

РАСЧЕТ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕДАЧ ЭНЕРГИИ ЯДЕР В РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА ЦИКЛОТРОНЕ У-400М

Г. Н. Тимошенко¹, И. С. Гордеев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна
Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

На циклотроне У-400М Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ выполняются радиобиологические эксперименты с облучением различных биологических образцов ядрами от бора до неона с первичной энергией 30–50 МэВ/нуклон. Расчет значений линейных передач энергии (ЛПЭ) ядер в образцах производится по программе Lise++. Для снижения энергии ядер и, соответственно, увеличения их ЛПЭ перед образцами размещаются алюминиевые фильтры различной толщины. Наличие фильтров и других поглотителей перед образцом приводит к образованию вторичных заряженных частиц, ЛПЭ которых могут сильно отличаться от ЛПЭ исходных ядер пучка. Это также влияет на точность расчета отпущенной поглощенной дозы. Поэтому для нескольких вариантов облучения образцов с наличием толстых поглотителей перед ними были выполнены детальные расчеты полей частиц, входящих в образцы, с помощью программы транспорта излучений в веществе методом Монте-Карло PHITS 3.20. Проведены анализ расчетных распределений ЛПЭ и сравнение с результатами расчетов по программе Lise++.

The cyclotron U400M of the JINR Laboratory of Nuclear Reactions is used for radiobiological experiments with exposure of different biological samples to nuclei from boron to neon with energies of 30–50 MeV/nucleon. The calculation of linear energy transfers (LET) of nuclei in biological samples is carried out using the Lise++ program. To reduce the energy of the nuclei and, accordingly, increase their LET, aluminum filters of various thickness are placed in front of the samples. The presence of filters and other absorbers in front of the sample leads to the formation of secondary charged particles, the LET of which can be very different from the LET of the initial nuclei of the beam. It can also have an effect on the calculation of the delivered dose. Therefore, a detailed calculation of the field of particles entering the sample in the presence of absorbers in front of the sample, and the calculation of the real LET distributions for all field components were carried out by the program of radiation transport in matter by the Monte Carlo method PHITS 3.20 for several variants of samples with thick absorbers before them. An analysis is made of the calculated distributions of LET and a comparison is performed with the results of calculations using the Lise++ program.

PACS: 29.30.Ep; 87.53.Bn; 02.70.Uu; 29.20.dg

¹E-mail: tim@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

На пучках ядер циклотрона У-400М Лаборатории ядерных реакций возможно проведение радиобиологических экспериментов исключительно с тонкими образцами клеток млекопитающих и человека, бактерий, микроорганизмов, поскольку пробег ядер в образцах не превышает 2–3 мм. На автоматизированной облучательной установке «Геном-М» за многие годы проводились сеансы облучения биологических образцов ядрами ^{11}B , ^{18}O , ^{15}N , ^{20}Ne с энергиями на выходе ускорителя от 33 до 52 МэВ/нуклон.

Установка «Геном-М» размещена на отводе канала масс-сепаратора АКУЛИНА. При выводе пучков на установку «Геном-М» пучок ядер из ускорителя выходит из ионопровода в атмосферу через выходную фольгу (Fe 3 мкм) и формируется фланец-коллиматором с диаметром отверстия 14 мм. Непосредственно за коллиматором смонтирована воздушная двухсекционная ионизационная камера (3 электрода из Al 5 мкм с межэлектродным расстоянием 6 мм) для измерения плотности потока ядер, проходящих через коллиматор на биологические образцы. Внутри ионопровода, неподалеку от выпускной фольги, в пучок введена Ta-мишень (4 мкм) для контроля в ходе облучения параметров пучка по упруго рассеянным в ней ядрам. Таким образом, в пучке до образца находится несколько тонких мишеней, на которых происходит частичная потеря энергии ядер [1]. Расширение диапазона линейных передач энергии ядер (ЛПЭ) в биологических образцах в область больших значений достигается снижением энергии ядер с помощью алюминиевых фольг различной толщины, помещаемых перед образцом. Дополнительно к этому, перед попаданием в облучаемый объем, ядра могут проходить также через защитные пленки, стенки пробирок или стекла. Даже в случае если облучаемый образец представляет собой монослой клеток до 10–20 мкм толщиной, наличие вещества перед ним приводит как к разбросу энергии исходных ядер, так и появлению в пучке однозарядных частиц и фрагментов ядер за счет ядерных реакций, что влияет на значение суммарной ЛПЭ и поглощенной в образце дозы излучения.

