

P16-2013-77

Я. Кубанчак ^{1,2}, А. Г. Молоканов

**ИЗМЕРЕНИЕ СПЕКТРОВ ЛПЭ
РАДИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОГО ПРОТОННОГО ПУЧКА
ФАЗОТРОНА ЛЯП ОИЯИ**

Направлено в оргкомитет 23-го Международного семинара
по ускорителям заряженных частиц
(8–14 сентября 2013 г., Алушта, Крым)

¹ Институт ядерной физики АН ЧР, Прага

² Чешский технический университет, Прага

Измерение спектров ЛПЭ радиотерапевтического протонного пучка фазотрона ЛЯП ОИЯИ

Важнейшей характеристикой воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты является величина линейной передачи энергии (ЛПЭ), от которой зависит механизм взаимодействия клеток с излучением.

С помощью активного кремниевого детектора LIULIN были измерены спектры линейной передачи энергии на разных глубинах радиотерапевтического протонного пучка фазотрона ЛЯП ОИЯИ. Спектрометр линейной передачи энергии LIULIN представляет собой миниатюрный 256-канальный спектрометр-дозиметр с кремниевым (Si) полупроводниковым детектором эффективной площадью 10×20 мм и толщиной 300 мкм. Спектрометр LIULIN измеряет энергию, выделяемую в Si-детекторе каждой проходящей через детектор частицей, а измеренные энергетические спектры преобразуются в спектры ЛПЭ. Полученная информация записывается во флэш-память и может считываться с использованием персонального компьютера.

Измерения спектров ЛПЭ были проведены во всем диапазоне глубинного дозного распределения протонного пучка — от входа до области пика Брэгга, а также в модифицированных пучках. Измеренные спектры используются для анализа воздействия излучения на биологические объекты.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2013

Measurements of LET Spectra of the JINR Phasotron Radiotherapy Proton Beam

Linear energy transfer (LET) is one of the most important parameters which characterize biological effects of ionizing radiation.

The spectra of linear energy transfer at different depths of the radiotherapy proton beam were measured using an active silicon detector LIULIN. The spectrometer of a linear energy transfer LIULIN is a small 256-channel spectrometer-dosimeter with a silicon (Si) semiconductor detector with an effective area of 10×20 mm and a thickness of 300 microns. LIULIN measures energy deposition in Si of each particle passing through the detector, the spectra of energy deposited in Si can be transformed to the LET spectra. The resulting information is written into the flash memory and can be read by using a personal computer.

LET spectra measurements were carried out at several points of the depth dose distribution from the proton beam entrance to the Bragg peak region and in modified beams. Measured spectra are used to analyze the effects of radiation on biological objects.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2013

ВВЕДЕНИЕ

При взаимодействии излучения с биологическими объектами важнейшей характеристикой является величина линейной передачи энергии (ЛПЭ), от которой зависит механизм взаимодействия клеток с излучением. На величину ЛПЭ влияет вид и энергия ионизирующего излучения. Для пучков тяжелых заряженных частиц (протонов и ионов) величину ЛПЭ определяет тип ионов и их энергия. При прохождении пучка частиц через вещество их средняя энергия уменьшается, но за счет страгглинга увеличивается энергетический разброс частиц в пучке.

Измерения спектров ЛПЭ в пучках тяжелых заряженных частиц возможно проводить различными методами. Для этого можно использовать тканезквивалентный пропорциональный счетчик, ионизационную рекомбинационную камеру, трековые детекторы. Однако трековые детекторы имеют порог измерения ЛПЭ около 10 кэВ/мкм и могут использоваться в пучках ионов, а в протонных пучках позволяют измерять только вторичные частицы с высокими значениями ЛПЭ и замедленные протоны с энергией ниже 6 МэВ в области пика Брэгга. Таким образом, для измерения спектров ЛПЭ основной части протонного пучка, имеющего более низкие величины ЛПЭ, наилучшим детектором является кремниевый детектор LIULIN, позволяющий измерять амплитуды импульсов от каждой частицы.

