

P16-2012-53

И. Амброзова \*, Б. Влчек \*,  
А. Г. Молоканов, К. Пахнерова-Брабцова \*

**ЛПЭ-СПЕКТРОМЕТРИЯ**  
**РАДИОТЕРАПЕВТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ ИОНОВ  $^{12}\text{C}$**

---

\* Институт ядерной физики АН ЧР, Прага

Амброзова И. и др.

P16-2012-53

ЛПЭ-спектрометрия радиотерапевтических пучков ионов  $^{12}\text{C}$

Наборы трековых детекторов были облучены на радиотерапевтических пучках ионов  $^{12}\text{C}$  с энергиями 135, 290 и 400 МэВ/нуклон на ускорителе HIMAC (Чиба, Япония) для спектрометрии линейной передачи энергии (ЛПЭ). Спектры ЛПЭ были измерены на разных глубинах пучка  $^{12}\text{C}$  от входа до максимальных значений ЛПЭ в области пика Брэгга и за пиком в области фрагментации.

В работе представлены спектры ЛПЭ, измеренные трековыми детекторами TD-1 вдоль оси пучков на различных глубинах вплоть до глубин, расположенных за пиком Брэгга.

Из этих спектров рассчитаны дозиметрические величины — глубинное распределение поглощенной дозы и биологически взвешенной дозы, характеризующее воздействие пучка на биологические ткани при проведении радиотерапии. Оценена относительная биологическая эффективность пучка на разных глубинах. Глубинные дозные распределения, вычисленные из спектров ЛПЭ, хорошо согласуются с измерениями пучков, проведенными в HIMAC.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2012

Ambrozova I. et al.

P16-2012-53

LET Spectrometry of the Clinical  $^{12}\text{C}$  Ion Beams

The sets of track etched detectors for the linear energy transfer (LET) spectrometry were exposed in  $^{12}\text{C}$  135, 290 and 400 MeV/amu ion beams at the HIMAC installation at NIRS (Chiba, Japan). LET spectra were measured at various depths in  $^{12}\text{C}$  ion beams through the Bragg peak area up to the region of fragmentation behind the Bragg peak.

In the paper LET spectra measured with track etched detectors TD-1, at the beams axis along the depth up to the region behind the Bragg peak are presented.

The dosimetric values calculated from measured LET spectra are given. The depth distributions of absorbed dose and biological weighted effective dose for radiation therapy are calculated. Relative biological weighted efficiency of  $^{12}\text{C}$  beams at the various depths is estimated. The depth-dose distribution calculated from LET spectra is in a good agreement with reference measurements in HIMAC.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Данная работа является продолжением исследований спектров линейной передачи энергии (ЛПЭ) в пучках углерода  $^{12}\text{C}$ , предназначенных для радиотерапии [1–4].

В данной работе величины ОБЭ определяются на основе спектров ЛПЭ, измерения которых проводились трековыми детекторами типа TD-1, облученными на пучках ионов  $^{12}\text{C}$  с энергиями 135, 290 и 400 МэВ/нуклон на ускорителе НИМАС в Чибе (Япония). Измерения треков осуществлялись на микроскопе HSP-1000 в Отделе радиационной дозиметрии Института ядерной физики Академии наук Чешской Республики в Праге.

### 1. СПЕКТРОМЕТР ЛПЭ НА ОСНОВЕ ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ

Спектрометр ЛПЭ на основе химически травленых трековых детекторов CR-39, разработанный в Отделе радиационной дозиметрии Института ядерной физики Академии наук Чешской Республики в Праге, предназначен для измерения спектров ЛПЭ в пучках и полях ионизирующего излучения [5, 6].