Для уточнения значений ЛПЭ ядер и введения необходимых поправок при определении поглощенной дозы в образцах необходим расчет спектров ЛПЭ всех компонент поля для типичных случаев облучения.

РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ЧАСТИЦ НА ВХОДЕ В БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБРАЗЦЫ

Учет средних потерь энергии ядер по тракту от выхода из ускорителя до образца и определение ЛПЭ ядер на входе в образец и на выходе из него производится по программе Lise++ [2, 3]. В качестве материала образца принимается вода. Расчет ионизационных потерь энергии в Lise++ для ядер с энергией более 200–300 МэВ/нуклон базируется на программе ATIMA 1.2 с LS-коррекцией [4]. При энергиях ядер ниже 10 МэВ/нуклон используется старая версия программы SRIM [5].

Вклад вторичных заряженных частиц в ЛПЭ тем больше, чем больше вещества находится перед образцом. В экспериментах на У-400М производится несколько типичных облучений с применением сравнительно толстых алюминиевых фильтров, кровных стекол или пробирок, при которых требуется введение поправок к значениям

ЛПЭ, рассчитанным по Lise++, и к расчетным значениям поглощенных доз. Рассмотрим в качестве примеров облучение ядрами ^{15}N с начальной энергией 46 МэВ/нуклон монослоя культуры (воды) при наличии следующих поглотителей перед монослоем:

1) фильтр Al толщиной 1815 мкм, слой воздуха 10 мм, стенка полиэтиленовая ($\rho = 0,94 \text{ г/см}^3$) пробирки толщиной 1,2 мм;

2) фильтр Al толщиной 1455 мкм, слой воздуха 10 мм, стекло боросиликатное ($\rho = 2,58 \text{ г/см}^3$) толщиной 170 мкм, перпендикулярное пучку;

3) фильтр Al толщиной 1455 мкм, слой воздуха 10 мм, стекло боросиликатное ($\rho = 2,58 \text{ г/см}^3$) толщиной 170 мкм под углом 10° к пучку (эффективная толщина 979 мкм);

4) фильтр Al толщиной 2315 мкм, слой воздуха 10 мм, стекло боросиликатное ($\rho = 2,58 \text{ г/см}^3$) толщиной 170 мкм, перпендикулярное пучку;

5) слой воздуха 10 мм, стекло боросиликатное ($\rho = 2,58 \text{ г/см}^3$) толщиной 170 мкм под углом 10° к пучку (эффективная толщина 979 мкм).

Стехиометрическая формула боросиликатного стекла $\text{O}_{60}\text{Si}_{26}\text{B}_9\text{Na}_3\text{Al}_1\text{K}_1$. Геометрии облучения образцов со стеклом показаны на рис. 1.

Материалы в пучке по тракту до указанных выше поглотителей и, соответственно, потери энергии ядер ^{15}N одни и те же. В качестве примера на рис. 2 приведен скриншот программы Lise++ при расчете последовательных потерь энергии ядер ^{15}N с начальной энергией 46 МэВ/нуклон и облучении образца (монослоя) в варианте облучения 1. За счет потерь по тракту энергия ядер ^{15}N на входе в алюминиевый фильтр составляет 45,57 МэВ/нуклон, а на входе в образец — 15,37 МэВ/нуклон. Это дает значение ЛПЭ ядер ^{15}N на входе в образец (слой воды толщиной 1 мкм) 159,8 кэВ/мкм.