ДЕТЕКТОР LIULIN

Спектрометр линейной передачи энергии LIULIN-4С разработан в Болгарской академии наук [1, 2] и представляет собой миниатюрный 256-канальный спектрометр-дозиметр (рис. 1) размером $95 \times 65 \times 24$ мм с кремниевым (Si) полупроводниковым детектором эффективной площадью 10×20 мм и толщиной 300 мкм.

Сигнал с детектора усиливается зарядово-чувствительным предусилителем и затем с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуется в спектры выделенной энергии. Полученная информация записывается во флэш-память и может считываться с помощью персонального компьютера.



Рис. 1. Фото спектрометра LIULIN-4C

Полные наборы данных хранятся в компьютере и могут использоваться для визуализации данных и анализа спектров ЛПЭ.

Благодаря малым размерам и массе прибор применяется для дозиметрических измерений на бортах самолетов и космических аппаратов. Этот спектрометр может также использоваться для измерений спектров ЛПЭ на радиотерапевтических пучках протонов и тяжелых ионов [3]. Однако для проведения таких измерений плотность потока протонов, проходящих через детектор, не должна превышать нескольких единиц $10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения спектров линейной передачи энергии были проведены на разных глубинах радиотерапевтического пучка протонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ с помощью спектрометра LIULIN-4C.

Средняя энергия протонного пучка на входе в кабину составляет 171 МэВ. Энергия пучка в кабине определяется по пробегу пучка в воде ($R = 200$ мм воды). Глубинные дозные распределения измеряются миниатюрным полупроводниковым кремниевым детектором. Уменьшение энергии пучка производится с помощью замедлителей из плексигласа.

Глубинные дозные распределения натурального протонного пучка и модифицированного с использованием двух гребенчатых фильтров (RF11 и RF14), с которыми были проведены измерения, показаны на рис. 2. Треугольниками указаны точки, в которых измерялись спектры ЛПЭ.

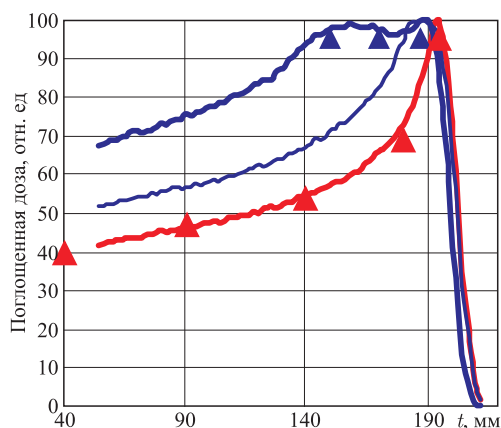


Рис. 2. Глубинные дозные распределения натурального и модифицированных протонных пучков

Измерения спектров ЛПЭ были проведены на различных глубинах натурального протонного пучка во всем диапазоне глубинного дозного распределения при толщинах от 0 до 200 мм в пике Брэгга и для двух гребенчатых фильтров (RF11 — в точке максимума дозы и RF14 — в трех точках плоской вершины: в начальной части плато, в центре и в конце плато).

Так как LULIN измеряет амплитуду импульса от каждой частицы, интенсивность протонного пучка была снижена до уровня плотности потока протонов $1,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, а также включена временная растяжка пучка. При таком уровне интенсивности протонного пучка через детектор площадью 2 см^2 проходит около $3 \cdot 10^4$ протонов в секунду.

На рис. 3 показаны спектры ЛПЭ, измеренные на разных глубинах протонного пучка. На рис. 3, а показаны спектры количества частиц, на рис. 3, б — энергетические спектры ($E_i = \text{ЛПЭ}_i^* N_i$). С увеличением глубины возрастает среднее значение ЛПЭ частиц и за счет страгглинга увеличивается ширина распределения.

