

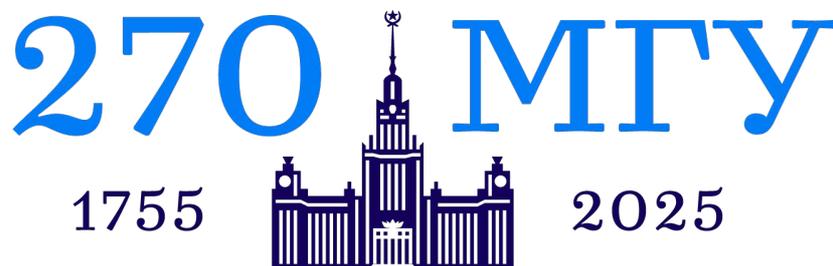
Сборник тезисов докладов  
XXV межвузовской молодежной научной  
школы-конференции имени Б.С. Ишханова

## **Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине**

27-28 ноября **2024** года  
НИИЯФ МГУ, Москва

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
ИМЕНИ Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА



**СБОРНИК ТЕЗИСОВ ДОКЛАДОВ**

**XXV МЕЖВУЗОВСКОЙ МОЛОДЕЖНОЙ  
НАУЧНОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ ИМЕНИ  
Б. С. ИШХАНОВА  
«КОНЦЕНТРИРОВАННЫЕ ПОТОКИ ЭНЕРГИИ  
В КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКЕ ЭЛЕКТРОНИКЕ,  
ЭКОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ»**

27-28 ноября 2024 г.  
НИИЯФ МГУ, Москва

Москва 2024

под редакцией А.А. Кузнецова

УДК 539.12.01(063)  
ББК

Сборник тезисов докладов XXV Межвузовской молодежной научной школы-конференции «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» 27.11.2024-28.11.2024, Москва, Россия. / Под ред. А.А. Кузнецова. – М.: «КДУ», 2024. – 134 с.: табл., ил.

В трудах школы рассмотрены физические основы концентрированных потоков энергии и их воздействия на материалы и изделия космической техники, методы обработки материалов концентрированным излучением, воздействие лазерного и микроволнового излучения на вещество, концентрированные потоки энергии в экологии и медицине, в электронике, проблемы физики нейтрино и ядерной спектроскопии.

Конференция проводится при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-1353

ISBN 978-5-91-304-....  
DOI .....  
РИНЦ .....

© Московский государственный университет  
имени М.В.Ломоносова, 2024  
© НИИЯФ МГУ, 2024  
© «КДУ», 2024

# Секция: Ядерная физика

# ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВАЦИИ ЕСТЕСТВЕННОГО КАЛЬЦИЯ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПУЧКАМИ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 100 И 200 МэВ

С.Р. Адоньев<sup>1</sup>, М. В. Желтоножская<sup>1</sup>, А.В. Овсянников<sup>1</sup>, А. Е. Шемяков<sup>2</sup>, А.П. Черняев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Физико-технический центр ФИАН, Протвино, Россия

e-mail: stepan1018@mail.ru

В последние годы одним из наиболее перспективных методов лечения злокачественных образований является протонная терапия. По сравнению с традиционной лучевой терапией фотонами, протонная терапия с модулированной интенсивностью может доставлять высокую лечебную дозу к опухолям при минимальной дозе для нормальных тканей.[1] Полезный терапевтический диапазон энергий для протонных пучков составляет от 60 до 250 МэВ. Однако в результате ядерных взаимодействий высокоэнергетических протонов с атомами легких элементов в теле человека формируются позитрон-излучающие радионуклиды.

Большинство используемых в настоящее время подходов к планированию лечения при лучевой терапии обычно основаны на быстрых алгоритмах оценки распределения поглощенной дозы в организме пациента. Такие планы лечения часто предполагают сначала измерение дозы, доставленной терапевтическим пучком в водном фантоме, а затем внесение изменений в пучок излучения или положение пациента. При таком подходе не учитывается доза, полученная в результате распада позитрон-излучающих продуктов реакций на ускоренных протонах, образующихся в биологических тканях пациента. Исследование сечений протон-индуцированных ядерных реакций на легких ядрах и построение функций возбуждения позитрон-излучающих радионуклидов представляет фундаментальный интерес для методов верификации лечения *in-vivo* в протонной терапии. [2] Исходя из ранее проведенных единичных оценок вклада позитронных излучателей в общую дозу, получаемую пациентом, отмечалось, что позитрон-излучающие радионуклиды с относительно длительным периодом полураспада (сутки – несколько суток) незначительно увеличивают дозу пациента, тогда как короткоживущие позитрон-излучающие радионуклиды (минуты-десятки минут) могут увеличивать терапевтическую дозу до 25%.[3] Для таких оценок необходимы экспериментальные измерения выходов этих радионуклидов или введение поправочных факторов, опираясь на известные экспериментальные данные о сечениях реакций на ускоренных протонах. Однако экспериментальные данные для реакций на ускоренных протонах весьма ограничены, особенно для энергий выше 20 МэВ, и имеют значительные расхождения.[4,5] Экспериментальные сечения ядерных реакций на ускоренных протонах являются критической составляющей для протонной терапии. Их погрешность непосредственно отражается на распределении дозы, особенно в области пика Брэгга. Поэтому необходимы новые измерения и последующие оценки сечений протон-индуцированных реакций во всем интересующем диапазоне энергий протонной терапии для уменьшения неопределенностей в оценке наработанной активности, что позволит в дальнейшем проводить целенаправленную верификацию субмиллиметрового диапазона пучков.

Нами проведены исследования сечений протон-индуцированных реакций на мишенях натурального кальция. Облучение проводилось в центре коллективного пользования комплекса протонной терапии (КПТ “Прометеус”) на пучках протонов с энергией 100 и 200 МэВ. Мишени облучались сканирующим методом. Сигма пучка составляла 3,5 мм, поле облучения -  $38 \times 38 \text{ мм}^2$ , время облучения – 60 мин, плотность потока протонов на мишени -  $\Phi_p = 10^{11} \text{ р см}^{-2}$ . Размер облучаемых мишеней составлял  $30 \times 30 \text{ мм}^2$  толщиной  $\sim 2 \text{ мм}$ . Каждая мишень размещалась таким образом, чтобы образец полностью находился в поле пучка протонов. Облученные мишени измерялись с помощью полупроводниковых спектрометров Ortec® и Canberra® с ультрачистыми германиевыми детекторами, имеющими энергетическое разрешение 1,8-2,0 кэВ для гамма-излучения  $^{60}\text{Co}$  с энергией 1333 кэВ.

В результате впервые получены экспериментальные сечения протон-индуцированных реакций на ядрах  $^{40}\text{Ca}$  с образованием  $^{18}\text{F}$ ,  $^{34}\text{mCl}$  и  $^{38}\text{K}$  при энергии протонов 100 и 200 МэВ. Также были измерены сечения (p, XpYn)-реакций на  $^{44}\text{Ca}$  для ядер с периодом полураспада больше 30 минут. Проведенные теоретические оценки сечений реакций с помощью программного кода TAYLIS1.96[6] показали, что для ядерных реакций на  $^{44}\text{Ca}$  при энергии протонов 100 МэВ доминируют предравновесные процессы, а при энергии протонов 200 МэВ значительно возрастает роль внутриядерного каскада. Также можно отметить, что при образовании ядер  $^{18}\text{F}$ ,  $^{24}\text{Na}$  и  $^{34}\text{mCl}$  экспериментальные сечения удовлетворительно описываются в рамках модели Ферми-газа. Полученные результаты обсуждаются.

1. W. D. Newhauser and R. Zhang, *Phys. Med. Biol.* 60, R155 (2015). <https://doi.org/10.1088/0031-9155/60/8/r155>
2. T. Rodriguez-Gonzalez, C. Guerrero, C. M. Backer, J. Bauer, C. Baumer, S. Brons, W. Jentzen, M. C. Jimenez-Ramos, M. A. Millan-Callado, C. Schomers, B. Timmermann, J. M. Quesada, and R. Capote, *Nucl. Data Sheets* 187, 579 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nds.2023.01.004>
3. M. Faßbender *et al.* *Radiochim. Acta.* 84, 59 (1999).
4. T. Rodriguez-Gonzalez, C. Guerrero, C. M. Backer, J. Bauer, C. Baumer, S. Brons, W. Jentzen, M. C. Jimenez-Ramos, M. A. Millan-Callado, C. Schomers, B. Timmermann, J. M. Quesada, and R. Capote, *Nucl. Data Sheets* 187, 579 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nds.2023.01.004>
5. A.L. Nichols *et al.* *Nucl. Data Sheets.* 120, 239 (2014).
6. J. Koning and D. Rochman, *Nucl. Data Sheets* 113, 2841 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.nds.2012.11.002>

# РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРА ФОТОНЕЙТРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО УСКОРЕНИЮ ЧАСТИЦ ЛАЗЕРНЫМ ПОЛЕМ

М. А. Бакулев<sup>1</sup>, А.С. Чепурнов<sup>2</sup>, С.А. Шуляпов<sup>1</sup>, И.Н. Цымбалов<sup>1</sup>,  
А.Б. Савельев-Трофимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: m-bakulev@mail.ru

Нейтроны являлись продуктами реакции электронов, полученных в экспериментах по ускорению частиц лазерным полем. Ускоренные электроны были получены в результате взаимодействия лазерного импульса с потоковой газовой мишенью. Центральная длина волны лазерного импульса составляет 800 нм, его длительность примерно 50 фс, а частота повторения — 10 Гц. Энергия на мишени достигает 60 мДж. Поскольку диагностика с помощью регистрации гамма-квантов затруднена из-за одновременного создания большого количества частиц в течение короткого времени (50 фс), диагностика была проведена через канал генерации фотонейтронов от мишени-конвертера с использованием метода времени пролетания. Нейтроны регистрировались с помощью цилиндрических сцинтилляционных детекторов, изготовленных из кристаллического транс-стильбена, размерами 20x20 мм (1 шт) и 40x40 мм (2 шт), которые располагались на расстоянии от 1.5 до 2.7 м от мишени-конвертера.

Данные собирались одновременно с работой лазера. Для каждого лазерного импульса регистрировался отклик всех трех детекторов. Затем проводился отбор нейтронных событий путем анализа формы импульсов и времени регистрации относительно лазерного импульса. Для увеличения энергетического порога регистрации нейтронов применялась цифровая обработка сигналов, что позволило выявить отклик нейтронов на фоне снижения перегрузки детектора от гамма-импульсов. Это дало возможность снизить временной порог регистрации нейтронов до 200 нс на фиксированной базе детекторов, что соответствует энергетическим порогам регистрации нейтронов в 250, 450 и 1050 кэВ соответственно.

Были построены распределения событий-кандидатов по времени регистрации с учетом выделенной энергии, что позволяет сделать оценку спектра зарегистрированных нейтронов.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ROT-ЭФФЕКТА В ДЕЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ GEANT4

М. Ю. Копач

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия*

e-mail: kopach.my23@physics.msu.ru

Эффект вращения ядра, так называемый ROT-эффект, впервые был обнаружен в угловых распределениях  $\alpha$ -частиц тройного деления ядра  $^{235}\text{U}$  холодными поляризованными нейтронами [1]. Впоследствии аналогичный эффект наблюдался в угловых распределениях гамма-квантов и нейтронов [2] в двойном делении  $^{235}\text{U}$  и  $^{233}\text{U}$ . ROT-эффект проявляется в асимметрии счета детекторов  $\alpha$ -частиц, гамма-квантов или нейтронов при изменении поляризации налетающих нейтронов на противоположную и объясняется смещением угловых распределений соответствующих продуктов деления относительно оси разлета осколков деления. Наблюдаемая величина коэффициента асимметрии  $D=(N^+-N^-)/(N^++N^-)$  – порядка  $10^{-2}$  для  $\alpha$ -частиц в тройном делении и  $10^{-4}$  для гамма-квантов в двойном делении  $^{235}\text{U}$ . В настоящее время эффект измерен при делении холодными нейтронами, а также для резонанса 0.3 эВ в  $^{235}\text{U}$ . Большой интерес представляет измерение этого эффекта в резонансной области, а также для других делящихся ядер.

В настоящей работе будут представлены результаты моделирования ROT-эффекта в испускании гамма-квантов и нейтронов методом Монте-Карло с использованием программного пакета GEANT4. Исследовалось влияние на величину наблюдаемой асимметрии геометрии экспериментальной установки, параметров мишени, степени поляризации и других факторов. Особое внимание уделено оценке возможности измерения ROT-эффекта путем определения оси деления с помощью детектирования мгновенных нейтронов деления.

1. F. Goennenwein et al., Phys. Lett. B 652, 13 (2007).
2. G. V. Danilyan et al., Phys. At. Nucl. 74, 671 (2011).

# КОРРЕЛЯЦИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД СО СВОЙСТВАМИ НУКЛОННЫХ И ГИПЕРОННЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

А. И. Насакин<sup>1,2</sup>, С. А. Михеев<sup>1,2</sup>, Д. Е. Ланской<sup>1</sup>, Т. Ю. Третьякова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: anasakin@mail.ru

Экспериментальная проверка уравнений состояния ядерной материи при экстремальных плотностях и энергиях в лабораторных условиях затруднительна. С этой точки зрения изучение нейтронных звезд представляет особую ценность, так как их наблюдаемые характеристики позволяют наложить ограничения на вышеупомянутые уравнения состояния.

Несмотря на то, что на данный момент, присутствие гиперонов в составе нейтронной звезды наиболее вероятным вариантом, существует проблема, называемая «hyperon puzzle». Дело в том, что модели, включающие гипероны, предсказывают максимальные массы нейтронных звезд, меньшие, чем массы в моделях без гиперонов, и меньшие, чем массы нейтронных звезд, полученные из наблюдений. Поэтому анализ влияния характеристик взаимодействий на предсказываемые значения параметров нейтронных звезд представляет интерес. Помимо радиуса и массы, нами рассматривался коэффициент приливной деформируемости, ограничение на значение которого было получено из анализа события GW170817 коллаборацией LIGO-VIRGO [1].

Мы рассчитали зависимость массы от радиуса и коэффициент приливной деформируемости для различных уравнений состояния ядерной материи, учитывая наличие в веществе гиперонов помимо нейтронов, протонов, электронов и мюонов. Для описания уравнения состояния использовались эффективные взаимодействия Скирма с учетом зависимости от плотности.

Мы исследовали зависимость наблюдаемых параметров нейтронных звезд, таких как максимальная масса  $M_{\max}$ , соответствующий ей минимальный радиус  $R_{\min}$ , коэффициент приливной деформируемости для звезды с массой  $1.4M_{\odot}$  и ее радиус ( $\Lambda_{1.4}$  и  $R_{1.4}$ , соответственно) от свойств гиперон-нуклонных и нуклон-нуклонных взаимодействий. В частности, установлена сильная взаимосвязь между параметрами нейтронных звезд и плотностью, при которой появляются гипероны, сжимающей способностью гиперон-нуклонных взаимодействий и ее производной, которые определяются как [2, 3]

$$K_{\Lambda}(n_N) = 3n_N \frac{dD_{\Lambda}}{dn_N},$$
$$L_{\Lambda}(n_N) = 9n_N^2 \frac{d^2 D_{\Lambda}}{dn_N^2},$$

где  $D_{\Lambda}$  – энергия связи  $\Lambda$ -гиперона в материи, состоящей из нуклонов, а  $n_N$  – нуклонная плотность.

В таблице 1 приведены коэффициенты Пирсона, рассчитанные нами для оценки величины корреляций между наблюдаемыми параметрами нейтронных звезд и характеристиками  $\Lambda N$ -взаимодействия при различных плотностях. Как можно видеть, характеристики нейтронных звезд сильнее коррелируют со сжимающей способностью  $\Lambda N$ -взаимодействия при больших плотностях. Это может объясняться тем, что вблизи

плотностей  $n_N = (2 - 3)n_0$ , где  $n_0$  – нормальная ядерная плотность, лежит плотность, при которой в материи нейтронных звезд появляются гипероны, и поэтому; свойства барионной материи, а, значит, и характеристики нейтронных звезд, определяются поведением  $\Lambda N$ -взаимодействий при именно таких значениях нуклонной плотности.

Таблица 1. Средние значения коэффициента Пирсона для корреляций между характеристиками нейтронных и характеристиками гиперон-нуклонных взаимодействий.

	$M_{\max}$	$R_{\min}$	$\Lambda_{1,4}$	$R_{1,4}$
$K_{\Lambda}(n_0)$	-0,88	-0,89	-0,75	-0,74
$K_{\Lambda}(2n_0)$	-0,91	-0,91	-0,82	-0,78
$K_{\Lambda}(3n_0)$	-0,90	-0,90	-0,83	-0,77
$L_{\Lambda}(n_0)$	-0,92	-0,92	-0,83	-0,77
$L_{\Lambda}(2n_0)$	-0,89	-0,88	-0,83	-0,75
$L_{\Lambda}(3n_0)$	-0,87	-0,86	-0,82	-0,74

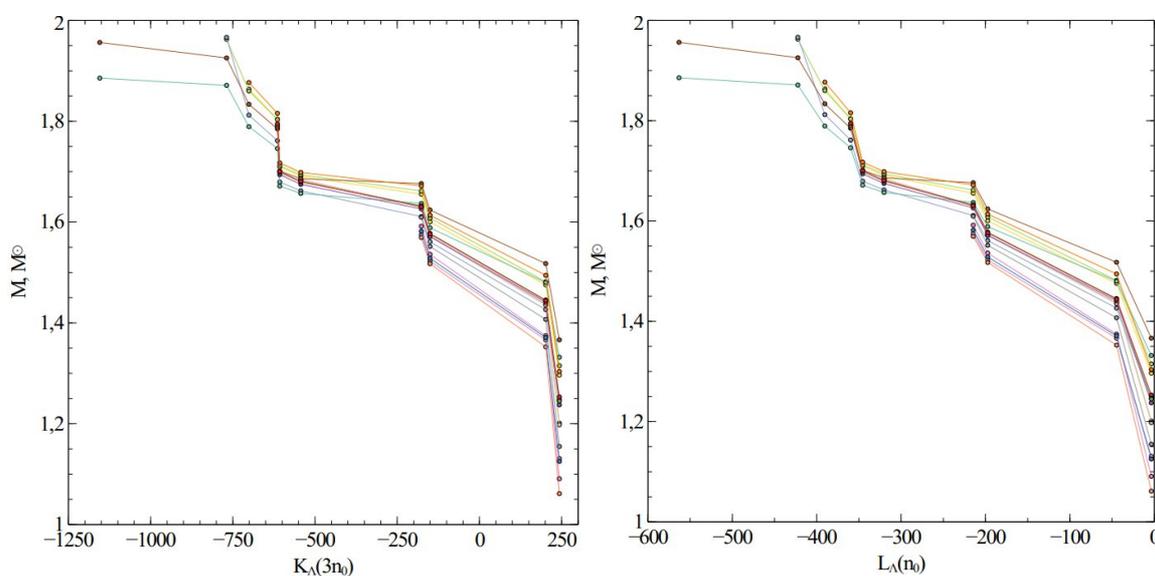


Рис. 1. Зависимость максимальной массы нейтронной звезды от сжимающей способности гиперон-нуклонного взаимодействия и ее производной.

На рисунке 1 показана зависимость предсказываемой максимальной массы нейтронной звезды от сжимающей способности  $\Lambda N$ -взаимодействия, рассчитанной для плотности  $n_N = 3n_0$  и ее производной при  $n_N = n_0$  для различных  $\Lambda N$ -параметризаций. Точки, соответствующие одной  $NN$ -параметризации, соединены ломаной одного цвета. Можно отметить, что наибольшую максимальную массу нейтронной звезды предсказывают модели с использованием  $\Lambda N$ -взаимодействий с наименьшим алгебраическим значением сжимающей способности при плотностях около  $(2 - 3)n_0$ , что может оказаться полезным для разрешения «hyperon puzzle».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00077.

1. В. Abbott et al. (LIGO Scientific and Virgo Collaboration) // Phys. Rev. Lett. 121, 161101 (2018)
2. Д.Е. Ланской, Т.Ю. Третьякова // Ядерная физика 1989. Т. 49, с. 401
3. А. Jinno, К. Murase, Y. Nara, А. Ohnishi // Phys. Rev. C 108, 065803 (2023)

# ИЗМЕРЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ВЫХОДА НЕЙТРОНОВ И $\gamma$ -КВАНТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕЙТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 14.1 МэВ с ЯДРАМИ $^{12}\text{C}$

Г. В. Пампушик<sup>1,3</sup>, Д. Н. Грозданов<sup>3,4</sup>, Н. А. Федоров<sup>3</sup>, П. С. Прусаченко<sup>3</sup>,  
Ю.Н. Копач<sup>3</sup>, Т.Ю. Третьякова<sup>2,3</sup>, П. Г. Филончик<sup>3,5,6</sup>, А. В. Андреев<sup>1,3</sup>, В.Р. Ской<sup>3</sup>,  
И.Н. Русков<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>4</sup>Институт ядерных исследований и ядерной энергетики Болгарской академии наук,  
София, Болгария

<sup>5</sup>Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

<sup>6</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва, Россия

E-mail: rampusik.g@gmail.com

Изучение нейтрон-ядерных реакций с быстрыми нейтронами представляет значительный интерес как с точки зрения практического применения, так и с точки зрения фундаментальных исследований атомных ядер. На базе Лаборатории Нейтронной Физики им. И.М.Франка (ОИЯИ) реализуется международный проект «TANGRA» [1] (Tagged Neutrons and Gamma Rays) по изучению рассеяния меченых нейтронов на атомных ядрах. В рамках проекта создано несколько многофункциональных конфигураций экспериментальных установок, в основе которых лежит использование метода меченых нейтронов (ММН). Данная работа посвящена измерению и модельному описанию дифференциальных сечений выхода нейтронов и  $\gamma$ -квантов в реакциях  $(n, n'\gamma)$  на ядрах углерода.

Для регистрации рассеянных нейтронов и  $\gamma$ -квантов использовалась установка (рис. 1) с генератором быстрых нейтронов ИНГ-27 со встроенным 256-пиксельным  $\alpha$ -детектором. В качестве мишени использовалась графитовая пластина размером 440x440x21 мм<sup>3</sup>, которая находилась на расстоянии 31,4 см от источника нейтронов. Нейтроны и  $\gamma$ -кванты, рассеянные на образце, регистрировались с помощью детекторной системы состоящей из 20 пластиковых сцинтилляционных детекторов, расположенных вокруг мишени на расстоянии 2 м.

Были получены угловые распределения для упругого и неупругого рассеяния нейтронов для уровней 4.44 МэВ, 7.65 МэВ и 9.64 МэВ. Также было измерено угловое распределение  $\gamma$ -квантов и рассчитано дифференциальное сечение для перехода  $4439(2+) \rightarrow 0(0+)$ . Результаты сравнивались с данными других работ, а также с теоретическими расчетами оптической модели, выполненными с помощью программы TALYS [2].

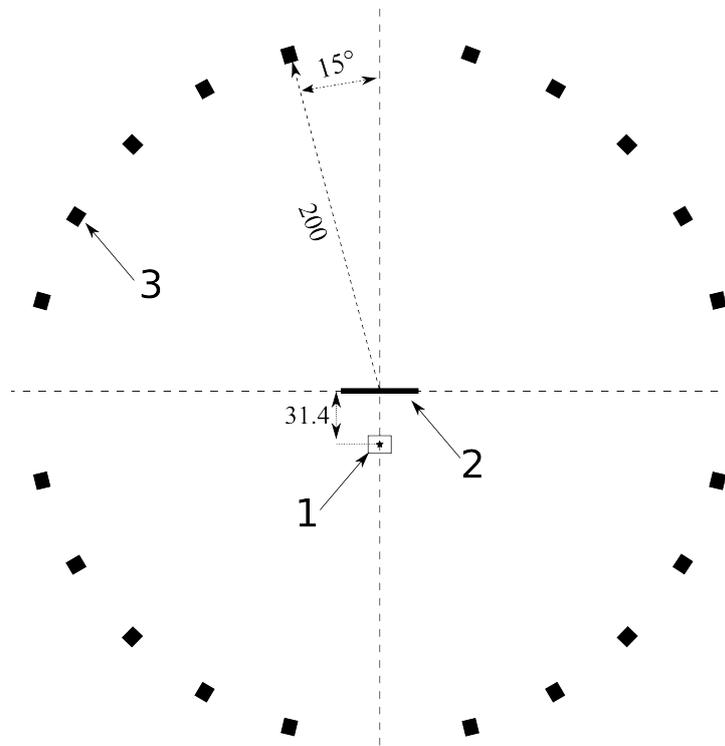


Рис. 1. Схема установки TANGRA для измерения дифференциальных сечений выхода нейтронов и  $\gamma$ -квантов: 1 – генератор нейтронов ИНГ-27 (звездочкой отмечена тритиевая мишень), 2 – образец из углерода, 3 – детектор нейтронов. Расстояния указаны в см.

1. Ruskov I.N., Kopatch, Y. N., Bystritsky, V. M. et al. TANGRA-Setup for the Investigation of Nuclear Fission induced by 14.1 MeV neutrons //Physics procedia. – 2015. – Т. 64. – С. 163-170.
2. Koning A. J., Hilaire S., Duijvestijn M. C. «TALYS-1.0» // Proceedings of the International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. EDP Sciences, 2007. С. 211—214

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

С.С. Бельшев<sup>1,2</sup>, А.А. Кузнецов<sup>1,2</sup>, О.В. Порядина<sup>1</sup>, Н.Ю. Фурсова<sup>1,2</sup>, В.В. Ханкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского  
государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

E-mail: olesya20025@gmail.com

Явление изомерии атомных ядер связано с большой разницей в спинах или деформации изомерного состояния относительно основного состояния атомного ядра. Изучение изомерных состояний атомных ядер позволяет получать информацию о природе возбужденных состояний.

В литературе выявлено всего шесть работ [1-6], в которых представлены экспериментальные данные об изомерных отношениях ( $IR$ ) в фотоядерных реакциях на тяжелых изотопах при энергии 55 МэВ, приведенные в таблице 1. В настоящей работе был проведен  $\gamma$ -активационный эксперимент [7] по облучению образца природной ртути пучком тормозного излучения от линейного ускорителя электронов РМ-55 НИИЯФ МГУ с верхней границей 55 МэВ. В результате эксперимента были получены значения изомерных отношений  $IR$  для реакций  $^{nat}\text{Hg}(\gamma, inkp)$ , которые рассчитаны как отношение выходов конечных изотопов в изомерном и основном состояниях ( $Y_m/Y_g$ ), где  $Y_m$ ,  $Y_g$  – выходы возбуждения изомерного и основного состояний соответственно. Результаты, полученные для мишени из ртути, также приведены в таблице 1.

Таблица 1. Полученные в настоящей работе и работах [1-6] изомерные отношения  $IR = Y_m/Y_g$  для изотопов тяжелых ядер, образовавшихся в результате фотоядерных реакций при максимальной энергии электронов ускорителя  $E^m = 55$  МэВ, с указанием значений спинов для ядер в основном и метастабильном состояниях

Основная реакция	$I_m^P$	$I_g^P$	$IR_{\text{эксп}} = Y_m/Y_g$	Источник
$^{196}\text{Hg}(0^+) (\gamma, 1n)^{195\text{m,g}}\text{Hg}$	13/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>-</sup>	0.481 ± 0.016	Настоящая работа
$^{198}\text{Hg}(0^+) (\gamma, 1n)^{197\text{m,g}}\text{Hg}$	13/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>-</sup>	0.147 ± 0.009	Настоящая работа
$^{199}\text{Hg}(3/2^-) (\gamma, 1p)^{198\text{m,g}}\text{Au}$ $^{200}\text{Hg}(0^+) (\gamma, 1n1p)^{198\text{m,g}}\text{Au}$	12 <sup>-</sup>	2 <sup>-</sup>	0.0026 ± 0.0006	Настоящая работа
$^{201}\text{Hg}(3/2^-) (\gamma, 1p)^{200\text{m,g}}\text{Au}$ $^{202}\text{Hg}(0^+) (\gamma, 1n1p)^{200\text{m,g}}\text{Au}$	12 <sup>-</sup>	1 <sup>-</sup>	0.0019 ± 0.0003	Настоящая работа
$^{178}\text{Hf}(0^+) (\gamma, 1p)^{177\text{m,g}}\text{Lu}$	23/2 <sup>-</sup>	7/2 <sup>+</sup>	(28.2 ± 2.0) · 10 <sup>-6</sup>	[1]
$^{165}\text{Ho}(7/2^-) (\gamma, 1n)^{164\text{m,g}}\text{Ho}$	6 <sup>-</sup>	1 <sup>+</sup>	0.427 ± 0.029	[2]
$^{165}\text{Ho}(7/2^-) (\gamma, 3n)^{162\text{m,g}}\text{Ho}$	6 <sup>-</sup>	1 <sup>+</sup>	0.652 ± 0.045	[2]
$^{198}\text{Pt}(0^+) (\gamma, 1n)^{197\text{m,g}}\text{Pt}$	13/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>-</sup>	0.166 ± 0.012	[3]
$^{149}\text{Sm}(7/2^-) (\gamma, 1p)^{148\text{m,g}}\text{Pm}$ $^{150}\text{Sm}(0^+) (\gamma, 1n1p)^{148\text{m,g}}\text{Pm}$	5 <sup>-</sup> , 6 <sup>-</sup>	1 <sup>-</sup>	1.035 ± 0.048	[4]
$^{142}\text{Nd}(0^+) (\gamma, 1n)^{141\text{m,g}}\text{Nd}$	11/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>+</sup>	0.055 ± 0.006	[5]
$^{142}\text{Nd}(0^+) (\gamma, 1n)^{141\text{m,g}}\text{Nd}$ $^{143}\text{Nd}(7/2^-) (\gamma, 2n)^{141\text{m,g}}\text{Nd}$	11/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>+</sup>	0.093 ± 0.010	[6]
$^{142}\text{Nd}(0^+) (\gamma, 3n)^{139\text{m,g}}\text{Nd}$ $^{143}\text{Nd}(7/2^-) (\gamma, 4n)^{139\text{m,g}}\text{Nd}$	11/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>+</sup>	0.859 ± 0.081	[6]

Была построена зависимость парциальных выходов метастабильных и основных состояний, взятых в отношении к полному выходу конкретной реакции, в зависимости от разности спинов продукта и мишени  $\Delta I = I_p - I_t$ . Красными точками отмечены реакции, исследуемые в настоящей работе, черными точками - в работах [1-6]. Важно отметить, что для реакций на натуральной смеси учитывалась только основная реакция.

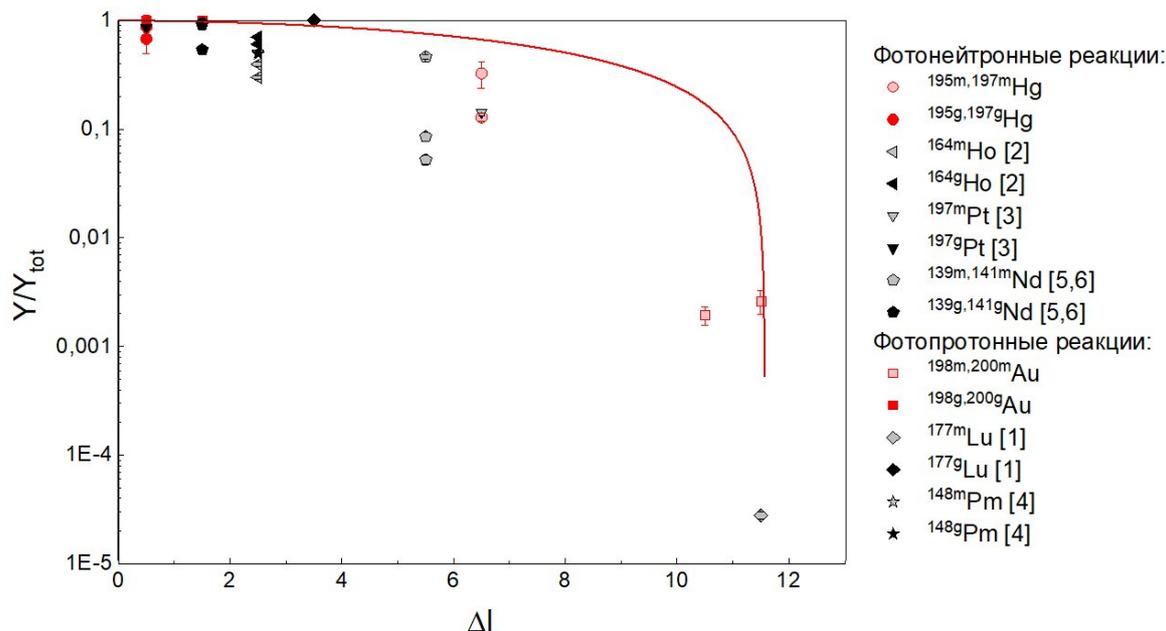


Рис. 1. Зависимость парциальных выходов метастабильных (слабо закрашенные точки) и основных (полностью закрашенные точки) состояний от разности спинов продукта и мишени  $\Delta I$ . Красным цветом отмечены точки, соответствующие фотоядерным реакциям на мишени из ртути естественного изотопного состава, черным цветом - другие реакции [1-6]

1. A.G. Kazakov, T.Y. Ekatova, J.S. Babenya et al. Recovery of  $^{177}\text{Lu}$  from Irradiated  $\text{HfO}_2$  Targets for Nuclear Medicine Purposes // *Molecules*. 2022. V. 27(10):3179. <https://doi.org/10.3390/molecules27103179>.
2. N. Van Do, P.D. Khue, K.T. Thanh et al. Measurement of isomeric yield ratios for the  $^{nat}\text{Ho}$  ( $\gamma, xn$ )  $^{164m,g}\text{Ho}$ ,  $^{162m,g}\text{Ho}$  reactions in the bremsstrahlung energy region from 45 to 65 MeV // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2013. V. 298(2). P. 1447–1452. <https://doi.org/10.1007/s10967-013-2608-6>.
3. Y.U. Kye, S.G. Shin, M.H. Cho et al. Measurement of isomeric yield ratios of  $^{197m,g}\text{Pt}$  and  $^{190m2,g+m1}\text{Ir}$  from the  $^{198}\text{Pt}(\gamma, n)$  and  $^{nat}\text{Pt}(\gamma, xn1p)$  reactions induced by 55-, 60-, and 65-MeV bremsstrahlung // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2015. V. 351. P. 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03.079>.
4. S.C. Yang, G. Kim, M. Zaman et al. Isomeric yield ratios of  $^{148}\text{Pm}$  from the  $^{nat}\text{Sm}(\gamma, x)$  and the  $^{nat}\text{Nd}(p, xn)$  reactions // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2014. V. 302. P. 467–476. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3284-x>.
5. H. Bartsch, K. Huber, U. Kneissl et al. Critical consideration of the statistical model analysis of photonuclear isomeric cross-section ratios // *Nuclear Physics A*. 1976. V. 256(2). P. 243–252. [https://doi.org/10.1016/0375-9474\(76\)90106-8](https://doi.org/10.1016/0375-9474(76)90106-8).
6. S.C. Yang, K. Kim, M. Zaman et al. Isomeric yield ratios for the  $^{nat}\text{Nd}(\gamma, xn)$   $^{139m,g}$ ,  $^{141m,g}\text{Nd}$  reactions in the bremsstrahlung energy region from 45 to 60 MeV // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2014. V. 300. P. 367–377. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-2933-4>.
7. S.S. Belyshev, A.N. Ermakov, B.S. Ishkhanov et al. Studying photonuclear reactions using the activation technique // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*. 2014. V. 745. P. 133-137. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.01.057>.

# РАДИАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОЙ МАССЫ НУКЛОНОВ И СВОЙСТВА ОСНОВНОГО СОСТОЯНИЯ МАГИЧЕСКИХ ЯДЕР

Д.Ю.Смолянников<sup>1a</sup>, Н.Н.Арсеньев<sup>1b</sup>, А.П.Северюхин<sup>1,2c</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова. 141980, г.Дубна, Московская обл., ул.Жолио-Кюри, д.6.

<sup>2</sup>Государственный университет «Дубна». 141982, г.Дубна, Московской обл., ул. Университетская, д.19.

E-mail: <sup>a</sup>dsmoliannikov@theor.jinr.ru, <sup>b</sup>arsenev@theor.jinr.ru, <sup>c</sup>sever@theor.jinr.ru

Одним из наиболее успешных подходов к описанию структуры атомного ядра является самосогласованный метод Хартри–Фока (ХФ) с функционалом плотности энергии (ФПЭ) Скирма [1]. Параметры эффективного взаимодействия подбираются таким образом, чтобы с хорошей точностью описать характерные свойства ядерной материи и атомного ядра [2]: например, плотность насыщения, энергию симметрии, а также энергии связи и зарядовые радиусы дважды магических ядер. Однако в рамках такого подхода наблюдается заметное отклонение теоретических расчетов от экспериментальных значений при описании плотности одночастичного спектра.

Как показано в работе [3], более точное описание плотности состояний вблизи поверхности Ферми можно получить, если включить в оригинальный ФПЭ Скирма поправки, влияющие на радиальную зависимость эффективной массы нуклонов:

$$\Delta\mathcal{H} = C_0^{\tau(\nabla\rho)^2} \tau(\nabla\rho)^2 + C_0^{\rho^2(\nabla\rho)^2} \rho^2(\nabla\rho)^2. \quad (1)$$

Введение новых слагаемых приводит к значительному снижению точности описания свойств основного состояния атомного ядра. В данной работе проведена перенормировка параметров оригинального ФПЭ Скирма так, чтобы восстановить точное описание свойств ядерной материи, а также энергий связи и зарядовых радиусов дважды магических ядер  $^{16}\text{O}$ ,  $^{40,48}\text{Ca}$ ,  $^{56,78}\text{Ni}$ ,  $^{132}\text{Sn}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  и с учетом поправок (1). Предложен новый набор параметров ядерного функционала плотности [4].

1. M. Bender, P.–H. Heenen, and P.–G. Reinhard Self-consistent mean-field models for nuclear structure // Rev. Mod. Phys. — 2003. — Vol. 75. — P. 121.
2. A.P. Severyukhin, J. Margueron, I.N. Borzov, and N. Van Giai Sensitivity of  $\beta$ -decay rates to the radial dependence of the nucleon effective mass // Phys. Rev. C. — 2015. — Vol. 91 — 034322.
3. Li-Gang Cao, G. Colo, H. Sagawa, and P.F. Bortignon Properties of single-particle states in a fully self-consistent particle-vibration coupling approach // Phys. Rev. C. — 2014. — Vol. 89 — 044314.
4. D.Yu. Smolannikov, N.N. Arsenyev, and A.P. Severyukhin // in preparation.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО ПОИСКУ УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ В РЕАКЦИИ НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ НА УГЛЕРОДЕ

П.Г. Филончик<sup>1,2,3</sup>, Д.Н. Грозданов<sup>2,4</sup>, Н.А. Федоров<sup>2,5</sup>, Ю.Н. Копач<sup>2</sup> и коллаборация  
TANGRA

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>2</sup>Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт ядерных исследований и ядерной энергии Болгарской академии наук, София,  
Болгария

<sup>5</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия

E-mail: filonchik.pg@phystech.edu

В Лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка в ОИЯИ в проекте TANGRA (Tagged Neutrons and Gamma-RAys) проводится измерение угловых корреляций ( $n'\gamma$ ) в реакции неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядре  $^{12}\text{C}$ . В эксперименте используется метод меченых нейтронов [1], который позволяет подсчитывать количество нейтронов с высокой точностью, а также эффективно выделять полезные события, связанные с реакциями в образце. Для регистрации нейтронов и  $\gamma$ -квантов используются длинные (1 метр) пластиковые сцинтилляционные детекторы производством компании EPIC CRYSTALL с двумя ФЭУ. В данной работе сделан акцент на определение характеристик 10 данных детекторов, а именно, определение временного и пространственного разрешения и коэффициента затухания света в сцинтилляторе.

По разнице времен срабатывания двух ФЭУ можно определить, в какую часть детектора попала частица [2]. Был проведён калибровочный эксперимент с источником  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$ . Из свинцовых пластин были сделаны щели на расстоянии 20, 50 и 80 см от одного из ФЭУ, вблизи которых располагался источник. В результате временное разрешение детекторов составило 3,5 нс, а пространственное разрешение составило порядка 23 см. Также была оценена длина затухания сцинтилляционного света в чувствительном объеме детектора.

Определение данных параметров, в частности, пространственная калибровка детекторов необходимы для определения местоположения попадания частицы. Это даёт возможность измерять угловые корреляции ( $n, n'\gamma$ ) в широком диапазоне углов, в том числе, вне плоскости реакции.

1. Федоров Н.А. [и др.]. Исследование неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах кислорода и кремния // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2018. №2: 1820205
2. Dabylova S.B. [et al.] Characteristics of Position-Sensitive Plastic Scintillation Detectors // 28-th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN 28). 2021.

## Секция: Физика высоких энергий

# КУЛОНОВСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В РЕДКИХ ЛЕПТОННЫХ И ПОЛУЛЕПТОННЫХ РАСПАДАХ НЕЙТРАЛЬНЫХ В-МЕЗОНОВ

С.И.Манухов<sup>1</sup>, Н.В.Никитин<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный,  
Московская область, Россия

E-mail: manukhov.2000@mail.ru

В настоящее время редкие полулептонные и сверхредкие лептонные распады В-мезонов активно изучаются на установках LHCb [1], CMS [2] и ATLAS [3] Большого адронного коллайдера и на установке Belle-II в японском ускорительном центре КЕК [4]. В частности, установки LHCb и CMS измерили парциальные ширины редких распадов  $B_{s,d}^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $B_{s,d}^0 \rightarrow h^0\Gamma^+1^-$  ( $h^0$  – нейтральный адрон). В настоящее время эти распады достаточно хорошо изучены теоретически в рамках Стандартной модели и ее расширений [5].

Однако известно существование расхождений между экспериментальными и теоретическими результатами. Прежде всего, это касается дифференциальных распределений таких распадов, как  $B^0 \rightarrow K^0\mu^+\mu^-$  [6], а также парциальной ширины распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  [1–3]. Именно благодаря этим расхождениям, изучение редких распадов В-мезонов считается чувствительным к «новой физике». Однако перед тем, как объявлять о выходе за пределы Стандартной Модели необходимо убедиться, что все возможные поправки к распадам в рамках СМ учтены верно.

Ключевая идея данной работы — учет кулоновского взаимодействия между заряженными лептонами в конечном состоянии при помощи изменения процедуры вторичного квантования. Обычно в квантовой теории поля используется разложение по плоским волнам. Однако плоские волны — это решения свободного волнового уравнения, то есть решения, предполагающие отсутствие взаимодействия между частицами. В тоже время, в рассматриваемых распадах В-мезонов в конечном состоянии присутствуют заряженные лептоны. Их нельзя считать свободными, потому что каждый из лептонов находится в поле другого лептона. Они взаимодействуют друг с другом кулоновским образом. Именно поэтому в работе используется модифицированная процедура вторичного квантования - разложение по точным решениям волнового уравнения с внешним потенциалом:

$$l(x) = \sum_{\lambda=\pm 1/2} \int \frac{d^3\mathbf{p}}{(2\pi)^3} \left( a_{E_p, \mathbf{p}} \Psi_{E_p, \mathbf{p}}^{(+)}(x) e^{-iE^{(+)}t} + b_{E_p, \mathbf{p}}^{\dagger} \Psi_{E_p, \mathbf{p}}^{(-)}(x) e^{+iE^{(-)}t} \right)$$

Этот метод хорошо известен из атомной физики и носит название картины или представления Фарри [7]. Обоснование применимости метода Фарри было выполнено на примере распада гипотетической нейтральной псевдоскалярной частицы на два заряженных скаляра  $B^0(M) \rightarrow S^+(m)S^-(m)$ . Необходимость проверки обусловлена тем, что метод Фарри обычно применяется для атомных систем, в которых имеется связанное состояние электрона и ядра. Априори не ясно, на сколько адекватным является рассмотрение Фарри в случае системы взаимодействующих релятивистских несвязанных в конечном состоянии частиц. Для проверки метода Фарри необходимо провести

сравнение с другими способами учета кулоновского взаимодействия. В данной работе производится сравнение трех подходов:

- 1) Нерелятивистского метода Гамова [8], Зоммерфельда [9] и Сахарова [10]
- 2) Точного релятивистского метода, основанного на построении двухчастичных релятивистских уравнений, формализм которых был развит Кратером (Crater) [11] и Сазджаном (Sazdjian) [12].
- 3) Релятивистского метода Фарри [7].