Расчет распределений ЛПЭ для всех частиц пучка на входе в образец производился с помощью пакетного кода RHITS [6–9], реализующего транспорт излучений в веществе методом Монте-Карло. Энергия ядер ^{15}N на входе в образец, толщины и плотности поглотителей на пути пучка (алюминия, воздуха, полиэтилена, стекла) брались в соответствии с указанными выше условиями облучения. ЛПЭ с учетом всех вторичных частиц определялось, как и в Lise++, на входе в образец (воду).

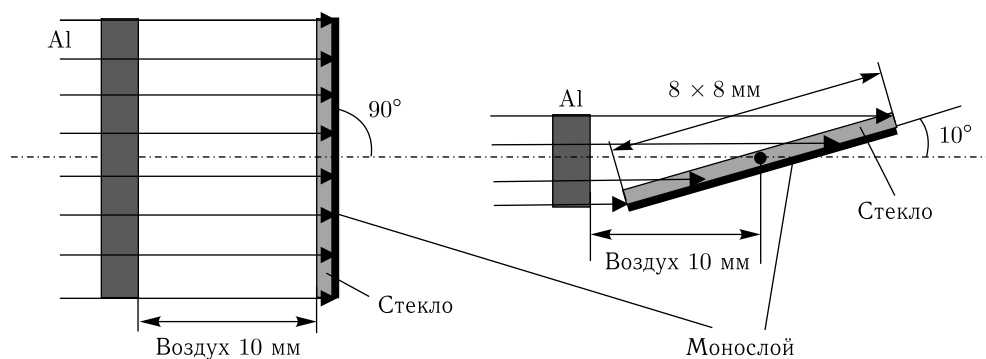


Рис. 1. Геометрии облучения монослоя клеток за стеклом

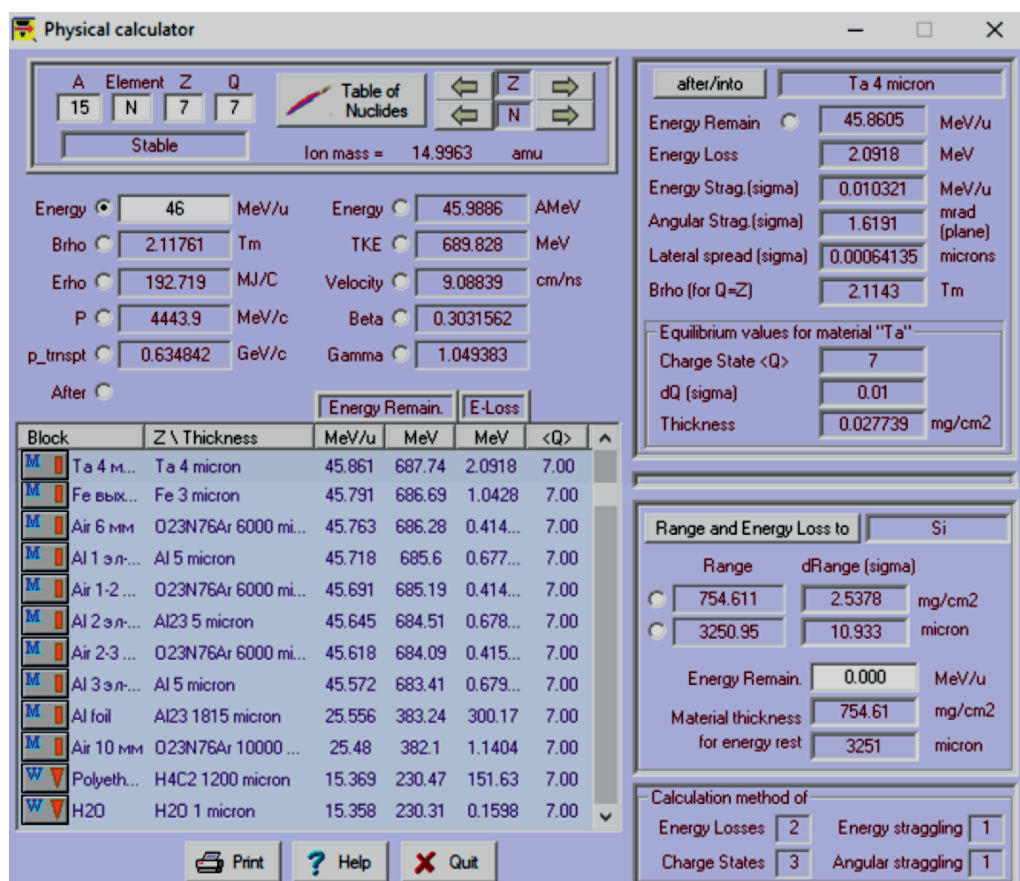


Рис. 2. Скриншот результатов расчета потерь ядер ^{15}N с энергией 46 МэВ/нуклон по тракту пучка до биологического образца

В коде PHITS версии 3.20 для моделирования ядро-ядерных взаимодействий использовалась модель JQMD-2.0 [10]. Расчет ионизационных потерь энергии ядер в веществе также базируется на алгоритме ATIMA, разработанном в GSI.