Принцип действия трековых детекторов основан на разнице в скорости растворения материала детектора в растворе кислоты либо щелочи в области вдоль трека достаточно плотноионизирующей частицы по сравнению с областями вне трека. Вследствие этой разницы на поверхности детектора образуются объекты (треки), которые можно рассматривать и измерять их размеры и форму при помощи обычных оптических микроскопов. В данной работе приводятся результаты измерений спектров ЛПЭ, проведенных трековыми детекторами TD-1, произведенными фирмой Nagase Landauer Ltd (Япония). Толщина детектора около 0,9 мм. После облучения пластинки детекторов подвергались травлению в 5N растворе NaOH при температуре 70 °C. Стандартное время травления детекторов составляет 18 ч. Размеры треков, образующихся в таком детекторе после травления, зависят от величины ЛПЭ прошедшей частицы. Для проверки и контроля условий травления измеряются треки от фрагментов деления источника  $^{252}\text{Cf}$  и альфа-частиц от источника  $^{241}\text{Am}$ .

Параметры треков измеряются автоматическим оптическим анализатором изображений на основе микроскопа HSP-1000, разработанного в SEIKO Precision (Япония) [7]. Новая установка обладает устройством для автоматической фокусировки микроскопа посредством контроля расстояния между объективом микроскопа и поверхностью трекового детектора, что существенно ускоряет процесс измерения. Измеренные параметры треков преобразуются в спектры ЛПЭ на основе калибровки спектрометра на пучках ионов [8, 9].

Спектрометр позволяет измерять величины ЛПЭ в диапазоне от 9,5 до 350 кэВ/мкм. Эти детекторы позволяют проводить прямую регистрацию каждого отдельного иона в пучке  $^{12}\text{C}$  и определять величину его ЛПЭ.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 1 представлены глубинные дозные распределения (кривые Брэгга) пучков ионов  $^{12}\text{C}$  с энергиями 135, 290 и 400 МэВ/нуклон на ускорителе НИМАС в Чибе, на которых проводилось облучение трековых детекторов. Трековые детекторы были облучены на различных глубинах плексигласового фантома во всем диапазоне проникновения пучка — на входе, в области пика Брэгга и в области фрагментации пучка за пиком.

Результаты измерений спектров ЛПЭ на различных глубинах для пучков с энергиями 135 и 290 МэВ/нуклон показаны на рис. 2. На этих изображениях видно, как изменяются спектры ЛПЭ с глубиной — растет среднее значение ЛПЭ и благодаря стратглингу увеличивается ширина распределения. Для

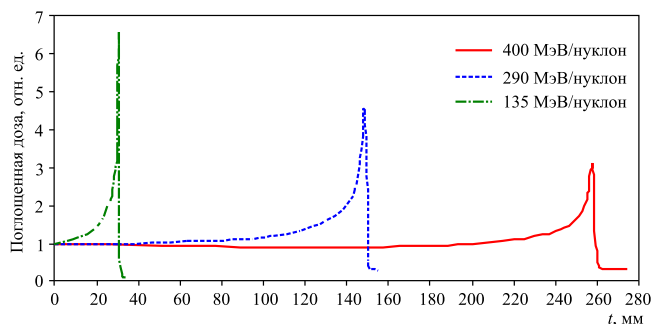


Рис. 1. Глубинные дозные распределения пучков ионов  $^{12}\text{C}$  на ускорителе НИМАС

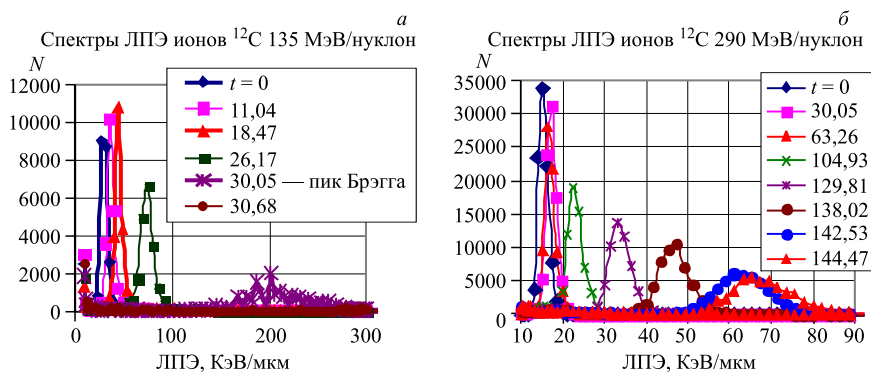


Рис. 2. Примеры спектров ЛПЭ для пучков ионов  $^{12}\text{C}$  с энергиями а) 135 и б) 290 МэВ/нуклон

энергии 135 МэВ/нуклон показаны все спектры, для энергии 290 МэВ/нуклон показана для наглядности только область толщин до пика Брэгга, для энергии 400 МэВ/нуклон спектры ЛПЭ выглядят подобным образом.