Сравнение трех методов изображено на рисунке 1. Видно, что метод Фарри дает аналогичные предсказания, что и остальные методы, практически на всем интервале допустимых значений. Только возле границы  $m \rightarrow M/2$  (нерелятивистский предел) наблюдается расхождение между методами. Это сигнализирует о том, что в таких распадах метод Фарри не работает. Однако в релятивистском случае картина Фарри работает также, как и остальные подходы. Именно этот факт позволяет сделать предположение, что картина Фарри хорошо применима к описанию распадов с участием пар заряженных лептонов.

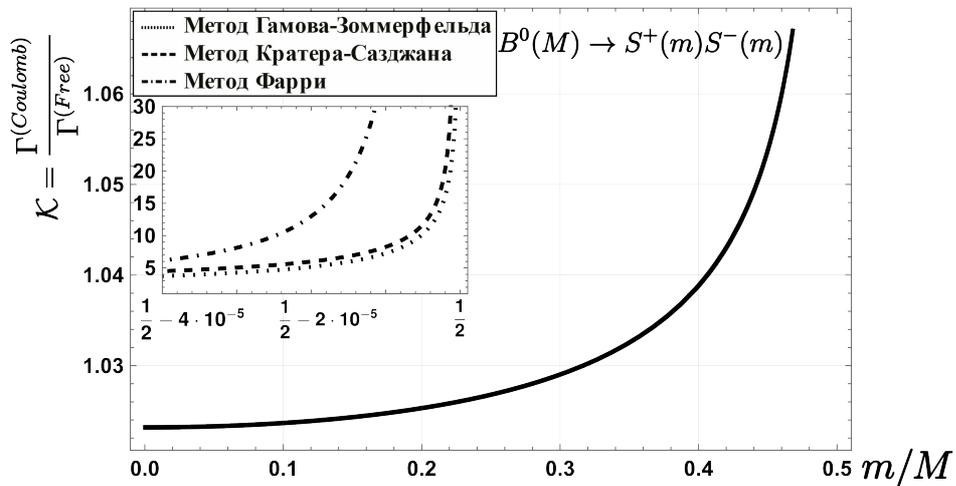


Рис. 1. График зависимости кулоновского фактора от соотношения масс  $m/M$  в распаде  $B^0(M) \rightarrow S^+(m)S^-(m)$ .

Применение метода Фарри к распадам В-мезонов позволило рассчитать поправки в распадах  $B_{d,s}^0 \rightarrow \ell^+ \ell^-$  и  $B_{d,s}^0 \rightarrow h^0 \ell^+ \ell^-$  (где  $h^0 = \{K, \pi^0, \eta, \eta'\}$  – псевдоскалярный мезон,  $\ell = \{e, \mu, \tau\}$  – лептон). Учет кулоновского взаимодействия в распаде  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  уменьшает расхождение между теорией и экспериментом более, чем вдвое (оставляя 2% отклонения на фоне 11%-й экспериментальной погрешности). Всего найдены кулоновские поправки более чем к 20 распадам.

Наконец, разработан универсальный рецепт, позволяющий учитывать кулоновское взаимодействие в любом распаде, в конечном (или начальном) состоянии которого есть пара заряженных лептонов:

$$\langle l^+ l^- | \bar{l}(x) O l(x) | 0 \rangle \xrightarrow{\text{Coulomb}} \langle l^+ l^- | \bar{l}(x) O l(x) | 0 \rangle \frac{\left| \Gamma \left( \sqrt{\frac{1}{4} - \alpha_{em}^2} + \frac{1}{2} + i \frac{\alpha_{em}}{v} \right) \right|}{\left| \Gamma \left( 2 \sqrt{\frac{1}{4} - \alpha_{em}^2} + 1 \right) \right|} \exp \left( \frac{\pi \alpha_{em} \epsilon_l}{2 p_l} \right), \text{ где}$$

О - оператор, представляющий из себя произвольную комбинацию  $\gamma$ -матриц, импульсов, а также кварковых и лептонных полей,  $\varepsilon_l, p_l$  – энергия и импульс заряженного лептона в системе покоя  $l^+l^-$  пары,  $\Gamma(x)$  – гамма-функция Эйлера. По результатам работы подготовлена статья в журнал ЭЧАЯ, на которую была получена положительная рецензия.

1. *Aaij R.* [et al.]. Measurement of the  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  branching fraction and effective lifetime and search for  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  decays. // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 118(19):191801. DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.191801
2. *Tumasyan A.* [et al.]. Measurement of the  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  decay properties and search for the  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  decay in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV // *Phys. Lett. B.* 2023. V. 842:137955. DOI: 10.1016/j.physletb.2023.137955
3. *Aaboud M.* [et al.]. Study of the rare decays of  $B_s^0$  and  $B^0$  mesons into muon pairs using data collected during 2015 and 2016 with the ATLAS detector // *JHEP.* 2019. V. 04:098. DOI: 10.1007/JHEP04(2019)098
4. *de Marino G.* [et al.]. Status and prospects for rare B decays at Belle and Belle II // *PoS.* 2023. FPCP2023:8. DOI: 10.22323/1.445.0008
5. *Buras A.J.* Theoretical review of B physics // *Nucl. Instrum. Meth. A.* 1995. V. 368. P. 1–20. DOI: 10.1016/0168-9002(95)00869-1
6. *Aaij R.* [et al.]. Differential branching fractions and isospin asymmetries of  $B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-$  decays // *JHEP.* 2014. V. 06:133. DOI: 10.1007/JHEP06(2014)133
7. *Furry W.H.* On bound states and scattering in positron theory // *Phys. Rev.* 1951. V. 81. P. 115–124. DOI: 10.1103/PhysRev.81.115
8. *Gamow G.* Zur Quantentheorie des Atomkernes // *Zeitschrift fur Physik.* 1928. V. 51. P. 204–212. DOI: 10.1007/BF01343196
9. *Sommerfeld A.* *Atombau und Spektrallinien.* V. 2 — Los Angeles: F. Vieweg & Sohn, 1921.
10. *Сахаров А.Д.* Взаимодействие электрона и позитрона при рождении пар // *ЖЭТФ.* 1948. Т. 18. Вып. 7. С. 631–635.
11. *Crater H., Alstine P.V.* Two-body dirac equations // *Annals Phys.* 1983. V. 148(1). P. 57–94. DOI: 10.1016/0003-4916(83)90330-5
12. *Sazdjian H.* Relativistic wave equations for the dynamics of two interacting particles. // *Phys. Rev. D.* 1986. V. 33 P. 3401–3424. DOI: 10.1103/PhysRevD.33.3401

# РАСЧЕТ АЗИМУТАЛЬНЫХ ПОТОКОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ ИОНОВ СВИНЦА И КСЕНОНА С ПОМОЩЬЮ МОНТЕ-КАРЛО ГЕНЕРАТОРА ПРИ ЭНЕРГИЯХ БАК

Д.А. Мягков<sup>1,2</sup>, С. В. Петрушанко<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Физический Факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский Институт  
Ядерной Физики им. Д.В. Скобельцына  
Москва Россия

<sup>3</sup>ОИЯИ Дубна Россия

E-mail: [danila.myagkov.msu@mail.ru](mailto:danila.myagkov.msu@mail.ru)

В настоящее время активно развиваются исследования в области экстремальных состояний вещества, например, изучение кварк-глюонной плазмы. В связи с этим также развивается комплексное применение различных моделей, описывающих явления, происходящие с веществом, например, при релятивистских столкновениях тяжелых ионов на ускорителях. Создаются новые методы изучения экстремальных состояний и совершенствуются методы работы с ними. Одним из таких методов является исследование ядерных столкновений с использованием Монте-Карло генераторов.

В реальности, платформой для таких исследований служат ускорители и детекторные комплексы. В нашей работе мы сосредоточимся главным образом на результатах, полученных коллаборацией CMS [1], работающей на Большом адронном коллайдере. Проводя исследования с 2010 года, коллаборация CMS уже опубликовала более двухсот научных статей [2] по физике тяжелых ионов. В этих статьях подробно рассматриваются различные методы расчета азимутальных потоков заряженных частиц: метод истинной плоскости реакции, кумулянты второго и четвертого порядков, двухчастичные корреляции и т.д. [3,4]. Данная работа будет посвящена изучению этих методов и их реализации в Монте-Карло генераторе HYDJET++ [5].

HYDJET++ - это Монте-Карло модель для генерации релятивистских столкновений тяжелых ионов. Он включает в себя комбинацию двух независимых компонентов: мягкой гидродинамической части для частиц с низкой энергией и жесткой части для струй и адронов, учитывающей эффект их гашения из-за потерь энергии в плотном веществе. Первоначально азимутальные потоки заряженных частиц в генераторе HYDJET++ рассчитываются с использованием метода истинной плоскости реакции [6]. В работе мы продемонстрируем результаты интеграции других методов в модель HYDJET++.

В работе рассматриваются методы расчета азимутальных потоков – эллиптического  $v_2$  и треугольного  $v_3$  – при столкновениях ионов свинца и ксенона. Метод плоскости реакции заключается в нахождении угла плоскости реакции и вычислении гармоник относительно этого угла. Кумулянтный метод, соответственно, подразумевает расчет кумулянтов, учитывающих корреляции между частицами. С помощью этих методов проводится расчет потоков, и результаты сравниваются с аналогичными в работе коллаборации CMS [3,4].

В результате работы получена генерация релятивистских столкновений ионов свинца с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 5,36$  ТэВ на пару нуклонов в с.m.s. и ксенона с энергией  $\sqrt{s_{NN}} = 5,44$  ТэВ на пару нуклонов в с.m.s. эллиптических  $v_2$  и треугольных  $v_3$  потоки были рассчитаны с использованием различных методов. Методы были проанализированы, и полученные результаты были сопоставлены с результатами эксперимента CMS [3,4]. Эта работа позволит нам скорректировать модель генератора в будущем и определить области, в которых модель работает недостаточно хорошо, и продолжить ее разработку.

1. S. Chatrchyan et al. (CMS Collaboration). The CMS experiment at the CERN LHC // J. Instrum. 2008. No. 3, S08004.

2. CMS Collaboration. CMS heavy-ion physics publications  
<http://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIN/>
3. S. Pandey, B. K. Singh. Anisotropic flow and correlations between azimuthal anisotropy Fourier harmonics in Xe–Xe collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$  TeV under HYDJET++ framework // Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 2022 // arXiv:2107.01880. 2021.
4. S. Pandey, B.K. Singh. Transverse momentum spectra and suppression of charged hadrons in deformed Xe–Xe collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$  TeV using HYDJET++ model // arXiv:2210.08527. 2022.
5. I. P. Lokhtin, L. V. Malinina, S. V. Petrushanko, A. M. Snigirev, I. Arsene, K. Tywoniuk. Heavy ion event generator HYDJET++ (HYDrodynamics plus JETs) // Comput. Phys. Commun. 2009. V. 180, 779.
6. Д. А. Мягков, С. В. Петрушанко. Эллиптический и треугольный потоки заряженных частиц в релятивистских столкновениях ядер Xe и Pb в модели HYDJET++ и эксперименте CMS (LHC) // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. 2023. № 3. 2330205.

# ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ КХД И ЭЛЕКТРОСЛАБЫХ ДИАГРАММ С ДИАГРАММАМИ С МЕДИАТОРОМ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ В РОЖДЕНИИ ЧЕТЫРЕХ ТОП-КВАРКОВ

Э.Э. Абасов<sup>1</sup>, Э.Э. Боос<sup>1</sup>, В.Е. Буничев<sup>1</sup>, П.В. Волков<sup>1</sup>, Г.А. Воротников<sup>1</sup>, Л.В. Дудко<sup>1</sup>,  
А.Д. Заборенко<sup>1</sup>, Е.С. Иудин<sup>1</sup>, А.А. Маркина<sup>1</sup>, М.А. Перфилов<sup>1</sup>, Н.А. Савкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия,

<sup>2</sup>Филиал Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в г. Сарове

E-mail: savkovana@my.msu.ru

Существуют весоные астрофизические и космологические данные, указывающие на присутствие темной материи (ТМ), которая проявляется через гравитационное взаимодействие и слабо взаимодействует с полями Стандартной модели (СМ) [1]. В рамках предположения, что ТМ имеет природу частиц, создаются различные расширения СМ, предсказывающие взаимодействия, которые могут быть обнаружены в экспериментах Большого Адронного Коллайдера [2].

Одним из таких расширений является упрощенная модель, предполагающая взаимодействие частиц темной материи, которые представляются дираковскими фермионами  $\chi$ , с фермионами Стандартной модели  $f$  посредством обмена массивным скалярным  $\Phi$  или псевдоскалярным медиатором  $A$  [3,4]. Лагранжианы взаимодействия выглядят следующим образом:

$$L_{\Phi} = g_{\chi} \Phi \bar{\chi} \chi + \frac{g_f \Phi}{\sqrt{2}} \sum_f (y_f \bar{f} f)$$

$$L_A = i g_{\chi} A \bar{\chi} \gamma^5 \chi + i \frac{g_f A}{\sqrt{2}} \sum_f (y_f \bar{f} \gamma^5 f)$$

Здесь  $y_f = \sqrt{2} m_f / v$  – константы связи Юкавы, со значением вакуумного среднего поля Хиггса  $v$  равным 246 ГэВ. В соответствии с рекомендациями LHC Dark Matter Working Group [5] значения параметров связи принимаются равными  $g_{\chi} = g_f = 1$ , масса частиц ТМ  $m_{\chi} = 1$  ГэВ.

Одним из самых перспективных каналов рождения медиатора ТМ является процесс с рождением четырех топ-кварков [6]. Было показано, что вклад диаграмм с ТМ без учета интерференции с диаграммами СМ в сечение  $pp \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$  высок [7]. В рамках данной работы была вычислена интерференция диаграмм ТМ с диаграммами СМ. Для моделирования и численных расчетов использовались вычислительные пакеты CompHEP4.6rc1 [8-10].

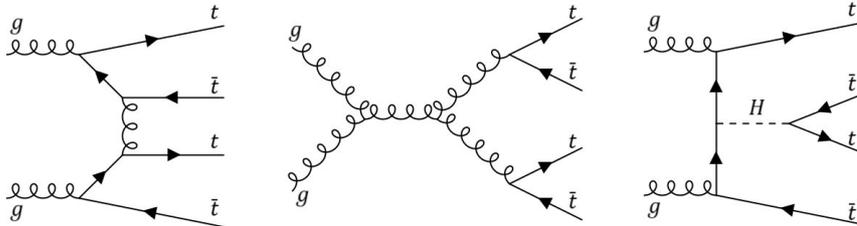


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана, описывающие рождение четырех топ-кварков в столкновении двух глюонов из двух сталкивающихся адронов в рамках СМ.

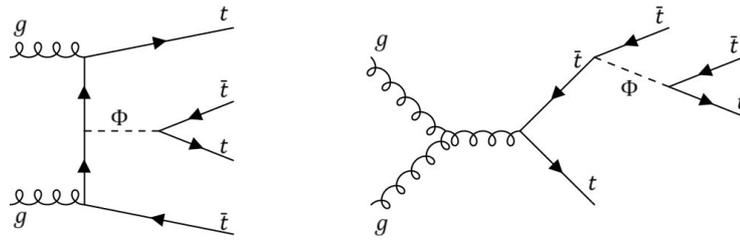


Рис. 2. Диаграммы Фейнмана, описывающие рождение четырех топ-кварков в столкновении двух глюонов из двух сталкивающихся адронов в рамках Упрощенной Модели ТМ со скалярным медиатором.

1. Rubin V.C., Ford Jr. W.K. Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions // *Astrophys. J.* — 1970. — V. 159. — P. 379–403.
2. Abercrombie D., others. Dark Matter benchmark models for early LHC Run-2 Searches: Report of the ATLAS/CMS Dark Matter Forum // *Phys. Dark Univ.* — 2020. — V. 27. — P. 100371. — arXiv:1507.00966.
3. Abdallah J., others. Simplified Models for Dark Matter Searches at the LHC // *Phys. Dark Univ.* — 2015. — V. 9-10. — P. 8–23. — arXiv:1506.03116.
4. Morgante E. Simplified Dark Matter Models // *Advances in High Energy Physics.* – 2018. 5012043, 13 pages, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/5012043>.
5. Buckley M.R., Feld D., Goncalves D. Scalar Simplified Models for Dark Matter // *Phys. Rev. D.* — 2015. — V. 91. — P. 015017. — arXiv:1410.6497 [hep-ph].
6. Boveia A., others. Recommendations on presenting LHC searches for missing transverse energy signals using simplified s-channel models of dark matter // *Phys. Dark Univ.* — 2020. — V. 27. — P. 100365. — arXiv:1603.04156.
7. Aad G. et al. [ATLAS Collaboration] Search for  $t\bar{t}H/A \rightarrow t\bar{t}t\bar{t}$  production in the multilepton final state in proton–proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector // *JHEP.* — 2023. — V. 07. — P. 203. — arXiv:2211.01136.
8. Search for dark matter mediator in the production of three and four top quarks / E. Abasov, E. Boos, V. Bunichev, P. Volkov, G. Vorotnikov, L. Dudko, A. Zaborenko, E. Iudin, A. Markina, M. Perfilov, N. Savkova // arXiv:2407.08308.
9. Boos E. et al. [CompHEP Collaboration] CompHEP 4.4: Automatic computations from Lagrangians to events // *Nucl. Instrum. Meth. A.* — 2004. — V. 534. — P. 250–259. — arXiv:hep-ph/0403113.
10. Pukhov A., Boos E., Dubinin M., Edneral V., Ilyin V., Kovalenko D., Kryukov A., Savrin V., Shichanin S., Semenov A. CompHEP: A Package for evaluation of Feynman diagrams and integration over multiparticle phase space. — 1999. — 8. — arXiv:hep-ph/9908288.
11. CompHEP home page: — URL: <http://comphep.sinp.msu.ru>.

# РЕЗОНАНСНЫЕ ВКЛАДЫ В СТРУКТУРНЫЕ ФУНКЦИИ ИНКЛЮЗИВНОГО РАССЕЙЯНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ДАННЫХ CLAS

Фадееенко Богдан Александрович

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет,  
Москва, Россия*

E-mail: [fadeenko.ba19@physics.msu.ru](mailto:fadeenko.ba19@physics.msu.ru)

Изучение инклюзивного рассеяния электронов на нуклонах играет важную роль в исследовании структуры нуклонов. Оценка резонансного вклада в структурную функцию  $F_2$ , а также в поляризованные структурные функции  $g_1$  и  $g_2$ , необходима в дальнейшем для определения нерезонансных вкладов, которые находятся как разница между экспериментальными данными о структурных функциях и резонансными вкладами соответственно [1, 2]. Эти результаты имеют большое значение для расширения информации о распределениях партонов в основном состоянии нуклона описываемых (не)зависящими от спина партонов PDF при сравнимых с единицей долей импульса партонов  $x$  в области возбуждения нуклонных резонансов.

В настоящей работе представлены оценки вкладов нуклонных резонансов в структурные функции  $F_2$ ,  $g_1$ ,  $g_2$ . Эти оценки впервые были получены с использованием экспериментальных данных по амплитудам электровозбуждения  $N^*$  из измерений сечений и поляризационных асимметрий реакций эксклюзивного электророждения мезонов на протонах  $p^0p$ ,  $p^+n$ ,  $p^+p$  коллаборацией CLAS [3]. Параметризация зависимостей амплитуд электровозбуждения  $N^*$  от виртуальностей фотонов  $Q^2$  выполнена с учетом ограничений налагаемых требованиями аналитичности этих амплитуд.

1. Nucleon resonance contributions to unpolarised inclusive electron scattering, A. N. Hiller Blin et al., Phys. Rev. C 100 (2019) 035201, arXiv:1904.08016 [hep-ph]
2. Resonant contributions to polarized proton structure functions, A. N. Hiller Blin, V. I. Mokeev, and W. Melnitchouk, arXiv:2212.11952 [hep-ph]
3. [https://userweb.jlab.org/~mokeev/resonance\\_electrocouplings23/](https://userweb.jlab.org/~mokeev/resonance_electrocouplings23/)

# МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ЗАДАЧЕ ПРЕДСКАЗАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ И СТРУКТУРНЫХ ФУНКЦИЙ ЭЛЕКТРОРОЖДЕНИЯ ПИОНОВ В РЕЗОНАНСНОЙ ОБЛАСТИ

В. В. Чистякова<sup>1</sup>, А. В. Голда<sup>1</sup>, А. А. Русова<sup>1,2</sup>, Е. Л. Исупов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

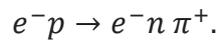
<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: chistiakova.vv19@physics.msu.ru

golda.av15@physics.msu.ru

Сильное взаимодействие обеспечивает устойчивость атомных ядер и формирование 90% видимой материи во Вселенной с ненулевой массой. Непертурбативная область, переходная область между конфайнментом и асимптотической свободой, ответственна за формирование структуры нуклона и нуклонных резонансов с различными квантовыми числами. Изучение структуры возбуждённых состояний нуклонов может приблизить нас к разгадке механизмов сильного взаимодействия, а потому данное направление можно по праву считать одним из важнейших в современной физике адронов.

Значительная часть информации о возбуждённых состояниях нуклонов извлекается из реакций эксклюзивного электророждения мезонов на нуклонах. В нашей работе исследовалась реакция взаимодействия электрона с протоном с образованием нейтрона и  $\pi^+$ -мезона:



Эксперименты по рассеянию электронов и фотонов на протонах осуществляются, в частности, в Лаборатории имени Томаса Джефферсона (Jefferson Lab). Детектор CLAS обладает аксептансом (полным телесным углом регистрации частиц)  $4\pi$  и позволяет в каждом событии надёжно устанавливать все типы и четырёхимпульсы образовавшихся частиц. Информация по всем измеренным на детекторе CLAS наблюдаемым хранится в CLAS Physics Database – результат совместной работы Hall B Jefferson Lab и ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ.

Дифференциальное сечение под действием виртуальных фотонов в случае неполяризованного электронного пучка описывается выражением:

$$\frac{d\sigma_{\gamma\nu}}{d\Omega_\pi} = \frac{d\sigma_u}{d\Omega_\pi} + \varepsilon \frac{d\sigma_{tt}}{d\Omega_\pi} \cdot \cos 2\varphi + \sqrt{2\varepsilon(1+\varepsilon)} \frac{d\sigma_{lt}}{d\Omega_\pi} \cdot \cos\varphi \equiv A + B\cos 2\varphi + C\cos\varphi.$$

Анализ дифференциальных сечений позволяет определить структурные функции, с помощью которых можно выразить амплитуды электровозбуждений резонансов. Эти данные в свою очередь служат источником информации о динамике сильного взаимодействия.

Цель работы состояла в построении алгоритма для предсказания значений дифференциальных сечений. Модель представляет собой полносвязную нейронную сеть, которая принимает на вход значения из четырёхмерного фазового пространства независимых кинематических переменных: инвариантной массы системы конечных адронов  $W$ , квадрата переданного четырёхимпульса виртуального фотона  $Q^2$ , косинуса полярного угла рассеяния электрона  $\cos\theta$ , угла между плоскостью рассеяния электрона и плоскостью реакции  $\varphi$ , а также энергии электронного пучка. На рис. 1 показан пример результата работы алгоритма при энергии пучка электронов 5.754 МэВ. Красные точки

соответствуют экспериментальным данным, синяя кривая – результат фитирования, зелёная – предсказание алгоритма.

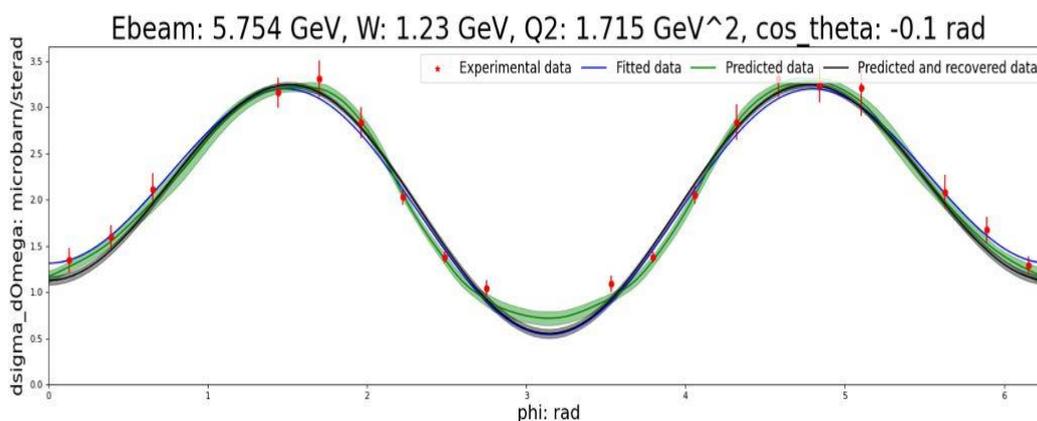


Рис. 1. Зависимость экспериментальных данных, фитирования и предсказания алгоритма дифференциальных сечений  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$  от угла  $\varphi$ .

Для оценки качества работы модели использовался корень из среднеквадратичной ошибки, поскольку в нашей работе эта ошибка оказалась меньше среднего значения самой статистической ошибки экспериментальных данных:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}.$$

Из проведённого сравнения во всём фазовом пространстве наблюдается хорошее согласие предсказанных данных с экспериментальными. Таким образом, данный алгоритм позволяет осуществлять надёжную интерполяцию экспериментальных данных, а значит, может быть использован в качестве Монте-Карло генератора.

Секция: Физика космических лучей  
и солнечно-земных связей

# ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ЯРКОСТИ НОЧНОГО НЕБА В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

А. А. Аминова<sup>1</sup>, Д. А. Подгрудков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: [amineva.aa19@physics.msu.ru](mailto:amineva.aa19@physics.msu.ru)

В случае любого наземного оптического эксперимента всегда приходится иметь дело с фоном: помимо интересующих событий присутствуют собственное свечение атмосферы, звездный, зодиакальный свет, свет от объектов Солнечной Системы и пр.

Сейчас в этой области существуют полнокупольные модели или модели в узком диапазоне длин волн. Основная проблема заключается в том, что в них представлен полный поток, поэтому получить спектр для отдельно взятого участка неба не представляется возможным.

В настоящей работе представлены первые этапы реализации модели яркости ночного неба в оптическом диапазоне — работа с системой отсчета, учет собственного свечения атмосферы и зодиакального света — двух компонентов, которые дают наибольший вклад. Модель небесной сферы строится по квадратам размером 0.1 \* 0.1 градус, что позволяет вычислить поток для любой заданной области. Свечение воздуха излучается атомами и молекулами в верхних слоях атмосферы, которые в течение дня возбуждаются солнечным ультрафиолетовым излучением. Интенсивность собственного свечения атмосферы коррелирует с солнечной активностью. Описание этого явления основывается на работах [1], [2]. Данные для моделирования зодиакального света были взяты из работы [3], где описание явления строится на основе данных с детектора SMEI (Solar Mass Ejection Imager). Описанные компоненты фона оформлены в виде библиотеки на языке Python.

1. Benn C. R., Ellison S. L. Brightness of the night sky over La Palma //New Astronomy Reviews. – 1998. – Т. 42. – №. 6-8. – С. 503-507.
2. Broadfoot A. L., Kendall K. R. The airglow spectrum, 3100–10,000 Å //Journal of Geophysical Research. – 1968. – Т. 73. – №. 1. – С. 426-428.
3. Buffington A. et al. Measurements and an empirical model of the Zodiacal brightness as observed by the Solar Mass Ejection Imager (SMEI) //Icarus. – 2016. – Т. 272. – С. 88-101.

# АНАЛИЗ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА LHAASO В АНИЗОТРОПНОМ ДИФФУЗИОННОМ ПОДХОДЕ

В.Д. Борисов<sup>1\*</sup>, И.А. Кудряшов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: borisov.vd19@physics.msu.ru

Спектр космических лучей (КЛ), измеренный у Земли, имеет особенность в районе 4 ПэВ [1]. В последнее время значительное количество исследований, основанных на анализе экспериментальных данных с таких установок, как LHAASO [2], указывают на потенциальную пространственную зависимость этой особенности [3, 4].

Совместный анализ данных экспериментов Fermi-LAT [5] (в области энергий до 1 ТэВ) и LHAASO (в области энергий до 1 ПэВ) [2] по гамма-квантам позволяет оценить энергетические спектры первичных космических лучей, полученные результаты указывают на пространственную зависимость излома в спектре КЛ и не описываются в рамках стандартного диффузионного подхода.

Мы представляем новую модель диффузионного распространения КЛ, учитывающую пространственную зависимость спектральных особенностей наблюдаемого спектра и позволяющую оценивать потоки КЛ в модельном объеме Галактики. Эта модель основана на расчете компонентов тензора диффузии в реалистично смоделированном крупномасштабном галактическом магнитном поле [6,7]. Параметры модели согласуются с современным пониманием структуры крупномасштабного галактического магнитного поля [8,9] и динамики мелкомасштабного турбулентного распространения КЛ [6,10]. В работе авторами показывается, что переход к анизотропному описанию распространения КЛ позволяет описать новые данные эксперимента LHAASO.

В данной работе авторы добились следующего: продемонстрирована модуляция спектров галактических космических лучей (ГКЛ) в диапазоне магнитной жесткости 1-30 ПВ (колено КЛ) для протонов, а также для средних и тяжелых групп ядер. Исследована пространственная вариация этого явления. Наблюдаемая модуляция спектра объясняется изменением механизма утечки. В рамках построенной модели оценены потоки гамма-квантов в области энергий до 1 ПэВ.

1. Hörandel, J. R. On the knee in the energy spectrum of cosmic rays // *Astroparticle Physics.*, 2003, V. 19, No. 2, p. 193 – 220. doi:10.1016/S0927-6505%2802%2900198-6.

2. Z. Cao et al. (LHAASO). Measurement of ultra-high-energy diffuse gamma-ray emission of the Galactic plane from 10 TeV to 1 PeV with LHAASO-KM2A // *Phys. Rev. Lett.* 131, 151001(2023), doi:10.1103/PhysRevLett.131.151001.

3. Prevotat C. et al. Energy dependence of the knee in the cosmic ray spectrum across the Milky Way // *Physical Review D*, 2024. doi:10.48550/arXiv.2407.11911.

4. Vernetto S., Lipari P. Absorption of very high energy gamma rays in the Milky Way // *Physical Review D*, 2016, V. 94. doi:10.1103/PhysRevD.94.063009.

5. R. Zhang, X. Huang, Z.-H. Xu, S. Zhao, and Q. Yuan. Galactic diffuse gamma-ray emission from GeV to PeV energies in light of up-to-date cosmic ray measurements // *Astrophys. J.* 957, 43 (2023), 2305.06948. doi:10.3847/1538-4357/acf842.
6. Yurovsky, V.O, Kudryashov, I.A. Anisotropic Cosmic Ray Diffusion Tensor in a Numerical Experiment // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys*, 2023, V. 87, p. 1032–1034. doi:10.3103/S1062873823702337.
7. Yurovsky, V.O., Peryatinskaya, A.I., Borisov, V.D., Kudryahshov, I.A Numerical study of GCR proton transport// *PoS(ICRC2023)*., 2023, Art. No. 201. doi:10.22323/1.444.0201.
8. Unger, M., and Farrar, G.R. The Coherent Magnetic Field of the Milky Way // *Astrophys.J.* 970 (2024) 1, 95. doi:10.3847/1538-4357/ad4a54.
9. Jansson, R., and Farrar, G.R. A new model of galactic magnetic field // *The Astrophysical Journal*, 2012, V. 757, No. 1, Art. No. 14. doi: 10.1088/0004-637X/757/1/14.
10. Giacinti, G., Kachelrieß, M., Semikoz, D. V. Anisotropic Cosmic Ray Diffusion and its Implications for Gamma-Ray Astronomy// *Physical Review D.*, 2015, V. 91, No. 8. doi:10.1103/PhysRevD.88.023010.

# МОДЕЛЬ ОТКЛИКА ДЕТЕКТОРА ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ «КОВЁР-3»

Васильев Н.А.<sup>1</sup>, Джатдоев Т.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына  
Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова  
(НИИЯФ МГУ), Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия*

Космические лучи высоких энергий порождают широкие атмосферные ливни (ШАЛ). В основе представлений о процессах в ливнях лежит модель ядерного каскада. Широкий атмосферный ливень считают гигантским электронно-ядерным ливнем. В этом ливне генерируются электронно-фотонная, мюонная и адронная компоненты, излучение Вавилова-Черенкова, радиоизлучение и др. Первые шаги, сделанные в этом направлении, дали возможность объяснить его основные особенности.

В настоящее время в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН работает комплексная ливневая установка «Ковёр-3», измеряющая поток космических гамма-квантов с энергией выше 100 ТэВ. Установка находится на высоте 1700 метров над уровнем моря. Модули установки «Ковёр-3» содержат сцинтилляционные детекторы с пластиковым сцинтиллятором и с жидкостным сцинтиллятором в пластиковых упаковках. В результате взаимодействия гамма-квантов с атмосферой генерируются ШАЛ, компоненты которого регистрируются сцинтилляторами. Также установка включает в себя мюонный детектор с энергетическим порогом в 1 ГэВ для вертикальных мюонов [1].

В нашей работе производится оценка зависимости эффективности регистрации установкой первичных гамма-квантов от их энергии. Широкие атмосферные ливни от первичных частиц сгенерированы при помощи программного комплекса CORSIKA. Затем с использованием кода на Geant4 [2] определялся отклик на смоделированные ливни. Далее с помощью скрипта на языке Python [3] отклики подвергались дополнительной обработке для получения итогового результата. На данный момент ведётся активная работа улучшению моделирования: учитывается мюонный детектор, выносные пункты вокруг центрального детектора; внедряется метод восстановления направления прихода ливня по временам срабатывания триггера детекторов.

1. V. S. Romanenko, D. D. Dzhabpuev & The Carpet-3 Collaboration, The Recent Result of the Carpet-2 Facility and Status of the Carpet-3 Facility
2. GEANT4 Collaboration S. Agostinelli(Genoa U.), GEANT4--a simulation toolkit
3. Van Rossum, G. & Drake, F.L., Python 3 Reference Manual

# ДВУМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ В ПЛОСКОСТИ ЭКЛИПТИКИ

А.А. Вахрушева<sup>1,2</sup>, Ю.С. Шугай<sup>2</sup>, К.Б. Капорцева<sup>1,2</sup>, В.Е. Еремеев<sup>2</sup>, В.В. Калегаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва,  
Россия

E-mail: vakhr.anna@gmail.com

Сильные геомагнитные возмущения часто бывают вызваны приходом корональных выбросов массы (КВМ) к Земле. Прогнозирование прибытия КВМ к орбите Земли – одна из важных задач космической погоды. Для моделирования распространения КВМ в гелиосфере часто используется модель DBM, основанная на идее торможения и ускорения КВМ за счёт его взаимодействия с фоновым солнечным ветром. КВМ может двигаться как по спокойному, медленному солнечному ветру, так и по высокоскоростному потоку, а также он может взаимодействовать с другим КВМ.

В этой работе мы исследуем распространение КВМ сквозь разные типы солнечного ветра. При моделировании времени прибытия КВМ на орбиту Земли и его скорости используется три типа геометрии выброса в модели DBM: 1) концентрическая модель (все точки фронта КВМ находятся на одинаковом расстоянии от Солнца); 2) модель самоподобного расширения (фронт КВМ не меняет своей формы при движении); 3) модель с выравнивающимся фронтом (каждый элемент фронта КВМ распространяется независимо от других). В качестве координат источника КВМ на солнечном диске были использованы координаты соответствующего коронального димминга, наблюдающегося как локальное понижение интенсивности диска Солнца в ультрафиолетовом излучении.

Параметры корональных диммингов, рассчитанные по изображениям аппарата SDO/AIA, были получены из базы данных Solar Demon. Параметры КВМ, рассчитанные по изображениям коронографа SOHO/LASCO, были получены из базы данных SASTus. Для сопоставления прогнозируемого КВМ с наблюдаемым МКВМ был использован список МКВМ.

Исследование выполнено при поддержке РФФ, номер гранта 22-62-00048.

1. Zhang J., Richardson I.G., Webb D.F. et al., J. Geophys. Res.: Space Physics. 2007. V. 112. A10
2. Vršnak B., Žic T., Vrbaneck D. et al. // Solar Phys. 2013. V. 285. P. 295.
3. Dumbović M., Čalogović J., Martinić K. et al. // Front. Astron. Space Sci. 2021. V. 8. P. 639986.

# МОДЕЛЬ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ ДЛЯ ЭМУЛЬСИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА NEWSdm И КАЛОРИМЕТРА Hadron-55

Верминская Я. В., Анохина А. М.

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

На настоящий момент было проведено множество экспериментов по поиску темной материи в парадигме WIMPs – слабо взаимодействующих массивных частиц, в результате которых были получены ограничения на их взаимодействие с частицами Стандартной модели.

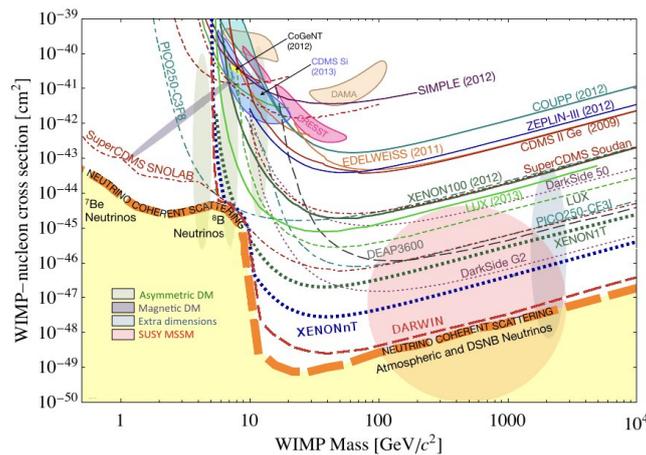


Рис.1. Экспериментально полученные сечения взаимодействия WIMPs с нуклонами.

Наша работа посвящена изучению отклика эмульсионного направленного эксперимента NEWSdm (в Gran Sasso, Italy) [1] и калориметра Hadron-55 в составе Тянь-Шаньской станции ФИАН [2] в рамках двухкомпонентной темной материи [3].

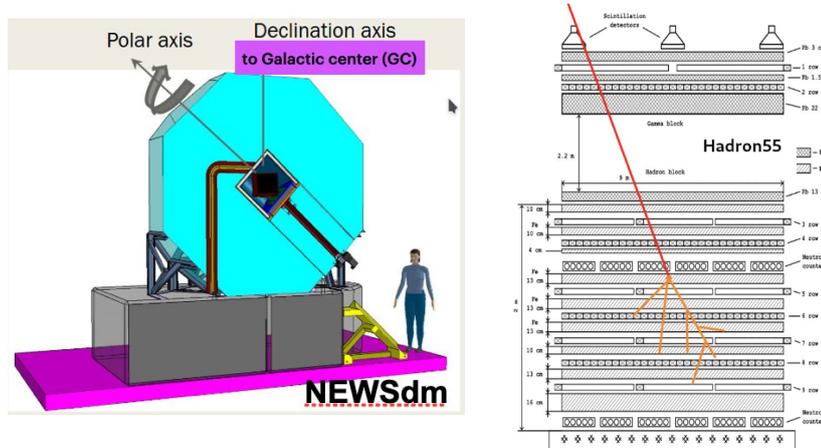


Рис.2. Эмульсионный эксперимент NEWSdm, направленный на центр Галактики (слева), калориметрический эксперимент Hadron-55, состоящий из слоев железа и свинца (справа).

Рассматриваемая модель предполагает существование доминирующей относительно более массивной компоненты (A), вносящей основной вклад в наблюдаемую реликтовую плотность ( $\Omega h^2 \sim 0.12$ ), которая ускоряет (англ. boost) вторую, сильно менее массивную, суб-компоненту в центре Галактики посредством аннигиляции, обмениваясь комплексным скаляром.

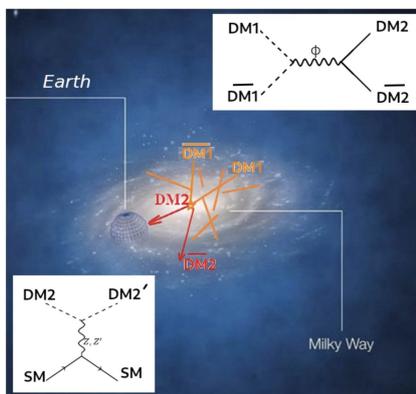


Рис.3. Аннигиляция первой компоненты темной материи (A) в галактическом центре и рассеяние второй компоненты (B) ТМ в детекторе.

Затем энергичная вторая компонента (B), попадая в вещество детектора, взаимодействует со стандартным веществом. Слева-направо: упругое – когерентное рассеяние на нуклонах и глубоко неупругое рассеяние в детекторе.

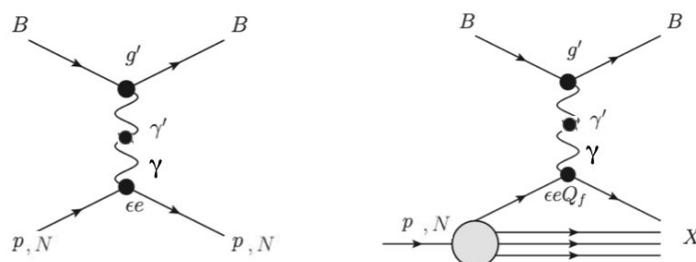


Рис.4. Типы рассеяния темной частицы на веществе детектора: упругое (слева) и глубоко неупругое рассеяние (справа).

Тип рассеяния определяется энергией налетающей частицы – чем выше энергия, тем больше вероятность провзаимодействовать по неупругому каналу. Таким образом, имея два разных эксперимента, мы исследуем несколько областей энергий темных частиц – упругие каналы для эмульсии и неупругие – для тяжелых слоев calorimetра, состоящих из свинца и железа.

Данная модель строится на шести свободных параметрах:

- массы двух темных частиц и темного фотона (переносчика взаимодействия между B-компонентой и стандартными частицами),

- параметр определяющий сечение аннигиляции компонент  $A \rightarrow B$ ,
- параметры фейнмановских диаграмм взаимодействия темных и стандартных частиц

$$\{m_A, m_B, m_{\gamma'}, \Lambda, g', \epsilon\}.$$

В ходе работы были реализованы сечения когерентного и некогерентного упругого рассеяния темных частиц различных энергий на ядрах эмульсионного детектора (группа CNO элементов) и протонах [3,4], и сечения глубоко неупругого рассеяния на тяжелых элементах calorиметра Hadron-55.

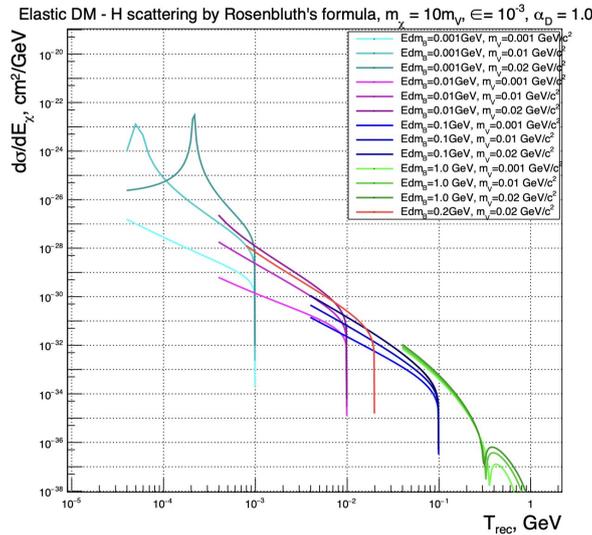


Рис.5. Дифференциальные сечения некогерентного упругого рассеяния темной частицы на протонах.

Следующим этапом генерировались таблицы частиц с нужными для дальнейшего исследования параметрами и построены их энергетические и угловые распределения.

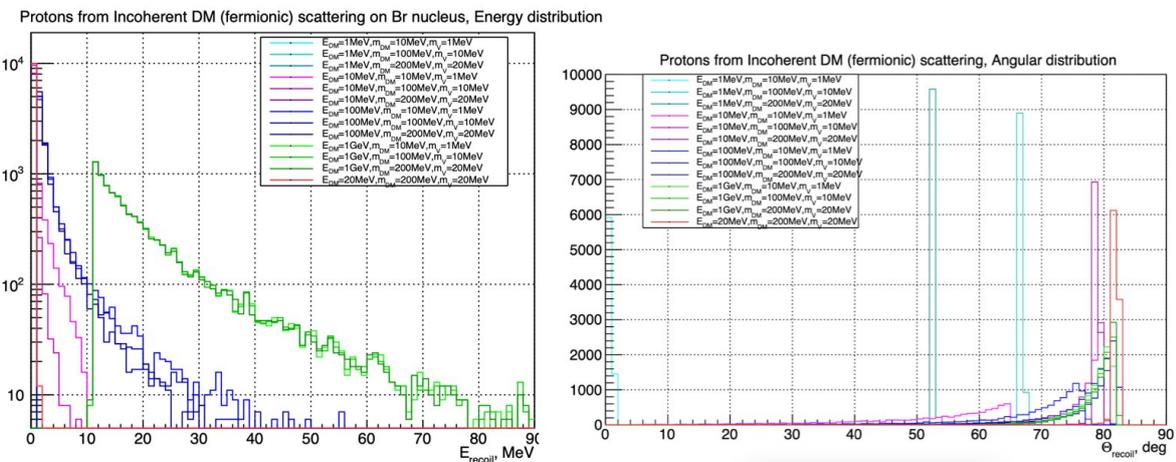


Рис.6. Распределения по энергиям и углам протонов, провзаимодействующих с ТМ.