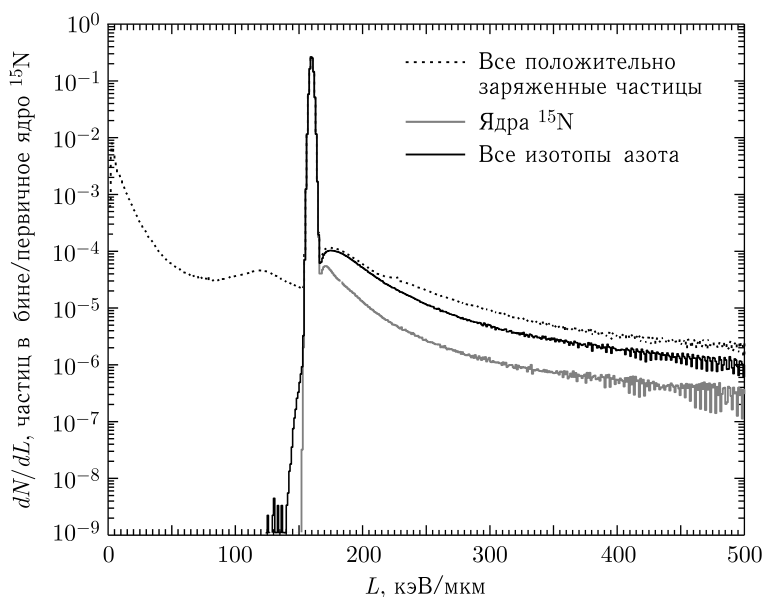
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ядерные взаимодействия первичных ядер ^{15}N в материалах перед образцом приводят к появлению на входе в него других изотопов азота, ядер с меньшим Z , протонов, нейтронов, электронов и гамма-квантов. Из-за малой толщины слоя воды нейтроны и гамма-кванты практически не взаимодействуют с ним и не создают ЛПЭ.

Следует отметить, что в программе PHITS нет возможности получить распределения значений бесконечных dE/dx для всех частиц на входе в образец, т. е. точных значений ЛПЭ, поэтому при моделировании условий облучения вместо ЛПЭ вычислялись средние потери энергии частиц в очень тонком слое воды — 1 мкм. При

Таблица 1. Компонентный состав излучения на входе в образец, нормированный на одно первичное ядро ^{15}N