По измеренным спектрам ЛПЭ возможно определить интегральные характеристики пучка — поглощенную дозу  $D_L$  от частиц с величиной ЛПЭ выше порога 9,5 кэВ/мкм, биологически взвешенную эффективную дозу  $BWED_L$  и величину относительной биологически взвешенной эффективности  $RBWE$ , характеризующую ОБЭ пучка при радиотерапии [3].  $BWED_L$  определяется с использованием биологической весовой функции  $r(L)$  (рис. 3), которая характеризует воздействие частиц с различными ЛПЭ на биологические ткани по критерию выживаемости облучаемых клеток [10, 11],

$$D_L = \int (dN/dL)L/\rho dL,$$

$$BWED_L = \int (dN/dL)L r(L)/\rho dL,$$

где  $dN/dL$  — количество треков в интервале  $dL$ ;  $L$  — величина ЛПЭ;  $r(L)$  — биологическая весовая функция;  $\rho$  — плотность биологической ткани.

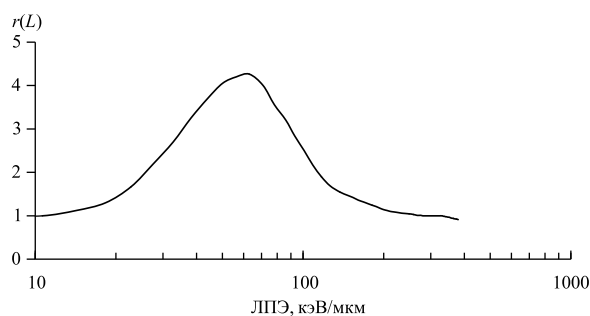


Рис. 3. Биологическая весовая функция [10, 11]

Таблица 1. Глубинная зависимость характеристик пучка ионов  $^{12}\text{C}$  с энергией 135 МэВ/нуклон, измеренных трековыми детекторами

$t$ , мм	Поглощенная доза $D_L$ , мГр	Биологически взвешенная доза $BWED_L$	$RBWE$
0,00	1,00	2,45	2,45
11,04	1,22	3,61	2,96
18,61	1,44	5,18	3,59
26,17	2,28	7,88	3,45
30,05	6,09	6,90	1,13
30,68	3,58	3,56	0,99
31,19	0,18	0,30	
31,82	0,15	0,28	
33,64	0,10	0,20	

**Таблица 2. Глубинная зависимость характеристик пучка ионов  $^{12}\text{C}$  с энергией 290 МэВ/нуклон, измеренных трековыми детекторами**

$t$ , мм	Поглощенная доза $D_L$ , мГр	Биологически взвешенная доза $\text{BWED}_L$	RBWE
0,00	2,34	2,51	1,08
30,05	2,47	2,86	1,16
63,26	2,23	2,60	1,16
104,93	2,55	3,75	1,47
129,81	3,54	8,52	2,41
138,02	4,55	14,67	3,23
142,53	5,72	22,30	3,90
144,47	6,23	24,08	3,87
146,15	12,07	18,72	1,55
147,29	12,61	17,89	1,42
147,92	3,51	4,28	1,22
149,01	0,23	0,38	
149,64	0,15	0,30	
150,78	0,55	1,10	
154,91	0,45	0,91	

**Таблица 3. Глубинная зависимость характеристик пучка ионов  $^{12}\text{C}$  с энергией 400 МэВ/нуклон, измеренных трековыми детекторами**

