

P16-2002-72

Б. Влчек*, А. Г. Молоканов, Ф. Спурны*

**МИКРОДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
КЛИНИЧЕСКИХ ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ
ФАЗОТРОНА ЛЯП ОИЯИ**

*Институт ядерной физики ЧАН, Прага, Чешская Республика

1. Введение

В работе представлены и обсуждаются результаты измерений вклада частиц с высокими значениями ЛПЭ и их влияние на дозиметрические и микродозиметрические характеристики клинических протонных пучков с первичными энергиями 150 и 205 МэВ на различных глубинах проникновения пучка в вещество.

При использовании протонных пучков в лучевой терапии необходимо учитывать возрастание относительной биологической эффективности (ОБЭ) при замедлении пучка в биологической ткани и увеличения плотности ионизации протонов с уменьшением остаточной энергии. Кроме того, при прохождении протонного пучка через вещество образуются вторичные частицы с высокими значениями линейной передачи энергии (ЛПЭ), которые также увеличивают величину ОБЭ. Вклад частиц с высокими значениями ЛПЭ в дозу клинических протонных пучков может быть экспериментально изучен с использованием спектрометра ЛПЭ на основе измерений размеров треков, образующихся при травлении в диэлектрических трековых детекторах, облученных на этих пучках.

На основе результатов измерений спектров ЛПЭ могут быть определены интегральные дозиметрические и микродозиметрические характеристики пучка - поглощенная, эквивалентная и биологическая дозы, обусловленные воздействием частиц с высокими значениями ЛПЭ, а также коэффициенты качества излучения и относительная биологическая эффективность протонного пучка.

2. Эксперимент

2.1. Трековые детекторы

Принцип действия диэлектрических трековых детекторов (ДТД) основан на разнице в скорости растворения материала детектора (в основном твердотельного диэлектрического вещества) 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 определять их размеры и форму при помощи обычных оптических микроскопов.

Возможность регистрации частицы в ДТД зависит от соотношения скоростей растворения $V = V_T/V_B$, где V_T есть скорость травления вдоль трека частицы, а V_B - скорость травления материала вещества вне трека. Для появления трека необходимо, чтобы было выполнено условие $V > 1$. Было обнаружено, что для данного ДТД и условий травления V возрастает с ростом плотности ионизации вдоль трека.

Для измерений использовались детекторы CR-39 толщиной 0,5 мм, изготовленные Pershore Moulding, England. Каждая стандартная герметичная упаковка детекторов состоит из двух пластинок CR-39, перед одной из половинок плоскости детектора устанавливается слой полиэтилена толщиной 2 мм. Таким образом, в каждой упаковке детекторов имеется 4 различных типа радиаторов перед пластиной детектора: первый слой без радиатора (bare), 2 мм полиэтилена (PE), второй слой детектора (bare-CR), второй слой за полиэтиленом (PE-CR).

2.2. Спектрометр ЛПЭ на основе трековых детекторов

Спектрометр ЛПЭ на основе химически травленных трековых детекторов CR-39, разработанный в Отделе радиационной дозиметрии Института ядерной физики в Праге, служит для измерения спектров ЛПЭ в пучках и полях ионизирующих излучений. Параметры треков измеряются с помощью автоматического оптического анализатора изображений LUCIA II (Laboratory Universal Computer Image Analyzer), работающего на основе Leitz-микроскопа [1-3].

После облучения пластинки детектора подвергаются травлению в 5N растворе NaOH при температуре 70°C. Стандартное время травления детекторов составляет 18 часов, при этом растворяется слой толщиной около 17 мкм с каждой стороны детектора. Перед травлением один из углов каждой пластинки трекового детектора облучается фрагментами деления источника ^{252}Cf , другой угол облучается альфа-частицами от источника ^{241}Am . Это делается для проверки и контроля условий травления. Для измерения величины ЛПЭ частицы из параметров трека определялось отношение скоростей травления V . Измеренные V -спектры преобразовывались в спектры ЛПЭ на основе калибровки тяжелыми заряженными частицами. Спектрометр позволяет измерять величины ЛПЭ в диапазоне от 10 до 700 кэВ/мкм в ткани.