Частицы	Образец				
	1	2	3	4	5
	Al 1,815 мм + воздух + CH ₂	Al 1,455 мм + воздух + стекло 90°	Al 1,455 мм + воздух + стекло 10°	Al 2,315 мм + воздух + стекло 90°	Воздух + стекло 10°
Все заряженные частицы	1,0241	0,9933	0,9522	0,9716	1,0212
Электроны	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$3,223 \cdot 10^{-5}$	$1,791 \cdot 10^{-5}$	$4,771 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$
Протоны	$2,393 \cdot 10^{-2}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$9,705 \cdot 10^{-3}$	$1,418 \cdot 10^{-2}$	$1,186 \cdot 10^{-2}$
Дейтроны	$7,601 \cdot 10^{-3}$	$4,148 \cdot 10^{-3}$	$2,924 \cdot 10^{-3}$	$4,068 \cdot 10^{-3}$	$3,824 \cdot 10^{-3}$
Тритоны	$2,679 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$9,893 \cdot 10^{-4}$	$1,388 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \cdot 10^{-3}$
^3He	$1,241 \cdot 10^{-3}$	$9,372 \cdot 10^{-4}$	$4,675 \cdot 10^{-4}$	$6,648 \cdot 10^{-4}$	$8,992 \cdot 10^{-4}$
^4He	$1,621 \cdot 10^{-2}$	$8,483 \cdot 10^{-3}$	$4,93 \cdot 10^{-3}$	$6,908 \cdot 10^{-3}$	$9,183 \cdot 10^{-3}$
Li	$8,896 \cdot 10^{-4}$	$7,962 \cdot 10^{-4}$	$3,292 \cdot 10^{-4}$	$5,306 \cdot 10^{-4}$	$9,377 \cdot 10^{-4}$
Be	$3,935 \cdot 10^{-4}$	$4,235 \cdot 10^{-4}$	$1,648 \cdot 10^{-4}$	$2,686 \cdot 10^{-4}$	$4,825 \cdot 10^{-4}$
B	$8,149 \cdot 10^{-4}$	$6,572 \cdot 10^{-4}$	$3,183 \cdot 10^{-4}$	$4,93 \cdot 10^{-4}$	$7,107 \cdot 10^{-4}$
C	$2,854 \cdot 10^{-3}$	$2,064 \cdot 10^{-3}$	$1,293 \cdot 10^{-3}$	$1,838 \cdot 10^{-3}$	$2,079 \cdot 10^{-3}$
Все изотопы азота					
В том числе ^{15}N	0,9671	0,9604	0,9321	0,9411	0,9895
	0,9635	0,9592	0,9312	0,9401	0,9883

Рис. 3. Спектр ЛПЭ в образце за слоем Al 1,815 мм, воздуха 10 мм и полиэтилена 1,2 мм, облучаемом ядрами ^{15}N с энергией 45,572 МэВ/нуклон

нормальном падении пучка частиц на этот слой потери энергии частиц будут численно равны ЛПЭ, однако из-за разброса энергий частиц и угла их входа в слой воды будет формироваться узкое распределение энерговыделений частиц в слое, максимум которого можно полагать соответствующим среднему ЛПЭ частиц на входе в образец.

Компонентный состав излучения на входе в образец представлен в табл. 1.

Видно, что в целом, несмотря на сравнительно большую толщину поглотителей перед образцом, значение ЛПЭ в них определяется исходными ядрами пучка. Доля других заряженных частиц, входящих в образцы, не превышает 3%.

Распределения ЛПЭ на входе в образец 1, рассчитанные по программе RHITS с шириной бина 1 кэВ/мкм, приведены на рис. 3. Максимум ЛПЭ ядер ^{15}N соответствует 159,5 кэВ/мкм, т. е. практически совпадает с расчетом по Lise++ (см. рис. 2). Значение ЛПЭ всех электронов лежит в пределах первого бина, т. е. меньше 1 кэВ/мкм. Нижние пороги энергии частиц в программе были следующими: электроны, позитроны — 0,1 МэВ, гамма-кванты — 1 кэВ, протоны и ядра — 1 кэВ/нуклон. Спектр ЛПЭ слева от пика ядер ^{15}N обусловлен заряженными частицами с меньшими Z , а хвост спектра справа от пика ядер ^{15}N обусловлен как медленными заряженными частицами, так и изотопами азота, частично потерявшими энергию в результате ядерных реакций упругого рассеяния и срыва нейтронов.

Среднее значение ЛПЭ по всему спектру заряженных частиц на входе в образец составляет 152,1 кэВ/мкм, т. е. на 4,6% меньше, чем у ядер ^{15}N , согласно расчетам по Lise++. Но из-за увеличения общего числа частиц это приводит к снижению значений поглощенной дозы в монослое образца на меньшую величину — на 2,6% по сравнению с расчетами по Lise++.