Такие же распределения выделенной энергии для модифицированных протонных пучков с плоской вершиной приведены на рис. 4. Для этих спектров наблюдается достаточно сильная зависимость среднего значения ЛПЭ от положения измеряемой точки на плоской вершине модифицированного пучка, что может приводить к различному биологическому воздействию на объекты, облучаемые одинаковой дозой в различных областях плоской вершины. Следует отметить подобие спектров ЛПЭ, измеренных с различными гребенчатыми фильтрами в точке на максимальной глубине плоской вершины (187 мм), что следует из способа модификации протонного пучка.

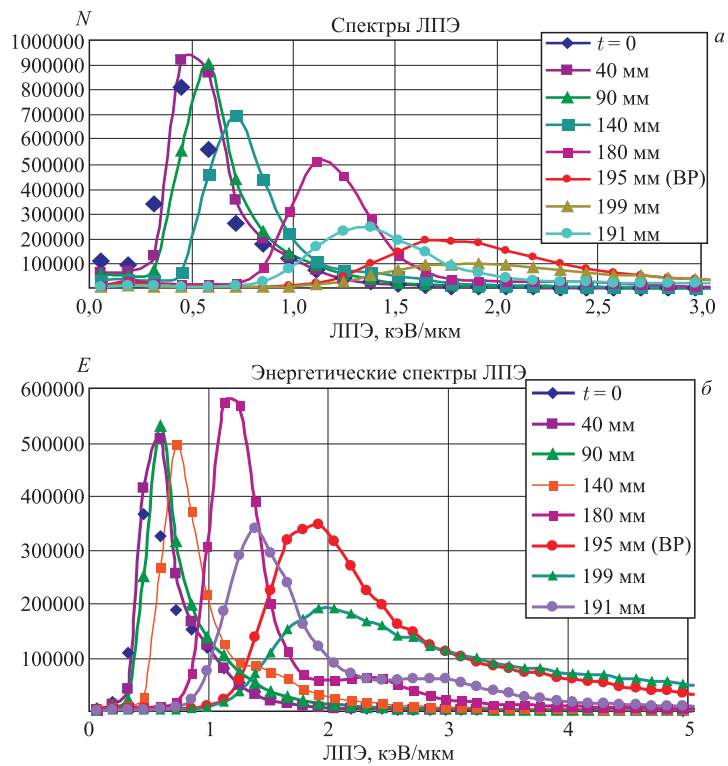


Рис. 3. Спектры ЛПЭ на разных глубинах протонного пучка

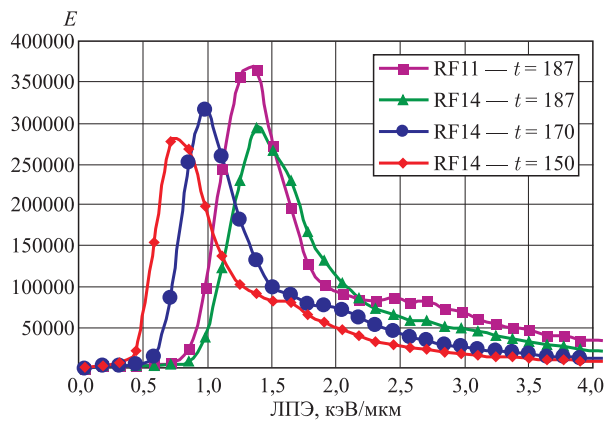


Рис. 4. Спектры ЛПЭ модифицированных протонных пучков

На основе измеренных спектров возможно определить поглощенную дозу пучка протонов в воде:

$$D = 1,6 \cdot 10^{-6} \sum \text{ЛПЭ}_i^* N_i / \rho,$$

где D — поглощенная доза в воде, мГр; ЛПЭ_i — величина линейной передачи энергии, кэВ/мкм; N_i — количество частиц в диапазоне ЛПЭ_i ; ρ — плотность воды, г/см³.

