

Для данного исследования был использован инструментарий GEANT4. Мы выбрали моноэнергетические пучки фотонов, электронов и позитронов в качестве первичного излучения и направили их на водный фантом, провели моделирование с использованием статистики из 10 миллионов первичных частиц. В результате моделирования были получены спектры вторичных электронов и фотонов, которые возникают в процессах различных механизмов. Были оценены вклады каждого из этих механизмов в образование вторичных электронов. Мы определили долю энергии первичных частиц, которая передается вторичным частицам в различных процессах, а также относительный вклад каждого из этих процессов в общее количество и суммарную энергию вторичных частиц.

Исследование выполнено при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

### Литература

1. A.V. Ivantchenko et al. Geometry and physics of the Geant4 hadronic physics for space radiation environment. *International Journal of Radiation Biology*, 88(1-2):171-175, sep 2011
2. А.П. Черняев, А.В. Белоусов, Е. Н. Лыкова ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

## ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЙ СИНГЛЕТНЫЙ КИСЛОРОД СТИМУЛИРУЕТ БИОЭНЕРГЕТИКУ ИНСУЛИН-ПРОДУЦИРУЮЩИХ КЛЕТОК

Ератова Л. В., Маковик И. Н., Винокуров А. Ю., Дрёмин В. В.

*Орловский ГУ им. И.С.Тургенева, Лаборатория КФП НТЦ  
биомедицинской фотоники, Орёл, Россия*

E-mail: [eratovalv7@gmail.com](mailto:eratovalv7@gmail.com) E-mail: [irina.makovik@gmail.com](mailto:irina.makovik@gmail.com);

E-mail: [tolmach\\_88@mail.ru](mailto:tolmach_88@mail.ru) E-mail: [dremin\\_viktor@mail.ru](mailto:dremin_viktor@mail.ru)

Сегодня сахарным диабетом (СД) страдает каждый 11-й человек в мире, поэтому поиск стратегий раннего лечения СД является актуальной проблемой здравоохранения. Одним из таких подходов является восстановление функции  $\beta$ -клеток поджелудочной железы, отвечающих за секрецию инсулина.

Выработка аденозинтрифосфата (АТФ) митохондриями  $\beta$ -клеток, которая нарушается при СД, является основным фактором секреции инсулина [1]. Поэтому видится перспективным использовать активацию митохондриального дыхания и выработки АТФ митохондриями  $\beta$ -клеток в качестве терапевтической мишени. Недавно было продемонстрировано, что прямая лазерная генерация синглетного кислорода (СК) может служить активатором митохондриального дыхания и выработки АТФ [2]. Эта работа послужила основой для нашего исследования.

Исследования проводили на клетках инсулиномы крысы RINm5F (модель островковых  $\beta$ -клеток поджелудочной железы) методами конфокальной микроскопии (с измерением мембранного потенциала митохондрий (МПМ), продукции СК и других АФК) и флуоресцентной микроскопии (продукция NADH, цитозольного  $Mg^{2+}$ ) с применением флуоресцентных зондов. Генерация СК осуществлялась с помощью разработанного устройства, включающего источник лазерного излучения с длиной волны 1267 нм для возбуждения триплетного кислорода.

Установлено:

- лазерное излучение 1267 нм активирует выработку СК в клетках (на основании данных с зондом SOSG, селективным к СК);
- лазерное облучение 1267 нм не приводит к образованию других активных форм кислорода в исследуемой культуре (на основании данных с индикатором супероксида

DHE и индикатором продуцируемых митохондриями АФК MitoTracker Red CM-H2Xros);

- СК приводит к большему увеличению продукции NADH после каждого добавления глюкозы к клеткам по сравнению с экспериментами без лазера (на основании данных исследований автофлуоресценции NADH);
- МПМ при добавлении глюкозы выше после облучения клеточной культуры, чем при добавлении глюкозы к необлученным клеткам (на основании данных с потенциометрическим зондом TMRM);
- СК приводит к уменьшению продукции цитозольного  $Mg^{2+}$ , что означает большую выработку митохондриями АТФ по сравнению с контролем (на основании данных с зондом Mag-Fura-2, индикатором внутриклеточного  $Mg^{2+}$ ).

Выявлены различия в изменении анализируемых параметров исследуемых клеток после лазерного воздействия по сравнению с контрольной группой клеток. Полученные на данном этапе результаты указывают на потенциальную возможность использования лазерно-индуцированного СК в регуляции функций  $\beta$ -клеток.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 22-75-10088.

### Литература

1. Haythorne E. et al. Diabetes causes marked inhibition of mitochondrial metabolism in pancreatic  $\beta$ -cells. *Nat. Commun.* 2019, 10, 2474.
2. Sokolovski S. et al. Singlet oxygen stimulates mitochondrial bioenergetics in brain cells. *Free Radic. Biol. Med.* 2021, 163, 306-313.

## РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ПРОТОННЫМ ПУЧКОМ

И.Ф. Жаринов<sup>1</sup>, А.А. Щербаков<sup>1,2</sup>, М.А. Белихин<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова НИИЯФ им. Д. В. Скобельцына, Москва, Россия

<sup>3</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

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

Ядерно-физические методы получили широкое распространение в различных областях современной медицины — от диагностики до непосредственно терапии. В частности, эффективным методом лечения является терапия на пучках протонов. К ее преимуществам можно отнести высокую точность воздействия, пространственное разрешение, и, как следствие, точечное поражение злокачественных образований. Однако существуют также негативные факторы, среди которых высокая стоимость и сложность оборудования и проведения процедур, а также наличие вторичного излучения, состоящего из различных частиц. Развитие протонной лучевой терапии началось в середине прошлого века, в СССР в 1967 году впервые был получен терапевтический протонный пучок, энергия которого достигала 200 МэВ. Несмотря на постоянное совершенствование методов терапии, эффекты, связанные со вторичными частицами изучены не до конца, поскольку экспериментально выделить их вклад в поглощенную дозу не представляется возможным.

Вторичные частицы, такие как нейтроны, фотоны и электроны, так же вносят вклад в поглощенную дозу, который мы должны учитывать. Вторичные частицы имеют значительно более широкие энергетический спектр и угловое распределение, чем первичное излучение. Без соответствующих мер предосторожности вторичное излучение несет потенциальную опасность, поскольку распространяется во всех направлениях. В частности, нейтроны, образующиеся в результате реакций протонов с ядрами и других процессов, представляют серьезную опасность, поскольку имеют большой пробег в