$t$ , мм	Поглощенная доза $D_L$ , мГр	Биологически взвешенная доза $\text{BWED}_L$	RBWE
0,00	1,07	1,16	1,08
99,79	1,35	1,50	1,11
207,51	1,00	1,49	1,49
242,36	0,82	2,33	2,86
252,77	2,12	7,81	3,68
256,90	3,35	4,76	1,42
257,53	3,42	4,74	1,39
258,07	1,15	1,68	
260,35	1,03	2,05	

Величина относительной биологически взвешенной эффективности RBWE может быть определена из соотношения

$$\text{RBWE} = \text{BWED}_L / D_L.$$

Результаты измерений представлены в табл. 1–3 и на рис. 4, 5. Глубинные распределения поглощенной дозы  $D_L$ , вычисленные на основе спектров ЛПЭ, измеренных на различных глубинах фантома, хорошо согласуются с измерениями кривых Брэгга, проведенными в НИМАС (рис. 4).

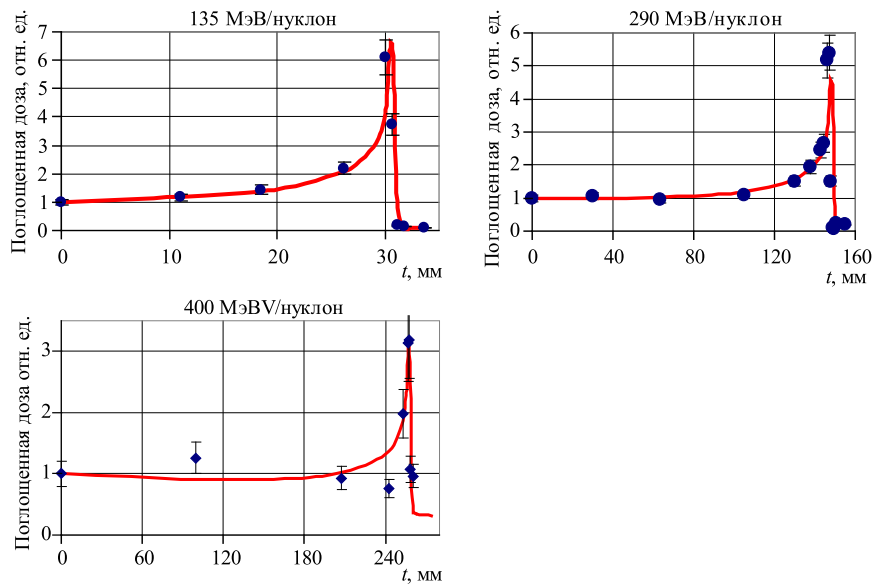


Рис. 4. Глубинные дозные распределения ионов  $^{12}\text{C}$ , измеренные в НИМАС (линия). Точками показаны результаты измерений трековыми детекторами

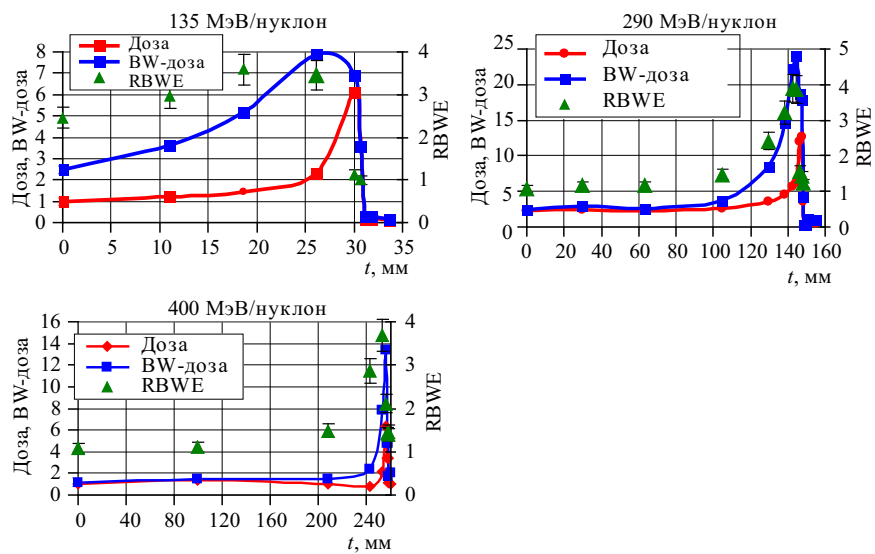


Рис. 5. Глубинные распределения поглощенной дозы, биологически взвешенной дозы и относительной биологически взвешенной эффективности пучков ионов  $^{12}\text{C}$  различных энергий, измеренные трековыми детекторами