На рис. 4–7 приведены распределения ЛПЭ на входе в образцы 2, 3, 4 и 5.

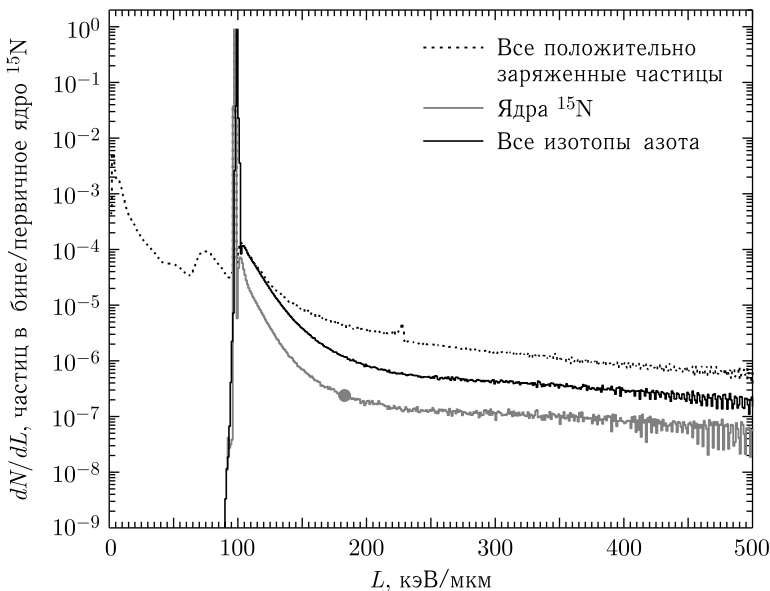


Рис. 4. Спектр ЛПЭ в образце за слоем Al 1,455 мм, воздуха 10 мм и стекла 0,17 мм, под углом 90° , облучаемом ядрами ^{15}N с энергией 45,57 МэВ/нуклон

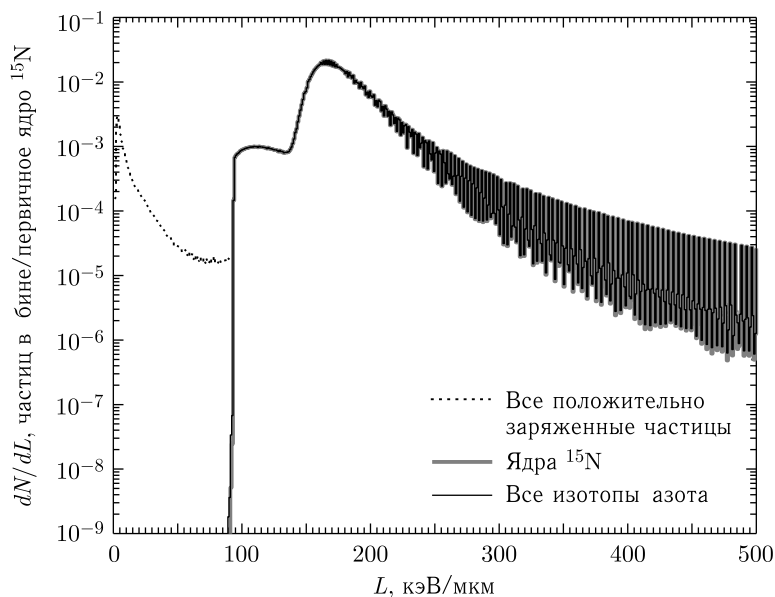


Рис. 5. Спектр ЛПЭ в образце за слоем Al 1,455 мм, воздуха 10 мм и стекла 0,17 мм, под углом 10° , облучаемом ядрами ^{15}N с энергией 45,57 МэВ/нуклон

