принято в научной литературе.

Текст автореферата и опубликованные работы правильно отражают содержание диссертации.

Характеризуя диссертацию в целом, можно заключить, что К.О. Иноземцевым выполнен большой объем работ как экспериментального, так и расчетно-теоретического характера, получен ряд новых и полезных результатов. Диссертационная работа является законченным научным исследованием, содержащим новые решения актуальной задачи по созданию метода и измерениям характеристик длиннопробежных и короткопробежных частиц космического излучения в космических аппаратах и на МКС.

Содержание работы по основным диссертационным показателям (актуальность, новизна, достоверность, практическая значимость) полностью отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор, Иноземцев Константин Олегович, заслуживает присуждения искомой степени.

Отзыв составил:

Ведущий специалист АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»

Доктор технических наук, с.н.с.

Николаев Вадим Аркадьевич

«16» декабря 2019 г.

Подпись руки В.А. Николаева заверяю.

Ученый секретарь Радиевого

ин-та им. В.Г. Хлопина



И.В. Смирнов

Почтовый адрес: АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», 194021, г. Санкт-Петербург,
2-й Муринский пр., д. 28.

Тел/факс: 8 (812) 297-57-00

e-mail: nikolaev@khlopin.ru

Список основных публикаций В.А. Николаева
в рецензируемых научных изданиях по теме диссертации за последние 5 лет:

1. V.A. Nikolaev Solid State Nuclear Track Detectors in Radiation Research, SPb. Publishing House of SPbPU, 2015 -288 p., ISBN 978-5-7422-4983-2
2. В.А. Шуршаков, И.Б. Воробьев, В.А. Николаев, В.И. Лягушин, В.В. Кушин, Оценка спектрометрических и дозовых характеристик нейтронных полей внутри российского сегмента МКС с помощью делительных детекторов // Космические исследования. 2016, том 54, № 2, стр. 119-125.
3. Николаев В.А. Определение концентраций радона в атмосферном воздухе и подпочвенном газе // Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина. 2018, том 18, стр. 129-151.
4. Николаев В.А. Прогресс в разработках трековых радиометров для радоновых исследований // Радиохимия. 2019, том 61, № 4, стр. 286-296.