Заключительным этапом является пропускание сгенерированных частиц через детектор, спроектированный в программе GEANT4 [5].

В результате работы, будут получены чувствительности детекторов NEWSdm и Hadron-55 к двухкомпонентной темной материи.

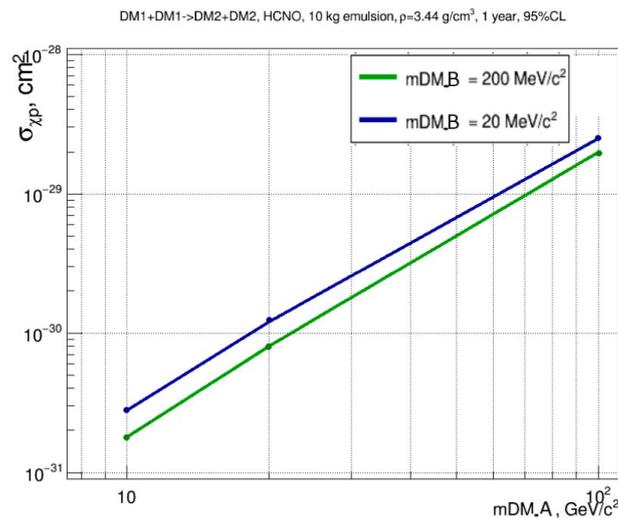


Рис.7. Чувствительность 10 кг эмульсии детектора NEWSdm к темным частиц различных масс  $m_B = 20, 200$  МэВ/ $c^2$ .

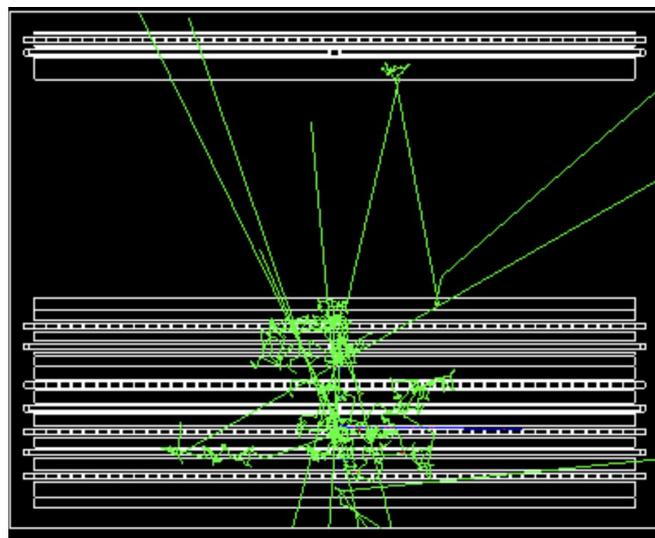


Рис.7. Визуализация пропускания сгенерированных частиц в детекторе Hadron-55, используя программу GEANT4.

1. <https://news-dm.lngs.infn.it/>
2. Вестник НЯЦ РК выпуск 4, декабрь 2019 “ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ ГИБРИДНОГО ИОНИЗАЦИОННОГО КАЛОРИМЕТРА”
3. <https://arxiv.org/abs/1405.7370>
4. <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.86.035022>
5. <https://geant4.web.cern.ch/>

## СОЗДАНИЕ ПРИБОРА МАДИЗ

А.Н. Ефимкин<sup>1</sup>, И.А. Золотарев<sup>2</sup>, И.П. Баканов<sup>1</sup>, С.Д. Анохин<sup>1</sup>,  
В.А. Фокин<sup>3</sup>, Е.Ю. Горбач<sup>4</sup>, Д.А. Тимохин<sup>5</sup>, Г.А. Куприянов<sup>6</sup>, И.А. Семенова<sup>7</sup>, О.Р.  
Кривачёв<sup>7</sup>, Т.А. Фомичев<sup>9</sup>

<sup>1</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, ФКИ, 1 курс, Москва, Россия,

<sup>2</sup>кфмн научный сотрудник НИИЯФ МГУ, Москва, Россия,

<sup>3</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, "Аппаратно-программное обеспечение систем искусственного интеллекта", 1 курс, Москва, Россия,

<sup>4</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физика частиц и экстремальных состояний вещества (Фундаментальная и прикладная физика), 1 курс, Москва, Россия,

<sup>5</sup>Долгопрудный, МФТИ, Техническая физика, 1 курс, Москва, Россия,

<sup>6</sup>МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия,

<sup>7</sup>ГБОУ Лицей №150 Калининского района Санкт-Петербурга, 10 «А» класс, Москва, Россия,

<sup>8</sup>МАИ, Самолёто-вертолётостроение, 1 курс, Москва, Россия,

<sup>9</sup>НИУ ВШЭ, ФиКЛ, 1 курс, Москва, Россия

E-mail: s24d\_efimkin@179.ru

МАтричный Детектор Излучения — это образовательный проект, научной задачей которого является изучение возможности детектирования радиации с помощью фотоматриц. Проект начал создаваться летом 2023 года в рамках проектной смены «Большие вызовы 2023» в Сириусе. Тогда НИИЯФ МГУ предложил ученикам образовательного центра написать программы для камеры кубсата МОНИТОР-1, чтобы она могла детектировать радиационные частицы, которые попадают на ее сенсор. На этой смене И. А. Золотарев (научный руководитель) предложил разработать новый прибор и на него поставить 2 матрицы на небольшом расстоянии.

Сейчас измерение радиации является важным направлением исследования космического пространства, особенно на полярной орбите. На эту орбиту планируется вывести новую российскую орбитальную станцию. Чтобы подготовить правильную радиационную защиту и спланировать действия экипажа во время солнечных вспышек, требуется запустить на эту орбиту прибор, который проведет наблюдения. Наш прибор планируется запустить на схожую орбиту. Мы рассчитываем, что он проведет наблюдения радиационного фона во время максимума солнечной активности. Еще одной важной особенностью прибора является простота детектирующей части. На нашем приборе это матрица фотокамеры. Схожие сенсоры установлены на многих кубсатах, поэтому можно использовать уже запущенные спутники, и измерять радиацию сразу в разных точках орбиты в одно время. Наш прибор фиксирует прилеты отдельных частиц. Также он может определять направление отдельных частиц. Особый интерес представляют солнечные протоны высоких энергий, так как они составляют значительную часть радиационного фона. Также их количество на околоземной орбите сильно меняется со временем. Солнечные протоны высоких энергий появляются в большом количестве во время солнечных вспышек. Солнце

имеет цикл активности 11 лет. Энергия, которая выделяется во время вспышки, может пойти на выброс частиц. Это событие называется солнечное протонное событие (СПС). Протоны достигают Земли за 30 минут. Они имеют большую энергию, поэтому могут проникнуть через корпус станции и навредить человеку и электронике. Частицы проникают через магнитосферу Земли и попадают на НОО. Больше всего их в полярных областях.

Когда протон пролетает через сенсор камеры, он «возбуждает» пиксели и оставляет след. Это мы называем треками или артефактами. На снимке может быть огромное число этих частиц, так как сенсор состоит из 12 миллионов пикселей, а артефакт из 10-100 пикселей. Для того, чтобы найти эти треки прибор обрабатывает изображение. На том приборе, на котором установлено 2 камеры планируем изучить пролет протонов через 2 сенсора. Они расположены на расстоянии 2 мм. Если частица оставит след сразу на двух сенсорах, то можно будет отследить ее направление, но для этого необходимо точно ориентировать сенсоры, и после сборки откалибровать по потоку протонов.

Общее количество артефактов говорит о радиационном фоне в этой точке орбиты. Это первый параметр, который измеряет наш прибор. Вторым параметром, который измеряет наш прибор, является направление прилета отдельных частиц. Мы хотим изучить, где больше всего частиц на полярной орбите и как они туда попадают. Если мы знаем направление прилета, то можно предполагать источник этих частиц, так как на полярную орбиту прилетают самые разные частицы. Они могут иметь разный источник.

Прибор МАДИЗ создается для того, чтобы отработать все алгоритмы и изучить взаимодействие радиационных частиц с матричными детекторами. Его планируется запустить в ноябре на кубсате 6U «Альтаир» на полярную орбиту. Прибор состоит из двух основных частей. Это детекторная часть, которая состоит из 2x Raspberry pi HQ camera, и вычислительная часть. Она состоит из Raspberry pi CM4. Эти части крепятся на спутник через алюминиевые пластины. Прибор имеет уменьшенную копию, она имеет меньший вес, меньшее потребление и одну камеру, но, как и основной прибор, будет измерять радиационный фон. Этот прибор планируется отправить на кубсате 3U в ноябре. Позже, когда алгоритм будет доработан будем пробовать его загрузить на летающие спутники.

# ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

И. Ю. Зобова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия

E-mail: zobovaiy@my.msu.ru

Солнечная активность (СА), представляющая собой явления, связанные с вариациями магнитных полей Солнца на различных масштабах [1], оказывает существенное влияние на многие процессы Земли. Максимумы и минимумы различных характеристик СА повторяются со средним периодом 11 лет, что связано с солнечной цикличностью – одной из важнейших проблем современной гелиофизики. Влияние солнечной цикличности распространяется на геофизические и климатические процессы, на жизнь человека и животных. Ее изучение имеет большое значение для космических программ, защиты электроники и приборов на космических аппаратах, а также для здоровья космонавтов. Поэтому прогнозирование параметров СА имеет практическую ценность на всех временных масштабах – от нескольких дней до десятилетий вперед.

Целью настоящей работы является изучение структуры временного ряда индексов солнечной активности, поиск закономерностей в этом ряде, а также прогнозирование формы и амплитуды 25-го и 26-го солнечных циклов. Для этого были рассмотрены данные Бельгийской королевской обсерватории [2] о среднемесячном числе солнечных пятен (Monthly mean total sunspot number, SSN) с февраля 1755 года по ноябрь 2019 года включительно, охватывающие 24 цикла солнечной активности. 25-й цикл находится в развитии с декабря 2019 года, что дает возможность сравнить прогноз с данными наблюдений. В работе использовался метод спектрального анализа, основанный на преобразовании временного ряда в многомерный ряд путем деления циклов на фазы, разложении многомерного ряда в обобщенные ряды Фурье-Уолша, одношаговой экстраполяции каждого временного ряда и обратной свертке. С учетом правила Гневьшева-Оля для прогноза 25-го цикла использовались значения SSN только для нечетных циклов, а для прогноза 26-го цикла – только для четных циклов.

Полученный прогноз для 25-го солнечного цикла указывает на достижение максимального значения  $174 \pm 15$  числом солнечных пятен, усредненным за 8.4 месяцев, в феврале 2025 года с погрешностью 5 месяцев. Прогноз коррелирует с данными наблюдений, усредненными за 8.4 месяцев, вплоть до сентября 2024 года с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0.95$ . По прогнозу в 26-м солнечном цикле максимальное значение числа солнечных пятен, усредненного за 7.3 месяца, составит  $180 \pm 14$  в августе 2035 года с погрешностью 9 месяцев.

1. Обридко В.Н., Наговицын Ю.А. Солнечная активность, цикличность и методы прогноза // СПб.: ВВМ. 466 С. 2017.
2. SILSO, World Data Center - Sunspot Number and Long-term Solar Observations, Royal Observatory of Belgium, online Sunspot Number catalogue: <http://www.sidc.be/>.

# МЕТОД ОЦЕНКИ ПЕРВИЧНОЙ ЭНЕРГИИ ШАЛ ТЕЛЕСКОПОМ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА УСТАНОВКИ СФЕРА-3

Т.А.Колодкин<sup>1,2</sup>, В. И. Галкин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: tka002@mail.ru

Оценка энергии производится с использованием полного интеграла ФПР черенковского света  $Q$ . Из моделирования получено, что при фиксированной энергии первичной частицы присутствует зависимость  $Q$  от расстояния  $R$  от оси ливня до центра телескопа. Оценка энергии производится путем получения  $Q^{exp}$  и  $R^{exp}$  для события и обратной интерполяции по зависимости  $Q=Q(E_0, R)$ , полученной из моделирования.

## ПРИМЕНЕНИЕ КФЭУ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АТМОСФЕРНОГО СВЕЧЕНИЯ В ПРОЕКТЕ СОНЭТ

В. Д. Кудрявцев<sup>1,2</sup>, А. А. Белов<sup>1,2</sup>, П. А. Климов<sup>2</sup>, А. С. Мурашов<sup>2</sup>, Р. Е. Сараев<sup>1,2</sup>,  
Д. В. Чернов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: kudryavtsev.phys@gmail.com

Полезная нагрузка СОНЭТ является перспективной разработкой научной аппаратуры спутникового базирования для регистрации пространственно-временной структуры УФ-излучения атмосферы Земли. Разработка ведется на основе опыта, полученного при проектировании и эксплуатации проборов АУРА (англ., AURA – atmospheric Ultraviolet RAdiation) на спутниках «ВДНХ-80», «ДЕКАРТ», «САТУРН».

В качестве элементов фотоприемной поверхности СОНЭТ выбраны кремниевые фотоэлектронные умножители (КФЭУ).

По сравнению с классическими ФЭУ можно отметить следующие достоинства КФЭУ: их компактные размеры, относительно низкое напряжение питания (десятки вольт), нечувствительность к магнитным полям, высокая механическая прочность. Однако при разработке высокочувствительных фотодетекторов необходимо учитывать следующие недостатки КФЭУ: высокую скорость темнового счета, относительно низкую радиационную стойкость, наличие эффекта насыщения, а также зависимость характеристик от температуры. Однако классические ФЭУ, тоже обладают рядом параметров, которые ограничивают их применение: высокое напряжение питания (до нескольких киловольт), ограниченный спектральный диапазон, большие размеры и хрупкость, а также некоторые сложности с доступностью высокотехнологичных компонентов. Поскольку разрабатываемый фотодетектор предназначен для спутниковых применений, критичным фактором является энергопотребление.

В работе представлен вариант схемы, предполагаемый для применения в проекте СОНЭТ. Работа схемы основана на накоплении заряда в собственной ёмкости КФЭУ и периодической передаче части накопленного заряда, через поочередное подключение буферных конденсаторов, на землю. Для измерения светового потока измеряется напряжение на выходе КФЭУ. После этого на основе измеренного напряжения вычисляется число фотоэлектронов, зарегистрированных за один такт измерения.

Для проверки работоспособности схемы была собрана экспериментальная установка. Она состоит из платы с КФЭУ (4 канала), системы регулирования температуры КФЭУ, генератора микросекундных импульсов, светодиода, платы управления на основе макетной платы с системой на кристалле и двух лабораторных источников питания. С использованием экспериментальной установки были измерены параметры фотоприемной поверхности.

С использованием экспериментальной платы было проведено исследование основных характеристик фотоприемной поверхности на основе КФЭУ, таких как общий уровень шума, скорость темнового счета, чувствительность, соотношение сигнал-шум, динамический диапазон, а также температурная зависимость характеристик КФЭУ. Также была разработана и протестирована система термоконтроля, основанная на элементе Пельтье.

С учетом полученных результатов была разработана электроника прибора СОНЭТ – полезная нагрузка, предназначенная для исследования тонкой пространственно-временной структуры свечения атмосферы Земли геофизической и космофизической природы.

1. Chernov, D.V., Azra, C., Bonvech, E.A. et al. SPHERE-3 Project for Studying the Composition of Primary Cosmic Rays in the Energy Range Between 1 and 1000 PeV. *Phys. Atom. Nuclei* 85, 641–652 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1063778822060059>
2. Cummings A., Eser J., Filippatos G., Olinto A., Venters T., Wiencke L. EUSO-SPB2: A balloon experiment for UHECR and VHE neutrino observation. // *EPJ Web of Conferences*. 283. 06009. (2023).
3. Trofimov Daniil, Belov Alexander, Blin-Bondil Sylvie, Creusot Alexandre, Klimov Pavel, Parizot Etienne, Prévôt Guillaume (2023). Absolute calibration of the JEM-EUSO photodetection modules. *EPJ Web of Conferences*. 283. 06016. [10.1051/epjconf/202328306016](https://doi.org/10.1051/epjconf/202328306016).
4. P. Eckert et al., «Characterisation studies of silicon photomultipliers», *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 620, 217–226 (2010).
5. Panasyuk et al. *Progress in Earth and Planetary Science* (2019) <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0280-3>
6. Sadovnichy V.A., Panasyuk M.I., Bobrovnikov S.Y., Vedenkin N.N., Vlasova N.A., Garipov G.K., Grigorian O.R., Ivanova T.A., Kalegaev V.V., Klimov P.A., Kovtyukh A.S., Krasotkin S.A., Kuznetsov N.V., Kuznetsov S.N., Muravyeva E.A., Myagkova I.N. et al. // *Cosm. Res.* 2007. V. 45. P. 273. <https://doi.org/10.1134/S0010952507040016>
7. Sadovnichy V.A., Panasyuk M.I., Yashin I.V., Barinova V.O., Veden'kin N.N., Vlasova N.A., Garipov G.K., Grigoryan O.R., Ivanova T.A., Kalegaev V.V., Klimov P.A., Kovtyukh A.S., Krasotkin S.A., Kuznetsov N.V., Kuznetsov S.N., Muravyeva E.A. et al. // *Sol. Syst. Res.* 2011. V. 45. P. 3. <https://doi.org/10.1134/S0038094611010096>
8. Klimov P.A., Zotov M.Y., Chirskaya N.P. et al. Preliminary results from the TUS ultra-high energy cosmic ray orbital telescope: Registration of low-energy particles passing through the photodetector. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 81, 407–409 (2017). <https://doi.org/10.3103/S1062873817040256>
9. Panasyuk M.I., Svertilov S.I., Bogomolov V.V. et al. Experiment on the Vernov satellite: Transient energetic processes in the Earth's atmosphere and magnetosphere. Part II. First results. *Cosmic Res* 54, 343–350 (2016). <https://doi.org/10.1134/S0010952516050051>
10. Garipov G.K., Khrenov B.A., Klimov P.A., Klimenko V.V., Mareev E.A., Martines O., Mendoza E., Morozenko V.S., Panasyuk M.I., Park I.H., Ponce E., Rivera L., Salazar H., Tulupov V.I., Vedenkin N.N., Yashin I.V. // *J. Geophys. Res. (Atmos.)*. 2013. V. 118. P. 370. <https://doi.org/10.1029/2012JD017501>
11. Г. К. Гарипов, М. И. Панасюк, С. И. Свертилов, В. В. Богомолов, В. О. Баринова, К. Ю. Салеев. Обнаружение глобальных явлений техногенного ультрафиолетового и инфракрасного свечений ночной атмосферы на спутнике Вернов. *ЖЭТФ*, 123(2), 2016
12. Е. В. Глинкин, П. А. Климов, А. С. Мурашов, and Д. В. Чернов. Детектор излучения атмосферы АУРА на основе кремниевых фотоумножителей для малых космических аппаратов типа кубсат. *Приборы и техника эксперимента*, 2:121–127, 2021. <http://dx.doi.org/10.31857/S0032816221020038>
13. Chernov D.V., Glinkin E.V., Klimov P.A., Murashov A.S. First results of UV radiation measurements made by AURA detector onboard VDNH-80 cubesat. *Advances in the Astronautical sciences*, том 173, с. 529-536 (2020).
14. Klimov. P.A. The UV Atmosphere (MINI-EUSO) Experiment: A Wide-Field-of-View Lens Telescope on Board the ISS. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 85, 389–391 (2021). <https://doi.org/10.3103/S1062873821040171>

# ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ФИЗИКИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА НА УСТАНОВКЕ TUNKA-GRANDE: СТАТУС

С. Д. Малахов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Иркутский государственный университет,  
Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутск, Россия*

E-mail: [malakhov.sd@yandex.ru](mailto:malakhov.sd@yandex.ru)

Исследования грозовых явлений ведутся уже несколько столетий, но до сих пор остаются неразрешенные фундаментальные вопросы, один из которых состоит в возникновении и распространении грозового разряда. Пробивное напряжение слоя воздуха на высотах образования облаков  $\sim 30$  кВ/см, в то время как на практике разряды наблюдаются при напряжённости электрического поля  $\sim 3$  кВ/см [1]. Причиной появления и объяснением механизма развития молний могут служить широкие атмосферные ливни (ШАЛ), инициируемые высокоэнергетическими ( $> 10^{14}$  эВ) космическими лучами (КЛ) [2]. При этом, само грозовое облако, вероятно, играет роль активной среды, модифицирующей процессы распространения ШАЛ.

Установка Tunka-Grande работает с 2016 года, представляет собой сеть из 19 сцинтилляционных станций и является частью астрофизического комплекса TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy) [3,4]. Станции равномерно распределены на площади  $\sim 0,5$  км<sup>2</sup> и предназначены для регистрации заряженной компоненты ШАЛ в диапазоне энергий КЛ  $10^{16} - 10^{18}$  эВ. До 2024 г основная часть наблюдений проводилась с октября по апрель - в периоды низкой грозовой активности. Летом 2024 года с целью изучения взаимосвязи физики КЛ и атмосферного электричества модернизирована программно-аппаратная часть установки и начаты работы по обеспечению грозозащиты станций, что позволит, во-первых, детектировать не только ШАЛ, но и поток высокоэнергетичных одиночных атмосферных частиц (электронов и мюонов), во-вторых, измерять напряженность приземного электрического поля, в-третьих, вести наблюдения круглогодично.

С августа по октябрь проводились тестовые измерения потока одиночных атмосферных частиц. На рис.1 представлена гистограмма темпа счёта (количество зарегистрированных событий за единицу времени) одной станции за указанный период, аппроксимированная функцией Гаусса (1). Важно отметить, что во время набора экспериментальных данных грозовых явлений в непосредственной близости от установки не наблюдалось.

$$f(x) = C * \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

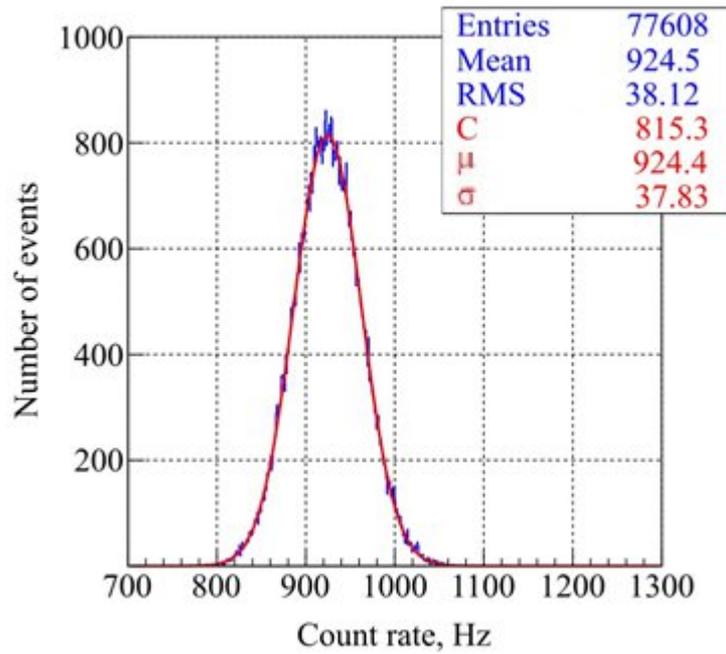


Рис.1. Гистограмма темпа счёта (синий) одной станции установки Tunka-Grande, аппроксимация функцией Гаусса (красный)

1. В.И. Ермаков, Ю.И. Стожков. Физика грозových облаков // Препринт / Физический ин-т им. П.Н. Лебедева (Москва); 2(2004)
2. В.И. Ермаков, Ю.И. Стожков/ роль космических лучей в образовании молний // Краткие сообщения по физике ФИАН, №9 2003
3. Р.Д. Монхоев Сцинтиляционная установка Tunka-Grande: статус, результаты и планы // Письма в ЭЧАЯ, том. 20, № 5. 1117–1136, 2023  
DOI: 10.1134/S1547477123050552
4. N. Budnev et al. TAIGA - A hybrid array for high energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics, Nucl. Instrum. Meth. A, Vol. 1039, P. 167047, 2022  
DOI: 10.1016/j.nima.2022.167047

# ДИНАМИКА ВЫСОКОШИРОТНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 27.02.2023 ПО ДАННЫМ ПОЛЯРНЫХ СПУТНИКОВ

Манина А.С.<sup>1,2</sup>, Калегаев В.В.<sup>1,2</sup>, Николаева В.Д.<sup>2</sup>, Сараев Р.Е.<sup>1,2</sup>, Иванова А.Р.<sup>1,2</sup>,  
Власова Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: [alinmanina73@yandex.ru](mailto:alinmanina73@yandex.ru)

Магнитосфера Земли - это динамичная и непрерывно изменяющаяся система, форма которой меняется под влиянием межпланетной среды: солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Изменения параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля приводят к геомагнитным возмущениям, в результате которых изменяются структура силовых линий магнитного поля и динамика потоков заряженных частиц. Наиболее яркие проявления можно наблюдать в высокоширотной магнитосфере. Инструментом для изучения топологии магнитного поля могут служить потоки заряженных частиц.

24 и 25 февраля 2023 г. в одной из активных областей на Солнце произошли солнечные вспышки, сопровождавшиеся мощными корональными выбросами массы. В околоземном пространстве были зарегистрированы два солнечных протонных события (СПС). Корональный выброс массы от 24.02 пришел в околоземное пространство 26.02, предшествующая ему ударная волна была зарегистрирована в  $\sim 18$  UT. В магнитосфере произошла сильная магнитная буря с  $|Dst|_{\max} \sim 140$  нТл.

Одновременное присутствие разных популяций заряженных частиц (солнечных энергичных частиц, энергичных электронов внешнего радиационного пояса и авроральных частиц, высыпающихся в области аврорального овала) создают уникальную возможность для исследования структуры и динамики высокоширотной магнитосферы во время магнитной бури. Представлены результаты исследования во время магнитной бури 27.02.2023 г. динамики высокоширотных границ основных магнитосферных структур: области проникновения солнечных протонов с энергиями  $3 \div 10$  МэВ; области высыпаний авроральных электронов и ионов с энергиями  $\sim 30$  эВ  $\div$   $30$  кэВ; положений границ захвата и максимальных потоков электронов с энергиями  $>300$  кэВ и  $>700$  кэВ внешнего радиационного пояса Земли. Работа выполнена на основе экспериментальных данных по потокам заряженных частиц, полученных на низкоорбитальных полярных спутниках Метеор-М2 и DMSP в вечернем и утреннем секторах по местному времени.

Получено, что во время главной фазы магнитной бури границы всех магнитосферных структур смещаются на более низкие широты, при этом наблюдается сильная утрете-вечерняя асимметрия. Более сильное смещение границ в вечернем секторе по сравнению с утренними часами, связано с развитием асимметричного кольцевого тока на главной фазе бури. На фазе восстановления магнитной бури положение максимумов потоков электронов внешнего радиационного пояса смещается на более низкие широты, а граница захвата электронов внешнего радиационных поясов – на более высокие широты.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Ядерная и радиационная физика»).

# СПЕКТР ДИФФУЗНОГО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКОГО ДИСКА В ОБЛАСТИ ОЧЕНЬ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

В. А. Наумов, Т. А. Джатдоев

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: naumov.va20@physics.msu.ru

Протоны и ядра галактических космических лучей при распространении в объеме Галактики образуют гамма-кванты в результате ядро-ядерных взаимодействий с газом галактического диска [1-5]. Гистограмма распределения направлений прихода гамма квантов высоких энергий ( $E > 100$  MeV) от галактических источников по галактической широте  $b$  имеет пик при  $b = 0$  [6–12]. Традиционно выделяют гамма-излучение точечных (point-like; угловой радиус источника  $\ll$  характерной ширины функции рассеяния точки наблюдающего инструмента) и протяженных (extended; как правило, в этом случае угловой радиус источника  $<$  нескольких градусов) источников, а также диффузное (diffuse) гамма-излучение. Точечные и протяженные источники можно объединить термином “дискретные” (“discrete”) источники.

Сравнительно недавно было объявлено об открытии диффузного гамма-излучения сверхвысоких энергий ( $E > 100$  TeV) от галактического диска в эксперименте Tibet-AS $\gamma$  [13]. Измеренный поток “диффузного” гамма-излучения содержит примесь гамма-квантов от неразрешенных дискретных источников; выделение вклада этих неразрешенных дискретных источников в измеренный поток гамма-излучения затруднительно по ряду причин и не было проведено методически корректно в течение трех лет после опубликования результата [13]. Спектр “диффузного” гамма-излучения (с некоторой примесью гамма-квантов от неразрешенных дискретных источников) был также измерен в эксперименте LHAASO [14]; кроме того, в эксперименте LHAASO был построен каталог источников гамма квантов очень высоких (от 100 GeV до 100 TeV) и сверхвысоких энергий [15].

Использование информации из указанного каталога облегчает выделение вклада гамма-квантов от неразрешенных дискретных источников в измеренный поток гамма-излучения. Авторы работы [16] показывают, что вклад неразрешенных дискретных источников лептонной природы в поток гамма-квантов, измеренный в эксперименте LHAASO, составляет не более 60% при энергии 10 TeV и не более 20 % при энергии 100 TeV. Тем самым, становится возможной оценка интенсивности гамма-квантов сверхвысоких энергий от ядро-ядерного взаимодействия протонов галактических космических лучей, основанная на данных измерений, проведенных в эксперименте LHAASO, и сравнение полученных спектров с результатами моделирования.

Мы провели модельные расчеты спектра диффузных гамма-квантов в рамках различных моделей состава первичных космических лучей (ПКЛ) в области излома спектра всех ядер (“колена”). На рисунке 1 Предварительные расчеты показывают, что некоторые модели “колена” (например, [17]) в настоящее время уже могут быть исключены. В частности, для расчетов можно использовать общую схему, представленную в Sect. II [18]; парциальные спектры протонов и ядер ПКЛ согласно различным моделям и/или результатам различных экспериментов по наблюдению широких атмосферных ливней (ШАЛ) (в нескольких вариантах); модель концентрации газа в галактическом диске согласно Sect. IV [18]; модели полного (неупругого) и дифференциального сечения взаимодействия протонов [19], а также модель галактического фотонного поля [20]. Полученные результаты стали бы

первыми методически корректными ограничениями на параметры “колена” по данным гамма-астрономических наблюдений.

1. S. Hayakawa, *Prog. Theor. Phys.*, 8, 571 (1952)
2. V.L. Ginzburg & S.I. Syrovatskii, *The Origin of Cosmic Rays* (1963)
3. J.B. Pollack & G.G. Fazio, *Phys. Rev.*, 131, 2684 (1963)
4. V.L. Ginzburg & S.I. Syrovatskii, *Sov. Phys. Uspekhi*, 7, 696 (1965)
5. F.W. Stecker, *Astrophysics and Space Science*, 6, 377 (1970)
6. G.W. Clark et al., *ApJ*, 153, L203 (1968)
7. W.L. Kraushaar et al., *ApJ*, 177, 341 (1972)
8. C.E. Fichtel et al., *ApJ*, 198, 163 (1975)
9. H.A. Mayer-Hasselwander et al., *A&A*, 105, 164 (1982)
10. S.D. Hunter et al., *ApJ*, 481, 205 (1997)
11. M. Ackermann et al., *ApJ*, 750, 3 (2012)
12. F. Acero et al., *ApJ Suppl.*, 223, 26 (2016)
13. M. Amenomori et al., *Phys. Rev. Lett.*, 126, 141101 (2021)
14. Z. Cao et al., *Phys. Rev. Lett.*, 131, 151001 (2023)
15. Z. Cao et al., *ApJ Suppl.*, 271, 25 (2024)
16. S. Kaci et al., *astro-ph/2407.20186* (2024)
17. H.-B. Hu et al., *ApJ Lett.*, 700, L170 (2009)
18. P. Lipari & S. Vernetto, *Phys. Rev. D*, 98, 043003 (2018)
19. S.R. Kelner et al., *Phys. Rev. D*, 74, 034018 (2006)
20. S. Vernetto & P. Lipari, *Phys. Rev. D*, 94, 063009 (2016)

# ОЦЕНКА МАССЫ ПЕРВИЧНОЙ ЧАСТИЦЫ ШИРОКОГО АТМОСФЕРНОГО ЛИВНЯ ПО УГЛОВОМУ РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА УСТАНОВКОЙ СФЕРА-3

Н. О. Овчаренко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: ovcharenko.no19@physics.msu.ru

В разрабатываемой установке СФЕРА-3 [1] будет происходить регистрация прямого черенковского света от широких атмосферных ливней наряду с отражённым от снега. Мы исследуем возможности регистрации прямого света для оценки массы первичного ядра ШАЛ. Разделение по массам происходит на основе различий формы углового распределения черенковского света. В качестве численного параметра для разделения используется длина большой оси распределения. При этом критерий отличается для различных положений детектора относительно оси ливня [2]. Это даёт возможность построить сетку более точных локальных критериев в зависимости от расстояния до оси и азимутального положения установки, которое можно вычислить по ориентации пятна в поле зрения детектора.

1. E. A. Bonvecch, C. J. Azra, D. V. Chernov et al. Design of the Simulation Scheme for SPHERE-3 Telescope for the 1015–1018 eV Primary Cosmic Ray Studies Using Direct and Reflected Cherenkov Light from the Extensive Air Showers //Physics of Atomic Nuclei, 2023, Vol. 86, No. 6, pp. 1048–1055.
2. Н. О. Овчаренко, В. И. Галкин. Анализ угловых распределений прямого черенковского света детектором установки СФЕРА-3 // Ученые записки Физического факультета МГУ, 2024, выпуск 3, № 3. 2431604.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТИ ТЕЛЕСКОПОВ SIT

А. В. Пантюхин<sup>1</sup>, Д. А. Подгрудков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва, Россия

E-mail: [pantiukhin.av19@physics.msu.ru](mailto:pantiukhin.av19@physics.msu.ru)

Одна из самых главных задач при анализе широких атмосферных ливней – это определить их первичные характеристики, такие как: тип первичной частицы, ее энергию, угол прихода и т.д.

С целью того, чтобы проверить, способна ли сеть широкоугольных телескопов SIT определять эти характеристики или различать ливни между собой предлагается построить реальную модель детектора и на основе собранной статистики найти критерий разделения ливней по типу первичной частицы для широкоугольного детектора с грубым пикселем. Ранее такое моделирование не проводилось.

Была начата работа по построению модели отклика сети телескопов SIT на широкие атмосферные ливни. Для сбора статистики был модифицирован программный комплекс CORSIKA. В него была заложена схема станций и изменена система координат. Собранная статистика была в дальнейшем обработана для перехода к модели детектора с маленькой площадью и большим пикселем. Для поиска критерия разделения ливней было предложено несколько метрик, которые проверяются на полученной статистике. Также проводится проверка, что при восстановлении параметров ливня и изменении модели детектора, параметры определяются правильно и без большой ошибки.

# ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА СМЕНЫ РЕЖИМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

А. И. Перятинская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия

E-mail: szsalexvay@gmail.com

В современных работах существует две основных гипотезы о возникновении анизотропии космических лучей. В первой гипотезе анизотропия объясняется влиянием близких источников, таких как пульсары или остатки сверхновых [1-4]. Вторая гипотеза - это влияние местного магнитного межзвездного поля, которое может отклонять частицы так, что диффузия космических лучей становится анизотропной [5-8]. Анализ распространения частиц, используемый в работах, является усреднением транспорта по пространству, то есть описанием его глобальных свойств. Однако при таком макроскопическом подходе не учитываются локальные особенности поля в точке наблюдения.

Для того, чтобы учесть влияние особенностей магнитного поля в данной работе используется микроскопический подход. Он заключается в определении зоны перехода одномерной диффузии вдоль магнитной линии в классическую анизотропную диффузию. В этой части пространства рассматривается взаимный транспорт магнитных линий и частиц с энергиями, при которых происходит смена фаз анизотропии.

Для определения минимальных масштабов, в котором режим движения частиц диффузионный, уточняются численные характеристики транспорта магнитных линий поля. Эти характеристики являются асимптотикой для диффузионного коэффициента частиц низких энергий. Метод расчета основан на численном моделировании линий турбулентного магнитного поля и расчету численных характеристик его транспорта.

1. P. Blasi and E. Amato. Diffusive propagation of cosmic rays from supernova remnants in the galaxy. ii: Anisotropy. *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 2012:011, 2012.
2. A. Erlykin and A. Wolfendale. The anisotropy of galactic cosmic rays as a product of stochastic supernova explosions. *Astropart. Phys.*, 25:183–194, 2006.
3. W. Liu, X.-J. Bi, S.-J. Lin, B.-B. Wang, and P.-F. Yin. Excesses of cosmic ray spectra from a single nearby source. *Phys. Rev. D*, 96(2):023006, 2017.
4. L. Sveshnikova, O. Strelnikova, and V. Ptuskin. Spectrum and anisotropy of cosmic rays at tev–pev energies and contribution of nearby sources. *Astropart. Phys.*, 50-52:33–46, 2013.
5. Carmelo Evoli, Daniele Gaggero, Dario Grasso, and Luca Maccione. Common solution to the cosmic ray anisotropy and gradient problems. *Physical Review Letters*, 108:211102, 2012.
6. Yi-Qing Guo, Zhi Tian, and Cheng Liu. Spatial-dependent propagation of cosmic rays results in the spectrum of proton, ratios of p/p, and b/c, and anisotropy of nuclei. *Astrophysical Journal*, 819:54, 2016.
7. Aifeng Li, Qiang Yuan, Wei Liu, and Yi-Qing Guo. A scenario for the anisotropy of galactic cosmic rays related to nearby source and local interstellar magnetic field. *arXiv*, 2021.
8. Aifeng Li, Qiang Yuan, Wei Liu, and Yi-Qing Guo. A scenario for the anisotropy of galactic cosmic rays related to nearby source and local interstellar magnetic field. *arXiv*, 2021.

# РАДИАЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

А.М. Садыков<sup>1,2</sup>, С.А. Красоткин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кафедра физики космоса, Физический факультет, МГУ, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: sadykov.am19@physics.msu.ru

В настоящее время одним из наиболее распространенных теоретических подходов к пониманию процессов формирования активных областей является гипотеза Паркера о всплывании магнитных трубок [1]. Эта гипотеза имеет ряд недостатков, но, несмотря на это, она широко используется в теоретических работах для описания эволюции активных областей [2]. В связи с этим возникает необходимость в проверке корректности этой гипотезы на основе прямых магнитометрических и доплерометрических наблюдений.

Целью нашей работы является проверка гипотезы всплывания магнитной трубки на основании рассмотрения потоков радиальной скорости подъема и опускания на ранних этапах эволюции активной области (АО) на фотосфере Солнца. Для этого были рассмотрены данные глобальной сети телескопов GONG (Global Oscillations Network Group). Для работы отобраны 24 АО (2011–2022 гг.), удовлетворяющие критериям. Для каждой АО данные рассматриваются с временным шагом в 4 часа на протяжении 6 дней, вплоть до сближения пятен с западным лимбом.

Полученные результаты показывают, что существует статистически значимая корреляция между магнитным полем и отрицательным потоком скорости вещества. При этом корреляция для потока положительной скорости слабо выражена. Эти результаты показывают, что не существует всплывающих магнитных потоков, используемых в гипотезе. Эти результаты указывают, что в зарождающихся активных областях при увеличении магнитного потока усиливается поток отрицательной скорости, причем эта зависимость близка к линейной.

1. E.N. Parker. The Formation of Sunspots from the Solar Toroidal Field // *Astrophys. J.*, 1955, 121, p. 491
2. В.Н. Ишков. Всплывающие магнитные потоки - ключ к прогнозу больших солнечных вспышек // *Изв. РАН, серия физ.* 1998, т. 62, №9, с. 1835-1839

# МУЛЬТИМОДАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ HORIZONT-T

М.А. Самойлов, А.М. Анохина

*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия*

E-mail: samoilov.ma19@physics.msu.ru

Экспериментальная установка Horizont-T [1] расположена на Тянь-Шаньской станции ФИАН и состоит из 13 регистрирующих пунктов, представляющих собой сцинтилляционные детекторы, позволяющие фиксировать частицы от ШАЛ (рис.1). Детекторная система расположена на высотах  $\sim 3300-3700$  метров над уровнем моря.

Большая площадь покрытия установки ( $\sim 2$  км<sup>2</sup>) обеспечивает возможность определения направления прихода ливней, и, в связи с этим, изначальной целью эксперимента Horizont-T было изучение именно сильно наклонных ливней.

В процессе работы были обнаружены ливневые события, представляющие собой многопиковые сигналы (временные развертки) в детекторах (рис. 2) – мультимодальные события (ММЕ) [2]. В качестве гипотезы, объясняющей такие события, было предположено, что ММЕ могут быть результатом образования некоторого кваркового объекта при аннигиляции темной материи [2].

Была поставлена задача продемонстрировать возможность ММЕ без привлечения экзотических частиц и процессов, на основе данных моделирования с помощью кода Corsika с привлечением общеупотребительной модели ядерного взаимодействия (например, QGSJET). Было предположено, что во временные ворота детектора попадают несколько частиц, разнесенных во времени. Это объясняет возникновение сигналов, при которых высвечивание сцинтиллятора от одной частицы уже заметно затухло, и следующая частица вызывает новый пик. Данная гипотеза была успешно подтверждена при моделировании.



Рис. 1. Установка Горизонт-T: 13 пунктов регистрации, высота над уровнем моря – 3350 м.

При моделировании учитывалось, что размер сцинтиллятора в каждом пункте – 1x1 метр, толщина – 5 см. Так же существует калибровочная система, представляющая собой два сцинтиллятора, диаметром 10 см и толщиной 5 см, расположенные сверху и снизу от основного сцинтилляционного блока, на расстоянии  $\sim 30$  см от центра детектора. Такое расположение сцинтилляторов позволяет осуществить схему совпадений и получать отклик от частиц, прошедших практически под прямым углом через детектор. Это позволит определить одночастичный спектр энерговыделений.

В результате моделирования с использованием программных комплексов

Corsika [3] и Geant4 [4], были получены временные развертки сигналов для ливней с энергиями  $10^{16} - 10^{18}$  эВ с различными углами наклона.

На рис.3 приведены примеры смоделированных откликов в нескольких детекторных пунктах при развитии одного из ливней, представляющие собой ММЕ, подобные экспериментальным. Следовательно, предварительно можно утверждать, что в результате моделирования без привлечения экзотических моделей ядерного взаимодействия была подтверждена гипотеза об объяснении ММЕ, как событий с регистрацией нескольких частиц в одних временных воротах детектора.

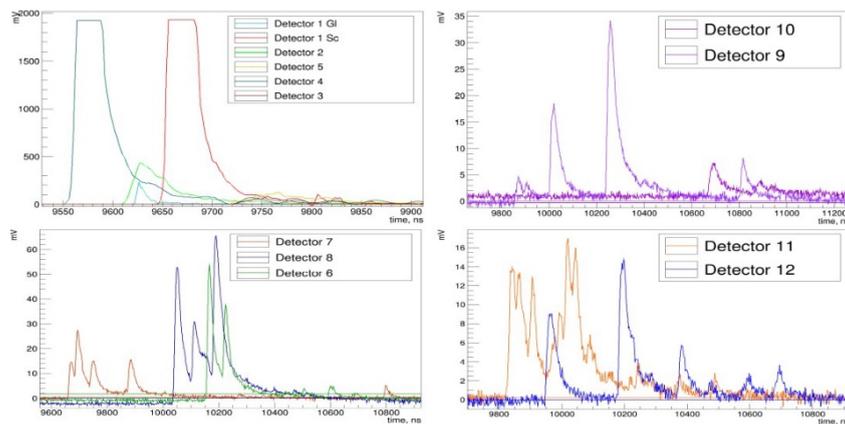


Рис. 2. Мультимодальные события, зарегистрированные на установке Горизонт-Т.