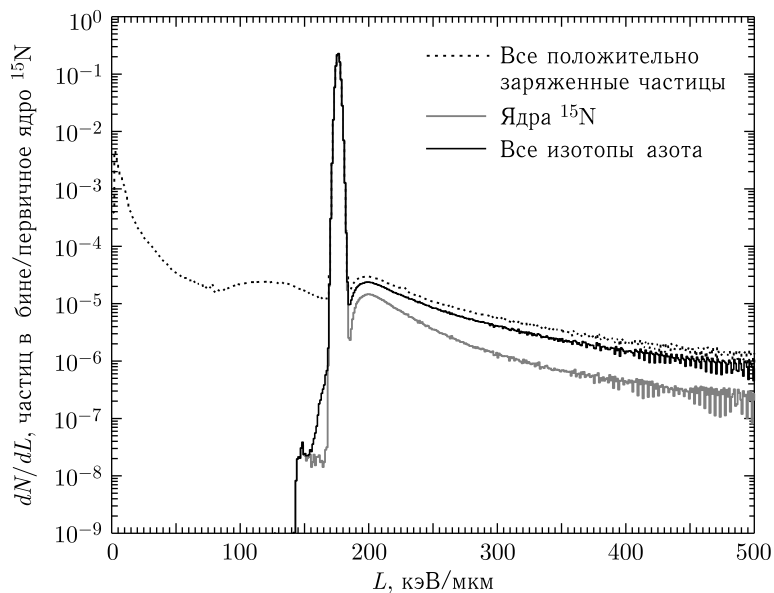


Рис. 6. Спектр ЛПЭ в образце за слоем Al 2,315 мм, воздуха 10 мм и стекла 0,17 мм, под углом 90° , облучаемом ядрами ^{15}N с энергией 45,57 МэВ/нуклон

В спектре ЛПЭ от всех заряженных частиц вне пика от исходного ядра ^{15}N видны локальные максимумы ЛПЭ, связанные с отдельными группами вторичных частиц (см. рис. 7). Спектры, рассчитанные в условиях облучения образцов за стеклом под

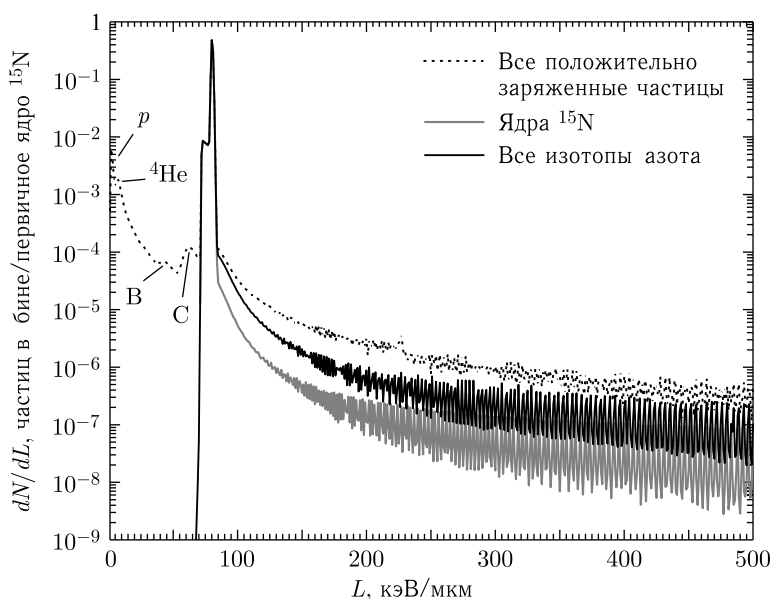


Рис. 7. Спектр ЛПЭ в образце за слоем воздуха 10 мм и стекла 0,17 мм, под углом 10° , облучаемом ядрами ^{15}N с энергией 45,57 МэВ/нуклон

