

в клетках золотых наночастиц расчёт по этой модели не продемонстрировал выраженного радиосенсибилизирующего эффекта, наблюдаемого в эксперименте. Предположив, что наночастицы золота обладают собственной цитотоксичностью даже в малых концентрациях, характерных для экспериментов *in vitro* и введя соответствующие поправки в модель NanOx, нам удалось рассчитать кривые выживаемости в присутствии золотых наночастиц (Рис.1б).

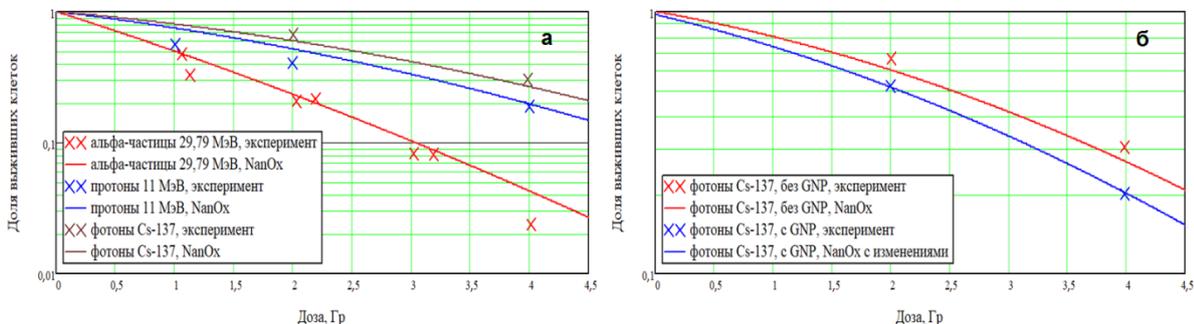


Рис. 1. Выживаемость клеток HeLa после облучения: (а) расчёт по базовой версии модели при отсутствии в клетках препарата; (б) расчёт по дополненной версии в присутствии золотых наночастиц (GNP) в концентрации  $\sim 0.1\%$  по массе.

Таким образом, введя поправку на собственную цитотоксичность наночастиц, дополненная нами версия модели NanOx способна воспроизвести экспериментальные данные по выживаемости клеток HeLa после облучения в присутствии в клетках золотых наночастиц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bromma K., Chithrani D.B. Advances in Gold Nanoparticle-Based Combined Cancer Therapy // Nanomaterials (Basel). – 2020. – Т. 10. – № 9. – С. 1671.
2. Cunha M., Monini C., Testa E. et al. NanOx, a new model to predict cell survival in the context of particle therapy // Physics in medicine and biology. – 2017. – Т. 62. – № 4. – С. 1248-1268.

### ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИКОВ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ С ЦЕЛЬЮ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ФАНТОМА ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ АДРОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

О.С. Чернова<sup>1</sup>, А.А. Булавская<sup>1</sup>, И.А. Милойчикова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт онкологии Томского НИМЦ РАН,  
Россия, г. Томск, пер. Кооперативный, 5, 634009

E-mail: [osc6@tpu.ru](mailto:osc6@tpu.ru)

Создание дозиметрических фантомов играет важную роль в планировании и верификации расчетных планов терапевтических процедур в процессе лечения онкологических заболеваний. Так, современные мировые исследования направлены на разработку альтернативных методов изготовления дозиметрических фантомов. Одним из таких методов является применение технологии быстрого прототипирования, поскольку ожидается, что таким образом удастся существенно сократить временные и финансовые затраты на изготовление [1].

На сегодняшний день в связи с особенностями взаимодействия адронных пучков высоких энергий с веществом одним из наиболее эффективных и перспективных методов лечения онкологии считается адронная лучевая терапия. Тяжелые частицы, проходя через ткани человеческого организма, теряют основную часть своей энергии на определенной глубине, что способствует более прицельному воздействию на пораженные участки, не нанося при этом существенного ущерба здоровым клеткам [2]. Поскольку развитие данного вида лучевой терапии

является относительно молодым направлением исследований, необходимо оценить возможность изготовления тканеэквивалентного дозиметрического фантома методами трехмерной печати для облучения конкретным видом тяжелых частиц.

В рамках данного исследования в инструментарии GEANT4 с помощью метода Монте-Карло было проведено численное моделирование взаимодействия углеродных пучков с биологическими тканями и пластиком, пригодным для изготовления изделий с помощью технологии быстрого прототипирования. В качестве исследуемых материалов были выбраны жировая, мышечная, костная ткани, головной мозг и PLA-пластик как в чистом виде, так и с примесями меди, оксида кальция CaO и диоксида титана TiO<sub>2</sub>. После чего был проведен сравнительный анализ полученных глубинных распределений поглощенной энергии с целью определения термопластических материалов, эквивалентных выбранным биологическим тканям.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2022-620 (проект № МК-26.2022.1.2).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Onuh S.O., Yusuf Y.Y. Rapid prototyping technology: applications and benefits for rapid product development // Journal of Intelligent Manufacturing. – 1999. – Т.10. – С. 301–311.
2. Dosanjh M. Development of hadron therapy for cancer treatment in Europe // AIP Conference Proceedings. – 2008. – Т.1032. – №.12. – С. 12–16.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛУБИННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПЛАСТИКОВЫМ БОЛЮСОМ

Е.А. Бушмина, Ю.М. Черепенников, А.А. Григорьева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [eab60@tpu.ru](mailto:eab60@tpu.ru)

Эффективным способом лечения опухолевых заболеваний является лучевая терапия, основанная на разрушающем действии ионизирующего излучения на опухолевые клетки. Для лечения поверхностно расположенных новообразований показана электронная лучевая терапия [1]. Часто опухоли локализируются в теле человека неравномерно, в связи с этим необходимо создавать сложное глубинное распределение поглощенной дозы. В лучевой терапии для этих целей используют специальные устройства, называемые болюсами. Эти устройства, повторяющие контуры тела человека, располагаются на поверхности тела в поле облучения. Также назначение подобных устройств заключается в снижении лучевой нагрузки на здоровые ткани пациента, располагающиеся вблизи опухоли [2] и уменьшении краевого эффекта, возникающего на границе двух сред – воздуха и тела пациента.

На сегодняшний день в клинической практике для создания болюсов используют специальный материал фирмы Action Volx и парафин, однако первый материал ограничивается простотой формы, а второй – слишком ломкий и хрупкий, в связи с чем, его эксплуатация ограничена несколькими сеансами лучевой терапии. В данной работе предлагается изготовить пластиковый болюс для формирования глубинного распределения дозы терапевтического электронного пучка с помощью методов трехмерной печати. Технологии трехмерной печати на сегодняшний день позволяют с высокой точностью изготовить изделие необходимой формы, что дает возможность создавать индивидуальные болюсы для каждого пациента. Также изделия, изготовленные из термопластичных материалов методами трехмерной печати, отличаются высокой прочностью и теплостойкостью, и как следствие, смогут прослужить весь курс лечения пациента.