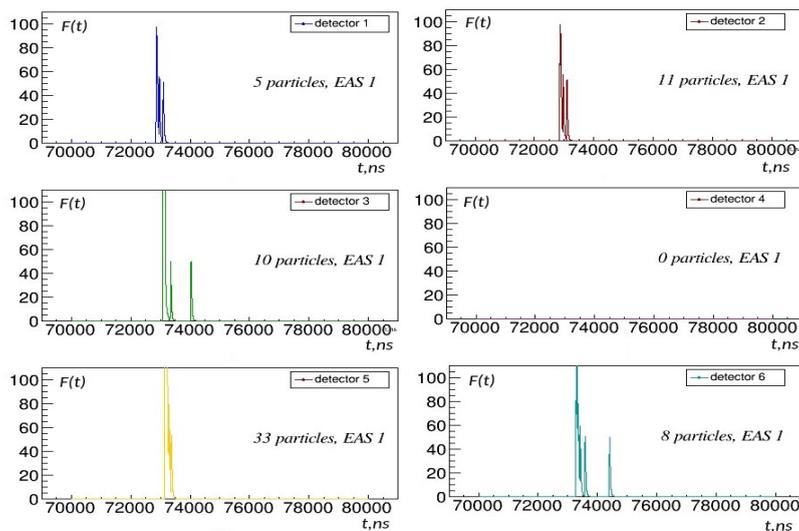


Рис. 3. Мультимодальные события, полученные с помощью кода Corsika.

1. The "Horizon-T" Experiment: Extensive Air Showers Detection. R.U. Beisembaev, E.A. Beisembaeva, O.D. Dalkarov, V.A. Ryabov, A.V. Stepanov, N.G. Vildanov, M.I. Vildanova, V.V. Zhukov, K.A. Baigarin, D. Beznosko, T.X. Sadykov, N.S. Suleymenov. arXiv:physics.ins-det/1605.05179
2. Probing Fundamental Physics With Multi-Modal Cosmic Ray Events. D.Beznosko, K.Baigarin, R.Beisembaev, E.Beisembaeva, E.Gladysz-Dziadu, V.Ryabov, T.Sadykov, S.Shaulov, V.Siltsev, A.Stepanov, M.Vildanova, A.Zhitnitsky, V.Zhukov. arXiv:2204.04045v4
3. Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide. D. Heck and T. Pierog.
4. GEANT4, <https://geant4.web.cern.ch/>

# ГАММА-КВАНТЫ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ОТ ТРОЯНЦЕВ НЕПТУНА

Семенов А. А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия*

E-mail: semenov.aa19@physics.msu.ru

Цель данной работы — анализ гамма-излучения от Троянцев Нептуна.

В своей работе я поставил верхние пределы на спектральное распределение энергии ( $SED = E^2 dN/dE$ ) от Троянцев Нептуна (Рисунок 1.) .

Троянцы Нептуна представляют собой группу астероидов на расстоянии 30 а.е. от Солнца. Оптический цвет Троянцев в основном более синий, чем медианные значения для астероидов из пояса Койпера. Они движутся по орбите Нептуна в области точек Лагранжа 4, 5.

Имеют угловой радиус 15 градусов [1] и занимают область пространства похожую на диск[2]. Троянские астероиды Нептуна можно представить как группу камней, образовавшихся если бы Нептун размолотил на небольшие осколки, при этом масса остается такой же, а эффективная площадь увеличивается, поэтому поток высокоэнергетических гамма-квантов от Троянцев будет выше, чем от Нептуна.

Гамма-кванты от Троянцев Нептуна будут рождаться в результате р-р взаимодействий. В объектах с размером меньше 1 метра каскад, образованный взаимодействием КЛ(Космических лучей) с веществом астероида, не затухнет полностью. Образование гамма-квантов на объектах с размерами меньше 1 метра сродни взаимодействию КЛ с одним ядром, где величина образовавшегося потока гамма-квантов линейно возрастает от количества провзаимодействовавших ядер. В таком случае спектр гамма-квантов будет жестче, чем в случае взаимодействия КЛ с единичным <<широким>> объектом. Полный спектр от альbedo гамма-квантов с энергией  $< 1$  ГэВ от Троянцев будет зависеть от плотности расположения астероидов.

Спектр гамма-излучения Троянцев чувствителен к распределению Троянцев по радиусу. Поставленные верхние пределы на спектральное распределение энергий от Троянцев Нептуна позволяет оценить их общую массу.

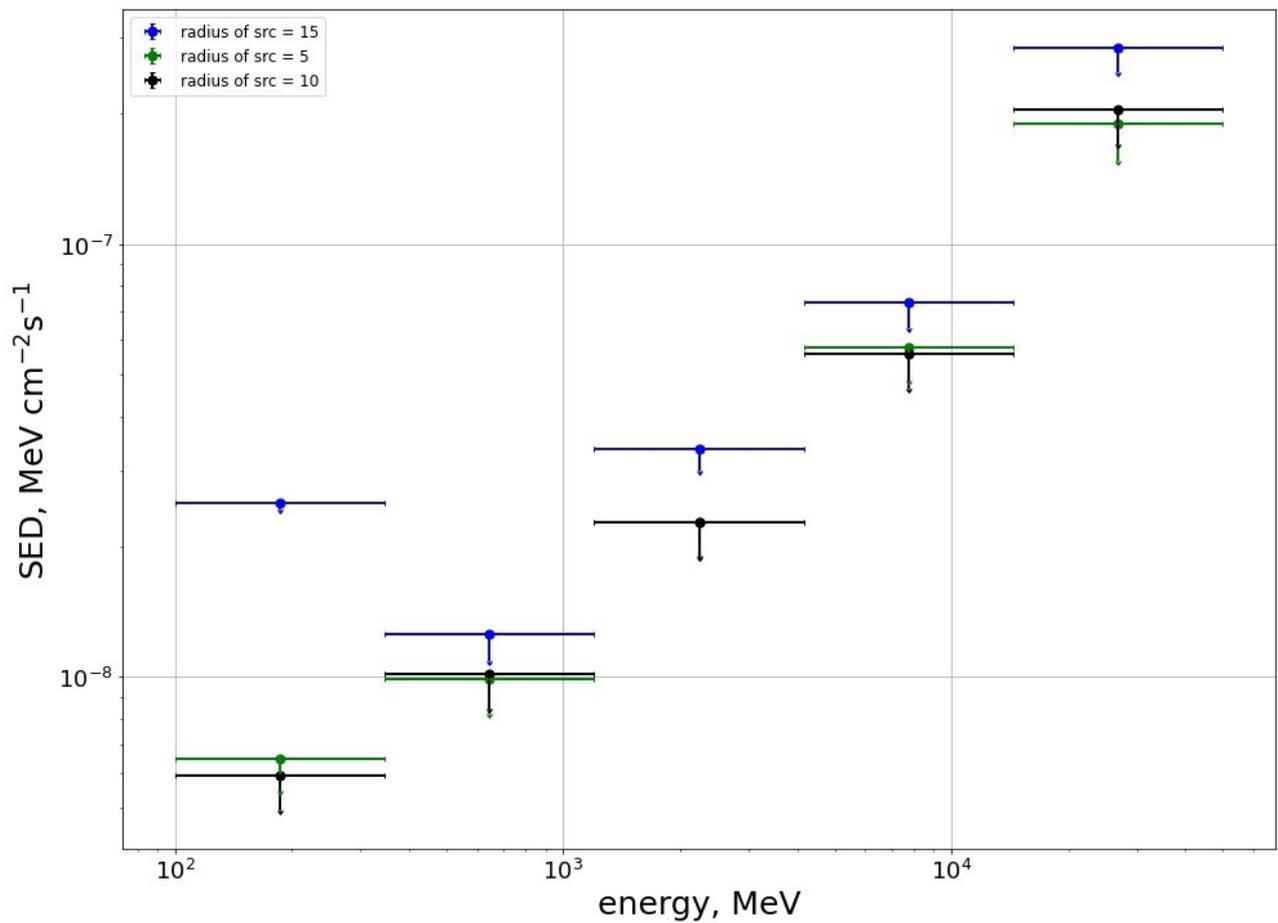


Рисунок 1.

1. Lin H. W., Chen Y.-T., Volk K., Gladman B., Murray-Clay R., Alexandersen M., Bannister M. T., Lawler S. M., Ip W.-H., Lykawka P.S., Kavelaars J., Gwyn S. D., and Petit J.-M. OSSOS: The eccentricity and inclination distributions of the stable neptunian Trojans // *Icarus*. — 2021. — June. — Vol. 361. — P. 114391. — Access mode: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114391>.
2. Huybers P. Early Pleistocene Glacial Cycles and the Integrated Summer Insolation Forcing // *Science*. — 2006. — July. — Vol. 313, no. 5786. — P. 508–511. — Access mode: <https://doi.org/10.1126/science.1125249>.

# ОЦЕНКА ОЦЕНКА ВЫСОТ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО АВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ СТЕРЕОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

К.Ф. Сигаева<sup>1,2</sup>, П.А. Климов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: sigaeva.kf15@physics.msu.ru

С сентября 2023 года на базе обсерваторий Ловозеро и Верхнетуломская Полярного геофизического института был заработал новый оптический комплекс, состоящий из двух высокочувствительных изображающих фотометров, направленных в одну область атмосферы. Такая конфигурация эксперимента позволяет проводить стереометрические наблюдения атмосферного свечения на высотах от 40 до 180 км (расстояние между обсерваториями около 150 км). Оба прибора оснащены оптической системой, позволяющей измерять атмосферное свечение в ближнем ультрафиолете с помощью многоанодной матрицы фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Высокое временное разрешение позволяет изучать тонкую структуру полярных сияний.

В данном докладе будут представлены результаты исследования высоты наблюдаемых пульсирующих структур полярных сияний, зарегистрированных за сезон 2023/2024. В данной работе оценка высоты высвечивания ППС основана на определении пространственной области с максимумом коэффициента корреляции скалограмм сигнала двух фотометров. Оценка высоты полярных сияний позволяет приблизительно оценить энергию частиц, вызвавших его. Также в докладе будет представлен результат анализа зависимости высоты полярных сияний от геомагнитной обстановки.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (проект № 22-62-00010).

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ МНОГОЦЕЛЕВОГО ДЕТЕКТОРА МЮОНОВ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЗЕНИТНЫХ УГЛОВ

П. И. Сушкова, И. Ю. Трошин, Е. А. Задеба

Национальный исследовательский ядерный университет «Московский инженерно-физический институт», Москва, Россия

E-mail: polina.sushkova.02@list.ru

В настоящее время в НИЯУ МИФИ разрабатывается Многоцелевой Детектор Мюонов (МДМ) [1] для изучения мюонной компоненты широких атмосферных ливней (ШАЛ) в диапазоне энергий от  $10^{14}$  до  $10^{17}$  эВ. Детектор представляет собой массив многопроводочных дрейфовых камер [2], экранированных слоями стального поглотителя. В каждом слое два уровня дрейфовых камер, ориентированных перпендикулярно друг к другу, которые позволяют регистрировать треки частиц в трехмерном пространстве. Основная цель – это анализ мюонной компоненты ШАЛ в диапазоне зенитных углов от  $0^\circ$  до  $60^\circ$  с использованием метода спектров локальной плотности мюонов (СЛПМ) [3].

Для определения эффективной площади детектора написана программа, моделирующая прохождение частиц через плоскости МДМ. В модель заложена геометрия детектора и взаимное расположение дрейфовых камер и стальных поглотителей. В программе вычислялась эффективная площадь с применением метода Монте-Карло. По данным моделирования получен график зависимости эффективной площади МДМ для диапазона зенитных углов от  $0^\circ$  до  $80^\circ$  (рис. 1.).

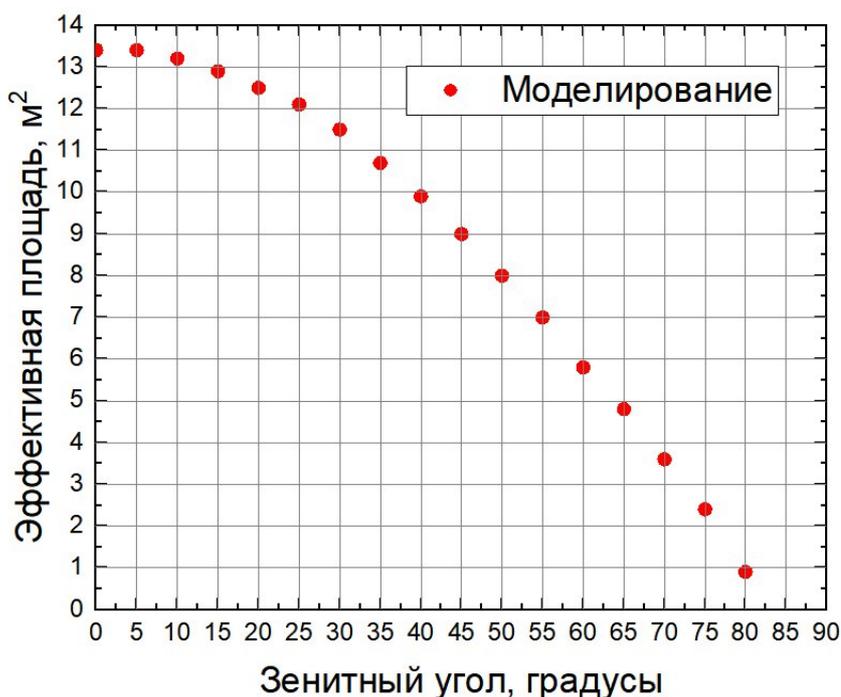


Рис. 1. Зависимость эффективной площади регистрации МДМ от зенитного угла, полученная с помощью численного моделирования.

В работе представлены расчёты по определению эффективной площади МДМ в зависимости от зенитных углов прихода частиц. Полученные значения эффективной площади в дальнейшем будут использованы при расчёте энергий первичных частиц с помощью метода СЛПМ.

1. Troshin I. Yu. Multifunctional Detector of Muons for Investigations of the Vertical Muon Flux of Extensive Air Showers at High Energies // Book of Abstracts. – M: Moscow International School of Physics, 2024. – P. 7-8.
2. V. S. Vorobev, E. P. Khomchuk, R. V. Nikolaenko et al. New coordinate-tracking detector on drift chambers for registration of muons in near-vertical EAS // Proceeding of science. – Berlin: 2021. – P. 401-409.
3. А. Г. Богданов, Д. М. Громушкин, Р. П. Кокоулин и др. Исследование характеристик потока и взаимодействия космических лучей сверхвысоких энергий с помощью метода спектров локальной плотности мюонов // Ядерная физика. – М: 2010. – Т. 73, № 11. – С. 1904-1920.

# ВОДНЫЕ ЧЕРЕНКОВСКИЕ ДЕТЕКТОРЫ В СОСТАВЕ TAIGA-100: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

М. Ю. Терновой<sup>1</sup>, коллаборация TAIGA

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет,  
физический факультет, Научно-исследовательский институт прикладной физики, Иркутск,  
Россия

E-mail: [markakarat@yandex.ru](mailto:markakarat@yandex.ru)

Проект TAIGA-100 представляет собой значительное расширение возможностей обсерватории TAIGA [1] для изучения космических лучей и гамма-лучей высоких энергий [2]. Предполагается, что площадь экспериментального комплекса TAIGA-100 будет составлять порядка 100 км<sup>2</sup>. В рамках данной работы проводится моделирование системы новых водных черенковских детекторов, специально спроектированных для данного проекта. Эти детекторы предназначены для регистрации мюонов широких атмосферных ливней (ШАЛ) и режекции адронного фона при выделении гамма-событий, особенно тех, что порождаются гамма-лучами в энергетическом диапазоне выше 100 ТэВ.

Рассматриваются различные конфигурации системы детекторов. Новые детекторы позволят лучше анализировать характеристики ливней и значительно улучшат возможности установки по идентификации гамма-событий [3]. Моделирование работы детекторов выполнено с применением программных пакетов для симуляции ШАЛ, включая CORSIKA [4] на базе модели адронных взаимодействий высоких энергий QGSJet-II-04 [5], а также других специализированных программных инструментов.

Ожидается, что введение этих детекторов в работу комплекса TAIGA-100 будет способствовать важным научным открытиям, включая возможные сигналы темной материи и исследование природы космических лучей. Они окажут существенное влияние на достижение научных целей нового комплекса.

1. Budnev N., et al. (TAIGA Collaboration). TAIGA – A hybrid array for high energy gamma-ray astronomy and cosmic-ray physics // Nucl. Instrum. Meth. A. 2012. V. 1039. 167047.
2. Л.А. Кузьмичев. Астрофизический комплекс TAIGA – статус, результаты, планы // Выступление на 38 всероссийской конференции по космическим лучам (ВККЛ-2024), 1-5 июля 2024, Москва.
3. R. Conceição, B. S. González, A. Guillén, M. Pimenta, B. Tomé. Muon identification in a compact single-layered water Cherenkov detector and gamma/hadron discrimination using machine learning techniques // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81. 542.
4. D. Heck., et al. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers // Tech. Rep. 1998. FZKA. 6019.
5. Ostapchenko S. Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: I. QGSJET-II model // Phys. Rev. D 2011. V. 83. 014018.

# ОЦЕНКА МАССЫ ПЕРВИЧНОГО ЯДРА ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПРЯМОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО СВЕТА ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ

О. В. Черкесова<sup>1,2</sup>, В. И. Галкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
факультет космических исследований, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: olga.v.cherkesova@yandex.ru

Серия экспериментов СФЕРА посвящена регистрации черенковского света широких атмосферных ливней, отражённого от снега, для исследования энергетического спектра и массового состава первичных космических ядер. Целью проекта СФЕРА-3 является определение типа первичного ядра на основании данных, полученных при одновременном детектировании прямого и отражённого черенковского света. Для этого исследуется возможность определения массы первичной частицы на основании характеристик прямого черенковского света. В настоящий момент ядра классифицируются на три группы: группа водорода, группа азота и группа железа на основании одного из параметров Хилласа — длины большой оси черенковского образа. Для улучшения качества классификации были рассмотрены два типа линзы и выбран лучший, построены критерии для различных положений детектора относительно оси ливня и проанализирована их точность. Также идёт работа над аппроксимацией образа асимметричной функцией с целью поиска другого критериального параметра либо группы параметров.

Секция: Воздействие ионизирующих  
излучений на материалы  
и космическую технику

# ПОВРЕЖДЕНИЕ ВДОЛЬ ТРЕКОВ БЫСТРЫХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В ПОЛИЭТИЛЕНЕ

П.А. Бабаев<sup>1</sup>, Р.А. Воронков<sup>1</sup>, А.Е. Волков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ФИАН им П.Н. Лебедева, Москва, Россия

<sup>2</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

e-mail: babaevpa@lebedev

Впервые получен профиль структурных и химических повреждений полиэтилена вдоль траекторий тяжёлых ионов, тормозящихся в режиме электронных потерь энергии. Для моделирования материала использовался код TREKIS-3 [1]. Силовое поле AIREVO-M, учитывающее разрывы/образование химических связей, использовалось для описания релаксации атомной структуры.

Продемонстрирован эффект скорости — положение на траектории иона в полиэтилене области максимального выделения энергии не совпадает с местом максимального повреждения (см. Рис.1).

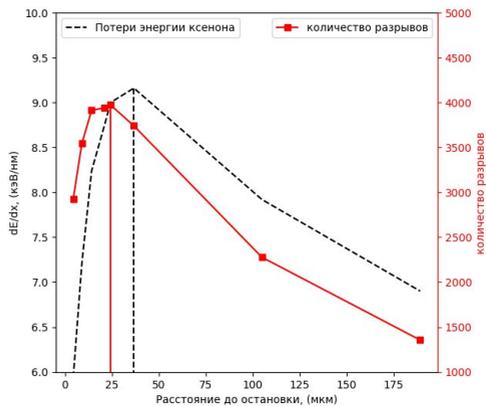


Рис.1 Количество поврежденных связей и потери энергии ксенона как функция остаточного расстояния до остановки в треке.

1. Medvedev N. et al. //Journal of Applied Physics. – 2023. – Т. 133. – №. 10.

# ДЕГРАДАЦИЯ СТРУКТУРЫ ГИБРИДНОЙ ЦИРКОНИЕВОЙ КЕРАМИКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЁ ПРОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Д.Р. Беличко<sup>1</sup>, А.В. Малецкий<sup>1,2</sup>, Г.К. Волкова Р.Ш. Исаев<sup>2</sup>, М.Н. Якименко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Россия,

<sup>2</sup>Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

E-mail: danil.belichko@yandex.ru

Керамические материалы сегодня являются широко распространенным классом материалов, применяемых во многих отраслях промышленности, техники и народного хозяйства. В широком диапазоне составов и соединений керамик, особое место занимают материалы на основе частично или полностью стабилизированного диоксида циркония (ZrO<sub>2</sub>), особенно, легированные дополнительными оксидами с целью обретения новых свойств или усовершенствования уже имеющихся. При этом, предпочтительным условием легирования является получение в его процессе дополнительных включений в матрице материала, что приводит к дополнительному упрочнению материала (в случае если образующиеся включения частично когерентны), а также к образованию дополнительных гетерофазных границ в материале. Согласно [1] границы в материале могут выступать местом «стоков» образующихся дефектов, что даёт возможность рассматривать такие классы материалов с точки зрения радиационной устойчивости.

В настоящей работе исследовались нанопорошки и керамики на их основе состава  $ZrO_2 + 3 \text{ мол.}\% Y_2O_3 + nSiO_2 + 2 \text{ мас.}\% Al_2O_3$ , где  $n = 3, 5, 7, 9 \text{ мас.}\%$  (YSZnSi<sub>2</sub>Al). Выбор такого состава исходного сырья обусловлен тем, что в процессе структурообразования керамик в их матрице материала образуется ортосиликат циркония (ZrSiO<sub>4</sub>), что приводит к существенному упрочнению керамики [2]. Облучение керамических образцов проводилось на электростатическом ускорителе ЭГ-5 в течение 18 ч. Мощность дозы облучения  $D_p$  составляла  $1 \cdot 10^{17}$  ед./см<sup>2</sup> с энергией 2 МэВ.

Рентгенофазовый анализ порошков и керамики проводили на дифрактометре ДРОН-3М в  $CuK\alpha$ -излучении. Плотность  $\rho$  и пористость  $\epsilon$  определяли методом гидростатического взвешивания. Твердость по Виккерсу HV определяли на твердомере ТП-7Р-1 с нагрузкой 30 кгс. Исследование структуры поверхности керамики осуществляли на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JEOL JSM 6510lv.

На рис. 1 приведены микрофотографии поверхности керамики составов YSZ5Si<sub>2</sub>Al и YSZ7Si<sub>2</sub>Al до и после облучения протонами. Видна существенная разница в состоянии поверхности облученной керамики обоих составов, заключающаяся в том, что после облучения на поверхности керамики образовалось большое количество изолированных пор размером  $>50$  нм. Значение плотности и пористости материалов до и после облучения приведены на рис.2.

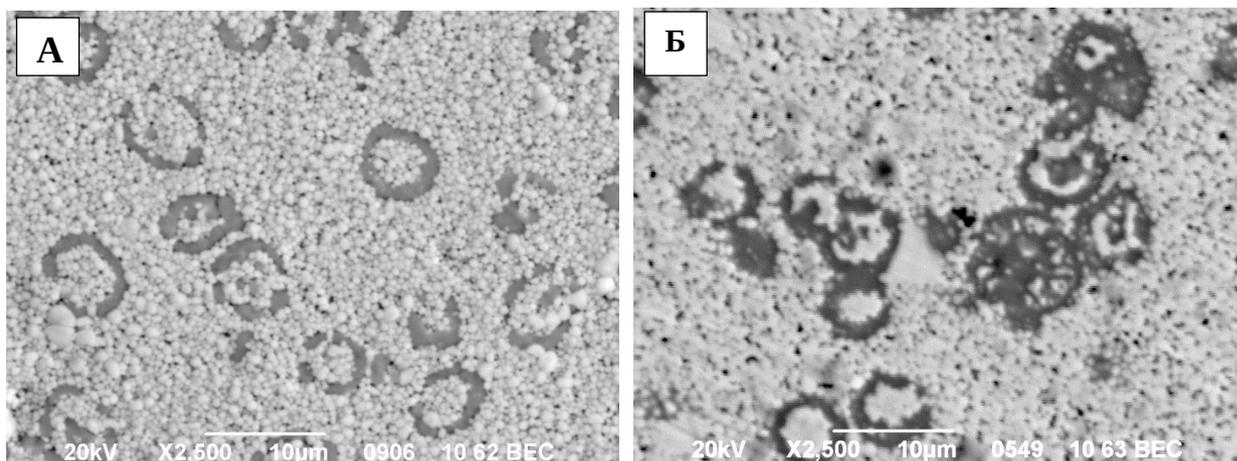


Рис. 1. Морфология поверхности керамической системы YSZ5Si2Al: а – до облучения, б –

после.



Рис. 2 Плотность и пористость исследованных керамических образцов: сплошная – до облучения, пунктирная – после облучения.

Результаты расчётов макронапряжений в материале после облучения, приведённые в табл.1, показали, что все макронапряжения сжимающего типа (отрицательные), причём, с увеличением добавки SiO<sub>2</sub>, а, следовательно, и циркона, эффект сжатия ослабевает: в керамике YSZ9Si2Al величина макронапряжений более, чем в 3 раза меньше, чем в YSZ3Si2Al, т.е. в связи с выше изложенным, поверхность керамики указанного состава характеризуется пониженной прочностью.

Таблица 1. Макронапряжения в керамике составов YSZ<sub>n</sub>Si<sub>2</sub>Al после облучения протонами.

Состав керамики	YSZ3Si2Al	YSZ5Si2Al	YSZ7Si2Al	YSZ9Si2Al
Величина и тип макронапряжения, ГПа	-2.28	-2.00	-0.93	-0.71

Значение твёрдости исследуемой керамики приведены на рис 3.

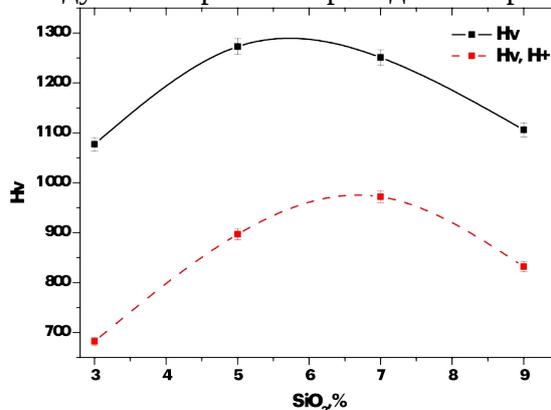


Рис.3 Кривые зависимости твёрдости по Виккерсу от концентрации легирующей примеси: сплошная – до облучения, пунктирная – после облучения.

Таким образом, можно сделать вывод, что основным результатом воздействия протонов на структуру исследуемой керамики является образование макропор (>50 нм) в матрице и в частицах циркона. При этом исследование облучённой поверхности керамики методом СЭМ показало хаотичное распределение макропор в матрице, тогда как поры в частицах циркона расположены, в основном, по границам включений. Также следует отметить что облучение протонами использованной дозы создало в керамике поля сжимающих макронапряжений  $\sim -1 -2$  ГПа.

1. G. Pu, J. Zou, L. Lin, et. all. Effects of He ion irradiation on the microstructures and mechanical properties of t' phase yttria-stabilized zirconia ceramics // Journal of Alloys and Compounds. 2018. Vol. 18. P. 13150-5.
2. Д.Р. Беличко, Г.К. Волкова, Т.Е. Константинова, А.В. Малецкий. Эффект легирования керамики на основе диоксида циркония оксидами алюминия и кремния// ФТВД. – 2023. - Т. 33, №2, С. 1-10.

*Исследования выполнены при поддержке РФФ, грант № 24-72-10072*

# ВАРИАЦИЯ РАЗМЕРОВ МИКРОЧАСТИЦ СО ВРЕМЕНЕМ РАБОТЫ И ИЗМЕНЕНИЕМ РЕЖИМОВ ИНЖЕКТОРА

Д.В. Зикий<sup>1,2</sup>, Н.Б. Акимов<sup>1</sup>, С.А. Бедняков<sup>1</sup>, О.П. Глогов<sup>1</sup>, О.Б. Дзагуров<sup>1</sup>, О.М. Марченко<sup>1</sup>, Н.Г. Чеченин<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
физический факультет, Москва, Россия

E-mail: ffhgfbnjh@gmail.com

Плотность потоков космических частиц в околоземном пространстве непрерывно возрастает, что создает опасность повреждений космического аппарата (КА) и риски для жизни космонавтов. Для изучения последствий высокоскоростных ударов космических микрочастиц с поверхностью КА необходима имитация потоков твердых частиц, с которыми возможно столкновение в околоземном пространстве. Так как их размеры, форма и плотность варьируются в широких пределах, наиболее значительной отличительной чертой можно считать скорости относительно космических аппаратов порядка 10 км/с [1]. Для создания потока твердых частиц с такими скоростями, могут быть использованы инжекторы, сообщаящие пыли электрический заряд, и ускорители. В данной работе осуществляется исследование характеристик микрочастиц, ускоренных с помощью инжектора, установленного на ускорителе Ван-дер-Граафа ЭГ-8 НИИЯФ МГУ [2,3]. А именно определение их распределения по размерам, скоростей, масс.

В данной работе определено исходное распределение порошка, состоящего из микрочастиц, и установлено как изменяется размерное распределение частиц, вылетающих из инжектора, со временем работы инжектора и в зависимости от напряжения между электродами инжектора. Для этого вылетающие из ускорителя частицы осаждались на пленку и облученный таким образом образец исследовался на оптическом микроскопе Axio Imager A1m.

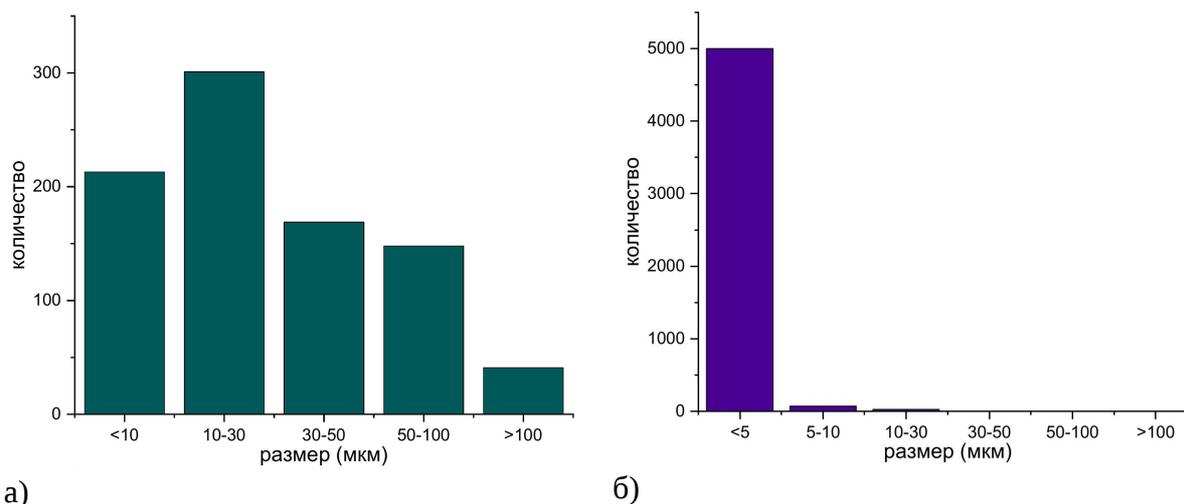


Рис.1. Распределения по линейным размерам микрочастиц исходной пыли (а) и пыли, осевшей за первые 8 часов работы инжектора (б).

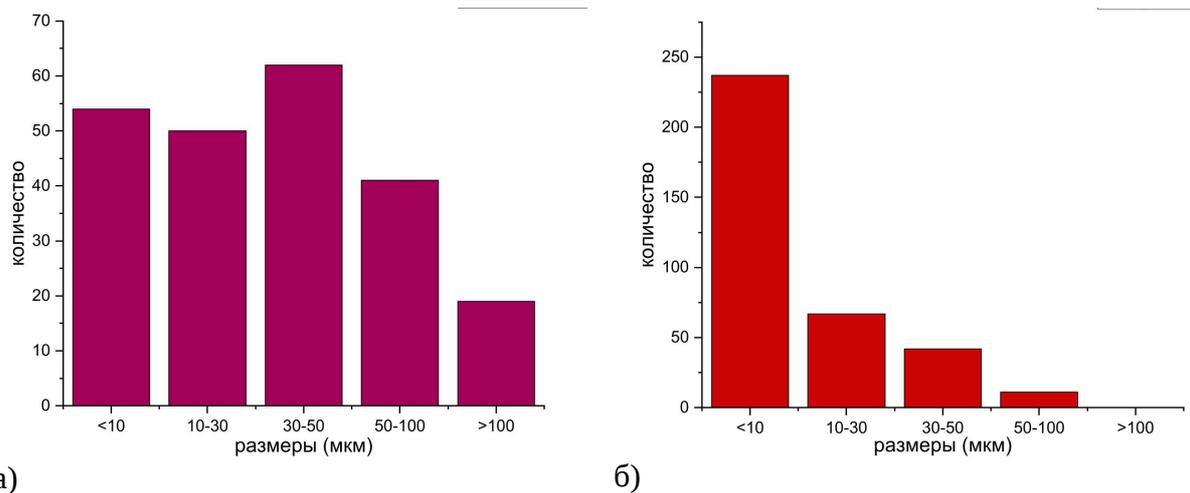


Рис.2. Распределения по линейным размерам микрочастиц, осевших на втором (а) и третьем (б) образце.

Результаты эксперимента представлены на Рис. 1 и Рис. 2. На Рис. 1(а) представлено распределение по размерам исходного алюминиевого порошка. На Рис.1 (б) распределение по размерам частиц, ускоренных за первые 8 часов работы инжектора и ускорителя. Первым 3 часам соответствует разность потенциалов между электродами инжектора 7 кВ, в следующие 5 часов она была увеличена до 15 кВ для корректировки плотности потока. Практически все твердые частицы, соответствующие этому временному промежутку, обладают линейным размером менее 5 микрон. На Рис.2 (а), (б) представлены распределения по размерам для частиц порошка, ускоренных в последующие промежутки времени примерно по 2 часа каждый. За это время напряжение менялось в пределах от 5 до 10 кВ. В этих распределениях присутствует значительная неоднородность линейных размеров твердых частиц.

Из представленных результатов видно, что в начальный период работы инжектора размерное распределение микрочастиц сравнительно узкое, несмотря на широкое распределение в исходном порошке, однако, распределение вылетающих из инжектора частиц меняется со временем и зависит от напряжения на электродах.

1. Новиков Л.С. Модель космоса. Том 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов: под. ред. Новикова Л.С. –М: Университет. Книжный дом. М., 2007, 1144 с.
2. Акимов Н.Б., Бедняков С.А., Глотов О.П., Дзагуров О.Б., Куликаускас В.С., Марченко О.М., Чеченин Н.Г.. Имитация воздействия космических микрочастиц. В кн. Модель космоса, т.2, под ред. Чеченина Н.Г. Изд. дом МГУ, 2024, с. 420-428
3. Бедняков А.А., Гиляров Р.А., Дзагуров О.Б., Криволап В.В., Куликаускас В.С., Инжекция, формирование потока и контроль параметров твердых частиц, ускоряемых на электростатическом генераторе ЭГ-8 / ПТЭ, 1998, №2, с.149-156

# К СРАВНИТЕЛЬНОМУ АНАЛИЗУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ СТЕКЛА К-208 ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЯМИ 20 и 30 КэВ

И. С. Кузнецов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, факультет фундаментальных наук, кафедра физики, Москва, Россия

E-mail: kuznetsovis1@student.bmstu.ru

В условиях космического пространства на материалы внешних поверхностей высокоорбитальных космических аппаратов в основном воздействуют следующие повреждающие факторы: ультрафиолетовое излучение, потоки горячей магнитосферной плазмы (ГМП), частицы солнечных и галактических космических лучей [1]. Основными компонентами ГМП являются электроны и протоны. Воздействие ГМП на диэлектрические материалы помимо радиационных повреждений приводит к накоплению инжектированного заряда. Поле, индуцированное таким зарядом, взаимодействует с окружающей плазмой, изменяя пространственно-энергетическое распределение составляющих ее частиц. Такое поле влияет также на процессы, протекающие в облучаемом материале. В частности, в стекле К-208, которое используется в качестве защитного покрытия фотоэлементов солнечных батарей, в поле инжектированного заряда происходит перераспределение ионов натрия и калия. Полевая миграция ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  влечет за собой перестройку микроструктуры стекла. В стекле локальную нейтрализацию заряда вокруг ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  обеспечивают немостиковые атомы кислорода. После того как ионы щелочных металлов покидают места локализации, происходит высвобождение атомов немостикового кислорода, которые после некоторой миграции скапливаются в окрестности дефектов стекла и образуют пузырьки молекулярного кислорода.

Для прогнозирования изменения функциональных свойств материалов в условиях эксплуатации высокоорбитальных космических аппаратов следует более детально изучить процессы, происходящие в материалах внешних покрытий под действием ГМП, а это в свою очередь требует подробного исследования процессов, протекающих под действием отдельных ее компонентов. Если влияние электронного облучения на стекла, содержащие ионы щелочных металлов, изучено достаточно подробно, то результаты протонного облучения и их анализ требует дополнительных исследований. При наземных испытаниях материалов всегда остро стоит вопрос выбора эффективной энергии частиц при моделировании условия космоса. Поэтому данная работа посвящена сравнительному анализу экспериментальных результатов, полученных при облучении пластин К-208 протонами с энергиями, характерными для ГМП. В частности, для анализа наблюдаемых в экспериментах данных предложена дрейфово-диффузионная модель, описывающая процесс полевой миграции ионов  $\text{Na}^+$ . В докладе будут представлены экспериментальные данные и результаты расчетов распределения концентрации ионов  $\text{Na}^+$  в пластинах стекла К-208, облученных протонами с энергиями 20 и 30 кэВ.

1. Ferguson D. C., Wimberly S.C. The Best GEO Daytime Spacecraft Charging Index. Proceed. 50th AIAA Aerospace Sci. Mtg. January, 2013. Nashville, Tennessee. AIAA 2013-0810. doi: 10.2514/6.2013-810.
2. Model of Space Environment, ed. by L.S. Novikov, Iss. 8, in 2 volumes // М.: Moscow State University Publishing House, 2007.

# ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ ДИОКСИДОМ ЦИРКОНИЯ

А.В. Малецкий<sup>1,2</sup>, Д.Р. Беличко<sup>1</sup>, Г.К. Волкова<sup>1</sup>, Р.Ш. Исаев<sup>2</sup>, М.Н. Якименко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Донецк, Россия,

<sup>2</sup>Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

E-mail: sashamalecki097@gmail.com

Керамика на основе  $Al_2O_3$  и YSZ ( $ZrO_2+3 \text{ mol.}\%Y_2O_3$ ) широко применяется в различных областях техники, промышленности и медицины [1-3]. Широкое распространение данные керамические материалы получили благодаря ряду уникальных свойств, среди которых химическая стойкость, биологическая совместимость, высокие плотность, прочность и твердость, а также радиационная устойчивость. Создание композитных материалов системы  $Al_2O_3$ -YSZ (ZTA) является перспективным методом получения материала с высокими трибологическими свойствами для эксплуатации в сложных гидротермальных условиях и условия интенсивных радиационных воздействий. Однако механические и физические изменения, возникающие под действием высокоэнергетических частиц и излучения в алюмоциркониевой керамике, остаются в значительной степени неизученными и требуют детального рассмотрения. Особый интерес в этом плане вызывает влияние ионизирующего облучения на различные типы структуры ZTA керамики (агрегатно- и дисперсно-упрочненные структуры) с различным распределением зерен матричного элемента и легирующей примеси по размерам [4-6].

В данной работе проанализировано влияние протонного и нейтронного облучения на структуру и свойства керамики  $Al_2O_3 - YSZ$  на основе нанопорошков  $\gamma+\theta-Al_2O_3 + n\% YSZ$  ( $n = 0, 1, 5, 10, 15 \text{ мас.}\%$ ). Порошки для исследования были получены методом химического соосаждения раствора солей с последующим применением физических воздействий при синтезе керамики. Изучены фазовый состав порошков, структура и физико-механические свойства керамики  $Al_2O_3 - YSZ$  с учетом концентрации YSZ и обработки компактов высоким гидростатическим давлением. Методом РСА и СЭМ установлено, что при спекании керамики протекают различные процессы кристаллизации и реализуются два типа структуры: агрегатно-упрочненная и дисперсно-упрочненная структура в зависимости от величины приложенного ННР.

Облучение синтезированной керамики протонами и нейтронами состава  $Al_2O_3 + n YSZ$  ( $n = 0, 1, 5, 10, 15 \text{ мас.}\%$ ) проводили на электростатическом ускорителе ЭГ-5 (ОИЯИ, ЛНФ). Мощность дозы ( $D_p$ ) составляла  $1 \cdot 10^{17} \text{ ед/см}^2$  с энергией 2 МэВ, в течение 2 часов для протонов и  $2 \cdot 10^{12} \text{ ед/см}^2$  с энергией 4,5 МэВ в течение 40 часов для нейтронов. Методом СЭМ установлено, что под действием облучения в ZTA керамике с дисперсно-упрочненной структурой происходит дробление зерен  $ZrO_2$  с уменьшением среднего размера зерна наполнителя алюминиевой матрицы. Также исследование дисперсно-упрочненной структуры керамики после воздействия высокоэнергетического облучения показало эффект радиационно-ускоренной диффузии зерен диоксида циркония в матрице оксида алюминия. Вероятнее всего причиной дробления зерен является образование частицы оксида циркония нестехиометрического состава после радиационного воздействия. Образовавшиеся частицы оксида циркония обладают относительно высокой диффузионной подвижностью, что приводит к их смещению из

первоначального положения. Вследствие этого процесса происходит изменение структуры ЗТА композита (рис. 1).

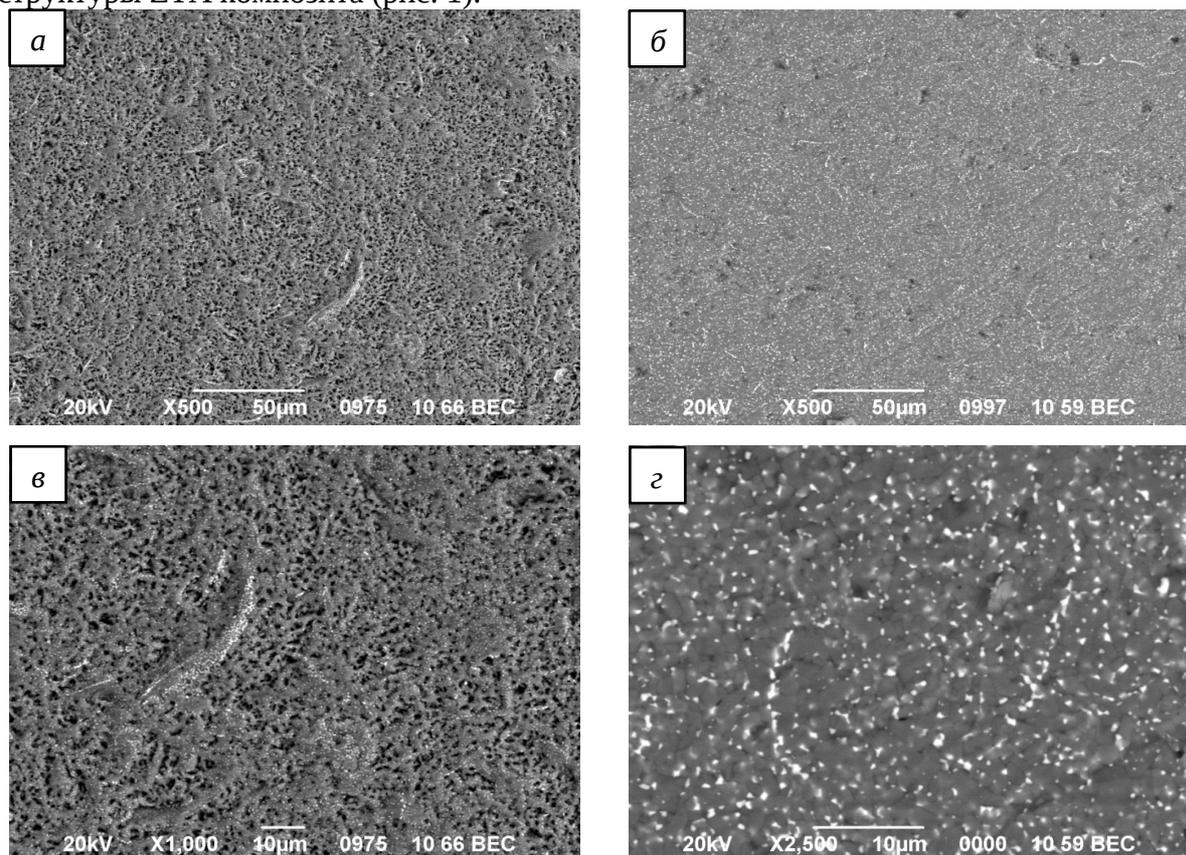


Рис. 1. Структура поверхности облученной нейтронами керамики состава  $\text{Al}_2\text{O}_3 + 10\% \text{YSZ}$ : а, в - 300 МПа (агрегатно-упрочненная), б, г - 700 МПа (дисперсно-упрочненная)

Установлено, что агрегатно-упрочненная структура ЗТА композитной керамики более устойчива к физическим изменениям под действием протонного облучения в сравнении с дисперсно-упрочненной структурой.