Величина относительной биологически взвешенной эффективности RBWE, вычисленная с использованием биологической весовой функции  $r(L)$ , характеризующей воздействие частиц с различными ЛПЭ на биологические

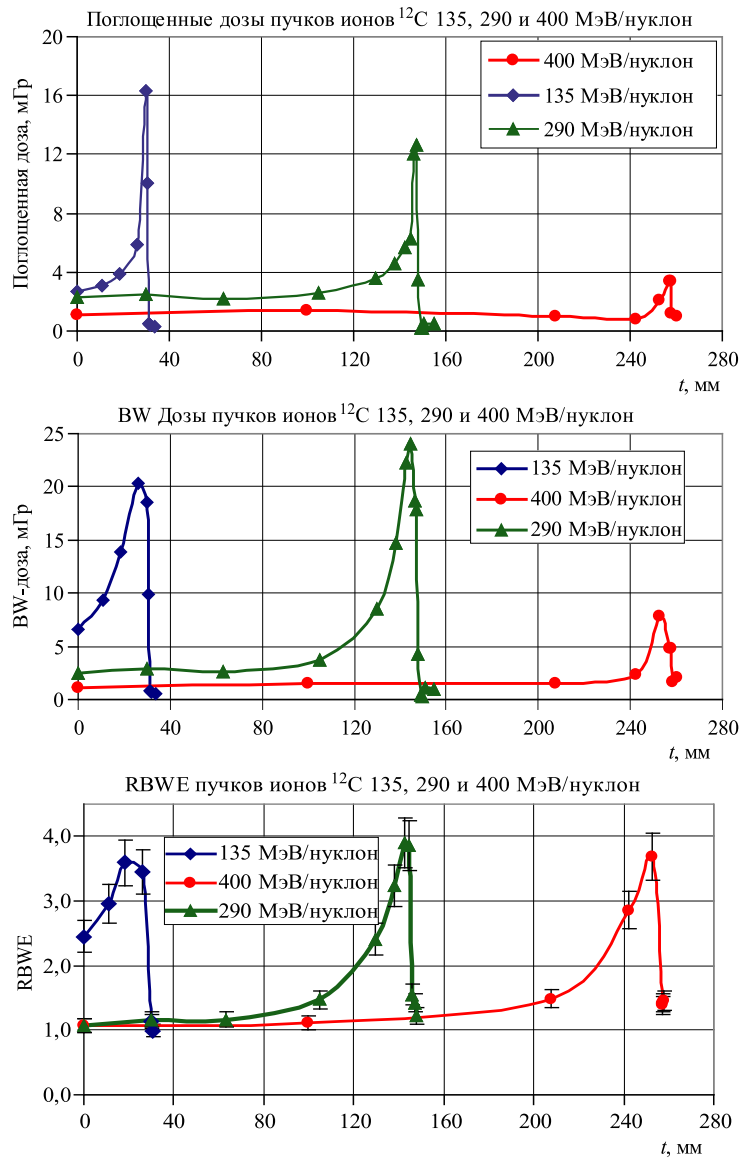


Рис. 6. Глубинные распределения поглощенной дозы, биологически взвешенной дозы и относительной биологически взвешенной эффективности пучков ионов  $^{12}\text{C}$



ткани по критерию выживаемости облучаемых клеток, на всех радиотерапевтических пучках ионов  $^{12}\text{C}$  возрастает с увеличением глубины фантома, достигая величины примерно 3,5–4,0 на расстоянии нескольких миллиметров перед пиком Брэгга, после чего резко уменьшается, что хорошо согласуется с проведенными ранее измерениями [1–4].