2.3. Облучение детекторов

Облучение трековых детекторов проводилось на протонных пучках фазотрона ЛЯП ОИЯИ, использующихся для проведения лучевой терапии пациентов. Детекторы облучались на пучках протонов с энергиями 150 и 205 МэВ за различными толщинами дополнительного замедлителя. Детекторы располагались ортогонально к направлению пучка, дозиметрическая калибровка пучка осуществлялась наперстковой ионизационной камерой клинического дозиметра KD-27012, мониторинг пучка - воздушной ионизационной камерой. Дозы облучения детекторов выбирались из условий образования оптимального количества треков на поверхности детектора.

При первичной энергии пучка 205 МэВ детекторы были облучены в 5 точках глубинного дозного распределения, при средних остаточных энергиях замедленного пучка 205, 188, 100, 70 МэВ и в пике Брэгга (энергии протонов в области пика Брэгга - в диапазоне от нуля до 20-30 МэВ).

При первичной энергии пучка 150 МэВ детекторы были облучены в 4 точках глубинного дозного распределения, при средних остаточных энергиях замедленного пучка 137, 100, 70 МэВ и в пике Брэгга.

Глубинные дозные распределения протонных пучков 150 МэВ и 205 МэВ приводятся на рис.1.

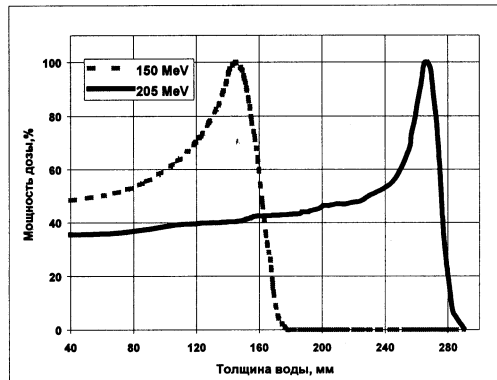


Рис.1. Глубинные дозные распределения клинических протонных пучков

3. Результаты измерений

3.1. Спектры ЛПЭ

Спектрометр ЛПЭ позволяет определять как поглощенные дозы D , так и эквивалентные дозы H и биологические дозы R , измеренные спектры также могут быть использованы для определения коэффициентов качества Q и относительной биологической эффективности (ОБЭ) протонных пучков, применяемых для протонной терапии. Для определения эквивалентной дозы используются зависимости коэффициента качества из двух последних рекомендаций Международной комиссии по радиологической защите (ICRP) [4,5]. Для определения относительной биологической эффективности пучка при лучевой терапии использовалась биологическая весовая функция $r(L)$ [6,7].

Как было показано в предыдущих работах [8,9], при измерениях на пучках протонов в начальной части глубинного дозного распределения наблюдается минимальная разница для спектров ЛПЭ, измеренных за различными радиаторами, и результаты измерений при четырех различных радиаторах могут быть усреднены. В области пика Брэгга из-за высоких градиентов в глубинном дозном распределении эта разница становится заметной. Поэтому при измерениях в области пика Брэгга использовались детекторы без дополнительных радиаторов. Спектры ЛПЭ на различных глубинах протонных пучков 150 и 205 МэВ, отнормированные на поглощенную дозу в точке облучения, приведены в виде микродозиметрических распределений ($L^*D(L)$ и $L^*H(L)$) на рис.2 и 3. На этих рисунках видна качественная разница между спектрами, измеренными в начальной части глубинного дозного распределения и в области пика Брэгга. Если в начальной части глубинного дозного распределения вклад в поглощенную дозу от частиц с высокими значениями ЛПЭ обусловлен вторичными частицами; то в области пика Брэгга основной вклад вносят частицы с ЛПЭ ниже ~ 100 кэВ/мкм, основную часть которых составляют замедлившиеся первичные протоны. Протоны с энергиями выше 4 МэВ имеют более низкую величину ЛПЭ (менее 10 кэВ/мкм) и не образуют в детекторе видимых треков.