Исследования выполнены при поддержке РФФ, грант № 24-72-10072

1. M. Moraes, C. Elias, J. Duailibi Fh, L. Oliveira. Mechanical Properties of Alumina–Zirconia Composites for Ceramic Abutments // *Mater Res-Ibero-Am. J. Mater.* 2004, № 7. DOI: 10.1590/S1516-14392004000400021
2. J. Chevalier, P. Taddei, L. Gremillard, S. Deville, G. Fantozzi, et al. Reliability assessment in advanced nanocomposite materials for orthopaedic applications // *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2011, №4, 303–314.
3. Zinkle, S. J. & Busby, J. T. Structural materials for fission and fusion energy // *Mater. Today* 2009, № 12, 12–19.
4. A.V. Maletskiy, T.E. Konstantinova, G.K. Volkova, D.R. Belichko, et al. High hydrostatic pressure influence on the properties and tendency to agglomeration of  $\text{ZrO}_2$  grains of the  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{YSZ}$  composite ceramics system // *Ceram. Int.* 2023, № 49 [10], 16044-16052. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.01.202.
5. A.V. Maletsky, D.R. Belichko, T.E. Konstantinova, G.K. Volkova, et al. Structure formation and properties of corundum ceramics based on metastable aluminium oxide doped with stabilized zirconium dioxide // *Ceram. Int.* 2021, № 47, 19489–19495. DOI: 10.1016/j.ceramint.2021.03.286.
6. A.V. Maletskii, G.K. Volkova, D.R. Belichko, V.A. et al. Influence of stabilized zirconium dioxide and high hydrostatic pressure on the kinetics of sintering nanopowders of metastable aluminum oxide // *Ceram. Int.* 2024. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.09.002.

# СКОРОСТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МИКРОЧАСТИЦ, УСКОРЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

О. М. Марченко<sup>1</sup>, С. А. Бедняков<sup>1</sup>, Д. В. Зикий<sup>1,2</sup>, О. Б. Дзагуров<sup>1</sup>,  
Н. Б. Акимов<sup>1</sup>, О. П. Готов<sup>1</sup>, Н. Г. Чеченин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

E-mail: oleg.marchenko.99@bk.ru

Активно развивающееся в настоящее время направление космического материаловедения требует совершенствования методов имитации воздействия космического пространства на приборы и материалы. Космическая пыль и микрометеориты являются важным фактором космического пространства, приводящим в ряде случаев к преждевременной деградации материалов и выходу из строя приборов космических аппаратов [1, 2].

В этой связи актуальны работы по моделированию воздействия этих факторов на материалы и приборы в лабораторных условиях [3,4]. В НИИЯФ МГУ на базе ускорителя ЭГ-8 и электростатического инжектора [3,5], запущена система, позволяющая получать ускоренные электростатическим полем металлические микрочастицы со скоростями до 3 км/с и потоком частиц от 10 до 200 частиц в секунду.

В сочетании с системой работает программно-аппаратный комплекс, реализующий времяпролетную методику фиксации значений скоростей и зарядов каждой отдельной частицы. Комплекс включает пару измерительных цилиндров, расстояние между которыми составляет 1 метр, пару зарядочувствительных усилителей (ЗЧУ), цифровой осциллограф АКИП 72204А, персональный компьютер. Схема измерений при помощи комплекса представлена на рисунке 1, стрелками показано направление скорости частицы.

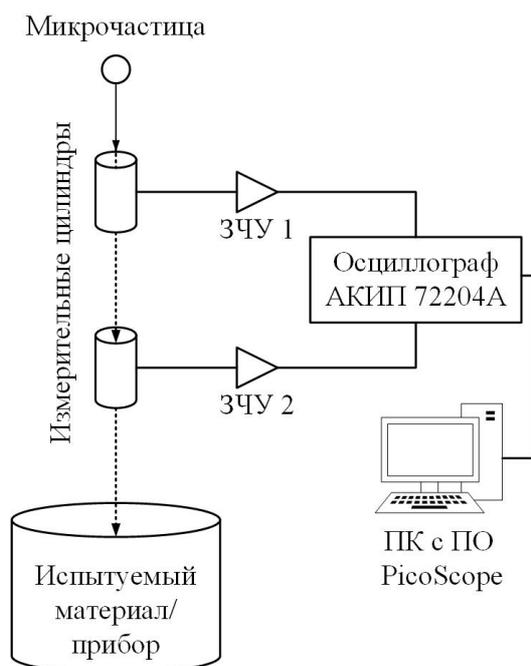


Рис. 1. Схема установки для измерения скоростей и зарядов частиц

Для обработки полученных данных разработано программное обеспечение DUST\_02, позволяющее в автоматическом режиме определять скорости и заряды частиц, скоростные спектры полученные для разных периодов работы инжектора приведены на рисунке 2.

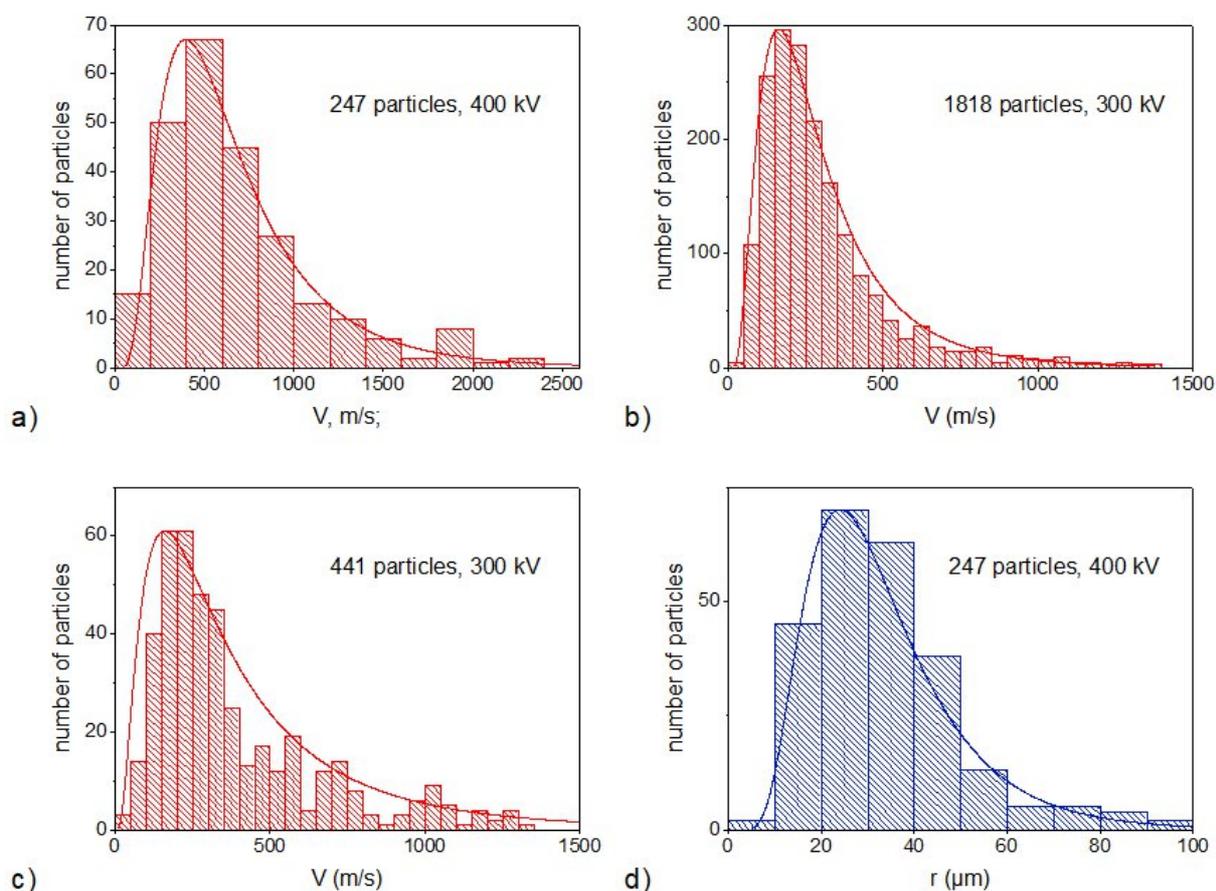


Рис. 2. Распределения частиц по массам и скоростям.

- a) Распределение по скоростям сразу после загрузки новой пыли;
- b) распределение по скоростям при дальнейшем расходе пыли в инжекторе;
- c) распределение по скоростям при малом количестве пыли, оставшейся в инжекторе;
- d) распределение по размерам, вычисленное обработкой сигналов;

1. А.М. Телеги, Н.Д. Семкин Космическая пыль и её взаимодействие с космическими аппаратами. - Самара: Изд-во СГАУ, 215. - 124 с.
2. Л. С. Новиков Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. - М.: Университетская кн., 2009. - 103 с.
3. Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, А. П. Погодин Эволюция и перспективы развития устройств для моделирования микрометеоритов в лабораторных условиях // Прикладная физика. - 2008. - №4
4. Slyuta, E. & Vysochkin, V. & Ivanov, V. & Makovchuk, Vladislav & Nazarov, A. & Pogonin, Vladimir & Roskina, E. & Safronov, V. & Tatsiy, L.. (2021). METEOR-L Device on the Lunar Orbital Vehicle Luna-26: Space Dust Detector. Solar System Research. 55. 437-445.
5. Н. Д. Семкин, А. С. Видманов Моделирование процесса зарядки микрочастиц в камере электростатического инжектора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. - 2015. - №1, Т. 14.

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ КАРТИНА ИОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ ПДМС

О. М. Марченко<sup>1, 2</sup>, Д. К. Миннебаев<sup>1</sup>, А. П. Евсеев<sup>1</sup>, Е. А. Воробьева<sup>1</sup>,  
А. А. Шемухин<sup>1</sup>, А. В. Назаров<sup>1</sup>, А. Д. Шпорин<sup>1</sup>, Ю. В. Балакшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

<sup>2</sup>НИТУ МИСИС, Москва, Россия,

E-mail: oleg.marchenko.99@bk.ru

Ионно-пучковая обработка полимерных материалов позволяет осуществлять тонкие изменения различных свойств таких материалов в поверхностном слое регулируемой толщины [1,2], а также формировать сложные структуры на поверхности таких материалов (рисунок 1). Однако на сегодняшний день изменение структуры и свойств полимеров при ионном облучении не поддается предсказанию ввиду отсутствия модели, описывающей все происходящие при таком облучении процессы.

Подходы, использующиеся для моделирования взаимодействия ионного пучка с твердыми кристаллическими и аморфными телами – SRIM (метод Монте-Карло в приближении бинарных столкновений), метод молекулярной динамики, – не вполне подходят для полимерных материалов, так как не позволяют оценить характер и степень изменения свойств мишени [3,4]. В связи с этим предлагается дополнить результаты моделирования SRIM двумя основными факторами, отличающими полимеры от других материалов.

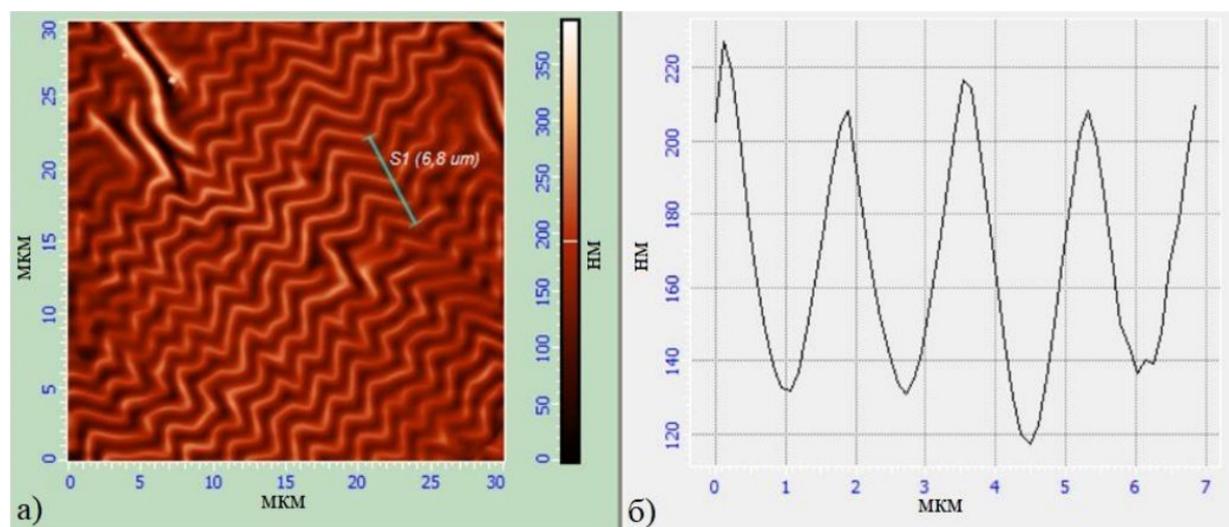


Рис. 1. АСМ изображение поверхности облученного атомарными ионами аргона с энергией 10 КэВ под углом 60° к нормали с флюенсом  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup> образца (а) и профиль рельефа (б);

Обладающие органическим или частично органическим строением, полимеры испытывают при ионном облучении множество химических превращений. Это приводит к изменению химической структуры молекул полимера, для описания которого предлагается ввести реакции разложения под действием ионного пучка и сшивки, связанной с образованием химически активных радикалов и низкомолекулярных соединений.

Кроме того, полимеры отличаются от аморфных и кристаллических веществ высокой пространственной неоднородностью плотности так как обладают сетчатой структурой. В этой связи диффузионные процессы в полимерах протекают активнее, чем в

твёрдом теле, что позволяет образующимся в результате радиационного разложения низкомолекулярным соединениям перемещаться в объёме образца и существенно влияет на молекулярную и надмолекулярную структуру полимера.

Разработанная модель описывается системой уравнений (1) и позволяет моделировать морфологию поверхности и концентрации химических связей в образце после облучения. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dr}{d\tau} = \frac{N}{N_0} P_N + P_n \frac{n}{n_0} - rRK_r - \frac{dr}{dx} D_r \\ \frac{dR}{d\tau} = 2 \frac{N}{N_0} P_N + P_n \frac{n}{n_0} - rRK_r - 2R^2 K_R - \frac{dR}{dx} D_R \\ \frac{dN}{d\tau} = R^2 K_R - \frac{N}{N_0} P_N \\ \frac{dn}{d\tau} = rRK_r - P_n \frac{n}{n_0} \end{array} \right. \quad \#(1)$$

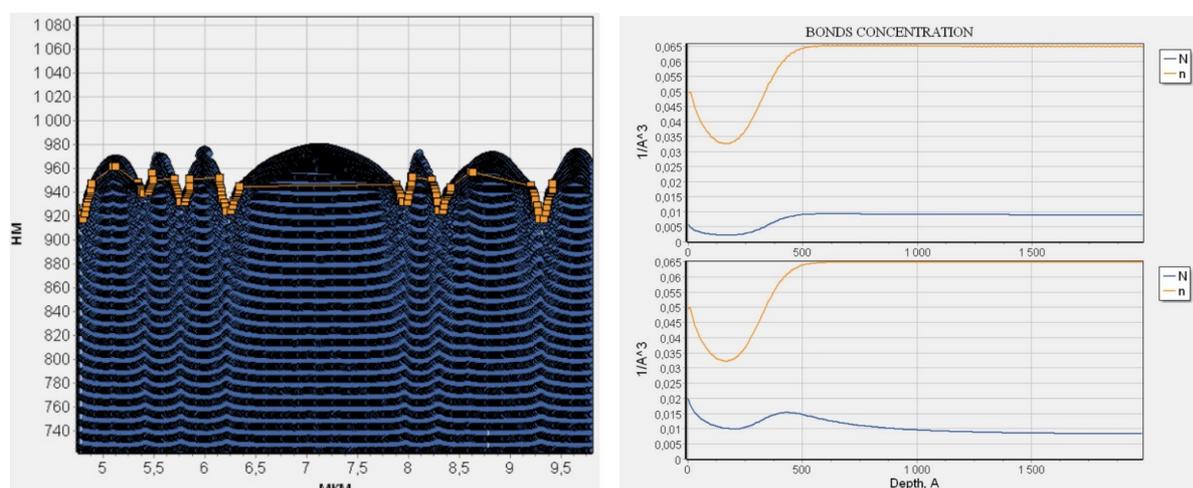


Рис. 2. Результаты моделирования профиля рельефа на ПДМС и концентрации химических связей после облучения при превалировании процесса разложения (сверху), и сшивки (снизу);

Предлагаемая модель базируется на данных SRIM и построена путём выделения подпроцессов распыления, разложения, сшивки и т.д. при взаимодействии ионного пучка с полимерной мишенью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2021-1353.

1. Kondyurin, M. Bilek (Eds.) Ion Beam Treatment of Polymers (Second Edition), Elsevier, Oxford. 2015 – 255 p.
2. Оджаев В.Б. и др. Ионная имплантация полимеров. - Минск: Белгосуниверситет, 1998 – 197 с.
3. Park, Hong-Gyu & Jeong et al. (2015). Control of the wrinkle structure on surface-reformed poly(dimethylsiloxane) via ion-beam bombardment. Scientific reports. 12356. 10.1038 / srep12356.
4. О. М. Марченко и др. Ионно-пучковая обработка поверхности ПДМС для улучшения клеточной адгезии // Ученые записки физического факультета МГУ. - 2023. - №3

# ИССЛЕОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ ВОЛЬФРАМА

О. М. Михалкович<sup>1</sup>, С. М. Барайшук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка,  
Минск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

E-mail: Phyzbober@tut.by

Способ осаждения покрытий ассистированного собственными ионами (ОПАСИ) [1] относится к перспективным. Осаждение пленок W на Si методом ОПАСИ является способом образования силицида вольфрама, представляющего ценность для микроэлектромеханических систем, что позволяет его использовать для получения таких соединений без термически нагруженных процессов [2]. WSi<sub>2</sub> хорошо работает в качестве стойких к окислению покрытий. Подобно MoSi<sub>2</sub>, высокая излучательная способность дисилицида вольфрама делает этот материал привлекательным для высокотемпературного радиационного охлаждения для тепловых экранов. В работе проведено определение элементного состава вольфрамовой пленки и слоевых концентраций компонентов системы W/Si сформированных методом ОПАСИ W на кремний при варьировании потенциала смещения на мишени. Осаждение вольфрамовых тонких пленок на кремний в условиях ассистирования ускоренными ионами W<sup>+</sup> проводили при ускоряющем напряжении  $U = 7, 15$  и  $20$  кВ и потоке ионов  $2 \times 10^{17} \text{ W}^+/\text{cm}^2$ . Отношение ионизированной фракции к нейтральной составляло 0,09. В рабочей камере поддерживался вакуум  $\sim 10^{-2}$  Па. Для проведения послойного элементного анализа конструкций W/Si использовался метод Резерфордского обратного рассеяния ионов He<sup>+</sup> с энергией 1,45 МэВ ( $\Delta E = 15$  кэВ) и геометрией рассеяния  $\alpha \approx 70^\circ$ ,  $\beta \approx 10^\circ$ , где  $\alpha$  и  $\beta$  - углы влета, вылета и рассеяния соответственно, и компьютерное моделирование экспериментальных спектров POP по программе RUMP. Распределение элементов в массиве пленки практически равномерное. Концентрация атомов W, Si, C, O, H в пленке составляет в среднем 12, 6, 48, 29, 5 ат.% соответственно. W в кремнии идентифицируется на глубине в 400-500 нм с концентрацией 0.05 ат.%. Атомы C и O проникают в Si на сравнительно малую глубину в 40 нм с концентрацией 0.5 и 0.2 ат.% соответственно. Наличие кремния в пленке с концентрацией порядка 6 ат. % свидетельствует о его диффузии в пленку в составе силицида, в то время как, C, O, H идентифицируются из гидроксильной группы вакуумного масла.

Значение слоевой концентрации атомов вольфрама  $(Nz)_W$  при осаждении W пленки составляет  $1.9 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup>,  $5.1 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> и  $2.8 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> для значений ускоряющего потенциала 7 кВ, 15 кВ и 20 кВ соответственно. Значение слоевой концентрации атомов углерода  $(Nz)_C$  составляет  $11.5 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup>,  $14.0 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> и  $5.4 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> для значений ускоряющего потенциала 7 кВ, 15 кВ и 20 кВ соответственно. Значение слоевой концентрации атомов кислорода  $(Nz)_O$  при составляет  $5.0 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup>,  $3.6 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> и  $5.1 \cdot 10^{16}$  атом/см<sup>2</sup> для значений ускоряющего потенциала 7 кВ, 15 кВ и 20 кВ соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь № ГР 20211394.

1. Способ нанесения покрытий : пат. ВУ 2324 / И. С. Ташлыков, И. М. Бельй. – Опубл. 30.09.1998. – 3 с.
2. Bobrovich, O. G. Composition and morphology of Ti and W coatings deposited on silicon during ion-beam assistance / O. G. Bobrovich, O. M. Mikhalkoich, I. S. Tashlykov // Inorganic Materials: Applied Research. – 2015. – Vol. 6, № 3. – P. 229–233.

# РАЗРУШЕНИЕ ФТОРУГЛЕРОДНЫХ ПЛЕНОК ИОНАМИ НИЗКОЙ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЫ Ar И O<sub>2</sub>

А. А. Соловых<sup>1,2</sup>, Е. Н. Воронина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: solovykh.aa19@physics.msu.ru

При производстве элементов нанoeлектроники большинство технологических операций, включающих в себя травление, легирование, очистку поверхности и т.д., выполняется с использованием низкотемпературной плазмы. С уменьшением размеров элементов микросхем возросла потребность в повышении степени контроля обработки материалов с точностью до атомарных масштабов [1, 2]. Подобная точность может быть обеспечена благодаря использованию атомно-слоевого травления (ALE) – метода, в основе которого лежат последовательные самоограниченные реакции [1]. Процесс ALE может быть разделен на два основных этапа: создание модифицированного слоя и его последующее удаление, причем реакции на каждом из этапов в существенной степени зависят от материала. Особый интерес вызывает применение плазмы для реализации ALE, поскольку в этом случае благодаря наличию ионов становится возможным анизотропное травление, критически важное для создания элементов нанoeлектроники. Обычно ионы применяют на втором этапе ALE, и их энергия должна быть подобрана таким образом, чтобы удалялся модифицированный слой, но не происходило распыления исходного материала. Поэтому для осуществления ALE важно предварительно определить оптимальный диапазон энергий ионов для осуществления этого процесса. В настоящее время ведется активный поиск реакций для ALE в зависимости от материала. Например, травление диоксида кремния SiO<sub>2</sub> осуществляется во фторуглеродной плазме, в результате воздействия которой на поверхности материала образуется CF<sub>x</sub>-пленка. Как показали проводимые в НИИЯФ МГУ экспериментальные исследования процессов ALE, благодаря наличию такой пленки толщиной 1–2 нм воздействие ионов Ar низкой энергии приводит к модификации ультратонкого поверхностного слоя SiO<sub>2</sub>, который затем может удаляться плазмой Ar и O<sub>2</sub> [3].

Целью настоящей работы является исследование влияния фторуглеродной пленки на процесс атомно-слоевого травления SiO<sub>2</sub>. Для выполнения данной задачи было выполнено моделирование воздействия ионов плазмы Ar и O<sub>2</sub> с энергией до 50 эВ при различных параметрах удара на периодические модели CF<sub>x</sub>-пленки различной плотности, а также модели отдельных цепочек (–C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>–)<sub>n</sub>. Моделирование осуществлялось с использованием квантовомеханического метода теории функционала плотности (DFT) на суперкомпьютере ЦКП МГУ «Ломоносов-2» [4] в программном пакете VASP (Vienna Ab initio Simulation Package) [5].

Расчеты показали, что ионы Ar с энергией 15–50 эВ способны выбивать атомы F и радикалы CF из CF<sub>x</sub>-пленки. Пример рассчитанной траектории, в которой в результате удара иона Ar молекулу (–C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>–)<sub>n</sub> покинули сразу два атома F, представлена на рис. 1а. Для нахождения пороговой энергии отрыва атома F был выполнен ряд расчетов для случая, когда ион Ar летит перпендикулярно связи. Анализ полученных результатов показал, что кинетическая энергия выбиваемого атома F и улетающего атома Ar линейно зависят от начальной энергии иона (рис. 1б, коэффициент детерминации R<sup>2</sup> равен ~0.99). По виду рассчитанной зависимости кинетической энергии атома F можно сделать вывод, что пороговая энергия отрыва F составляет примерно 15 эВ. Из приведенного графика

видно, что при энергии 40-50 эВ энергия вылетающих атомов F может достигать 25-30 эВ, что позволяет этим атомам преодолевать рыхлую фторуглеродную пленку толщиной несколько нанометров и проникать в приповерхностный слой SiO<sub>2</sub> (возможность подобного проникновения при энергии атомов F более 5 эВ была показана в работе [6]). В результате таких процессов происходит модификация верхнего слоя SiO<sub>2</sub>, который затем может быть удален под действием частиц плазмы. Для ионов плазмы O<sub>2</sub> были получены аналогичные результаты, которые будут подробно представлены на презентации доклада.

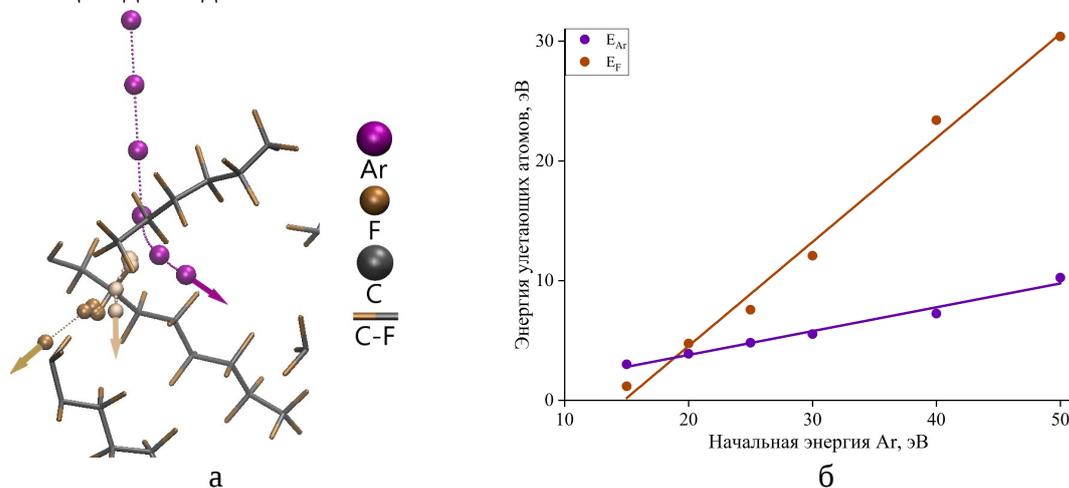


Рис. 1. а – Последовательные изменения положений атомов в периодической модели полимерной структуры для случая удара иона Ar с энергией 50 эВ; б – Зависимость кинетической энергии выбиваемого атома F и улетающего атома Ar от начальной энергии иона.

1. K.J. Kanarik, T. Lill, E.A. Hudson, et. al. Overview of atomic layer etching in the semiconductor industry // *JVST A*. 2015, 33. P. 020802
2. K.J. Kanarik, S. Tan, R.A. Gottscho. Atomic Layer Etching: Rethinking the Art of Etch // *J. Phys. Chem. Lett.* 2018, 9. P. 4814
3. D.R. Shibanov, D.V. Lopaev, Y.G. Zaseev, G.Y. Pavlov, A.T. Rakhimov. Plasma enhanced atomic layer etching in Ar/C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> inductively coupled plasma with O<sub>2</sub> cleaning step // *GDPA-2023: Abstracts of 16th International Conference*. 2023. P. 109
4. V.V. Voevodin, A.S. Antonov, D.A. Nikitenko, et. al. Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community // *Supercomp Frontiers and Innov.* 2019, 6. P. 4
5. G. Kresse, D. Joubert. From ultrasoft pseudopotentials to the projector augmented-wave method // *Phys. Rev. B*. 1999, 59. P. 1758
6. Yu A. Mankelevich, E.N. Voronina, T.V. Rakhimova. Multi-step reactions mechanism for F atoms interactions with organosilicate glass and SiO<sub>x</sub> films // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2016, 49. P. 345203

Секция: Медицинская физика  
и радиационная биология

# ОЦЕНКА СПЕКТРА ВТОРИЧНЫХ НЕЙТРОНОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В КОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ

И. Ф. Жаринов<sup>1</sup>, А. А. Щербаков<sup>1,2</sup>, Ф.Р. Студеникин<sup>1,2</sup>, А.П. Черняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: zharinov.if20@physics.msu.ru

В настоящее время все более широкое распространение в медицине получают различные методы лучевой терапии, одним из них является облучение на пучках протонов, заслуженно считающееся эффективным средством лечения онкологических заболеваний. На данный момент в мире существуют 123 центра протонной лучевой терапии[1]. При прохождении протонов через вещество возникает значительное количество вторичных частиц, распространяющихся во всех направлениях. Отдельно следует выделить вторичные нейтроны, поскольку они обладают сравнительно высоким коэффициентом качества — от 5 до 20, и значительным пробегом в веществе.

В данной работе исследовались характеристики вторичных нейтронов, возникающих при облучении водного фантома протонным пучком, прошедшим через коллимационную систему. Исследование реализовано с помощью компьютерного моделирования с использованием программного пакета GEANT4 v11.0.0, основанного на методе Монте-Карло.

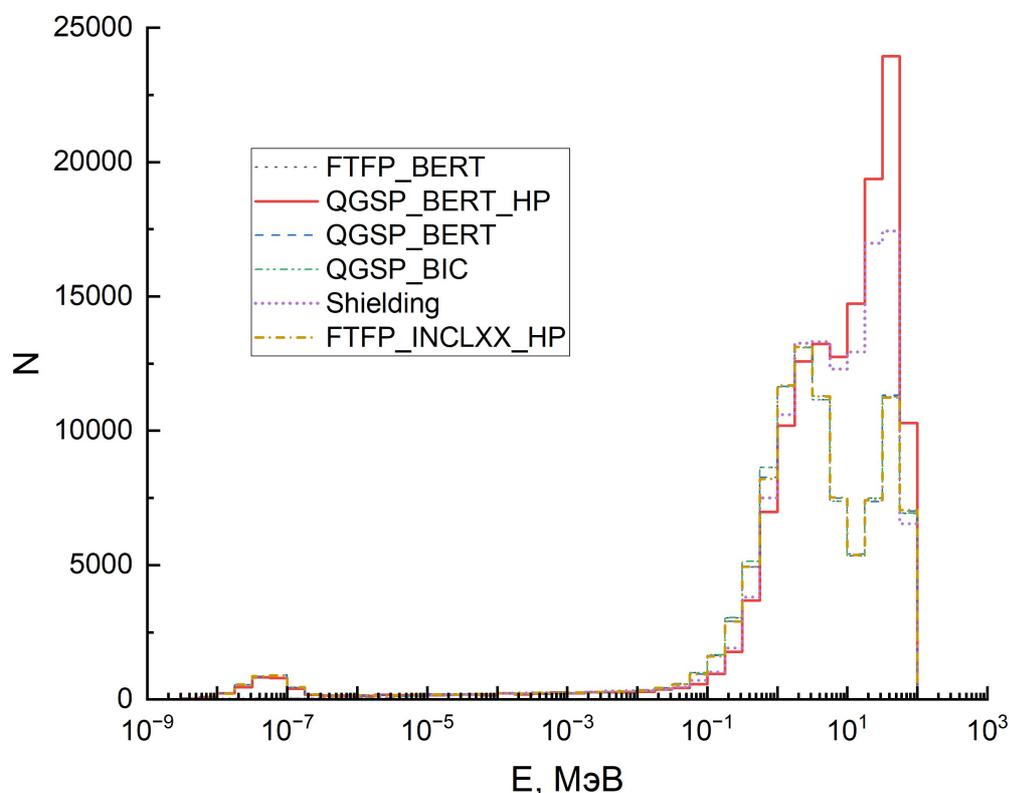


Рис. 1. Спектр вторичных нейтронов после прохождения коллимационной системы

В численном эксперименте для получения модифицированного пика Брэгга монохроматический пучок протонов после прохождения через коллимационную систему нормально падал на модулятор переменной толщины, вращающийся вокруг своей оси. В клинических установках такими пучками пользуются для облучения протяженных опухолей, различные части которых находятся на разной глубине. Модифицированный пучок затем нормально падал на поверхность фантома — куба со стороной 20 см. В центральной части куба снималось глубинно-дозовое распределение, также был исследован спектр нейтронов, образовавшихся в результате прохождения пучком через набор коллиматоров и фильтров. Моделирование проводилось с использованием следующих физических листов, использующих различные модели взаимодействий: QGSP\_BIC, QGSP\_BIC\_HP, QGSP\_BERT, QGSP\_BERT\_HP, FTFP\_BERT, FTFP\_BERT\_HP, Shielding и других, исследовалась зависимость полученных результатов от выбора физического листа. Результаты обсуждаются.

1. СанПиН2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009"
2. Черняев А. П. Ионизирующие излучения. / А. П. Черняев – 4-е изд., испр. И дополн. – М.: Издательский дом «КДУ», 2021;
3. Климанов В. А., Крамер-Агеев Е. А., Смирнов В. В. Дозиметрия ионизирующих излучений: учебное пособие / под ред. В. А. Климанова. М.: НИЯУ МИФИ, 2015.
4. Беспалов В. И. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. - Томск: издательство Томского политехнического университета, 2008.
5. Geant4 User's Guide For Application Developers (<https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/AllGuides/html/index.html>).

# ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НА КОНУСНО-ЛУЧЕВОМ КОМПЬЮТЕРНОМ ТОМОГРАФЕ

К.В. Запорожская<sup>1</sup>, И.И. Юрикова<sup>2</sup>, А.А. Щербаков<sup>1,3,4</sup>, Ф.Р. Студеникин<sup>1,3</sup>, А.П. Черняев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Центр Гамма-нож при ФГАУ НМИЦ Нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко Минздрава России, Москва, Россия*

<sup>3</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва, Россия*

<sup>4</sup> *Физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова, Якутск, Россия*

E-mail: zaporozhskaia.kv21@physics.msu.ru

Радиохирургия — это метод, который предполагает однократное воздействие на патологическую мишень высокой дозой ионизирующего излучения, создаваемой с помощью множества внешних пучков [1,2]. Данный метод позволяет доставить необходимую дозу излучения к глубоким мишеням, минимизируя воздействие на окружающие ткани.

Один из методов радиохирургии осуществляется с помощью аппарата «Гамма-нож» (Leksell Gamma Knife®). В радиационном блоке аппарата находятся 192 источника радиоактивного <sup>60</sup>Со. При распаде этого изотопа образуются два гамма-кванта, которые оказывают повреждающее воздействие на биологические ткани. «Гамма-нож» используется для стереотаксического облучения патологических структур головного мозга размером от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров [3].

В одной из последних моделей установки Leksell Gamma Knife® Icon™ применяется конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ). КЛКТ — это один из способов определения локализации мишени. На основе томографических изображений создаётся система координат, которая позволяет точно определить положение мишени. Этот метод сканирования позволяет определить текущее положение мишени и окружающих её структур головного мозга относительно системы координат стереотаксического аппарата [4]. Полученные снимки совмещаются с результатами предыдущих КТ или МРТ.

В соответствии с протоколом гарантии качества (ГК), осуществляется контроль точности наведения КЛКТ и качества получаемого изображения. Эти виды проверок рекомендуется проводить ежемесячно [3]. Для оценки качества изображений используются КЛКТ изображения фантома Catphan. Качество КЛКТ-изображений определяется по нескольким параметрам: пространственное разрешение, контрастность, однородность.

Для измерения пространственного разрешения проводится подсчёт количества разрешимых пар линий на восстановленном изображении фантома.

Степень различия между объектом и шумом определяется контрастом. Контрастность — это соотношение контраста и шума на участке изображения, где присутствуют вставки из разных материалов. Датчик изображений помещается в центр вставок из полистирола и полиэтилена. Для каждого материала измеряется среднее значение пикселя и стандартное отклонение, после чего рассчитывается соотношение.

Для определения однородности используются датчики изображения. С их помощью вычисляются среднее значение пикселя и стандартное отклонение в пяти точках на однородном участке. На основе этих данных определяется максимальное процентное

различие между наибольшими значениями пикселей [5]. Измерения проводятся при двух заданных значениях дозы при компьютерной томографии: 2,5 мГр и 6,3 мГр.

С помощью КЛКТ удаётся достичь высокой точности и стабильности при определении стереотаксических координат (погрешность составляет всего 0,15 мм). При этом точность определения радиологического фокуса достигает 0,4 мм [6].

В других исследованиях также отмечается стабильность КЛКТ в течение длительного времени (4 месяца). Стандартные отклонения для положений маркеров, которые определяют пространственные координаты, составляют менее 0,07 мм [7].

В настоящей работе были проведены оценки качества КЛКТ изображений.

Для оценки стабильности системы КЛКТ на аппарате Гамма-нож на протяжении 5 недель проводились проверки качества изображения. Полученные в результате проверок параметры сравнивались между собой.

Учитывая механические ограничения, накладываемые существующей системой, качество КЛКТ изображений для стереотаксической радиохирургии соответствует требованиям. Анализ проведенного исследования показывает высокое качество и временную стабильность КЛКТ изображений аппарата Гамма-Нож ICON.

1. А.В. Голанов, В.В. Костюченко. Нейрорадиохирургия на Гамма-ноже. //М.: Издательство ИП «Т. А. Алексеева». 2018
2. А.П. Черняев, Е.Н. Лыкова, А.И. Поподько. Медицинское оборудование в современной лучевой терапии. //М.: ООП физического факультета МГУ. 2019
3. Leksell Gamma Knife® Icon™ Instructions for Use ©2015 //Elekta Instrument AB. 1505194 Rev. 01 Draft
4. Position accuracy analysis of the stereotactic reference defined by the CBCT on Leksell Gamma Knife® Icon™// Elekta
5. Design and performance characteristics of a Cone Beam CT system for Leksell Gamma Knife® Icon™// Elekta
6. Duggar WN, Morris B, Fatemi A, Bonds J, He R, Kanakamedala M, Rey-Dios R, Vijayakumar S, Yang C. Gamma Knife® icon CBCT offers improved localization workflow for frame-based treatment. //J Appl Clin Med Phys. 2019 Nov;20(11):95-103. doi: 10.1002/acm2.12745
7. AlDahlawi, I., Prasad, D., & Podgorsak, M. B. (2017). Evaluation of stability of stereotactic space defined by cone-beam CT for the Leksell Gamma Knife Icon. //Journal of Applied Clinical Medical Physics, 18(3), 67–72.

# ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВТОРИЧНЫХ НЕЙТРОНОВ НА ПОГЛОЩЕННУЮ ДОЗУ ПУЧКОМ ПРОТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРЕБЕНЧАТОГО ФИЛЬТРА

К.Р. Кибец<sup>1</sup>, А.А. Щербаков<sup>1,2</sup>, Ф.Р. Студеникин<sup>1,2</sup>, А.П. Черняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, отдел ядерно-физических методов в медицине и промышленности. Россия, 199991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2*

E-mail: kibetc.kr20@physics.msu.ru

Протонная терапия имеет известные преимущества для лечения новообразований сложной локализации. Существуют новые перспективы, связанные с FLASH-терапией при высокой мощности поглощенной дозы [1]. В протонной терапии зачастую для лечения продольных опухолей используется расширение области пика Брэгга путем модификации энергетического спектра пучка. Одним из вариантов технической реализации является гребенчатый фильтр.

Вклад вторичных нейтронов, образованных при взаимодействии изначального пучка протонов с гребенчатым фильтром, не оценивается и не учитывается при планировании облучения. Взяв во внимание тот факт, что относительная биологическая эффективность нейтронов в 2-4 раза больше, чем у протонов [2], то эквивалентная доза, полученная в результате облучения, может превышать рассчитанную дозу, которая была необходима для лечения, что может приводить к различным отрицательным эффектам.

В исследовании оценивается спектр и глубинные распределения вторичных нейтронов, а также их вклад в поглощенную дозу. Расчёт этих величин производится с помощью инструментария GEANT4, в основе которого лежит метод Монте-Карло. Моделируется прохождение пучка протонов, предварительно прошедших систему коллимации, через гребенчатый фильтр и водный фантом. Система коллимации соответствует системе формирования терапевтического пучка комплекса протонной лучевой терапии ИЯИ РАН [3].

1. S. V. Akulinichev, Yu. K. Gavrilov, S. I. Glukhov, A. V. Ivanov, D. A. Kokontsev, T. M. Kulinich, E. A. Kuznetsova, V. V. Martynova, and I. A. Yakovlev//Analysis of Cell Response to Ultrahigh Dose-Rate Proton Irradiation// Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. Vol. 87, No. 8, pp. 1224–1228 (2023)
2. Dan T L Jones, André Wambersie// Review of neutron and proton therapy// Workshop on Nuclear Data for Science and Technology: Medical Applications ICTP, Trieste, Italy (2007)
3. Г. В. Мерзликин, С. В. Акулиничев, И. А. Яковлев// Моделирование протонной лучевой установки в программном пакете TOPAS MC// Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 11, 2023

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

А.А. Ким<sup>1,2</sup>, С.А. Золотов<sup>1,2</sup>, Ф.Р. Студеникин<sup>1,2</sup>, А.П. Черняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: kim@srd.sinp.msu.ru

Задача корректного и точного определения энергетического спектра линейного ускорителя актуальна уже десятки лет. Интерес научного сообщества к спектрам линейных ускорителей проявляется во многих приложениях лучевой терапии и в физике линейных ускорителей, поскольку они играют фундаментальную роль в повышении точности расчета дозы и в формировании наиболее полного описания качества пучка [1].

В медицинских ускорителях информация о спектре фотонов заложена в сопровождающем программном обеспечении и как правило не доступна для медицинских физиков с целью проведения научных исследований. К тому же реальный спектр фотонов ускорителя со временем может отличаться от начального, ввиду технического состояния прибора. Сегодня существует три метода определения энергетического спектра ускорителя. 1) Непосредственное измерение спектра с помощью спектрометра на основе комптоновского рассеяния [2, 3]. 2) Моделирование источников с помощью метода Монте-Карло [4, 5]. 3) Восстановление спектра на основе измеренного распределения поглощенной дозы в опорных материалах [6]. Однако все эти имеют свои недостатки.

Экспериментальное измерение энергетического спектра ускорителя является дорогостоящей процедурой и требует остановки работы ускорителя на продолжительное время, что является весьма проблематичным для медицинских учреждений.

Моделирование источников с помощью метода Монте-Карло требует больших вычислительных мощностей и времени. К тому же для более точного моделирования необходимо иметь информацию о геометрии и материалах конструкции тормозной мишени, которую производители ускорителей не предоставляют.

Восстановление спектра по измеренным распределениям поглощенной дозы представляет из себя обратную задачу, которая сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма первого рода. Однако, зачастую точность такого метода составляет порядка 10%. Однако, широко известно, что искусственные нейронные сети хорошо проявляет себя в решении многих задач, в особенности в решении обратных задач.

В настоящей работе представлена искусственная нейронная сеть которая позволяет восстанавливать энергетический спектр фотонов и электронов на основе измеренных глубинных распределений доз. Искусственная нейронная сеть была обучена на искусственной базе данных сформированной с помощью компьютерного моделирования методом Монте-Карло. База данных для обучения и валидации искусственной нейронной сети состояла из 1200 пар «спектр»-«дозовое распределение по глубине».

1. P. Tsiamas et al. Beam quality and dose perturbation of 6 MV flattening-filter-free linac // *Physica Medica*. 2014. V. 30. No. 1. P. 47-56.
2. Taneja S, Bartol LJ, Culberson W, De Werd LA, et al. Measurement of the energy spectrum of a 6 mv linear accelerator using compton scattering spectroscopy and monte carlo-generated corrections, *International Journal of Medical Physics. Clin Eng Radiat Oncol* 2020;9(04):186. <https://doi.org/10.4236/ijmpcero.2020.94017>.
3. Piermattei A, Arcovito G, Azario L, Bacci C, Bianciardi L, De Sapio E, Giacco C. A study of quality of bremsstrahlung spectra reconstructed from transmission measurements. *Med Phys* 1990;17(2):227–33. <https://doi.org/10.1118/1.596567>.
4. Verhaegen F, Seuntjens J. Monte carlo modelling of external radiotherapy photon beams. *Phys Med Biol* 2003;48(21):R107–64. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/48/21/r01>.
5. Andreo P. Monte carlo techniques in medical radiation physics. *Phys Med Biol*. 1991;36(7):861–920. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/36/7/001>.
6. Deng J, Jiang SB, Pawlicki T, Li J, Ma C-M. Derivation of electron and photon energy spectra from electron beam central axis depth dose curves. *Phys Med Biol*. 2001;46(5):1429–49. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/46/5/308>.

# СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ЭФФЕКТИВНЫХ ДОЗ ПАЦИЕНТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ РЕНТГЕНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУРАХ

Ю.А. Кублинская<sup>1,2</sup>, З.А. Лантух<sup>2</sup>, М.И. Наумов<sup>2</sup>, И.В. Солдатов<sup>2</sup>, Ф.Р. Студеникин<sup>1,3</sup>,  
А.В. Титова<sup>2</sup>, А.П. Черняев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва, Россия

<sup>3</sup>НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

E-mail: yuliya\_zubkova24@mail.ru

В настоящее время рентгенологические исследования являются одним из самых распространенных методов диагностики заболеваний [1]. Использование данного метода позволяет выявлять широкий спектр патологий, в связи с чем доля рентгенологических исследований в общем количестве процедур лучевой диагностики занимает 61,7 % [2].

В соответствии с требованиями СанПиН 2.6.1.1192-03 «доза, полученная пациентом при проведении рентгенологического исследования, подлежит регистрации». Полученная пациентом доза должна вноситься в лист учета доз, а также собираться медицинским учреждением для последующего заполнения формы федерального государственного статистического наблюдения, которая используется для сбора сведений о дозах облучения пациентов при проведении медицинских рентгенорадиологических исследований [3]. Кроме этого, пациент всегда в праве запросить информацию об ожидаемой или полученной дозе облучения в ходе проведения рентгенологического исследования [4].

Достоверная оценка эффективных доз является важным этапом в обеспечении радиационной безопасности пациента. Контроль эффективных доз пациента особенно важно проводить в ситуациях, когда необходимо повторное проведение исследования, например, при длительном лечении и диагностики заболеваний, таких как COVID-19, онкологических заболеваний, сложных переломов. Помимо этого, контроль значений доз, полученных пациентом, необходим для предотвращения необоснованных назначений рентгенологических исследований.

В соответствии с рекомендациями Международного агентства по атомной энергии [5] расчет значений эффективных доз пациентов, получаемых при рентгенологических процедурах, в Российской Федерации осуществляется согласно МУ 2.6.1.3584-19 и может быть проведен двумя способами: с использованием измеренного значения радиационного выхода рентгеновского аппарата или с использованием значения произведения дозы на площадь (ПДП), полученного с помощью клинического дозиметра с проходной камерой. Помимо перечисленных дозиметрических параметров, в расчете должны учитываться технические характеристики рентгеновского аппарата, геометрические параметры исследования и особенности пациента.

Таким образом, основная проблема в регистрации значений эффективных доз облучения пациентов состоит в том, что требуется проведение трудоемких расчетов, так как непосредственное измерение не предусмотрено.

Для учета технических, геометрических и дозиметрических параметров рентгенологических исследований и перехода к значениям эффективной дозы используются коэффициенты перехода. Кроме того, необходимо учитывать и возраст пациента. В существующих методических указаниях значения коэффициентов перехода были вычислены для «стандартного» человека и для наиболее часто встречающихся на практике рентгенологических процедур. Данные коэффициенты включают в себя: возраст пациента, тип процедуры, проекцию исследования, размер поля, расстояние источник-приёмник, напряжение на рентгеновской трубке.

Однако в реальности пациент имеет индивидуальные параметры, а характеристики исследования могут отличаться от заложенных в значении коэффициента перехода. В

результате оценка значения эффективной дозы получается усредненной и может отличаться от реального значения [6].

Таким образом, важно постоянно совершенствовать и повышать эффективность средств дозиметрического контроля. При этом, существует необходимость в создании универсального программного обеспечения, позволяющего оптимизировать алгоритм расчета эффективных доз пациента, что в свою очередь позволит ускорить процесс и избежать ошибок. Также представляется интересным реализация корректировки переходных коэффициентов с учетом пола, веса, возраста и результатов последних радиобиологических исследований в этой области.

Целью данной работы являлась разработка программного обеспечения для расчета эффективных доз пациентов, получаемых при рентгенологических процедурах.

Для вычисления эффективных доз была выбрана методика расчета на основе результатов измерения произведения дозы на площадь. Для перехода к значениям эффективной учитывались известные коэффициенты, зависящие от возраста пациента, типа процедуры, проекции исследования, размера поля, расстояния источник-приемник, напряжения на рентгеновской трубке. В результате было разработано программное обеспечение для расчета эффективных доз пациентов, размещенное на онлайн ресурсе для открытого доступа и использования в медицинских организациях.

Дальнейшим этапом исследования станет усовершенствование программного обеспечения, оптимизация параметров и разработка собственных средств дозиметрического контроля.

1. Ю.А. Васильев, Н.Д. Кудрявцев, А.Н. Мухортова, И.В. Солдатов, А.В. Владимирский. Показатели деятельности отделений лучевой диагностики Департамента здравоохранения города Москвы в 2016–2022 гг. // Менеджер здравоохранения. 2024, № 5. [Электронный ресурс] URL: <https://www.idmz.ru/jurnali/menedger-zdravookhraneniija/2024/5/pokazateli-deiatelnosti-otdelenii-luchevoi-diagnostiki-departamenta-zdravookhraneniia-goroda-moskvy-v-2016-2022-gg> (дата обращения: 10.10.2024).
2. А.В. Алехнович, Ю.В. Дружинина, З.А. Лантух и др. Ретроспективный анализ доз облучения пациентов при рентгенорадиологических исследованиях в многопрофильных медицинских организациях Московского региона // Госпитальная медицина: наука и практика. 2023, Т. 6, № 3, 50-58. [Электронный ресурс] URL: <https://telemedai.ru/biblioteka-dokumentov/retrospektivnyj-analiz-doz-oblucheniya-pacientov-pri-rentgenoradiologicheskikh-issledovaniyah-v-mnogoprofilnyh-medicinskih-organizacijah-moskovskogo-regiona> (дата обращения: 10.10.2024).
3. Приказ от 30 ноября 2022 г. № 880 «Об утверждении формы федерального статистического наблюдения с указаниями по ее заполнению для организации федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека федерального статистического наблюдения за санитарным состоянием субъекта Российской Федерации». [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1300139297> (дата обращения: 10.10.2024).
4. Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения». [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/9015351> (дата обращения: 10.10.2024).
5. International Atomic Energy Agency. Dosimetry in diagnostic radiology: an international code of practice. Technical reports series № 457. Vienna: IAEA. 2007. [Электронный ресурс] URL: <https://www.iaea.org/publications/7638/dosimetry-in-diagnostic-radiology-an-international-code-of-practice> (дата обращения: 10.10.2024).
6. Ю.В. Дружинина, А.В. Водоватов, С.Е. Охрименко. Сравнительный анализ эффективных доз, рассчитанных по разным методикам, для пациентов при проведении исследований на рентгенодиагностических аппаратах общего назначения // Гигиена и санитария. 2022, Т. 101, № 2, 124-131. [Электронный ресурс] URL: <https://www.rjhas.ru/jour/article/view/2004> (дата обращения: 10.10.2024).

# ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ ОКИЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОЛЕКУЛЕ МИОГЛОБИНА

Е. А. Кузунова<sup>1</sup>, У.А. Близнюк<sup>1,2,3</sup>, А.П. Черняев<sup>1,3</sup>, П.Ю. Борщеговская<sup>1,2,3</sup>, И. А. Родин<sup>2,4</sup>, М.И. Торопыгина<sup>4</sup>, В.С. Ипатова<sup>1</sup>, С.А. Золотов<sup>1</sup>, Е.К. Козлова<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Химический факультет, Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, Москва, Россия

E-mail: kuzunova.ea21@physics.msu.ru

Радиационная обработка может приводить к изменению молекул тканей: при воздействии ионизирующим излучением образуются свободные радикалы, которые взаимодействуют с атомами и молекулами вещества, нарушаются химические связи молекул [1-3]. Так, например, излучение способно развить окислительные процессы в молекуле миоглобина схожие с процессами окисления гемоглобина в эритроцитах [4-5].

В качестве объекта исследования был выбран экстрагированный в раствор 0,9% NaCl из мяса говяжьей вырезки миоглобин. Экспериментальные образцы растворов облучались на УФ-лампе ООО «Ферропласт Медикал» (Россия, Ярославская область) при длине волны 254 нм в течение 5, 10, 15, 20, 25, 30 минут. Количественная оценка концентраций производных миоглобина (оксимиоглобин (MbO<sub>2</sub>), дезоксимиоглобин (Mb), метмиоглобин (MetMb)) в говядине основана на аппроксимации экспериментально измеренных спектров (спектрофотометр УФ-3000 («ТМ ЭКОВЬЮ», Россия) [6]) растворов миоглобина функцией вида:

$$A_l(\lambda_l)_{\text{теор}} = \varepsilon_{\text{Mb},l} C_{\text{Mb}} L + \varepsilon_{\text{MbO}_2,l} C_{\text{MbO}_2} L + \varepsilon_{\text{MetMb},l} C_{\text{MetMb}} L + \frac{E}{\lambda^4} + K,$$

где  $l$  - количество длин волн;  $\varepsilon_{\text{Mb},l}(\lambda_l)$ ,  $\varepsilon_{\text{MbO}_2}(\lambda_l)$  и  $\varepsilon_{\text{MetMb},l}(\lambda_l)$  - молярные коэффициенты поглощения Mb, MbO<sub>2</sub>, MetMb, соответственно;  $C_{\text{Mb}}$ ,  $C_{\text{MbO}_2}$ , и  $C_{\text{MetMb}}$  - концентрации Mb, MbO<sub>2</sub>, MetMb, соответственно;  $L = 1$  см - толщина слоя раствора;  $E$  и  $K$  - коэффициенты рассеяния [5].

Поскольку процессы окисления, вызванные ионизирующим излучением, бактериальная активность, кислород и активные формы кислорода (АФК), возникающие в результате ионизирующего излучения, влияют на органолептические свойства и химический состав облученной говядины, необходимо контролировать концентрацию метмиоглобина  $C_{\text{MetMb}}$  во время хранения.

Было показано, что в необлученных образцах говядины в течение 8 суток хранения концентрация метмиоглобина увеличивалась в следствие окислительных процессов с 11,77% до 40,77%.

Была построена зависимость содержания  $C_{\text{MetMb}}$  в растворах миоглобина от времени облучения в 0, 4 и 7 день хранения мяса. При воздействии ультрафиолетового излучения с длиной волны 254 нм наблюдается нарастающий эффект перехода оксимиоглобина в метмиоглобин для времен облучения до 20 минут. При большем времени облучения весь оксимиоглобин переходит в метмиоглобин. При дальнейшем хранении процессы порчи мяса превалируют над воздействием излучения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №22-63-00075.

1. Черняев А. П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина / А.П.

- Черняев // М: Издательство Московского университета — 2019. — 231 с.
2. Алимов А. С. и др. Применение пучков ускоренных электронов для радиационной обработки продуктов питания и биоматериалов // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2017. — Т. 81. — №. 6. — С. 819-823.
  3. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения) / Под ред. В.К. Мазурика, М.Ф. Ломанова. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 448 с. — ISBN 5-9221-0388-1.
  4. Козлова, Е. К., et al. ОКИСЛИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА КРАСНЫЕ КЛЕТКИ КРОВИ. // Медицинская физика 2 (2014): 63-70.
  5. Bliznyuk, Ulyana, et al. Hemoglobin Derivatives in Beef Irradiated with Accelerated Electrons. // Molecules 28.15 (2023): 5773.
  6. Ссылка на спектрофотометр УФ-3000 <https://istina.msu.ru/equipment/card/615320740/>.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ «ХИЩНИК-ЖЕРТВА» ДЛЯ ОПИСАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОДУКТАХ ПИТАНИЯ

Кусак А.А.<sup>1</sup>, Борщеговская П.Ю.<sup>1,2</sup>, Никитченко А.Д.<sup>1</sup>, Ипатова В.С.<sup>2</sup>, Близнюк У.А.<sup>1,2</sup>,  
Черняев А.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: kusak.aa22@physics.msu.ru

Поведение биологических объектов описывается различными математическими моделями [1]. В этой работе были изучены основные принципы работы модели «хищник-жертва» Лотки-Вольтерры [2]. Система дифференциальных уравнений данной модели была решена с использованием программного кода на MATLAB, при этом алгоритм позволяет находить все неизвестные параметры системы на основе введённых экспериментальных данных с точностью более  $4.154329545280693e-18$ . В качестве экспериментальных данных в данной работе для проверки работы алгоритма были использованы значения плотности популяций инфузории *Paramecium bursaria* и одноклеточного гриба *Schizosaccharomyces pombe* [3], а также количество колониеобразующих единиц на грамм в охлажденном мясе индейки после облучения ускоренными электронами во время хранения [4].

Модель «хищник-жертва» – является широко используемой математической моделью в биологии, экологии и медицине [1, 2]. Система дифференциальных уравнений, для описания конкурирующего поведения различных популяций микроорганизмов, записывается в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = N(a - bP) \\ \frac{dP}{dt} = P(cN - d) \end{cases}'$$

где  $a$  – коэффициент рождаемости жертв,  $d$  – коэффициент смертности хищников в единицу времени. Вклад в рост скорости численности хищника регулируется параметром  $c$ , соответственно  $b$  регулирует сокращение численности жертв из-за влияния хищников. В модели есть допущения: неограниченный объём питательной среды, жертвы погибают только от влияния хищников, хищники питаются только жертвами, воздействием внешних факторов можно пренебречь.

На рис. 1 представлен результат работы алгоритма с использованием экспериментальных данных демонстрации периодических колебаний численности животных из работы [3]. Были получены необходимые колебания и качественная зависимость плотности двух конкурирующих популяций: инфузории *Paramecium bursaria* (хищник) и гриба *Schizosaccharomyces pombe* (жертва) от времени. Различия в амплитудах для двух популяций и сдвиг по фазе обусловлены физическими причинами: хищнику необходимо «догнать» жертву и при большом потреблении пищи популяция растёт по закону Мальтуса, а затем резко убывает.

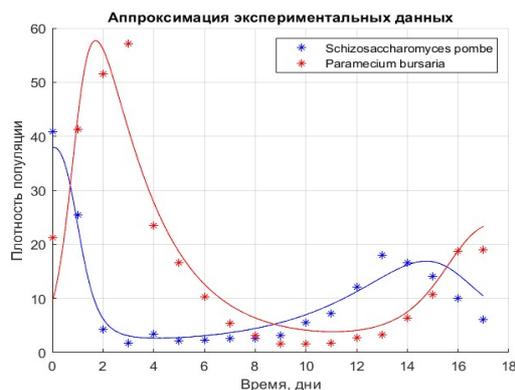


Рис. 1. Пример работы алгоритма на основе модели Лотки-Вольтерра с использованием экспериментальных данных о двух конкурирующих популяциях: инфузории *Paramecium bursaria* (красный) и гриба *Schizosaccharomyces pombe* (синий) от времени хранения из работы [3].

На рисунке 2 приведена работа алгоритма по экспериментальным данным из работы [4], где оценивалось поведение жизнеспособных клеток в облученном мясе индейке во время 15 дней хранения.

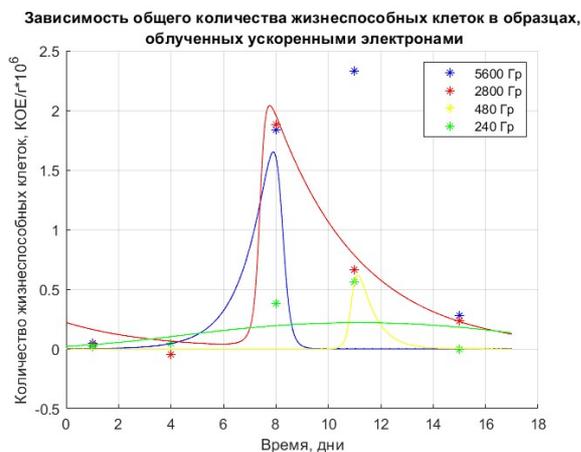


Рис. 2. Пример работы алгоритма на основе модели Лотки-Вольтерра с использованием экспериментальных данных о количестве жизнеспособных клеток в мясе индейки после облучения в дозах 240 Гр (зеленые точки), 480 Гр (желтые), 2800 Гр (красные) и 5600 Гр (синие) от времени хранения из работы [4].

Как видно, модель «хищник-жертва» позволила описать данные первых колебаний, однако спрогнозировать рост клеток данная модель не сумела, что говорит о необходимости учета других параметров, включая ограниченный питательный ресурс, радиоустойчивость биологических популяций к излучению, и их взаимная конкуренция как между собой, так и за питательный ресурс. В дальнейшем планируется улучшение классической модели Лотки-Вольтерра для создания более точных прогнозов о сроках годности охлажденной продукции.

1. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде. М.: ООО «Маска», 2022. 638 с.
2. Fornalski K. Radiation and evolution: From Lotka-Volterra equation to balance equation. International Journal of Low Radiation. 2016. 10. 222-233.
3. Gause G.F. The struggle for existence. The WILLIAMS & WILKINS COMPANY, 1934.
4. Study of the Effectiveness of Treating Trout with Electron Beam and X-Ray Radiation / Chernyaev A.P., Avdyukhina V.M., Bliznyuk U.A et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. 84(4), 385-390.

# ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ПУЧКА ФОТОНОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ В ОБЛУЧАЕМЫХ ОБЪЕКТАХ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Любомудров А.П.<sup>1</sup>, Золотов С.А.<sup>1,2</sup>, Ким А.А.<sup>1,2</sup>, Студеникин Ф.Р.<sup>1,2</sup>,  
Черняев А.П.<sup>1,2</sup>, Швецова Е.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: liubomudrov.ap22@physics.msu.ru

На сегодняшний день ускорительная техника и радиационные технологии находят применение в множестве разнообразных сфер человеческой деятельности: науке, медицине, пищевой промышленности, безопасности и др. [1]. В лучевой терапии в большинстве случаев в качестве частиц облучения используются фотоны из-за меньшего сечения взаимодействия по сравнению с электронами и, как следствие, лучшего проникающего эффекта [2]. Важным аспектом успешного применения ускорителей заряженных частиц является оценка ожидаемого распределения поглощенной дозы по объему облучаемого объекта. Для компьютерного моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество широкое распространение получил метод Монте-Карло [3]. Для научных исследований в области медицинской физики и для улучшения эффективности лучевой терапии необходимо знание энергетического спектра пучка частиц, например, для применения в нестандартных ситуациях, таких как наличие имплантатов у пациентов, которые не учитываются в штатных системах планирования [5, 7, 8]. Однако, на практике точный спектр может быть неизвестен и при расчете методом Монте-Карло упрощается моноэнергетичным пучком с наиболее вероятной энергией [8].

Целью данной работы являлась оценка влияния энергетического спектра пучка фотонов с энергией до 10 МэВ на распределение поглощенной дозы по объему облучаемых водных фантомов в форме куба и сферы.

Было проведено компьютерное моделирование облучения объектов разными типами пучков фотонов, представленными на рис. 1. Первый пучок, представленный на рис. 1 - а, задавался как моноэнергетический с энергией 0,475 МэВ. Вторым пучком, представленный на рис. 1 - б, задавался как спектр линейного ускорителя фотонов Varian TrueBeam [6]. Поперечный размер каждого пучка составлял 6 см × 6 см, количество фотонов в пучке –  $10^5$ . Для реализации метода Монте-Карло в данной работе был использован программный пакет Geant4, разработанный Geant4 Collaboration в CERN [4].

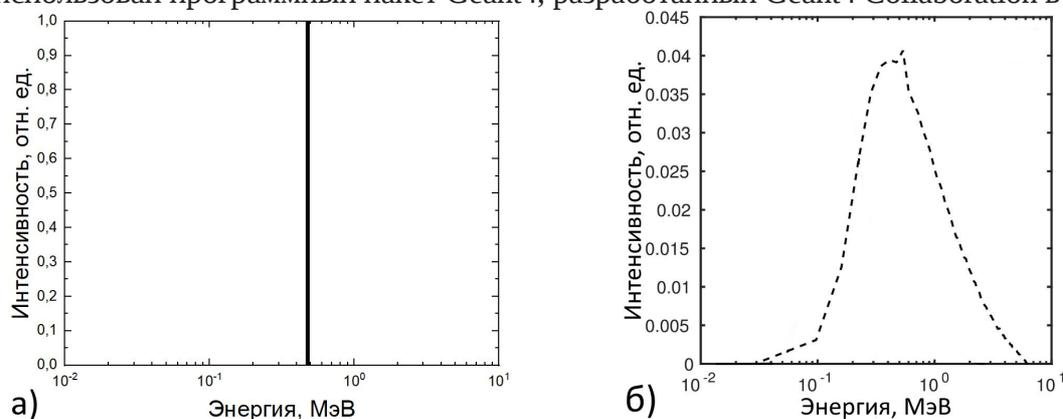


Рисунок 1. Распределение количества фотонов в пучке по энергии:

а) – моноэнергия 0,475 МэВ, б) – спектр ускорителя Varian TrueBeam

Модельные объекты задавались в виде куба и сферы. Материалом объектов была выбрана вода, так как стационарные водные фантомы широко применяются для проведения дозиметрических измерений излучения фотонов и электронов [9]. Ребро куба – 6 см, диаметр сферы – 6 см. Расстояние от источника до объекта – 5 мм, среда прохождения пучка до объекта – воздух. Схема моделируемого облучения представлена на рис. 2.

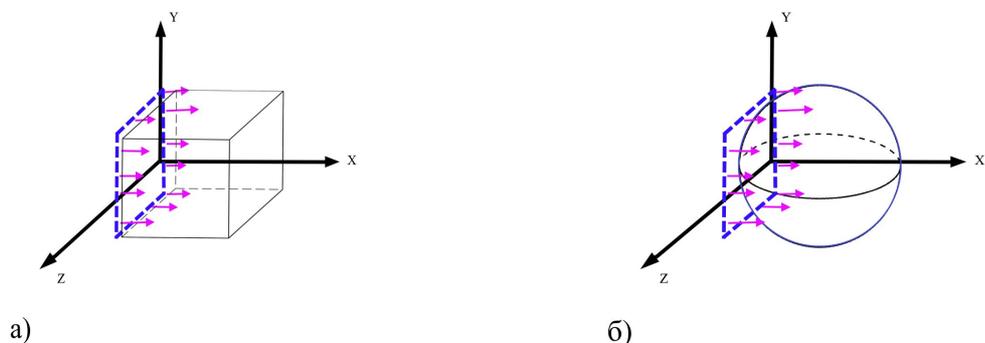


Рис. 2. Схема облучения модельных объектов из воды фотонами: а) куб, б) сфера

В результате исследования, было установлено, что упрощение энергетического спектра пучка при моделировании моноэнергетическим пучком приводит к ошибке до 17%, которую необходимо учитывать при планировании облучения. При этом ошибка зависит не только от различий между реальным спектром пучка ускорителя электронов и упрощенным моноэнергетическим спектром, заданным при моделировании, но также имеет свое значение для объектов различной геометрии.

1. Черняев А.П. Радиационные технологии: наука, народное хозяйство, медицина. М.: КДУ, 2018
2. Editor E. B. Podgorsak. Radiation Oncology Physics: a Handbook for Teachers and Students; sponsored by IAEA, 2005
3. PENELOPE/PRIMO-calculated photon and electron spectra from clinical accelerators / Radiation Oncology, 2019
4. Geant4 - A Simulation Toolkit, S. Agostinelli et al., Nucl. Instrum. Meth. A 506 250-303 (2003).
5. Analysis of Dose Distribution According to the Initial Electron Beam of the Linear Accelerator: A Monte Carlo Study / Journal of Radiation Protection and Research, 2018
6. Multi-layer imager design for mega-voltage spectral imaging / Physics in Medicine and Biology, 2018
7. Commissioning measurements for photon beam data on three TrueBeam linear accelerators, and comparison with Trilogy and Clinac 2100 linear accelerators / Journal of applied clinical medical physics, 2013
8. Effects of Initial Electron Beam Parameters of a Linear Accelerator on the Properties of Bremsstrahlung Radiation in a Radiotherapy Setting / Physics of Particles and Nuclei Letters, 2016
9. VHEE beam dosimetry at CERN Linear Electron Accelerator for Research under ultra-high dose rate conditions / Biomedical Physics and Engineering Express, 2021

# СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ: ОПТИМИЗАЦИЯ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ И ИННОВАЦИИ В РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А.А. Маслахова<sup>1</sup>, А.А. Щербаков,<sup>1,2</sup> Ф.Р. Студеникин<sup>1,2</sup>, А.П. Черняев<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: maslakhova.aa22@physics.msu.ru

Компьютерная томография (КТ) является одним из наиболее распространенных методов медицинской визуализации, позволяющим получать высококачественные объемные изображения внутренних органов и тканей, которые играют ключевую роль в диагностике и планировании лечения. Благодаря своей способности детализировать анатомические структуры, КТ широко используется в различных медицинских областях, включая травматологию, онкологию и кардиологию. Однако использование ионизирующего излучения в КТ вызывает беспокойство по поводу радиационной безопасности пациентов.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в снижении доз облучения при проведении КТ-исследований. Современные достижения включают разработку низкодозовых протоколов и передовых алгоритмов реконструкции изображений, которые позволяют уменьшить радиационную нагрузку без потери качества визуализации[1].

Перспективные направления в области КТ включают интеграцию искусственного интеллекта для автоматизации диагностики и оптимизации параметров сканирования, что может значительно повысить эффективность и безопасность процедур[2]. Продолжающиеся исследования направлены на разработку новых методов и технологий, которые обеспечат еще более точную и безопасную диагностику, минимизируя риск для пациентов.

Настоящая работа посвящена обзору современных достижений и тенденций в области компьютерной томографии, с акцентом на физические основы, аппаратные технологии и инновационные методы снижения доз облучения.

1. Ginat D. T., Gupta R. Advances in computed tomography imaging technology //Annual review of biomedical engineering. – 2014. – Т. 16. – №. 1. – С. 431-453.
2. McCollough C. H., Leng S. Use of artificial intelligence in computed tomography dose optimisation //Annals of the ICRP. – 2020. – Т. 49. – №. 1\_suppl. – С. 113-125.

# ВЛИЯНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ В КЛУБНЯХ КАРТОФЕЛЯ СОРТА ЛИНА

Межетова И.Т.<sup>1</sup>, Ипатова В.С.<sup>2</sup>, Близнюк У.А.<sup>1,2</sup>, Борщеговская П.Ю.<sup>1,2</sup>, Болотник Т.А.<sup>3</sup>,  
Зубрицкая Я.В.<sup>1,2</sup>, Козлова Е.К.<sup>1,4</sup>, Малюга А.А.<sup>5</sup>, Никитченко А.Д.<sup>1</sup>, Опруненко А.Ю.<sup>3</sup>,  
Родин И.А.<sup>3,4</sup>, Чуликова Н.С.<sup>5</sup>, Черняев А.П.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Российская Федерация.*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, г. Москва, Российская Федерация.*

<sup>3</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет, г. Москва, Российская Федерация.*

<sup>4</sup> *ФГАОУ ВО Первый МГМУ имени И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский Университет), г. Москва, Российская Федерация.*

<sup>5</sup> *Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН, Новосибирская область, р.п. Краснообск, Российская Федерация.*

E-mail: mezhetova.it19@physics.msu.ru

Радиационная обработка продуктов – перспективное направление развития в области пищевой промышленности, позволяющее решить большой спектр задач: продление сроков хранения продукции; эффективное подавление активности патогенной микрофлоры (грибы, бактерии, микроорганизмы); стимулирование прорастания сельскохозяйственных культур и др [1,2]. Однако в связи с распространением данного вида обработки в мире, в отсутствие обязательной маркировки облученной продукции, возможны случаи повторной обработки, что может привести к ухудшению органолептических свойств продукта [3]. В связи с этим, важной задачей является поиск методов и биохимических маркеров, с помощью которых возможно качественно установить факт проведения радиационной обработки конкретного продукта.

Целью данной работы было исследование влияния рентгеновского излучения на биохимические показатели семенного картофеля.

Клубни картофеля сорта Лина облучали на рентгеновском аппарате РАП-100 с рентгеновской трубкой 1БПВ23-100 с молибденовым анодом, максимальная энергия тормозных фотонов – 80 кэВ (ФМБЦ им. Бурназяна, Россия). Для обеспечения максимальной равномерности дозы, облучение клубней проводилось с двух противоположных сторон в дозах 0 Гр, 100 Гр, 1 000 Гр и 5 000 Гр. Облучение образцов проводилось из расчета трехкратной повторяемости.

Для проведения дальнейшего анализа из облученных клубней был подготовлен экстракт, после чего проводился газовый хромато-масс-спектрометрический анализ на аппарате Shimadzu GCMS-QP2010 Ultra (Shimadzu, Япония), снабженного автоматическим устройством ввода паровой фазы HT200H Headspace Autosampler (HTA, Италия). Соединения идентифицировали путем сравнения полученных масс-спектров неизвестных соединений, со спектрами из библиотеки масс-спектров NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library 2008 (NIST 08) с помощью программного обеспечения GCMSsolution. По результатам ГХ-МС анализ было обнаружено 9 соединений, относящихся к классам альдегидов (ацетальдегид, пропаналь, 2-метил,бутаналь, 3-метил,бутаналь, 2-метил,гексаналь), кетонов (ацетон), спиртов (2-пропанол,2-метил), фуранов (фуран,2-пентил-) и алканов (пропан,2-этокси-2-метил-). Анализ поведения летучих соединений выявил нелинейные зависимости концентраций от поглощенной картофелем дозы. Альдегиды, за исключением, гексаналя, показали схожие тенденции:

их концентрация увеличивалась и была максимальна при 100 Гр, после чего происходило снижение концентрации. Гексаналь присутствовал только в одном не облученном образце, и во всех клубнях, облученных в дозе 1 000 Гр. Средняя концентрация фуран,2-пентила- возрастала, по мере увеличения поглощенной дозы. Также в образцах, облученных в дозе 1 000 Гр был обнаружен спирт изопропил, который отсутствовал в контрольных образцах.

Анализ восстанавливающих сахаров проводился по методике ГОСТ Р 54905-2012 с использованием спектрофотометра УФ-3000 (ТМ ESOVIEW, Россия). Оптическую плотность экстрактов смотрели колориметрическим методом с ДНС-реактивом при длине волны 540 нм. По результатам данного исследования была также установлена нелинейная зависимость концентрации восстанавливающих сахаров в облученном картофеле сорта Лина от поглощенной дозы (рис. 1).

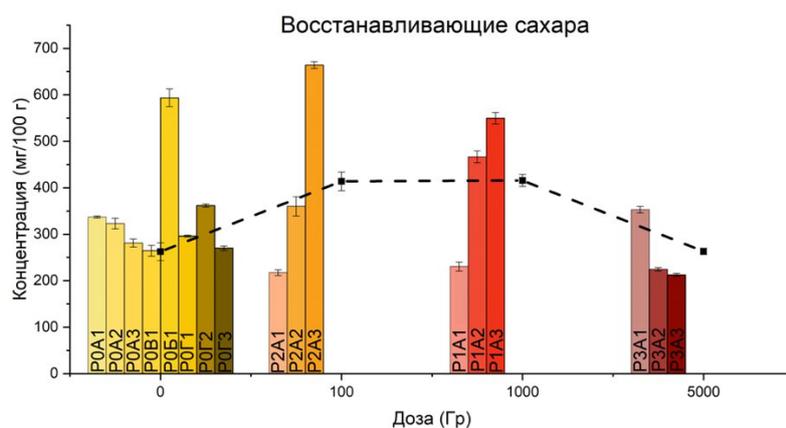


Рис 1. Зависимость концентрации восстанавливающих сахаров от дозы, поглощенной клубнями картофеля. P0 – контрольные необлученные образцы, P1, P2 и P3 – образцы облученные в дозе 1000 Гр, 100 Гр и 5000 Гр соответственно. A1-3 – повторность исследований.

Как видно, наблюдается рост средней концентрации восстанавливающих сахаров при значениях поглощенной дозы до 1 000 Гр, после чего начинается спад. Это свидетельствует о том, что при проведении радиационной обработки, крахмал, который является полисахаридом и входит в состав картофеля, разрушается до моносахаров, концентрация которых и оценивается данным методом. Однако, при больших значениях поглощенной дозы, моносахара также претерпевают распад на другие низкомолекулярные соединения, концентрацию которых предложенными методами оценить не представляется возможным.

Таким образом, анализ восстанавливающих сахаров в перспективе может быть использован не только для качественного установления факта проведения радиационной обработки, но и для количественного определения диапазона поглощенной дозы. Анализ летучих органических соединений выявил преимущественно нелинейные зависимости от дозы облучения, которые нуждаются в дальнейшем исследовании с последующим построением математических моделей, способных косвенно оценивать эффективный диапазон доз для данной категории продукции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта №22-63-00075.

1. Codex Alimentarius Commission et al. Codex general standard for irradiated foods //Codex stan. – 2003. – С. 106-1983.
2. А.П. Черняев, Радиационные технологии (Университет «Книжный Дом», Москва, 2019).
3. Ravindran R., Jaiswal A. K. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods //Food chemistry. – 2019. – Т. 285. – С. 363-368.

# ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА СОВРЕМЕННЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Н. А. Никитин<sup>1</sup>, А. С. Жаров<sup>2</sup>, А. А. Ким<sup>1,2</sup>, А. В. Попов<sup>1</sup>, Ф. Р. Студеникин<sup>1,2</sup>,  
Д. В. Соснов<sup>1</sup>, А. П. Черняев<sup>1,2</sup>, А. А. Щербаков<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: nikitin.na16@physics.msu.ru

В ходе стремительного движения научно-технологического прогресса происходит развитие и совершенствование медицинского оборудования. Исследования и инновации в области медицинской техники способствуют развитию рентгеновских диагностических систем. В связи с этим данный доклад посвящен общему обзору технологий и перспектив развития современных рентгеновских диагностических аппаратов.

В настоящее время наблюдается тенденция к развитию технологической стороны рентгеновских диагностических аппаратов, к примеру создание рентгеновской трубки для проекционной рентгенографии нового поколения.

Клиническая практика прошлых лет показала, что для успешной реализации метода проекционной рентгенографии размер фокусного пятна используемых рентгеновских трубок не должен превышать 100 мкм. В соответствии с ГОСТ 22091.9–86 такие рентгеновские трубки относятся к классу микрофокусных. Многолетние исследования показали, что в случае использования микрофокусных рентгеновских трубок при формировании рентгеновского изображения проявляется целый ряд эффектов, таких как: снижение экспозиционной дозы, увеличение глубины резкости и контраста, эффект псевдообъемного изображения и фазового контраста. Однако, вследствие ограничения мощности, подводимой к мишени микрофокусной рентгеновской трубки электронным пучком малого сечения, интенсивность генерируемого ею излучения по сравнению с «обычной» рентгеновской трубкой невелика. Это существенно ограничивает область применения микрофокусной рентгенографии в таких социально важных областях медицинской диагностики, как ангиография, маммография, флюорография, томография и др. Интенсивность излучения может быть повышена путем увеличения как тока трубки, так и напряжения на ней, поэтому при создании нового поколения микрофокусных рентгеновских трубок были использованы оба метода [1].

Отдельно необходимо выделить проблему проведения рентгенодиагностических исследований в неспециализированных условиях, например «на дому» у пациента. Важное значение приобретает вопрос обеспечения радиационной безопасности как для проводящего исследование персонала, так и для других вовлечённых в процесс участников.

Исходя из исследования эффективности мобильной рентгенографии ОГК в отделении интенсивной терапии, проведённого Palazzetti V. и др. (2013), диагностическая эффективность портативной рентгенографии грудной клетки для пациентов, госпитализированных в отделение интенсивной терапии, составляет 84,5% [2]. Помимо этого, портативные технические средства в рентгенографии в настоящее время также предлагаются для эксплуатации в стоматологической практике [3,4].

При использовании «ручных» рентгеновских аппаратов существует небольшое увеличение уровня дозы для рентгенолаборантов, однако величина дозы остается значительно ниже рекомендуемых уровней. Положение аппарата относительно

рентгенолаборанта имеет существенное влияние на общую поглощенную дозу. Наличие индивидуальных дозиметров для контроля уровня облучения рекомендуется. Кроме того, руководство, обучение и протоколы уровня облучения должны располагаться на месте эксплуатации аппарата и строго соблюдаться; необходимы регулярные проверки, чтобы обеспечить соблюдение всех правил [5].

Из перспектив развития рентгеновских диагностических аппаратов можно отдельно выделить направление томографии и двойной энергии. В рентгенографии общего назначения традиционная линейная томография позволяет получать послойные снимки объекта, но за один проход излучателя получается изображение лишь одного среза. В результате, в случае необходимости получения послойного изображения всего органа процедура проводится не менее 10 раз, что приводит к значительному увеличению радиационной нагрузки на пациента и длительности процедуры. Метод компьютерной томографии позволяет получить информацию обо всем объеме грудной клетки, но существенно увеличивает дозовую нагрузку на пациента [6]. Технология томосинтеза находится на стыке линейной и компьютерной томографии (КТ), совмещая в себе высокую информативность и низкую дозовую нагрузку. Главным достоинством данных технологий является возможность их применения на телеуправляемых столах-штативах с цифровым плоскопанельным динамическим детектором без существенных доработок аппаратной части, а также на современных аппаратах на два рабочих места [7,8].

Предполагается, что внедрение технологий двойной энергии и томосинтеза в медицинскую практику в ряде случаев позволит отказаться от проведения дообследований в кабинетах компьютерной томографии. Это поможет разгрузить кабинеты КТ от рутинных обследований и обеспечить доступ к ним большему количеству пациентов.

1. Мазуров А. И., Элинсон М. Б. Современное состояние медицинской рентгенотехники // НИПК «Электрон».
2. Palazzetti V, Gasparri E, Gambini C, Sollazzo S, Saric S, Salvolini L, et al. Chest radiography in intensive care: an irreplaceable survey, *Radiol Med (Torino)*. 2013 Aug;118(5):744-51.
3. Клестова И. А., Васильев А. Ю., Потрахов Н.Н. Значение панорамной микрофокусной рентгенографии в оценке стоматологического статуса и идентификации личности у военнослужащих по призыву // Изд-во Радиология – Практика №4(58), 2016. – 19 с.
4. Потрахов Е. Н. Радиационная нагрузка при применении портативных рентгеновских аппаратов семейства «ПАРДУС» в стоматологии // *Медицинская техника*. 2012, №5. – С.37-40.
5. Makdissi J, Pawar RR, Johnson B, Chong BS. The effects of device position on the operator's radiation dose when using a handheld portable X-ray device. *Dentomaxillofac Radiol*. 2016;45(3):20150245.
6. J. M. Sabol, B. Heckel «Techniques for Very Low Dose Thoracic Digital Tomosynthesis» / *Proceedings of conference of European Society of Thoracic Imaging (ESTI)*, 2012.
7. Tsutomu Gomi « X-ray digital linear tomosynthesis imaging» / *Journal of Biomedical Science and Engineering*, Issue 4, 2011. — 444 с.
8. S. Richard «Optimization of imaging performance and conspicuity in dual-energy x-ray radiography» / *Department of Medical Biophysics, University of Toronto*, 2008. – 160 с.

# ГЕНЕРАЦИЯ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В УСКОРИТЕЛЕ ЭЛЕКТРОНОВ С ЦИКЛОТРОННЫМ АВТОРЕЗОНАНСОМ

Н. А. Никитин<sup>1</sup>, С. А. Золотов<sup>1,2</sup>, Г. М. Казарян<sup>1</sup>, В. Л. Саввин<sup>1</sup>, Ф. Р. Студеникин<sup>1,2</sup>,  
А. П. Черняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: nikitin.na16@physics.msu.ru

Доклад посвящен моделированию генерации тормозного излучения в ускорителе электронов с циклотронным авторезонансом. Традиционные источники рентгеновского излучения (рентгеновские трубки) генерируют пучки электронов с энергией в диапазоне 50-150 кэВ. В этих источниках электроны ускоряются стационарным электрическим полем до столкновения с термостойкой мишенью. Рентгеновские трубки с жестким излучением обычно используют высоковольтные источники питания с большими массогабаритными параметрами. Значительно снизить уровень напряжения питания позволяет применение высокочастотного принципа ускорения электронов [1].

Рассмотрен ускоритель, в котором электронный пучок ускоряется под действием поперечного высокочастотного электрического поля резонатора. Внешняя магнитная система ускорителя поддерживает циклотронный авторезонанс частоты вращения электронов с частотой высокочастотного электрического поля. Данная схема позволит реализовать компактный электровакуумный источник рентгеновского излучения с большим значением тока пучка (до 1 А), способный производить жесткое рентгеновское излучение с энергией выше 200 кэВ [2]. Использование резонатора с ламелями и емкостным зазором позволяет существенно снизить (в 5–10 раз) влияние взаимодействия с высокочастотной магнитной компонентой СВЧ поля в резонаторе [3].

На оси резонатора формируется неоднородное вдоль длины статическое магнитное поле для коррекции релятивистских эффектов и поддержания резонанса циклотронного движения электронов с СВЧ полем. Электроны, двигающиеся в резонаторе по спиральным траекториям с возрастающим радиусом, наращивают свою энергию циклотронного вращения и поступают в выходную секцию с расширяющимся магнитным полем. Здесь энергия вращения электронов трансформируется в энергию их поступательного движения вдоль оси секции под действием радиальной компоненты расширяющегося магнитного поля. На выходе секции электроны сталкиваются с многослойной мишенью различной конфигурации (рис. 1). В результате столкновения энергия ускоренного движения электронов преобразуется в энергию тормозного рентгеновского излучения, которое выводится через вакуумное окно на торце секции.

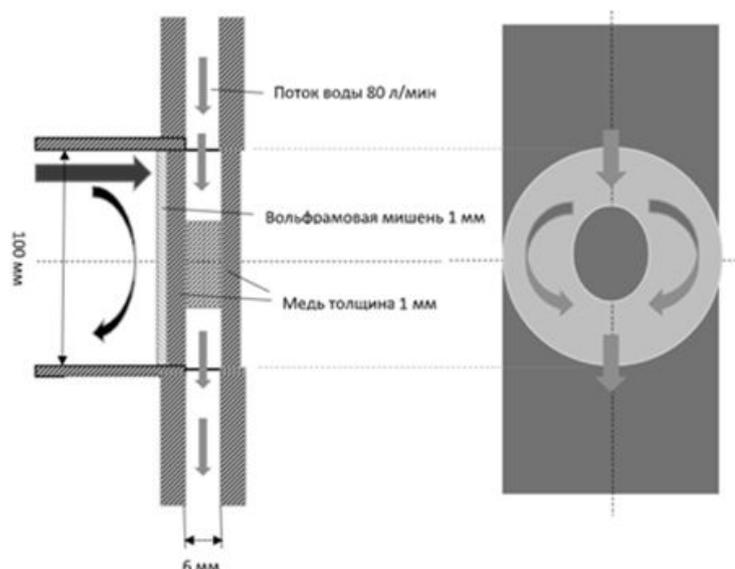


Рис.1 Схема многослойной мишени ускорителя

Проведено моделирование процессов, происходящих при торможении электронов в веществе, и тормозного рентгеновского излучения в программе Geant4 [4]. Изучены энергетическое и угловое распределения тормозного рентгеновского излучения для двух конфигураций мишени, выявлены оптимальные режимы работы циклотронного ускорителя электронов. Произведена оптимизация характеристик мишеней циклотронного ускорителя электронов с точки зрения эффективности.

На основе полученных диаграмм направленности, глубинных дозовых распределений и энергетических карт для модели облучаемого тела можно сделать вывод о выборе оптимального режима работы циклотронного ускорителя электронов: для пучка электронов с током 1А и энергией 400 кэВ при расстоянии 20 см облучаемого тела от источника излучения, время облучения составляет 50 секунд при средней норме облучения в 50 Гр.

1. Черняев А.П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина/ М: Изд. МГУ, 2019.
2. Саввин В.Л., Коннов А.В., Казарян Г.М. Источник рентгеновского излучения с циклотронным авторезонансом/ Патент RU2760284С1, 2021.
3. Саввин В.Л., Казарян Г.М., Михеев Д. М. и др. О влиянии магнитных компонент высокочастотного поля при пространственном циклотронном авторезонансе//Изв. РАН. Серия физическая, 2019, т. 83, № 1, с. 54.
4. <http://geant4.web.cern.ch>.