Из измеренных спектров рассчитана зависимость поглощенной дозы от глубины (кривая Брэгга), которая достаточно хорошо совпадает с измеренной миниатюрным кремниевым детектором (рис. 5).

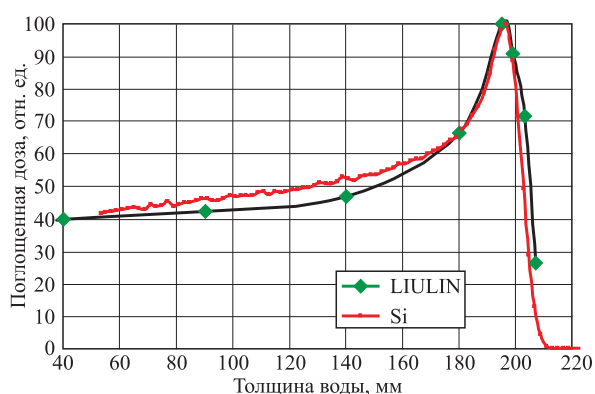


Рис. 5. Глубинные дозные распределения протонного пучка, измеренные миниатюрным кремниевым детектором и вычисленные из спектров ЛПЭ

Недостатками спектрометра являются нетканеэквивалентность материала детектора и достаточно большая толщина детектора (0,3 мм).

Нетканеэквивалентность детектора обусловлена энергетической зависимостью отношения линейной передачи энергии в воде (или в мягкой ткани) относительно энерговыделения в кремнии (Si). Это отношение для протонов в интервале энергий от 20 до 200 МэВ с точностью 3 % возможно считать равным 1,24. Однако эта зависимость была учтена при построении спектров [4].

Толщина детектора (0,3 мм Si) соответствует пробегу протонов с энергией 6,3 МэВ [5]. Все протоны с энергией ниже этого предела останавливаются в детекторе, и таким образом этот детектор не позволяет измерить ЛПЭ протонов с энергией ниже этого значения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. С помощью спектрометра LIULIN измерены спектры ЛПЭ радиотерапевтического протонного пучка на фазотроне ЛЯП ОИЯИ.

2. Глубинная зависимость поглощенной дозы, рассчитанная на основе измеренных спектров ЛПЭ, хорошо согласуется с кривой Брэгга, измеренной миниатюрным кремниевым детектором.

3. Измеренные спектры могут быть использованы для анализа воздействия излучения на биологические объекты.

Работа была поддержана Чешским техническим университетом в Праге (грант SGS 10/212/ОНК4/2Т/14) и проектом INGO Министерства образования, молодежи и спорта Чешской Республики.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dachev Ts. et al.* Simultaneous Investigation of Galactic Cosmic Rays on Aircraft and on International Space Station // *Adv. Space Res.* 2005. V. 36a. P. 1665.
2. *Spurny F., Ploc O., Jadrnícková I.* Spectrometry of Linear Energy Transfer and Dosimetry Measurements on Board Spacecrafts and Aircrafts // *Phys. Part. Nucl., Lett.* 2009. V. 6, No. 1. P. 70.
3. *Uchihori Y. et al.* Analysis of the Calibration Results Obtained with Liulin-4J Spectrometer-Dosimeter on Protons and Heavy Ions // *Rad. Meas.* 2002. V. 5, Iss. 2. P. 127.
4. *Semkova J. et al.* Radiation Measurements inside a Human Phantom aboard the International Space Station Using Liulin-5 Charged Particle Telescope // *Adv. Space Res.* 2010. V. 45. P. 858.
5. *Dachev Ts., Spurny F., Ploc O.* Characterization of the Radiation Environment by LIULIN-type Spectrometers // *Rad. Protection Dosimetry.* 2011. V. 144, No. 1–4. P. 680.

Получено 24 июля 2013 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 21.08.2013.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,56. Уч.-изд. л. 0,68. Тираж 195 экз. Заказ № 58050.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/