углом 10° к направлению пучка, имеют заметные отличия от остальных спектров. Во-первых, распределение ЛПЭ ядер ^{15}N на рис.5 намного шире и растянуто в область больших значений ЛПЭ из-за большой суммарной толщины поглотителей перед образцом. Ядра ^{15}N на его входе имеют низкую энергию и большой разброс по углу. Вследствие этого часть ядер может двигаться под углами, близкими к 10° к направлению пучка, т.е. практически вдоль монослоя воды. Их трек в воде в этом случае составляет несколько микрометров, и они теряют в ней большую часть своей энергии. В случае малой суммарной толщины поглотителей перед образцом (см. рис.7) угловой разброс исходных ядер на входе в образец много меньше и пик их ЛПЭ становится уже.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В табл.2 приведены значения энергии ядер ^{15}N на входе в образец (МэВ/нуклон), значения ЛПЭ (кэВ/мкм) ядер ^{15}N на входе в образец, рассчитанные по Lise++, значения ЛПЭ в центре тяжести пиков от ядер ^{15}N и значения средних ЛПЭ по всему спектру, рассчитанные по программе RHITS.

Несмотря на то, что в расчетах по программе Lise++ нет возможности учесть реальную геометрию облучения (наклонное положение образца), расчеты ЛПЭ по ней согласуются со средними значениями ЛПЭ по спектру с учетом всех вторичных частиц, рассчитанными по программе RHITS, с точностью не хуже 5%.

Таким образом, несмотря на наличие значительного количества материала перед образцом, понижающего энергию ядер и максимально увеличивающего их ЛПЭ, по-

Таблица 2. Результаты сравнения расчетов ЛПЭ ядер ^{15}N по Lise++ и PHITS

Образец	$E_{\text{вх}}$, МэВ/нуклон	ЛПЭ по Lise++	ЛПЭ _{max} по PHITS	ЛПЭ среднее по PHITS
1	15,369	159,8	159,5	152,1
2	27,995	97,7	98,9	94,5
3	13,83	173,7	169,0	174,0
4	13,558	177,0	175,6	171,0
5	35,477	81,0	79,3	78,1

давящая часть поглощенной дозы создается исходными ядрами пучка. Генерация вторичных заряженных частиц в веществе перед образцом несколько уменьшает среднее значение ЛПЭ за счет вклада частиц с меньшим зарядом, чем у исходного ядра, и приводит к увеличению девиации ЛПЭ, не меняя существенно среднего значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bezbakh A. A., Zager V. B., Kaminski G., Krylov A. I., Krylov V. A., Teterev Yu. G., Timoshenko G. N.* Upgrading the Genome Facility for Radiobiological Experiments with Heavy Ion Beams // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2013. V. 10, No. 2. P. 175–178.
2. *Tarasov O., Bazin D.* Lise++: Radioactive Beam Production with In-Flight Separators // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2008. V. 266. P. 4657–4664.
3. *Bazin D., Tarsov O., Lewitowitz M., Sorlin O.* The Program Lise++: A Simulation of Fragment Separators // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002. V. 482. P. 307–327.
4. *Weick H. et al.* Slowing Down of Relativistic Few-Electron Heavy Ions // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2000. V. 164–165. P. 168–179.
5. *Ziegler F. et al.* SRIM2000. New York: Pergamon Press, 1985; <http://www.research.ibm.com/ionbeams/#SRIM>.
6. *Sato T. et al.* Features of Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) Version 3.02 // *J. Nucl. Sci. Technol.* 2018. V. 55. P. 684–690.
7. *Boudard A. et al.* The INCL Model // *Phys. Rev. C.* 2013. V. 87. P. 014606.
8. *Hirayama H. et al.* The EGS Code: SLAC-R-730. 2005; KEK Report 2005-8. 2005.
9. *Iida K., Kohama A., Oyamatsu K.* Formula for Proton–Nucleus Reaction Cross Section at Intermediate Energies and Its Application // *J. Phys. Soc. Japan.* 2007. V. 76. P. 044201.
10. *Ogawa T., Sato T., Hashimoto S., Satoh D., Tsuda S., Niita K.* Energy-Dependent Fragmentation Cross Sections of Relativistic ^{12}C // *Phys. Rev. C.* 2015. V. 92. P. 024614.

Получено 27 мая 2020 г.