### 3. ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. С помощью спектрометра ЛПЭ на основе трековых детекторов TD-1 измерены спектры ЛПЭ радиотерапевтических пучков ионов углерода  $^{12}\text{C}$  с энергиями 135, 290 и 400 МэВ/нуклон на различных глубинах плексигласового фантома во всем диапазоне проникновения пучка — на входе, в области пика Брэгга и в области фрагментации пучков за пиком.

2. Поглощенные дозы, вычисленные на основе измеренных спектров ЛПЭ на различных глубинах, хорошо согласуются с кривыми Брэгга, измеренными в HIMAC.

3. Вычислены биологически взвешенные глубинные дозные распределения пучков ионов углерода  $^{12}\text{C}$ . Эти распределения заметно шире, чем распределения поглощенной дозы.

4. Оценена величина относительной биологически взвешенной эффективности RBWE пучков  $^{12}\text{C}$ , характеризующая воздействие частиц с различными ЛПЭ на биологические ткани. Величина RBWE на всех радиотерапевтических пучках ионов  $^{12}\text{C}$  возрастает с увеличением глубины фантома, достигая величины около 3,5–4,0 на расстоянии нескольких миллиметров перед пиком Брэгга, после чего резко уменьшается, что хорошо согласуется с проведенными ранее измерениями.

Авторы благодарят сотрудников HIMAC (NIRS, Чикаго, Япония) за помощь при проведении эксперимента.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Молоканов А. Г., Спурны Ф. Измерения микродозиметрических характеристик пучка ионов  $^{12}\text{C}$ . Сообщение ОИЯИ Р16-2005-86. Дубна, 2005.
2. Jadrníčková I., Molokanov A. G., Spurný F. Doses and LET Spectra in the Beam of  $^{12}\text{C}$  with Energy 500 MeV/amu // Radiat. Prot. Dosim. 2007. V. 122. P. 488.
3. Брабцова К. и др. ЛПЭ-спектрометрия радиотерапевтических пучков ионов  $^{12}\text{C}$ . Сообщение ОИЯИ Р16-2010-31. Дубна, 2010.
4. Jadrníčková I., Spurný F., Molokanov A. G. Spectrometry of Linear Energy Transfer and Its Use in High-Energy Particle Beams // Письма в ЭЧАЯ. 2008. Т. 5, № 6. С. 890.

5. *Charvát J.* LET Spectrometry with Polymer Track Etch Detectors. PhD Thesis. Prague, 1986.
6. *Spurný F. et al.* A LET Spectra of Secondary Particles in CR 39 Track Etch Detectors // *Radiat. Measur.* 1996. V. 26. P. 645.
7. *Yasuda N. et al.* Development of a High Speed Imaging Microscope and New Software for Nuclear Track Detector Analysis // *Rad. Meas.* 2005. V. 40. P. 311.
8. *Spurný F., Molokanov A. G., Bamblevski V. P.* Spectrometry of Linear Energy Transfer, Its Development and Use // *Rad. Prot. Dosim.* 2004. V. 110 (1–4). P. 675.
9. *Spurný F., Molokanov A. G., Vlcek B.* The Spectrometry of Linear Energy Transfer with Track Etched Detectors // *Rad. Phys. Chem.* 2001. V. 61. P. 519.
10. *Loncol T. et al.* Radiobiological Effectiveness of Radiation Beams with Broad LET Spectra: Microdosimetric Analysis Using Biological Weighting Functions // *Radiat. Prot. Dosim.* 1994. V. 52 (1–4). P. 347.
11. *Wambersie A., Menzel H. G.* Dose Specification in Heavy Particle Therapy (a Review) // *Radiat. Prot. Dosim.* 1997. V. 70. P. 517.

Получено 17 мая 2012 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 19.09.2012.

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

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,83. Тираж 195 экз. Заказ № 57762.

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

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)