# РАЗРАБОТКА ГРАФИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Е. В. Парменова<sup>1</sup>, О. П. Ющенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий имени А.А. Логонова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Протвино, Россия,

E-mail: Ekaterina.Parmenova@ihep.ru

Клинические испытания в области лучевой терапии показывают эффективность использования пучков ускоренных ионов углерода при лечении определённых видов опухолей [1]. Реализация углеродной терапии планируется в проектируемом центре ионной лучевой терапии на базе действующего Ускорительного комплекса У-70 НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ в г. Протвино [2]. Для данной установки требуется уникальная планирующая система. Система планирования будет состоять из нескольких отдельных модулей, каждый из которых выполняет определённые функции, необходимые для успешного проведения облучения ионами углерода. Организованная работа всех этих модулей и их связь между собой будет осуществляться при помощи графической оболочки.

В работе представлено описание разрабатываемой на основе Qt [3] графической оболочки системы планирования ионной лучевой терапии. Показана модульная база планирующей системы, с учётом которой был определён функционал графического интерфейса. Продемонстрирован стартовый вариант графической оболочки, связанный с реализацией работы модуля, отвечающего за обработку медицинских файлов в формате DICOM.

1. H.Tsujii et al. Carbon Ion Radiotherapy. Principles, Practices and Treatment Planning // Springer Science & Business Media, 2013, 312 p.
2. Центр ионной лучевой терапии [Электронный ресурс] // Официальный сайт института физики высоких энергий имени А.А. Логонова. Режим доступа: [http://www.ihep.su/files/Journal\\_2017\\_Final\\_2\\_05\\_02\\_2018.pdf](http://www.ihep.su/files/Journal_2017_Final_2_05_02_2018.pdf)
3. The Qt Project : [Электронный ресурс] // URL: <https://contribute.qt-project.org>

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КАРТОФЕЛЬНЫХ ЗЕРЕН КРАХМАЛА В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

Р. А. Пережогин<sup>1</sup>, П. Ю. Борщеговская<sup>1,3</sup>, У.А. Близнюк<sup>1,3</sup>, А.П. Черняев<sup>1,3</sup>, И. А. Родин<sup>2,4</sup>, М.И. Торопыгина<sup>4</sup>, В.С. Ипатова<sup>1</sup>, С.А. Золотов<sup>1</sup>, Е.К. Козлова<sup>1,4</sup>, А.Ю. Опруненко<sup>2</sup>, А.Д. Никитченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Физический факультет), г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (Химический факультет), г. Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Первый Московский государственный медицинский университет имени И. М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский Университет), г. Москва, Российская федерация

E-mail: perezhogin.roma10@yandex.ru

Для наблюдения за формой и структурой биологических объектов применяют различные методы, в том числе методы микроскопии, которые имеют широкий спектр разрешений и применяются для изучения как поверхностных, так и внутренних структур клеток и тканей: оптическую микроскопию, электронную микроскопию, атомно-силовую микроскопию, рамановскую микроскопию, зондовую микроскопию, голографическую микроскопию, поляризационную микроскопию, мультифотонную микроскопию, оптическую когерентную томографию, форсирующую микроскопию [1].

Оптическая микроскопия уже долгое время остается одним из важнейших инструментов для исследования биологических объектов [2]. Существует несколько типов оптической микроскопии: световая, флуоресцентная, конфокальная, суперразрешающая. Флуоресцентная микроскопия может помочь выявить изменения в активности белков и других молекул внутри клетки, а конфокальная микроскопия позволяет наблюдать изменения в 3D структуре клетки. Методы суперразрешающей микроскопии могут выявить тонкие детали, которые трудно уловить обычными методами [3 - 6]. Она имеет ряд преимуществ: относительная простота прибора, возможность наблюдения объектов в динамике, не требует особой подготовки образцов, однако она сталкивается с рядом ограничений, таких как низкий контраст, разрешение до нескольких микрометров, шумы. Данные ограничения затрудняют интерпретацию данных и проведение качественного анализа изображений. Поэтому применение методов обработки изображений позволяют повысить информативность и улучшить качество картинки.

Комбинированная обработка изображений, которая включает совмещение данных от разных типов микроскопов, позволяет получать более полное представление о структуре и функциях биосистем, что важно для фундаментальных исследований. Существуют различные методы обработки и интерпретации изображений, включающие в себя количественные и статистические расчеты, методы сегментации изображений, морфологический и текстурный анализы, вычитание изображений, сверточные нейронные сети и другие методы цифровой обработки [4, 7, 8].

В результате внешнего воздействия клеточные структуры могут претерпевать различные изменения. Морфологические изменения, такие как деформация клеточной формы, увеличение

или уменьшение размеров, разрушение клеточной мембраны, изменение структуры ядра и органелл, могут быть видны под оптическим [2 - 6].

Целью данной работы являлось исследование изменений структуры зерен крахмала клубней картофеля в результате воздействия ионизирующим излучением.

Образцы зерен крахмала были получены путем выделения из картофеля, облученного на ускорителе электронов УЭЛР-1-25-Т-001 (НИИЯФ МГУ, Россия) с максимальной энергией 1 МэВ, средней мощностью пучка 0,1 мкА при температуре окружающей среды 20 °С. Далее было проведено сравнение мазков экстрактов контрольных и облученных клубней картофеля в дозах 100, 1000, 5000 Гр на оптическом микроскопе ADF U300В (Китай), предназначенном для проведения исследований в клинично-диагностических лабораториях, научных и исследовательских центрах.

Был проведен качественный анализ зерен крахмала до и после облучения, статистическая обработка зерен в поле изображения микроскопа 3786x2000 мкм, 1472x778 мкм, 757x400 мкм, 353x187 мкм, 147x78 мкм, проведен подсчет количества слоев крахмальных зерен, их площадь и подсчет количества поврежденных зерен в контрольных и облученных образцах экстракта картофеля.

Дальнейшей задачей является подбор метода обработки изображений, который даст более детальную и полную информацию с кадров, полученных на микроскопе, либо создание своего метода обработки изображений. Работа включает в себя оптимизацию обработки различными методами, выявление возможностей данных методов, их положительных и отрицательных сторон для исследования различных биологических объектов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта №22-63-00075.

1. Hawkes P. W., Spence J. C. H. (ed.). Springer handbook of microscopy. – Springer Nature, 2019.
2. Davidson M. W., Abramowitz M. Optical microscopy //Encyclopedia of imaging science and technology. – 2002. – Т. 2. – №. 1106-1141. – С. 120.
3. Lei X. et al. Fine molecular structure and digestibility changes of potato starch irradiated with electron beam and X-ray //Food Chemistry. – 2024. – Т. 439. – С. 138192.
4. Liang W. et al. Understanding how electron beam irradiation doses and frequencies modify the multiscale structure, physicochemical properties, and in vitro digestibility of potato starch //Food Research International. – 2022. – Т. 162. – С. 111947.
5. Zhu F. Impact of  $\gamma$ -irradiation on structure, physicochemical properties, and applications of starch //Food Hydrocolloids. – 2016. – Т. 52. – С. 201-212.
6. Atrous H. et al. Effect of  $\gamma$ -radiation on free radicals formation, structural changes and functional properties of wheat starch //International journal of biological macromolecules. – 2015. – Т. 80. – С. 64-76.
7. Wang X. et al. Deep learning-based image analysis for in situ microscopic imaging of cell culture process //Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2024. – Т. 129. – С. 107621.
8. Salvi M., Meiburger K. M., Molinari F. Softmax-Driven Active Shape Model for Segmenting Crowded Objects in Digital Pathology Images //IEEE Access. – 2024. – Т. 12. – С. 30824-30838.

# СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ТЕХНОЛОГИИ И КЛИНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Е.А.Рябова<sup>1</sup>, А.А.Щербаков<sup>1,2</sup>, Ф.Р.Студеникин<sup>1,2</sup>, Е.Н.Лыкова<sup>1,2</sup>, А.П.Черняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва, Россия

E-mail: katy150104@yandex.ru

На сегодняшний день магнитно-резонансная томография (МРТ) занимает важное место среди методов медицинской визуализации. Эта методика предоставляет уникальные возможности для диагностики и мониторинга различных заболеваний благодаря способности получать высококачественные изображения мягких тканей. С помощью МР-исследования возможно выявление патологических изменений на ранних стадиях и отслеживание динамики заболеваний, которая позволяет оценивать эффективность проводимого лечения. МРТ является одним из наиболее информативных и безопасных методов медицинской визуализации, что обуславливает широкий спектр его применения, включая гастроэнтерологию, кардиологию, неврологию, а также планирование лучевой терапии.

Несмотря на значительный научный прогресс, достигнутый в области МРТ, эта дисциплина продолжает активно развиваться. К перспективным направлениям относят разработку новых контрастных веществ, которые могут значительно повысить качество изображений. В настоящее время также происходит интенсивное развитие мультимодальной визуализации, заключающейся в совместном применении МРТ с компьютерной томографией (КТ) и позитронно-эмиссионной томографией (ПЭТ) для более точного диагностирования онкологических заболеваний. С целью улучшения интерпретации МР-изображений, снижения числа диагностических ошибок и автоматизации процесса диагностики в практику внедряются алгоритмы искусственного интеллекта. Разработка новых технологий, таких как параллельная МРТ и усовершенствование методов импульсной последовательности также представляют собой перспективные пути развития.

Работа посвящена обзору исследований, затрагивающих современные достижения и тенденции в области МРТ, с акцентом на физические основы, аппаратные технологии и методы формирования изображений, для более детального представления ключевых направлений в улучшении качества и точности изображений.

1. F. Bloch Nuclear Induction / F. Bloch // Physical review. — 1946. — № 70. — С. 460-474.
2. V S Khoo, D L Joon New developments in MRI for target volume delineation in radiotherapy / V S Khoo, D L Joon // British Journal of Radiology. — 2006. — № 79. — С. S2-S1

# СИНТЕЗ АРТЕФАКТОВ НА СНИМКАХ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ

М. Д. Сиомаш<sup>1</sup>, С. А. Золотов<sup>1,2</sup>, О. С. Карчанов<sup>1</sup>, Л. О. Степанченко<sup>1</sup>, Ф. Р. Студеникин<sup>1,2</sup>,  
А. А. Логинова<sup>2,3</sup>, А. П. Черняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,*

<sup>2</sup>*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия*

<sup>3</sup>*ФГБУ «НМИЦ ДГОИ им. Дмитрия Рогачева» Минздрава России*

E-mail: siomashmd@gmail.com

В процессе компьютерной томографии (КТ) у пациентов с металлическими имплантатами на снимках возникают артефакты [1-4]. Артефакты - это дефекты изображения, которые закрывают собой некоторые части снимка и могут исказить само изображение. Это становится серьезной проблемой, если снимки в дальнейшем используются для дозиметрического планирования лучевой терапии. Артефакты приводят к неправильному формированию дозы в плане облучения, что негативно сказывается на лечении пациента.

В настоящее время, чтобы сделать снимки пригодными для дозиметрического планирования, артефакты удаляются медицинскими физиками вручную: сначала артефакты определяются на основании собственного опыта врача, затем окантовываются и выделенные области заполняются числами Хаунсфилда тканей, которые считаются подходящими. Эта операция выполняется вручную для каждого слоя снимка, что занимает много времени.

Мы предлагаем использовать нейронную сеть для определения и устранения артефактов. Для обучения такой нейронной сети потребуется большая база данных, включающая одновременно КТ снимки с имплантатами и артефактами и те же самые снимки, но без артефактов. Ограничение заключается в том, что в открытом доступе отсутствует достаточное количество снимков с артефактами и еще меньше тех из них, с которых корректно удалены артефакты. Поэтому нами была поставлена задача генерации такой базы данных. Для этого можно взять КТ снимки без металлических имплантатов и без артефактов, добавить на снимки имплантаты путем наложения и далее провести синтез артефактов.

В работе [1] показаны основные причины возникновения металлических артефактов: уплотнение пучка, рассеяние, пуассоновский шум, движение и краевые эффекты. Все они возникают на этапе облучения пациента. Поэтому для синтеза артефактов мы проводили моделирование облучения пациента на основе КТ снимков, получая синограмму - данные детекторов, а затем восстанавливали изображение, повторяя работу программной части томографа.

Для моделирования облучения пациента был разработан программный код на основе преобразования Радона [5] и модели Ray Tracing [6]. Также было проведено сравнение с работой программного кода, ранее разработанного для задачи восстановления КТ изображений [7]. На рисунке 1 приведен пример синтезированных

снимков, основанных на ограничении чувствительности детекторов.

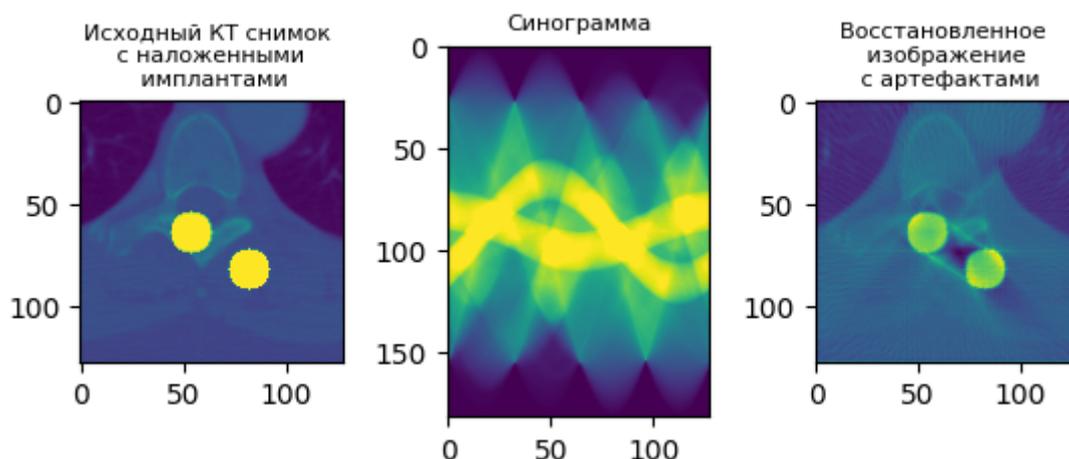


Рис. 1. Примеры КТ снимков: исходный КТ снимок с наложенными металлическими имплантами; синограмма; восстановленное изображение

Для проверки корректности синтезированных артефактов была проведена серия экспериментов, в ходе которой на КТ установке производились снимки водного фантома, при помещении внутрь металлических имплантов разных конфигураций. Это позволило исследовать импланты и артефакты на снимках без наложения на ткани. Экспериментальные результаты были сопоставлены с результатами компьютерного моделирования а также литературными данными из статьи Boas et. al [1].

1. F Edward Boas & Dominik Fleischmann. CT artifacts: Causes and reduction techniques // *Imaging in Medicine*, April 2012.
2. Yi Hu, Shinong Pan, Xudong Zhao, Wenli Guo, Ming He, Qiyong Guo, Value and Clinical Application of Orthopedic Metal Artifact Reduction Algorithm in CT Scans after Orthopedic Metal Implantation // *Korean J Radiol* 2017;18(3):526-535
3. Mark Selles, Jochen A.C., Mario Maas, Martijn F.,Boomsma, Ruud H., H. Wellenberg, Advances in metal artifact reduction in CT images: A review of traditional and novel metal artifact reduction techniques // *European Journal of Radiology* 170 (2024) 111276
4. Hojin Kim, Sang Kyun Yoo, DongWook Kim, Ho Lee, Chae-Seon Hong, Min Cheol Han & Jin Sung Kim, Metal artifact reduction in kV CT images throughout two-step sequential deep convolutional neural networks by combining multi-modal imaging (MARTIAN) // *Scientific Reports* | (2022) 12:20823
5. С. А. Терещенко. Методы вычислительной томографии. // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 320 с. - ISBN 5-9221-0551-5.
6. Jonas Dittmann, Efficient ray tracing on 3D regular grids for fast generation of digitally reconstructed radiographs in iterative tomographic reconstruction techniques // DOI:10.48550/arXiv.1609.00958, September 2016
7. [https://tristanvanleeuwen.github.io/IP\\_and\\_Im\\_Lectures/tomography.html](https://tristanvanleeuwen.github.io/IP_and_Im_Lectures/tomography.html)

# АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕДИЦИНСКОГО РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ПОСТАНОВКИ ДИАГНОЗА ПРИ ПОМОЩИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

А.Н. Сустатова<sup>1</sup>, П.Ю. Борщеговская<sup>1,2</sup>, Т.А. Бурцев<sup>3,4</sup>, И.С. Глухов<sup>1</sup>, А.А. Ким<sup>1,2</sup>,  
И.А. Кречетова<sup>1</sup>, Ф.Р. Студеникин<sup>1,2</sup>, А.П. Черняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий  
Департамента здравоохранения города Москвы, Россия, Москва

<sup>4</sup> Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
"МИРЭА - Российский технологический университет", Россия, Москва

E-mail: sustatova.an21@physics.msu.ru

В 1954 году В МГУ под руководством профессора Алексея Андреевича Ляпунова начал свою работу семинар «Автоматы и мышление». Считается, что именно в это время родился искусственный интеллект в России. Развитие и широкое применения такого подхода в науке, медицине и бытовых задачах стало развиваться с появлением персональных компьютеров и ростом вычислительных мощностей.

Одной из областей, в которой широко применяются методы машинного обучения стала медицинская диагностика. Это во много связано с активным внедрением цифровых сервисов хранения и обработки диагностических изображений. Искусственный интеллект в задачах медицинской диагностики и назначения лечения использует всю доступную ему информацию, обрабатывает тысячи объектов в секунду, чего не может сделать человек. Исследования показывают, что к концу дня процент ошибок врача, связанный с усталостью и утомляемостью, повышается. Использование ИИ помогает снизить количество таких ошибок.

В 2020 году в Москве стартовал беспрецедентный научный Эксперимент по внедрению компьютерного зрения в лучевую диагностику. В распоряжении московских врачей свыше 50 сервисов компьютерного зрения. Нейросети помогают находить на медицинских изображениях (маммограммах, КТ, МРТ и рентгеновских снимках) признаки 37 различных заболеваний. Точность диагностики сервисов искусственного интеллекта сопоставима с точностью врача.

Применение ИИ в области медицины уже сейчас демонстрирует свою эффективность и перспективность, в частности, применение искусственных нейронных сетей помогают в задачах диагностики и планирования лечения. Результаты исследования показывают, что искусственный интеллект повышает эффективность работы рентгенолога благодаря автоматизации рутинных процессов [1]. Учёные из Южной Кореи на основе машинного обучения разработали метод повышения точности скрининга рака молочной железы. Каждая маммография была оценена 14 рентгенологами на вероятность наличия злокачественного новообразования в молочной железе. Нейронная сеть показала высокие диагностические результаты: показатель AUC, оценивающий качество классификации, составил 0,940. Исследование подтвердило, что ИИ может выступать в качестве инструмента поддержки для врача [2].

В 2021 году в медучреждениях РФ использовалось около 57 тысяч рентгеновских аппаратов [3]. В России 17244 врачей рентгенологов. За последние полгода возросло количество врачей-рентгенологов, которые являются активными пользователями

медицинских сервисов на основе компьютерного зрения. Число скептически настроенных врачей к технологии искусственного интеллекта снизилось до 36%.

Есть исследования, которые показывают, что качество цифровых рентгенографических изображений может влиять на производительность моделей семантической сегментации с глубоким обучением. Отношение контраста к шуму (CNR) оказывается наиболее важным качеством изображения по сравнению с отношением сигнал / шум (SNR) [4]. Также на производительность искусственной нейронной сети влияет разрешение изображения. При сравнении производительности сетей, использующих входы с более низким разрешением ( $64 \times 64$  пикселя) по сравнению с входными данными с более высоким разрешением ( $320 \times 320$  пикселей), при обнаружении эмфиземы, кардиомегалии, грыжи и легочных узлов AUC в наибольшей степени улучшилась при более высоком разрешении изображения [5].

Параметры рентгеновских аппаратов значительно изменились за время их существования, начиная с изобретения Вильгельмом Конрадом Рентгеном в конце XIX века. Первые аппараты были громоздкими и требовали длительной экспозиции фотопластинок, что делало процесс диагностики медленным и не всегда эффективным. Однако с течением времени и развитием технологий произошли значительные улучшения. Производители рентгеновских систем стали уделять больше внимания улучшению контрастности, резкости и возможности инспекции изделий в режиме реального времени. Это позволило получать более чёткие и информативные снимки, вследствие чего уменьшился процент бракованных цифровых снимков [6,7,8].

В работе был проведен анализ влияния параметров рентгенологического изображения легких на точность постановки диагноза несколькими открытыми сверточными нейронными сетями. Была изучена корреляция между контрастностью снимков и процентом ошибок в постановке диагнозов. Изучено различие между качеством рентгеновских снимков с рентгенологических аппаратов разных поколений и представлен обзор современных методов улучшения качества рентгенологических снимков. В работе было выявлено, что параметры рентгеновского снимка оказывают значительное влияние на результат работы нейронной сети. Изменение таких параметров, как размер изображения, яркость, контрастность и разрешение, может существенно улучшить точность классификации и снизить количество ошибок.

1. Ханс-Иоахим Ментцель// *Monatsschr Kinderheilkd.* 2021 2 июля; 1-9. doi: 10.1007/s00112-021-01230-9
2. Ким Х.Ы, Изменения в выявлении рака и ложноположительном отзыве в маммографии с использованием искусственного интеллекта: ретроспективное многократное исследование // *Lancet Digit Health.* 2020;2(3):e138-e148. doi: 10.1016/S2589-7500(20)30003-0
3. Радиационно-гигиенический паспорт РФ 2021 год.
4. Hena, B.; Deep Learning Neural Network Performance on NDT Digital X-ray Radiography Images: Analyzing the Impact of Image Quality Parameters—An Experimental Study. *Sensors* 2023, 23, 4324. <https://doi.org/10.3390/s23094324>
5. Carl F. The Effect of Image Resolution on Deep Learning in Radiography// *Radiology: Artificial Intelligence* 2020; 2(1):e190015
6. Камышанская И.Г. Постобработка цифровых рентгенограмм в практике рентгенолога. 2017; 21 (1):116–128. DOI: 10.24835/1607-0763-2017-1-116-128.
7. Ганичев Павел Александрович, «Перспективы использования искусственного интеллекта в радиологии. Краткий обзор». *Визуализация в медицине*, vol. 4, no. 4, 2022, pp. 7-14
8. Волокитина Т.С. Нейросеть для распознавания изображений // *Современные научные исследования и инновации.* 2021. № 3 URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/03/94768>.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ВТОРИЧНЫМ РАКАМ ПРИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

И. В. Храмов<sup>1</sup>, А. А. Щербаков<sup>1,2</sup>, Ф. Р. Студеникин<sup>1,2</sup>, А. П. Черняев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: khramoviv@my.msu.ru

Лучевая терапия — эффективный, неинвазивный метод лечения рака, который необходим половине всех больных раком[1]. Различные формы онкологических заболеваний могут требовать разнообразных методов лечения, как единичных, так и комбинированных, в зависимости от характеристик опухоли и индивидуальных особенностей пациента. Не смотря на множество плюсов лучевой терапии, она имеет и свои недостатки. Так часть дозы, нацеленной на опухоли, может попасть на здоровые ткани, разрушая их. Вследствие этого значительно повышаются риски возникновения вторичных раков, которые могут серьезно влиять на дальнейшую жизнь человека.

В наше время, в силу увеличения продолжительности жизни выживших, за счёт развития техники и методов лечения раковых больных, растёт и число возникновения вторичных раков. Вторичный раки – это рак, возникший, после лечения рака, не менее чем через 2 месяца. Так число вторичных раков, среди всех выявленных раковых заболеваний составляло 9% в 1975-1979, в 2005-2009 это число выросло до 19% и продолжает расти дальше [2]. Они же и являются основной причиной смертей связанных с лечением. Известно, что лучевая терапия увеличивает риск возникновения вторичных раков в 1.5-3 раза взрослых и в 6-10 для детей [3-5]. В среднем после на протяжении 30 лет после лучевой терапии у 17-18% пациентов снова развиваются вторичные новообразования [2]. Совокупность этих факторов делает необходимым изучение формирования вторичных опухолей, изучения статистики их возникновения и построения математических моделей риска, для дальнейшего выбора самого эффективного и безопасного метода лечения

В ходе работы были проанализированы причины возникновения вторичных раков, методы оценки риска, изучена статистика возникновений в зависимости от пола, возраста, метода лечения, вида опухоли. К основным результатам обзора следует отнести: повышенный риск у женщин и детей при облучении по сравнению со всем населением, линейная зависимость риска от дозы полученной органом, при облучении малыми дозами.

1. Abdel-Wahab M. et al. Global Radiotherapy: Current Status and Future Directions—White Paper // JCO Global Oncology. American Society of Clinical Oncology (ASCO), 2021. № 7. P. 827–842.
2. Morton L.M. et al. The Rising Incidence of Second Cancers: Patterns of Occurrence and Identification of Risk Factors for Children and Adults // American Society of Clinical Oncology Educational Book. American Society of Clinical Oncology (ASCO), 2014. № 34. P. e57–e67.
3. Supramaniam R. New malignancies among cancer survivors: SEER cancer registries, 1973-2000 // Journal of Epidemiology & Community Health. BMJ, 2008. Vol. 62, № 4. P. 375–376.
4. Eaton B.R. et al. Secondary Malignancy Risk Following Proton Radiation Therapy // Frontiers in Oncology. Frontiers Media SA, 2015. Vol. 5.
5. Taylor C. et al. Estimating the Risks of Breast Cancer Radiotherapy: Evidence From Modern Radiation Doses to the Lungs and Heart and From Previous Randomized Trials // Journal of Clinical Oncology. American Society of Clinical Oncology (ASCO), 2017. Vol. 35, № 15. P. 1641–1649.

# ВОЗДЕЙСТВИЕ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА АКТИВНОСТЬ ФИТОПАТОГЕННЫХ ГРИБОВ

Шимко П.А.<sup>1\*</sup>, Близнюк У.А.<sup>1,2\*\*</sup>, Борщеговская П.Ю.<sup>1,2</sup>, Зубрицкая Я.В.<sup>1,2\*\*\*</sup>, Малюга А.А.<sup>3</sup>, Родин И.А.<sup>1,4</sup>, Черняев А.П.<sup>1,2</sup>, Чуликова Н.С.<sup>3</sup>, Юров Д.С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына, Москва,  
Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, 630501, Новосибирская область, Новосибирский район, р.п. Краснообск, Россия

<sup>4</sup>Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России (Сеченовский университет), кафедра эпидемиологии и доказательной медицины, Москва, Россия

E-mail: \*pashashimko0306@gmail.com, \*\*uabliznyuk@gmail.com,  
\*\*\*zubritckaia.iv18@physics.msu.ru

В сельском хозяйстве одной из ключевых задач растениеводства является защита культур от заболеваний. Фитопатогенные грибы представляют серьезную опасность как для растений, так и для урожая во время его хранения, так как до 80% всех возбудителей болезней растений составляют различные виды грибов [1]. Более экологически безопасным вариантом защиты растений по сравнению с химическими методами является радиационная обработка, способная эффективно подавлять рост фитопатогенных грибов и других вредоносных организмов без негативного влияния на окружающую среду [2].

Целью работы являлось исследование влияния обработки низкоэнергетическими ускоренными электронами на чистые культуры фитопатогенных грибов.

Объектами исследования послужили различные штаммы фитопатогенных грибов *Rhizoctonia solani* (ШП-28, ШК-25), *Fusarium spp.* (К-91, К-7.2, К-37, Г-4), *Bipolaris sorokiniana* (Т-2, Т-1), *Alternaria spp.* (ТАН-1, Е-1) и *Septoria nodorum* (S-1), предоставленные СФНЦА РАН.

Обработка чашек Петри с выращенными на питательной среде (КДА) культурами грибов проводилась с использованием линейного ускорителя электронов непрерывного действия УЭЛР-1-25-Т-001 со средней мощностью пучка 25 кВт. Максимальная энергия частиц составила 1 МэВ, облучение проводилось в дозах 100, 1000, 5000 и 10000 Гр. После радиационной обработки производился высев образцов мицелиального мата грибов на питательную среду в чашках Петри для наблюдения за динамикой их роста. Диаметры колоний фитопатогенных грибов измерялись на 3-й, 5-й и 7-й дни с момента посева.

Анализ динамики роста колоний грибов показал, что зависимость их диаметра от времени роста после посева имеет линейный характер. Посредством аппроксимации были получены диаметральные скорости роста колоний (таблица 1).

Таблица 1. Значения коэффициентов диаметральных скоростей роста колоний фитопатогенных грибов при их облучении ускоренными электронами с энергией 1 МэВ.

Штамм гриба	Доза				
	Контроль	100 Гр	1000 Гр	5000 Гр	10000 Гр
<i>Fusarium spp.</i> (Г-4)	11,67 ± 0,04	10,64 ± 0,53	16,06 ± 1,24	0	0
<i>Fusarium spp.</i> (К-91)	13,2 ± 0,18	13,11 ± 0,16	10,88 ± 0,60	0	0

<i>Fusarium spp</i> (К-7.2)	10,58 ± 0,18	7,58 ± 0,31	8,78 ± 0,10	8,03 ± 0,50	11,61 ± 0,32
<i>Fusarium spp</i> (К-37)	14,73 ± 0,18	14,63 ± 1,10	14,52 ± 1,02	13,90 ± 0,63	14,62 ± 1,10
<i>Alternaria spp.</i> (Е-1)	9,56 ± 0,36	9,56 ± 0,57	8,86 ± 0,30	8,13 ± 0,01	10,00 ± 0,60
<i>Alternaria spp.</i> (ТАН-1)	9,17 ± 0,14	8,52 ± 0,07	8,66 ± 0,01	0	0
<i>B. sorokiniana</i> (Т-1)	14,11 ± 0,73	13,63 ± 0,58	10,18 ± 0,20	0	0
<i>B. sorokiniana</i> (Т-2)	13,59 ± 0,46	13,33 ± 0,72	11,50 ± 0,60	0	0
<i>R. solani</i> (ШК-25)	5,22 ± 0,07	5,20 ± 0,05	0	0	0
<i>R. solani</i> (ШП-28)	5,72 ± 0,08	5,86 ± 0,11	3,54 ± 0,50	0	0
<i>S.nodorum</i>	12,15 ± 1,14	7,53 ± 0,91	8,67 ± 0,62	5,05 ± 1,25	5,41 ± 1,18

Полученные результаты указывают на различную степень радиочувствительности штаммов фитопатогенных грибов. Ионизирующее излучение снижало скорость роста у 7 из 11 исследованных штаммов, вплоть до полного подавления роста колоний при дозах свыше 1000 Гр. Наиболее чувствительным к радиационному воздействию оказался штамм ШК-25 гриба *Rhizoctonia solani*, у которого ингибирование роста наблюдалось уже при дозе 1000 Гр. Наиболее радиоустойчивыми оказались штамм ТАН-1 рода *Alternaria* и штаммы К-7.2 и К-37 рода *Fusarium*, чей рост не удалось подавить даже при облучении дозой 10000 Гр.

Для анализа зависимости диаметров колоний грибов от дозы облучения были выбраны данные на 5-й день наблюдений, поскольку к 7-м суткам рост был ограничен размерами чашек Петри. В результате анализа установлено, что для штаммов Г-4, К-91, ТАН-1, Т-1, Т-2, ШК-35, ШП-28 зависимость диаметра колоний от дозы облучения имеет сигмоидальный характер.

Таким образом, проведённое исследование показало, что радиационная обработка ускоренными электронами с максимальной энергией 1 МэВ не только снижает скорость роста колоний, но и может полностью подавить развитие ряда фитопатогенных грибов. При этом дозы облучения, необходимые для ингибирования роста, варьировались, что свидетельствует о различной радиочувствительности грибов, обусловленной морфологическими особенностями их видов и штаммов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №22-63-00075.

1. Сокирко В. П., Горьковенко В. С., Зазимко М. И. Фитопатогенные грибы (морфология и систематика) // Краснодар: КубГАУ. – 2014.
2. Н. С. Чуликова, А. А. Малюга, У. А. Близнюк и др. Радиационная обработка семенного картофеля как метод подавления различных форм ризоктониоза на клубнях нового урожая // Агрехимия. — 2023. — № 2. — С. 69–78.

Секция: Радиационные технологии.  
Синхротронные, нейтронные  
и ядерно-физические методы  
диагностики и модифицирования  
материалов

# СТЕНД ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ И КАЛИБРОВКИ ТРАКТА СВЧ НИЗКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ ОДНОСЕКЦИОННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ

В. К. Басати<sup>1</sup>, А. Н. Ермаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: dzampaeva.vk19@physics.msu.ru

НИИЯФ МГУ разрабатывает прототипы линейных ускорителей для медицины, дефектоскопии, стерилизации и различных технологических процессов в промышленности [1,2]. При проведении пуско-наладочных работ систем СВЧ питания данных ускорителей, построенных на основе клистронов КИУ-168, КИУ-271 [3], возникает необходимость в проверке и калибровке тракта СВЧ низкого уровня мощности, который формирует входной сигнал клистрона в форме прямоугольного импульса регулируемой скважности, заполненного высокочастотными колебаниями.

Задача калибровки тракта СВЧ низкого уровня мощности заключается в получении зависимости выходной импульсной мощности СВЧ от управляющего напряжения р-И-п аттенюатора. Для этого был построен стенд диагностики и калибровки. Затем была проведена автоматизация процесса калибровки с помощью программного обеспечения, разработанного на базе языка Matlab [4].

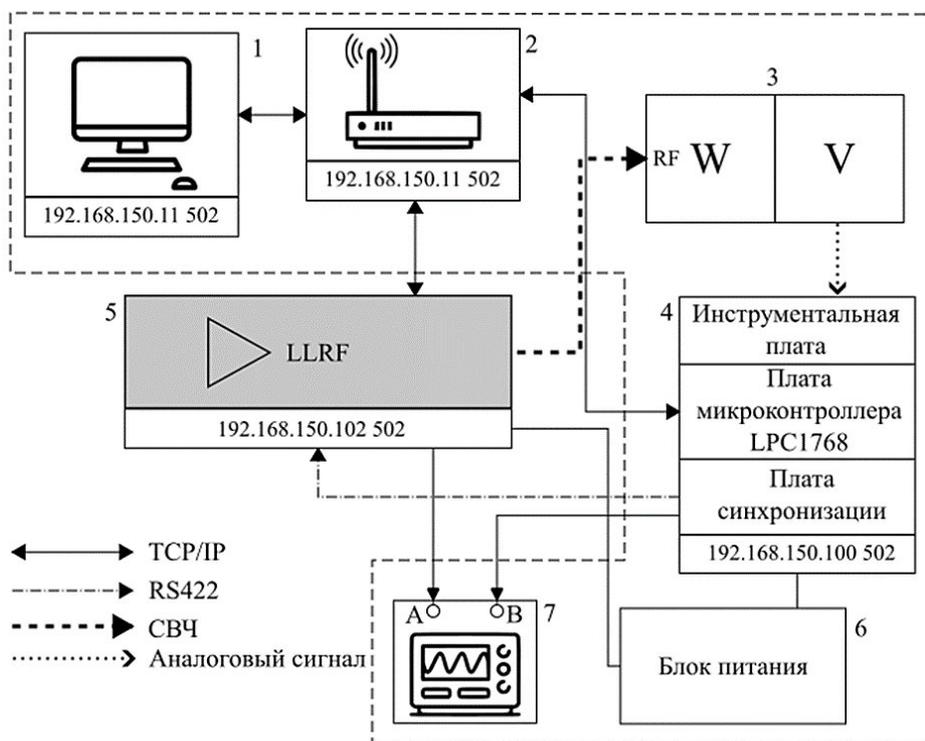


Рис. 1. Структурная схема стенда для диагностики и калибровки системы СВЧ питания низкого уровня мощности линейного ускорителя электронов: 1 – АРМ; 2 – маршрутизатор; 3 – ваттметр; 4 – контроллер измерителя средней выходной мощности калибруемого тракта СВЧ; 5 – калибруемый тракт СВЧ низкого уровня мощности; 6 – блок питания; 7 – осциллограф.

На рис. 1 показана структурная схема стенда. Маршрутизатор (2) объединяет устройства в локальную сеть Ethernet с использованием протокола ModBus TCP/IP [5]. Контроллер измерителя средней выходной мощности (4) передает значения напряжения  $U_c$  выходного усилителя ваттметра (3) на автоматизированное рабочее место оператора (АРМ) (1) и задает управляющее напряжение  $U$  р-п аттенюатора тракта (5) в цикле алгоритма калибровки. Выходная импульсная мощность  $P_{имп}$  калибруемого тракта СВЧ связана с  $U_c$  выражением:

$$P_{имп}(\text{мВт}) = \frac{b_c + a_c \cdot U_c (\text{мВ})}{\tau_{RF} \cdot f_{повт}},$$

где  $\tau_{RF}$  – длительность импульса СВЧ,  $f_{повт}$  – частота повторения импульсов;  $b_c = -0.0146$  мВт,  $a_c = 0.04476$  мВт/мВ – калибровочные коэффициенты. Осциллограф (7) предназначен для контроля сигналов синхронизации и огибающей СВЧ. На АРМ установлено программное обеспечение GUI\_RF\_Measurements, разработанное для автоматизации сбора данных и их дальнейшей обработки.

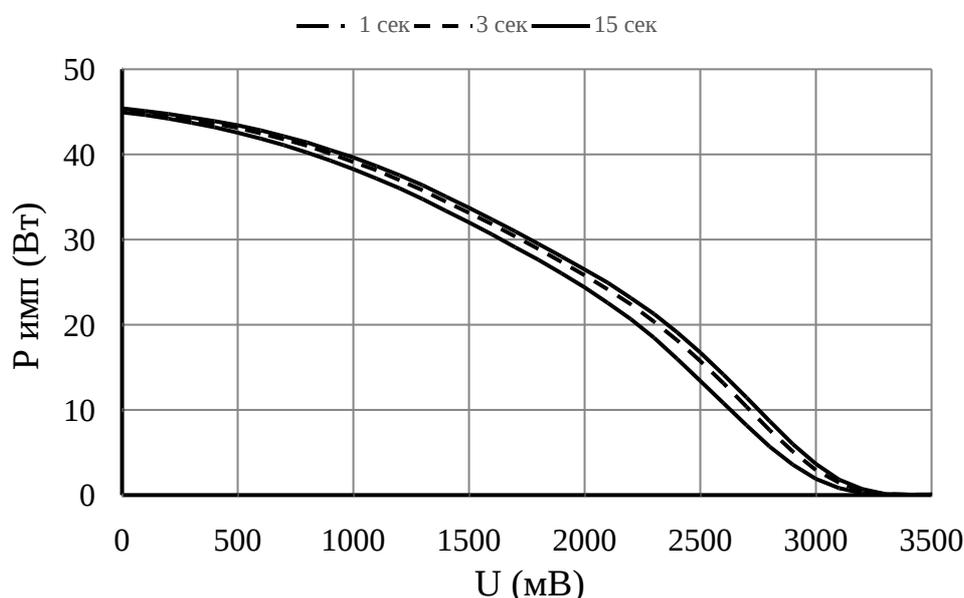


Рис 2. Калибровочная кривая тракта СВЧ с различными временными интервалами измерения одной точки.

Конечным результатом является файл формата «xlsx», содержащий таблицу с данными измерения выходной мощности калибруемого тракта СВЧ низкого уровня мощности. Пример калибровочной кривой показан на рис. 2. Приложение также может использоваться для изменения параметров подключения к компонентам стенда, калибровки измерения мощности контроллером стенда и отображения статуса процесса диагностики тракта СВЧ.

1. A.N. Ermakov et al. Main Parameters and Operational Experience with New Generation of Electron Accelerators for Radiography and Cargo Inspection // Proc. RuPAC'14, Obninsk, Russia, Oct. 2014, paper WECA08, pp. 143-145.
2. Ermakov A.N. et al. LINACS FOR INDUSTRY, CARGO INSPECTION AND MEDICINE DESIGNED BY MOSCOW UNIVERSITY // Proceedings of the 29th Linear Accelerator Conference, LINAC 2018, No. 29, pp. 130-132
3. <https://www.toriy.ru/products/klystrons/Pulse-klystrons/>
4. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
5. MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b3

# «МАЛОЕ» НАКОПИТЕЛЬНОЕ КОЛЬЦО ИСТОЧНИКА КОМПТОНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НЦФМ

Д. А. Бобылев<sup>1,2,3</sup>, В. И. Шведунов<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>ООО «Лаборатория электронных ускорителей МГУ», Москва, Россия

E-mail: agava2309@yandex.ru

В качестве первой крупной научной установки Национального центра физики и математики (НЦФМ) предлагается создание источника  $\gamma$ -квантов, основанного на эффекте обратного комптоновского рассеяния [1]. НИИЯФ МГУ принимает участие в разработке и создании «малого» накопительного кольца комптоновского источника на энергию 35-120 МэВ [2,3] и линейного ускорителя-инжектора для данного кольца.

В ходе данной работы было спроектировано накопительное кольцо, удовлетворяющее предъявленным требованиям, проведены расчёты динамики электронного пучка в нём [4-6] с учётом таких эффектов как радиационное затухание [6-7], квантовая раскачка [6], внутривпучковое рассеяние [8-11] и лазерное затухание [12-14]. Определены динамическая апертура [13] и аксептанс накопительного кольца. Проведены оценки параметров комптоновского излучения, генерируемого электронным пучком в точках взаимодействия с лазерным излучением [15]. Определена необходимая частота смены сгустков в накопительном кольце. Проведены расчёты системы инжекции пучка от линейного ускорителя. Определены проблемные точки спроектированного кольца и указано направление решения данных проблем.

Схема накопительного представлена на рис. 1.

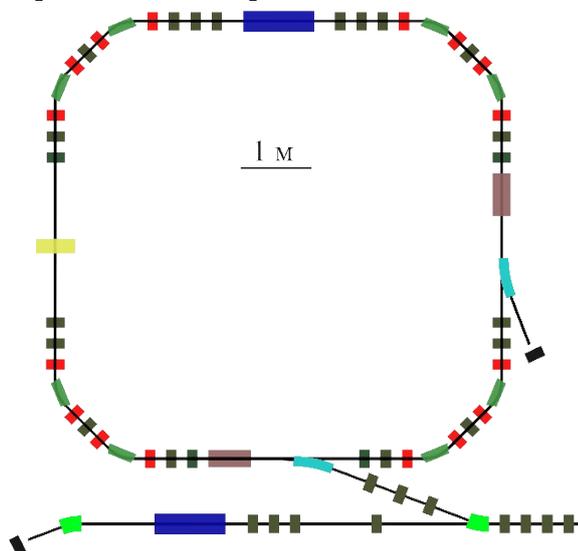


Рис. 1. Схема магнитных элементов накопительного кольца ИКИ НЦФМ.

*Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 6 «Ядерная и радиационная физика».*

1. Григоренко Л.В., Антоненко Н.В. и др. // Проект научной программы ИНОК — комптоновского источника монохроматических гамма-квантов НЦФМ. ФИЗМАТ, 2023, том 1, № 3-4, с. 123-264.

2. Анисимов А.В., Завьялов Н.В., Васильев А.В. и др. // Техническое задание на создание лаборатории ядерной фотоники. 2023.
3. Бобылев Д.А., Шведун В.И. Накопительное кольцо комптоновского источника НЦФМ. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. - 2024. - №2
4. Artyukov I., Savelev A., Shvedunov V., Vinogradov A. // Compton X-ray source based on 50-MeV accelerator and its applications. In Proceedings of the LXXII International Conference "NUCLEUS-2022: Fundamental Problems and Applications". Moscow, Russia. 11-16 July 2022; Stopani K., Zelenskaya N., Eds.; Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics. Amirit: Saratov Russia. 2022; pp. 273-274.
5. Deniau L., Grote H., Roy G., Schmidt F. // The MAD-X Program (Methodical Accelerator Design). User's reference manual. Geneva. 2021.
6. Wolski A. // Introduction to beam dynamics in high-energy electron storage rings. IOP Publishing. Bristol. 2018.
7. Sands M. // The physics of electron storage rings. 1970.
8. Bjorken J., Mtingwa S. // Intrabeam scattering. Particle accelerators. 1983 Vol. 13 pp. 115-143.
9. Wolski A. // Space charge, intrabeam scattering and Touschek effects. Lecture 7. USPAS 2007. Texas. Damping ring design and physics issues.
10. Bane K. // Intra-beam scattering theory and measurements. LER2011 Workshop. Heraklion. Crete. 2011.
11. Левичев Е.Б. // ЦКП «СКИФ» ИК СО РАН/ИЯФ СО РАН. Школа по физике и технике ускорителей. ОИЯИ. Дубна. 2023.
12. Chaikovska I., Variola A. // Equilibrium energy spread and emittance in a Compton ring: An alternative approach. Phys. Rev. St Accel. Beams 17. 044004 (2014).
13. Посеряев А. // Расчёт динамики и оптимизация параметров ускорительных комплексов различного назначения. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физ.-мат. Наук. Москва 2006.
14. Pan Zh., Byrd J., Huang W. et al. // Design and dynamic studies for a compact storage ring to generate gamma-ray light source based on Compton backscattering technique. Physical review accelerators and beams 22. 040702 (2019).
15. Vinogradov A., Feshchenko R., Shvedunov V., Artyukov I. // Ray tracing simulation of X-ray microdiffraction beamline on the inverse Compton source. Symmetry 2023. 15. 1068.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА КРЕМНИЯ НА ЕГО РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ К НЕЙТРОННОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ

Ю. Ю. Бунькова<sup>1,2</sup>, В.Е. Соловьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научноисследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: yu.bunkova@rtc.ru

На сегодняшний день кремний является одним из наиболее востребованных полупроводниковых материалов. Данный полупроводник лежит в основе КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) технологии, по которой производится подавляющее большинство современных интегральных микросхем.

Варьируя изотопный состав кремния, возможно модулировать свойства полупроводниковых материалов [1]. Изменение изотопного состава полупроводников особенно актуально для особо чистых материалов, где особенно остро стоит задача управления свойствами материала. На данный момент существует множество работ, описывающих получение и очистку изотопов кремния, позволяющих получить материалы со степенью очистки более 99,9 % [2-4].

Предметом данного исследования является влияние нейтронного излучения на кремний. Особое внимание уделено изучению воздействия тепловых нейтронов, которые активно используются для легирования монокристаллов полупроводников методом нейтронно-трансмутационного легирования. Кроме того, сечение взаимодействия тепловых нейтронов выше по сравнению с нейтронами более высоких энергий. Таким образом, исследование взаимодействия тепловых нейтронов с природными изотопами кремния позволит получить данные о наиболее вероятных взаимодействиях в кремнии под воздействием нейтронного излучения.

С использованием программного обеспечения Neutron Calculations, предназначенного для проведения моделирования методом Монте-Карло, были получены зависимости относительного количества взаимодействий изотопов кремния  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{30}\text{Si}$  и кремния с природным соотношением изотопов в зависимости от энергии тепловых нейтронов; графики процентного вклада изотопов кремния в общее количество взаимодействий с тепловыми нейтронами в зависимости от энергии излучения. Был произведен анализ полученных данных и определены наиболее чувствительные к нейтронам изотопы –  $^{28}\text{Si}$  и  $^{29}\text{Si}$ . Наименее восприимчивый к взаимодействиям с нейтронным излучением изотоп кремния –  $^{30}\text{Si}$ .

С целью увеличения стойкости материала к образованию структурных дефектов, логично уменьшить процентное содержание изотопов кремния  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  и увеличить долю  $^{30}\text{Si}$  в смеси. Несмотря на это, увеличение содержания  $^{30}\text{Si}$  не будет оптимальным вариантом для снижения количества дефектов, так как данный изотоп переходит в изотоп фосфора  $^{31}\text{P}$  в результате одного акта радиационного захвата. Удаление дефектов в виде примесных атомов фосфора, а также дефектных комплексов с присутствием фосфора затруднено, так как данные дефекты не подвергаются отжигу и избавиться от них можно лишь путем переплавки кристалла.

Увеличение вероятности образования фосфора в кремнии с увеличением содержания  $^{30}\text{Si}$  может быть полезно при проведении нейтронно-трансмутационного легирования и являться негативным фактором при повышении радиационной стойкости

детекторов и компонентов микроэлектроники за счет повышенной вероятности внесения дополнительных примесей в полупроводник.

Увеличение процентного содержания  $^{28}\text{Si}$  и  $^{29}\text{Si}$  может быть полезно при производстве объемных детекторов ионизирующего излучения, функционирующих в условиях нейтронного излучения. В таком случае, большинство дефектов, возникающих в объеме детектора – структурные и удаляются путем термического отжига.

Полученные результаты исследования могут быть использованы при конструировании радиационно-стойких приборов микроэлектроники, детекторов нейтронного излучения, нейтронно-трансмутационном легировании кремния, нейтронно-активационном анализе.

1. E.E. Haller Physics with isotopically controlled semiconductors // Semiconductors. 2010.V. 44, № 7. P. 841–853.
2. А.В. Гусев, В.А. Гавва, Е.А. Козырев. Выращивание монокристаллов стабильных изотопов кремния. // Перспективные материалы. 2010. № 8, 366.
3. М.Ф. Чурбанов, А.В. Гусев, А.Д. Буланов, А.М. Потапов. Моноизотопные разновидности кремния и германия с высокой химической и изотопной очисткой. // Известия академии наук. Серия химическая. 2013. № 2, 275.
4. Г.Г. Девярых, А.Д. Буланов, А.В. Гусев, П.Г. Сенников, А.М. Прохоров, Е.М. Дианов, Х.Й. Поль. Получение высокочистого моноизотопного кремния-28 // Доклады Академии Наук. 2001. Т. 376, № 4, 492.

# РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР И ДАТЧИКОВ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА ИОНОВ УГЛЕРОДА АКТИВАЦИОННЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ

А. Г. Васильева, М. Ю. Костин, В. А. Пикалов, А. А. Янович

*Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт физики высоких энергий  
имени А.А. Логанова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,  
Протвино, Россия*

E-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ ведутся работы по созданию первого в России экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на действующем Ускорительном комплексе У-70. На ускорительном комплексе У-70 освоен медленный вывод пучка ускоренных ионов углерода промежуточных энергий в экспериментальный зал 1БВ. Ведутся работы по разработке методики использования ионов углерода в медицинских целях [1].

Для медицинского применения точность подведения дозы к объему облучаемой опухоли, должна быть не хуже 5 %. Актуальность методики калибровки ионизационных камер с использованием активационного детектора обусловлена её эффективностью и простотой реализации по сравнению с прямыми измерениями с помощью цилиндра Фарадея [2,3]. Для работы с ускоренными ядрами углерода наиболее применимым является активационный детектор из чистого углерода с естественной смесью изотопов, при этом используются реакция  $^{12}\text{C} (^{12}\text{C}, \text{X})^{11}\text{C}$ . Изотоп  $^{11}\text{C}$  представляет собой  $\beta^+$ -излучатель. При аннигиляции позитрона и электрона испускаются два  $\gamma$ -кванта с энергией 511 кэВ, которые вылетают строго в противоположном друг от друга направлении. Для измерения активности таких событий удобно использовать радиометрическую установку, работающую по принципу  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений.

В настоящей работе представлена радиометрическая экспериментальная установка, работающая по принципу  $\gamma$ - $\gamma$ -совпадений для калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода активационными детекторами. Установка обеспечивают измерение активности образцов с погрешностью порядка 3%. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

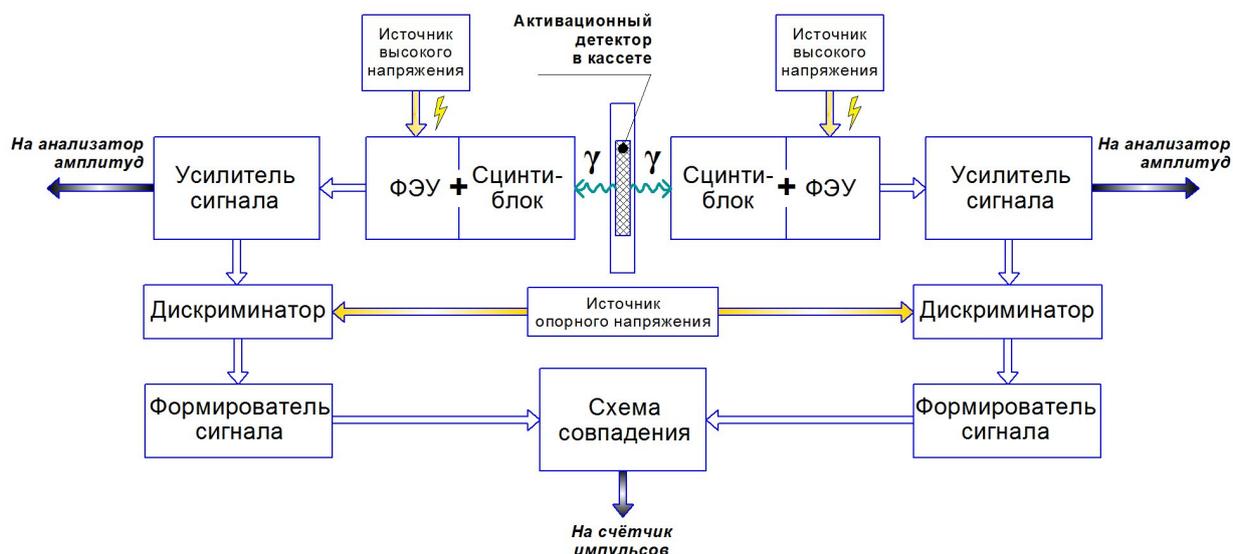


Рис. 1. Блок-схема радиометрической установки.

В работе приводится описание самой установки и процесса измерения её эффективности регистрации с использованием контрольного образцового источника  $^{22}\text{Na}$  из набора Образцовых Спектрометрических Гамма Источников (ОСГИ). Эффективность регистрации радиометрической установки была измерена и составляет 42%.

На работающем прототипе данной радиометрической установки уже в течение нескольких сеансов работы ускорительного комплекса У-70 при работе с ионами углерода энергии 400-450 МэВ/нуклон проводится калибровка плоскопараллельной ионизационной камеры, разработанной и изготовленной ИФВЭ. Готовится руководство по эксплуатации установки и методика выполнения измерений.

1. V. Pikalov et al. The Results Obtained on "Radiobiological Stand" Facility, Working with the Extracted Carbon Ion Beam of the U-70 Accelerator // Proc. RuPAC'21. Alushta: JACoW Publishing, 2021. P. 124-126.
2. J.B. Cumming. Monitoring reactions for high energy proton beams // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 1963. – V. 13, 261-286.
3. Г.И. Крупный, Г.Н. Стеценко, А.А. Янович. Методические вопросы использования пороговых активационных детекторов в радиационных исследованиях на ускорительном комплексе ИФВЭ // Препринт ИФВЭ 2000-30 (Потвино, 2000).

# ОБЗОР АКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМАХ СОРТИРОВКИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

О. В. Вольпяс<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: o.volpyas@rtc.ru

Детектирование альфа-излучающих радионуклидов является важной задачей при сортировке радиоактивных отходов (далее – РАО) в связи с увеличением объемов радиоактивных материалов, требующих переработки в процессе вывода из эксплуатации объектов ядерно-топливного цикла. В настоящее время для регистрации альфа-излучения на расстоянии широкое применение нашли методы аэроионной регистрации и радиolumинесценции.

Использование классических методов детектирования с помощью сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов для регистрации альфа-излучения затруднительно из-за ограничений, обусловленных малым пробегом альфа-частиц в воздухе и необходимостью размещения детектора в непосредственной близости от источника излучения. Таким образом, классические методы детектирования не подходят при работе с крупными РАО или в условиях повышенного радиационного фона.

Рассматривая данный вопрос с другой стороны, можно регистрировать альфа-излучение не за счет детектирования самих альфа-частиц, а с помощью счетчиков аэроионов регистрировать ионы, образующихся при взаимодействии альфа-частиц с молекулами воздуха. Это позволяет значительно увеличить расстояние обнаружения источников альфа-излучения, что обеспечивает повышение эффективности регистрации альфа-частиц. Эффективность этого метода заключается в способности обнаружения источников альфа-излучения на расстояниях до нескольких десятков сантиметров или даже метров, в зависимости от условий среды. Данный метод успешно применяется на практике – в России запатентовано устройство для дистанционного обнаружения источников альфа-излучения [1]. Устройство предназначено для регистрации альфа-излучения в присутствии значительного фона от сопутствующих излучений иной природы.

В настоящее время активно исследуются методы детектирования альфа-частиц на основе радиolumинесценции. Одним из них является метод детектирование фотонов, испускаемых возбужденными молекулами азота, когда альфа-частицы ионизируют воздух. Этот метод позволяет регистрировать излучение на значительных расстояниях, что делает его особенно полезным для мониторинга радиации на ядерных объектах. В частности, системы, использующие радиolumинесценцию, могут эффективно обнаруживать источники альфа-излучения на расстоянии до 3 метров, при этом сохраняя высокую точность и чувствительность. Точность таких систем определяется возможностью локализации источников излучения с погрешностью  $\approx 10$  см, чувствительность заключается в способности обнаружения низких концентраций альфа-излучающих веществ при минимальной флуктуации фона, даже при наличии внешнего освещения [2-4].

Применение методов аэроионной регистрации и радиolumинесценции для дистанционного мониторинга обеспечивает высокую чувствительность и точность обнаружения альфа-источников на значительных расстояниях. Их использование при разработке современной радиометрической аппаратуры позволит минимизировать контакт

персонала с радиоактивными материалами и повысить эффективность процессов обработки РАО на объектах ядерно-топливного цикла.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки\_России FNRG-2022-0014, рег. № 1021051302488-7-2.2.2;2.3.5 «Исследование программных и аппаратных способов безопасной и эффективной сортировки радиоактивных отходов по морфологии и активности

1. В.П. Мирошниченко, Е.М. Онищенко, Б.У. Родионов, А.Б. Симаков, А.В. Шальнов. Патент № 2158009 Российская Федерация, МПК G01 T 1/167. Устройство для дистанционного обнаружения источника альфа-излучения: № 99127256/28: заявл. 30.12.1999 : опубл. : 20.10. – 8 с.
2. A.J. Crompton, K.A.A. Gamage, A. Jenkins, C.J. Taylor. Alpha Particle Detection Using Alpha-Induced Air Radioluminescence: A Review and Future Prospects for Preliminary Radiological Characterisation for Nuclear Facilities Decommissioning // Sensors (Basel). 2018. V. 18(4), 1015.
3. L. Kong, T.B. Scott, J.C.C. Day, D.A. Megson-Smith. Advancements in Remote Alpha Radiation Detection: Alpha-Induced Radio-Luminescence Imaging with Enhanced Ambient Light Suppression // Sensors. 2024. V. 24(12), 3781.
4. Z. Wu, J. Cheng, M. Xu, Q. Wang, A. Yu, Y. Zhang, W. Wen, Y. Wu, Z/ Tang. Application and Development of Noncontact Detection Method of  $\alpha$ -Particles Based on Radioluminescence // Sensors. 2022. V. 22(1), 202.

# ЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИИ

В. К. Егоров<sup>1</sup>, Е. В. Егоров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники Российской академии наук,  
Черноголовка, Мос. Обл., Россия,

<sup>2</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН  
Фрязино, Мос. Обл., Россия

E-mail: egorov@iptm.ru

Экспериментально установлено, что реализация реакций ядерного синтеза с образованием ядер промежуточной массы в результате слияния лёгких ядер представляется существенно более выгодной в сравнении с использованием реакций распада тяжёлых ядер. Поэтому одной из задач ядерной энергетики является разработка технологий реализации таких реакций, которые сводятся к поиску методов преодоления, так называемого кулоновского барьера. Имеется два подхода к решению этой задачи. В термоядерных устройствах преодоление этого барьера осуществляется за счёт предания ядрам, предназначенным для ядерного синтеза, высокой кинетической энергии, превышающей энергию их электростатического отталкивания. Однако энергетические затраты на создание условий протекания реакций пока превышают энергию их выхода. Другой подход, к проведению ядерного взаимодействия, связан с идеей холодного ядерного синтеза или ядерной трансмутации. Он ориентирован на протекание ядерных реакций путём подбарьерного туннелирования. Энергетический выход таких реакций несоизмерим с величинами, ожидаемыми на основании знания энергии связи в ядрах. Анализируя особенности протекания реакций холодного ядерного синтеза проф. Чабс предположил, «что дейтон в некоторых условиях может превратиться в волну, в этом виде может провзаимодействовать с другой дейтоновой волной и, минуя кулоновский барьер, может сформировать гелиевую волну, которая, в свою очередь, превратиться в поток гелиевых частиц, которые усвоят энергетическую разницу в энергиях связи ядер гелия и дейтерия». Это сообщение, коррелирующее с идеей де Бройля о корпускулярно-волновой природе материи, не было воспринято научным сообществом, вследствие отсутствия механизма управляемого корпускулярно-волнового преобразования материи. С открытием явления волноводно-резонансного распространения радиационных потоков такой механизм был найден [1]. Оказалось, что независимые квазимонохроматические радиационные потоки могут взаимодействовать в результате взаимного влияния однородных интерференционных полей, возбуждённых этими потоками в плоских протяжённых материальных щелевых зазорах, транспортирующих радиационные потоки в соответствии с механизмом их волноводно-резонансного распространения. Результатом подобного взаимодействия является функционирование радиоприёмных устройств гетерогенного типа, в которых используется синтез входного и гетерогенного излучения. Хорошо известно, что потоки тепловых нейтронов с энергией  $E_{(300\text{K})}=0.025$  эВ характеризуется средней длиной волны  $l_0=0.17$  нм и проявляют свойства, соответствующие потокам рентгеновского излучения. Аналогичное поведение характерно и для атомных и молекулярных потоков гелия и водорода. Потоки атомов  ${}^4\text{He}$ , сформированные при температуре 90 К, будут характеризоваться средней энергией  $E=0.01$  эВ ( $l=0.137$  нм), а атомов дейтерия – энергией  $E=0.01$  эВ ( $l=0.194$  нм) и в волноводах-резонаторах, они будут формировать однородное интерференционное поле стоячей радиационной волны. Поскольку независимые радиационные потоки могут взаимодействовать через взаимное влияние возбуждённых ими однородных интерференционных полей, можно утверждать, что подобный подход позволяет надеяться на реализацию реакций ядерного синтеза с использованием волноводно-

резонансных структур. На рисунке 1 представлена схема конструкции, позволяющей реализовать ядерную реакцию:  $D+H \rightarrow He^3 (0.8 \text{ МэВ}) + \gamma (4.7 \text{ МэВ})$  с  $Q=5.5 \text{ МэВ}$ .

Конструкция требует наличия вакуума на уровне  $1 \times 10^{-9}$  торр и использования монохроматоров. Ожидаемая эффективность для данной реакции около 20%, поскольку механизм утилизации энергии гамма-квантов пока не отработан.

Исследования проведены в рамках выполнения Государственного задания № 075-00296-24-01.

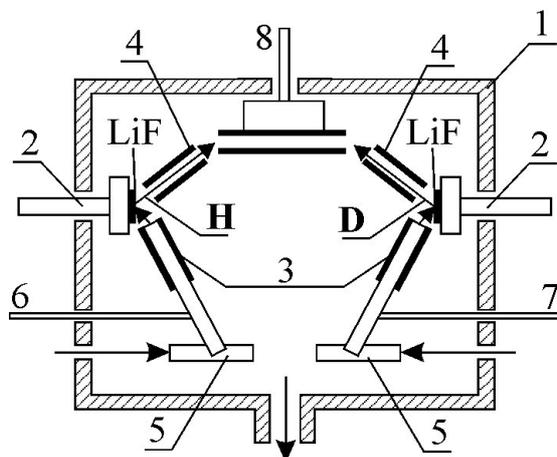


Рис. 1. Вакуумная конструкция для реализации ядерной реакции D+H. 1. Корпус; 2. Вакуумные гониометры; 3. Микроколлиматоры; 4. Волноводы-резонаторы; 5. Термостаты; 6. Ввод газообразного водорода; 7. Ввод газообразного дейтерия; 8. Система отвода энергии.

1. В. Егоров, Е. Егоров. Планарные рентгеновские волноводы-резонаторы. Реализация и перспективы. – Saarbrücken: Lambert Acad. Publ., 2017.

# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВКИ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ УСКОРЯЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ УСКОРИТЕЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

А. Р. Конеев<sup>1</sup>, Т. П. Михальков<sup>1</sup>, Д. С. Юров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

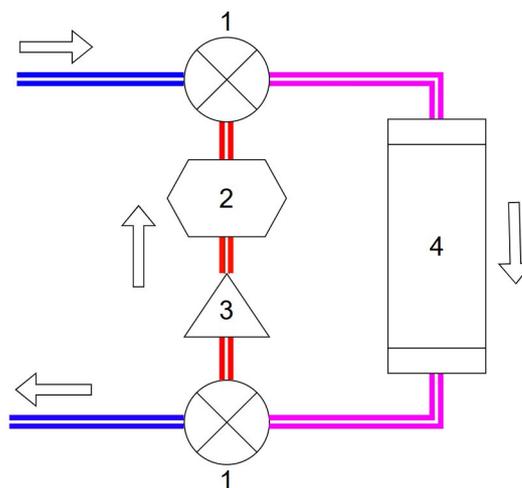
E-mail: aleksandrkonneyev21@gmail.com

В настоящее время линейные ускорители электронов закрепляют свои позиции в отечественном наукоемком секторе как необходимый инструмент для решения широкого круга задач. Так, они используются в медицине, обработке материалов, являются основной частью досмотровых комплексов<sup>1</sup>. По характеру генерируемого пучка ускорители делятся на два типа: импульсные ускорители и ускорители непрерывного действия. Последние производят непрерывный во времени пучок, который удобен для изучения свойств материалов за счёт большого среднего тока. Разработка средств для поддержания высокой временной стабильности характеристик пучка является одной из актуальных проблем для ускорителей такого типа.

В работе описывается одна из методик<sup>2</sup>, помогающих решить проблему поддержания резонансной частоты ускоряющей структуры на требуемом значении при различных уровнях СВЧ потерь в стенках. Данная проблема особенно актуальна для многосекционных ускорителей, где резонансные частоты ускоряющих структур при изначально неидеальной настройке должны совпадать как можно точнее для эффективного преобразования мощности СВЧ источника в мощность пучка.

Суть метода заключается в следующем: к водяному охлаждающему контуру структуры подключаются через трёхходовые клапаны насос и трубчатый электронагреватель. За счёт подмешивания части охлаждающей жидкости с выхода ускоряющей структуры ко входному потоку во время работы с СВЧ мощностью температура ускоряющей структуры и, соответственно, её резонансная частота может регулироваться в определённых пределах. Такое использование СВЧ мощности, рассеиваемой в стенках структуры, позволит значительно снизить расход электроэнергии по сравнению с классическим методом регулировки резонансной частоты с использованием одних только ТЭНов. Кроме того, использование данной методики может сгладить влияние переходных процессов во время подачи СВЧ мощности в ускоряющую структуру на стабильность уровня ускоряющего поля в ней.

В настоящее время методика находится в стадии тестирования на макете ускорителя непрерывного действия на энергию электронов 1 МэВ. Ниже приведена схема установки.



Общая схема установки. 1 - трёхходовой клапан, 2- ТЭН, 3 - насос, 4 – ускоряющая структура ускорителя. Стрелками указаны направления движения воды по трубкам.

1. Черняев А. П. Ускорители в современном мире. — М.: Издательство Московского университета, 2012. -368 с.
2. Paul J. Tallerico, A. K. Mitra, The Racetrack Microtron Radio-Frequency System, Proceedings of the 1981 Linear Accelerator Conference, Santa Fe, New Mexico, USA

# ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГЕРМАНИИ С РАЗЛИЧНЫМ ИЗОТОПНЫМ СОСТАВОМ

Г. С. Мальцев<sup>1,2</sup>, П.В. Семенихин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное научное учреждение «Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики», Санкт-Петербург, Россия,

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», Санкт-Петербург, Россия

E-mail: g.malcev@rtc.ru

С целью регистрации спектра ионизирующего излучения используются гамма-спектрометры, наиболее распространенными являются полупроводниковые диоды на основе особо чистого германия, которые получили свое широкое распространение ввиду превосходства их регистрационных характеристик по сравнению с иными полупроводниковыми материалами: малая ширина запрещенной зоны, позволяющая регистрировать излучение в широком диапазоне энергий, высокая подвижность носителей заряда, гарантирующая быстродействие спектрометров и уменьшающая их мертвое время регистрации, большое зарядовое число и плотность, за счет чего увеличивается сечение захвата и, соответственно, эффективность спектрометра. Именно за счет перечисленных параметров германий остается перспективным и наиболее востребованным материалом, в качестве основы для спектрометров и детекторов. Однако рассматриваемый полупроводник не лишен недостатков, один из которых – слабая радиационная стойкость. Полупроводниковая электроника как таковая подвержена деградации кристаллической структуры из-за радиационного излучения, дефекты, связанные с нарушением порядка атомов внутри объема полупроводника (радиационные дефекты) и взаимодействием с падающим излучением, приводящему к дальнейшему ядерному распаду атомов полупроводника (трансмутация) [1]. Для решения задачи повышения радиационной стойкости планируется развитие озвученной еще в 50-ые годы идеи применения моноизотопного материала [2] с целью совершенствования технологии трансмутационного легирования, которая приобрела популярность только в настоящее время из-за технической сложности ее реализации.

Радиационное излучение включает в себя гамма-излучение, альфа-частицы, электроны, позитроны и нейтроны. Это может привести к изменениям в кристаллической структуре материала полупроводника. В частности, нейтроны способны увеличивать массу ядра, вызывая последующий переход к менее стабильному изотопу.

Эти изменения, в свою очередь, влияют на электрофизические параметры полупроводниковых детекторов и полезны в процессах трансмутационного легирования. Однако, такое легирующее действие нейтронов негативно влияет на работу спектрометра, путем увеличения темновых токов и сокращения области обедненного заряда за счет насыщения носителями заряда рабочего объема детектора. Для минимизации этого воздействия, с целью повышения стойкости к нейтронному излучению предлагается использование материалов, обогащенных наиболее стойким к нейтронному излучению изотопом.

Применение таких материалов может существенно увеличить срок службы приборов, работающих в условиях повышенного радиационного фона. Это имеет важное значение для обеспечения долгосрочной и надежной работы радиационных измерительных систем в условиях, где высокий уровень излучения может быть обусловлен различными факторами, включая ядерные эксперименты, утилизацию

отходов, медицинские процедуры и другие сферы с повышенным фоном. На данный момент в России имеются методы получения изотопнообогащенных полупроводников [3,4], известны исследования по модулированию изотопного состава для увеличения эффективности трансмутационного легирования [5,6] и улучшения электрофизических свойств (повышение подвижности носителей в кремнии), целью данной работы является исследование возможности повышения радиационной стойкости за счет оптимизации изотопного состава.

1. Кулаков В.М. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / В.М. Кулаков, Е.А. Ладыгин, В.И. Шаховцов и др.; под ред. Е.А. Ладыгина. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с.
2. J.W. Cleland. Transmutation-Produced Germanium Semiconductors / J.W. Cleland, K. Lark-Horovitz, J.C. Pigg. Oak Ridge National laboratories, Oak Ridge, Tennessee, 1950.
3. Патент РФ: 2331463. Способ разделения изотопов / В.Г. Афанасьев, В.В. Водолазских и др. Заявл. 25.09.2006 Оpubл. 27.08.2008.
4. Липский В.А. Получение и оптические свойства высокочистого изотопно обогащенного германия. Диссертация канд. хим. наук. Нижний новгород. 2021. 119 с.
5. Шлимак И.С. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников: наука и приложения / И.С. Шлимак // Физика твердого тела, - 1999. -том. 41. -№5. С. 794-798.
6. Ионов. А.Н. Определение коэффициентов нейтронно-трансмутационного легирования германия / А.Н. Ионов, М.Н. Матвеев, Д.В. Шмикк. // Журнал технической физики. – 1989. – С. 169-171.

# ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ СВЧ ПИТАНИЯ УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Т. П. Михальков<sup>1</sup>, А. Р. Конеев<sup>1</sup>, Д. С. Юров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, Москва, Россия,

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,  
Москва, Россия

E-mail: tima.mikhalkov@gmail.com

Временная стабильность характеристик пучка от ускорителя позволяют с большей точностью задавать дозы облучения, что зачастую является важнейшим фактором при исследовании свойств образцов методом облучения электронным пучком. В данной работе проведено исследование процессов, происходящих в системе СВЧ питания ускорителя непрерывного действия НИИЯФ МГУ с энергией 1 МэВ [1] и его ускоряющей структуре с целью повышения временной стабильности ускоряющего поля.

Система питания данного ускорителя представляет собой замкнутый контур, по которому непрерывно циркулирует СВЧ-сигнал. Контур состоит из клистрона, ускоряющей структуры и управляющих элементов, обеспечивающих обратную связь структуры и клистрона, а также измерение уровня поля в структуре. Одним из управляющих элементов является фазовращатель, с помощью которого может регулироваться частота СВЧ сигнала и рабочая точка на резонансной кривой ускоряющей структуры.

С учётом нелинейного эффекта при работе ускорителя в непрерывном режиме [2] и при условии баланса фаз между элементами цепи можно получить зависимость [3] мощности поля в структуре от сдвига фаз на фазовращателе:

$$\Delta\varphi_{ph} + \varphi_0 = \begin{cases} \alpha \left( \chi P + \frac{f_0}{2Q} \sqrt{P_0/P - 1} \right) - \arctg \left( \sqrt{P_0/P - 1} \right), f < f_0 \\ \alpha \left( \chi P - \frac{f_0}{2Q} \sqrt{P_0/P - 1} \right) + \arctg \left( \sqrt{P_0/P - 1} \right), f > f_0 \end{cases},$$

где  $P$  – мощность поля в ускоряющей структуре,  $P_0$  – мощность поля в структуре в резонансе,  $Q$  – добротность структуры,  $f_0$  – резонансная частота структуры,  $f$  – смещённая в силу нелинейности частота структуры (зависит от мощности как  $f = f_0 - \chi P$  [2]),  $\alpha$  – константа, учитывающая набег фаз в соединительных элементах,  $\Delta\varphi_{ph}$  – сдвиг фаз на фазовращателе,  $\varphi_0$  – начальная фаза на фазовращателе. Причиной нестабильности ускоряющего поля в структуре во время подачи СВЧ мощности является нагрев структуры и связанный с этим сдвиг резонансной частоты, за счет чего при  $\alpha \neq 0$  происходит смещение рабочей точки на резонансной кривой.

Приведенной зависимостью были аппроксимированы экспериментальные данные работы ускорителя в стационарном режиме (рис. 1, красной линией показана аппроксимирующая кривая). Это позволило определить параметр  $\chi$  ускорителя – один из параметров, отвечающих за временную нестабильность поля в ускоряющей структуре (при условии  $t \gg t_{\text{характерное}}$ ).

Анализ полученных данных позволяет сформулировать различные методы минимизации нестабильности уровня поля в структуре во время подачи СВЧ мощности: выбор начального положения фазовращателя, обеспечивающего минимальную вариацию уровня поля; быстрая подстройка положения фазовращателя во время переходных

процессов; поддержание резонансной частоты структуры на одном уровне с помощью системы охлаждения.

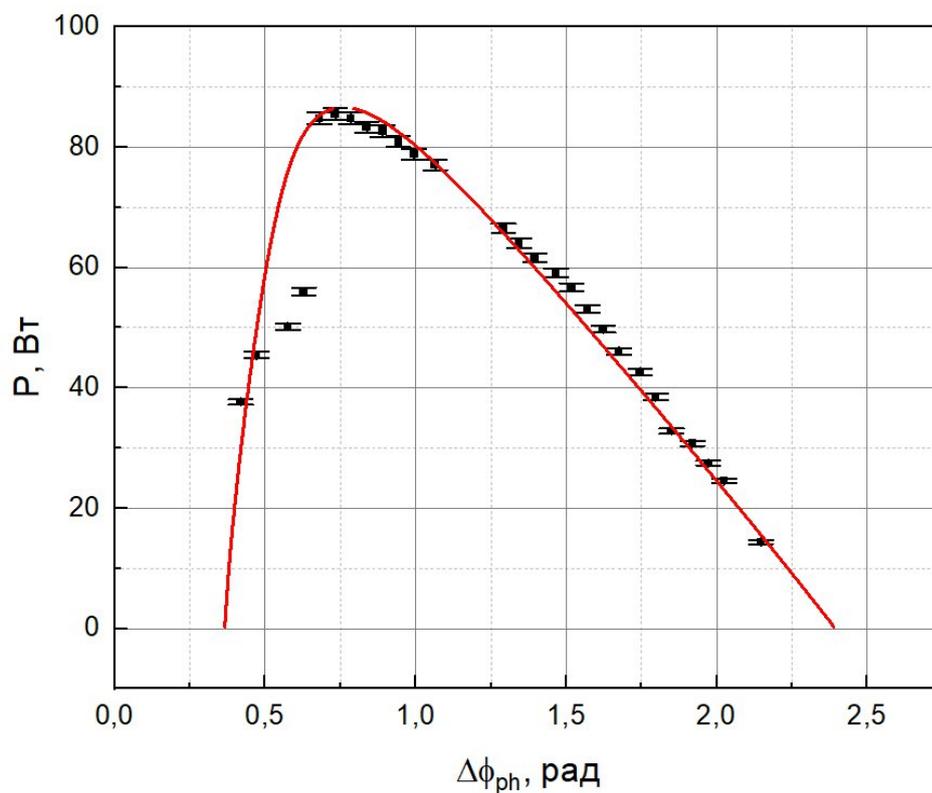


Рис. 1. Зависимость мощности поля в структуре от сдвига фаз на фазовращателе.

1. Юров Д.С., Шведун В.И., Алимов А.С., Линейные ускорители электронов непрерывного действия для научных и прикладных целей, Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, Изд-во Моск. ун-та (М.), № 1, с. 2310501-1-2310501-5
2. А. С. Алимов, И. В. Грибов, А. Ф. Курбатов, К. Ю. Платов, В. И. Шведун, Нелинейный эффект при работе ЛУЭ в непрерывном режиме, Письма в ЖТФ, 1987, том 13, выпуск 23, 1417–1419.
3. Ольховский И.И. Курс теоретической механики для физиков. Издательство Московского Университета, 1978.

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СИСТЕМЕ ГРАФИТОВЫХ ТИГЛЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ СИНТЕЗЕ КАРБИДОВ И БОРИДОВ МЕТАЛЛОВ

Д.Е. Стовец<sup>1,2</sup>, Г.А. Блейхер<sup>1</sup>, А.Я. Пак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Томский политехнический университет, инженерная школа ядерных технологий, Томск, Россия,

<sup>2</sup>Томский политехнический университет, инженерная школа энергетики, Томск, Россия

E-mail: des30@tpu.ru

Увеличивающийся спрос на материалы, обладающие уникальными физическими свойствами, создаёт необходимость в новых способах получения подобных материалов. Одним из перспективных является метод синтеза веществ с помощью дугowego разряда в условиях атмосферы, таким способом возможно получение карбидов и боридов различных металлов [1][2]. На фоне других методов синтеза подобных соединений, данный метод выделяется возможностью реализации в открытой воздушной среде и относительно небольшим временем рабочего процесса. Одной из задач, которую необходимо решить, для реализации синтеза данным методом является поиск режимов работы установки, при котором будет успешно произведён синтез, а также будет затрачиваться наименьшее количество энергии. Под режимом работы в данном случае подразумевается комбинация значений силы тока, напряжения и длительности процесса.

Решение данной задачи только экспериментальным путём является нецелесообразным, так как для определения совокупности параметров под каждое отдельное соединение углерода и бора с металлами требуется проведение большого числа экспериментов.

Возможным способом решения является построение математической модели системы, которая будет демонстрировать распространение температурных полей в тигле в процессе работы установки в зависимости от прилагаемой мощности.

Ввиду сложности математического описания движения катодного пятна по поверхности графитовой крышки, было принято упрощение, состоящее в равномерном распределении плотности мощности дугowego источника на обрабатываемой поверхности. Подобное упрощение позволяет описывать процесс распространения тепла с помощью уравнения теплопроводности с заданными начальными и граничными условиями [3]. Уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат с азимутальной симметрией:

$$c(Z,t) \rho(Z,t) \frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \lambda(Z,R) \frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial Z} + \frac{1}{R} \lambda(Z,R) \frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial R} + \frac{\partial}{\partial R} \lambda(Z,R) \frac{\partial T(Z,R,t)}{\partial R}$$

Начальным условием будет значение температуры в момент времени, соответствующий  $t = 0$ :

$$T(Z,R,0) = 300 \text{ K}$$

На поверхности крышки тигля задаётся плотность мощности дугowego источника. Её значение является усреднённым по площади облучаемой поверхности:

$$q = \frac{UI}{S_{кр}}$$

где  $I$  – среднее значение силы тока источника в процессе работы,  $U$  – среднее напряжение источника в процессе работы,  $S_{кр}$  – площадь крышки внутреннего тигля.

Передача системой тиглей энергии алюминиевой пластине, на которую

устанавливалась система, или в окружающую среду описывалась с помощью законов Стефана-Больцмана и Ньютона-Рихмана.

Система разбивалась на 4 расчётные области, для каждой из которых записывалось граничное условие. Расчёт разработанной модели производился в “Comsol Multiphysics”, результат расчёта представлен на рисунке 1.

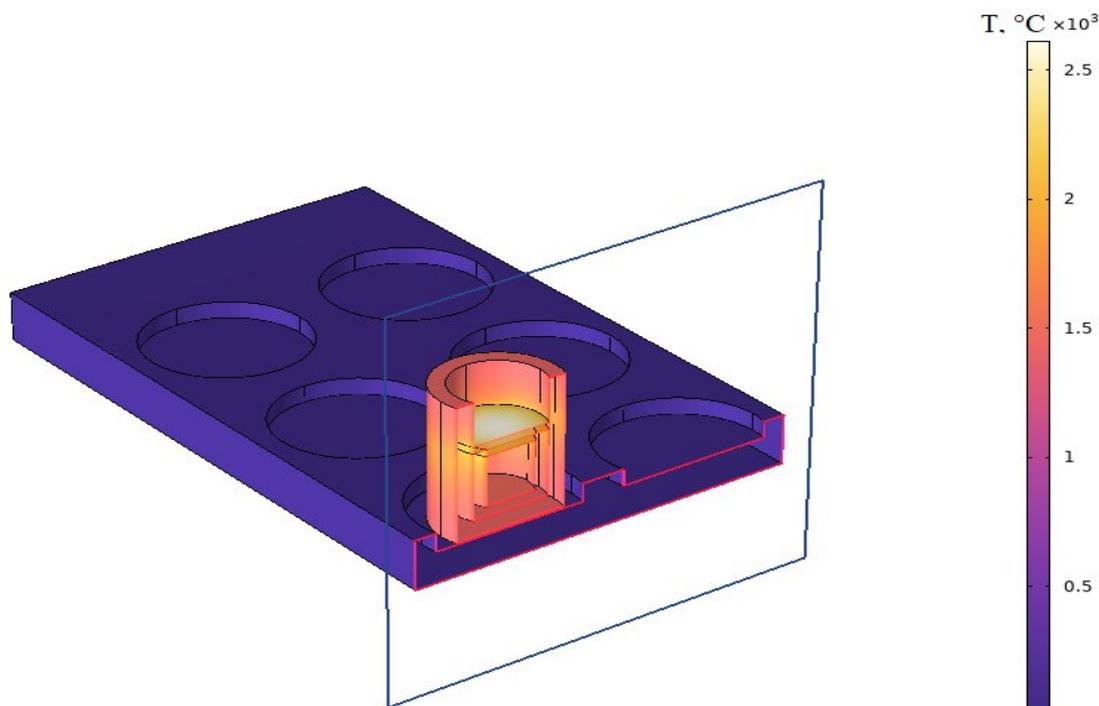


Рис. 1. Объёмный график распределения температур в системе в разрезе.

Результаты расчётов сравнивались с измеренными в процессе эксперимента температурами. Результаты проведённых измерений и расчёта модели согласуются.

#### *Финансирование*

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Государственного задания ВУЗам (проект № FSWW-2022-0018).

1. Ю.З. Васильева, А.Я. Пак. Синтез карбида молибдена в самокранирующей электродуговой плазме // *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 2. С. 62–72.
2. А.Ya. Pak, A.P. Korchagina, A.A. Gumovskaya, S.A. Yankovsky, G.V. Arysheva, E.N. Kolobova, Zh. Bolatova. Energy-efficient direct current arc plasma synthesis of tantalum carbide powder by advanced vacuum-free method // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2023. V.112
3. П.В. Цой. Методы расчёта задач тепломассопереноса. — М.: Энергоатомиздат, 1984.

# ПРИМЕНЕНИЕ КСЕНОНОВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

И.Ф.Химматов<sup>1</sup>, С.Е.Улин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова,  
Самарканд, Узбекистан

<sup>2</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

E-mail: islombekhimmatov24@gmail.com

Использование гамма-спектрометров в процессе нейтрон захватной терапии (НЗТ) позволяет точно определить дозовую нагрузку на пациента за счет регистрации гамма-квантов с энергией 478 кэВ от продуктов ядерной реакции. Хотя сцинтилляционные и полупроводниковые спектрометры широко применяются для НЗТ, но они имеют низкую радиационную стойкость к нейтронным потокам. В данной работе обсуждается возможность использования ксенонового гамма-спектрометра (КГС), основанного на цилиндрической ионизационной камере, заполненной ксеноном под давлением 40 атм., для оценки дозовой нагрузки при проведении НЗТ. Основными преимуществами данного детектора являются его высокая радиационная стойкость к нейтронным потокам и его энергетическое разрешение составляет  $(1,7 \pm 0,3) \%$  при энергии гамма-квантов 662 кэВ. Эти характеристики делают КГС надежным инструментом для получения эффективных данных для выполнения НЗТ.

В работе использовались импульсный генератор нейтронов, что позволило провести экспериментальные исследования и подтвердить эффективность КГС.

На рис. 4 приведены гамма-спектры, полученные при облучении мишени растворами двух различных концентраций  $^{10}\text{B}$ . Фон вычтен из измеренных спектров.

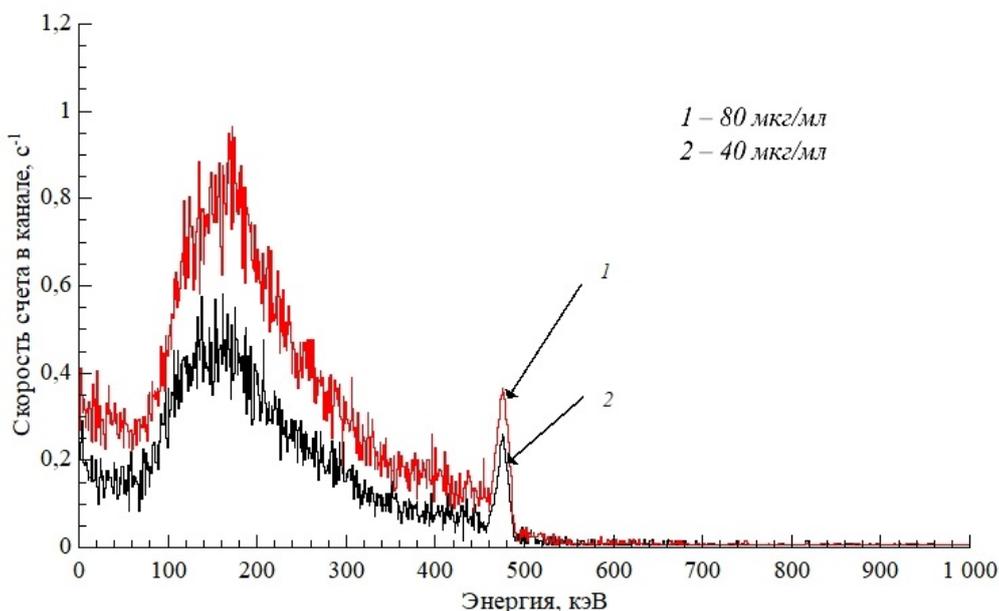


Рис.4. Гамма-спектры, измеренные с помощью КГС, при облучении мишени с водного раствора борной кислоты с различной концентрацией  $^{10}\text{B}$ .

Применение ксенонового гамма-спектрометра в НЗТ обеспечит измерение дозовую нагрузку, что позволит повысить эффективность лечения пациентов с онкологическими заболеваниями.

1. Novikov A. S. и др. Xenon gamma-ray spectrometers: development and applications // 2019. № September 2019. С. 19.
2. V. V. Dmitrenko и др. Detection of Neutrons and  $\gamma$  Rays by a Xenon Pulsed Ionization Chamber. 2012, Vol. 55, No. 4, pp. 419–422.
3. Koryakin S. N. и др. The experience of using portable Russian neutron generator for gamma-neutron therapy of domestic animals with malignant tumors // Radiat. Risk. 2018. Т. 27. № 1. С. 94–106.
4. Shustov A. E. и др. Thermal neutrons registration by xenon gamma-ray detector // J. Phys. Conf. Ser. 2016. Т. 675. № 4.
5. Улин С. Е. и др. Гамма-спектрометрический комплекс для вывода ядерных объектов из эксплуатации // 2020. С. 32–40.
6. Khimmatov, I.F., Ulin, S.E. Use of a Xenon Gamma Spectrometer for Dosimetry in Boron–Neutron Capture Therapy. Phys. Atom. Nuclei 87, 620–624 (2024).