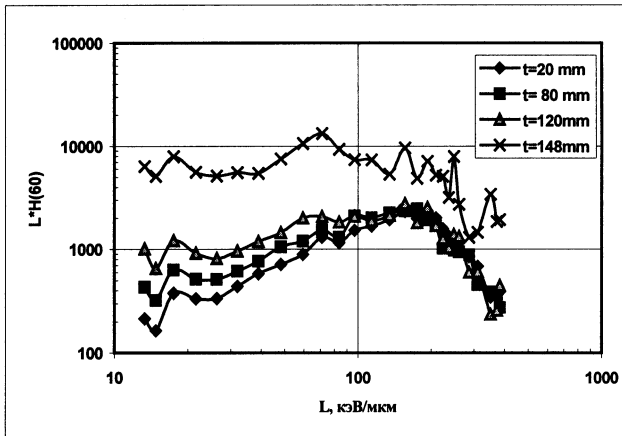
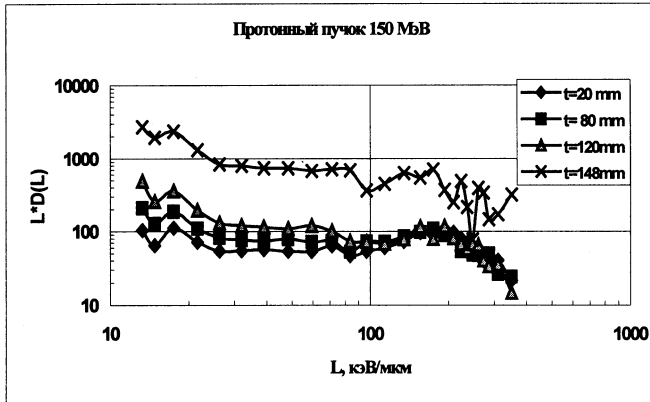


Рис.2. Микродозиметрические распределения поглощенных (а) и эквивалентных (б) доз на различных глубинах протонного пучка 150 МэВ

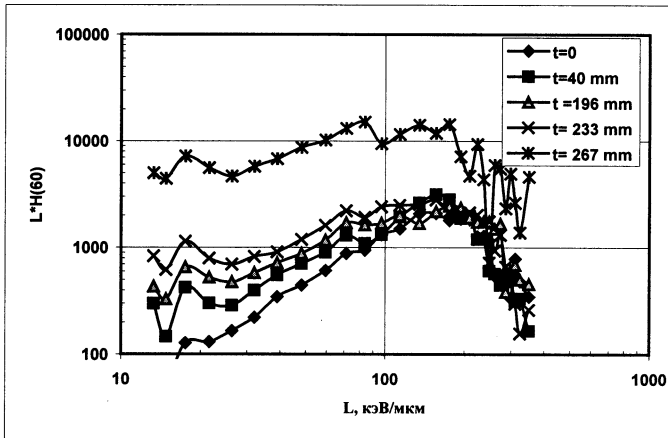
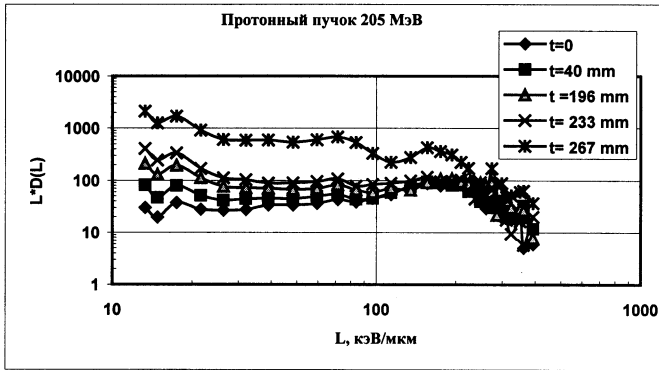


Рис.3. Микродозиметрические распределения поглощенных (а) и эквивалентных (б) доз на различных глубинах протонного пучка 205 МэВ

3.2. Интегральные дозиметрические и микродозиметрические характеристики

Из микродозиметрических распределений поглощенной дозы, эквивалентной дозы и биологически взвешенной дозы в зависимости от ЛПЭ возможно вычислить интегральные величины поглощенной дозы D , эквивалентной дозы H и биологически взвешенной дозы R той части частиц пучка, ЛПЭ которых позволяет регистрацию их треков (10-700 кэВ/мкм). Эти интегральные величины могут быть определены из следующих соотношений:

$$D = \int (dN / dL) \cdot L \cdot dL; \quad (1)$$

$$H = \int (dN / dL) \cdot L \cdot Q(L) \cdot dL; \quad (2)$$

$$R = \int (dN / dL) \cdot L \cdot r(L) \cdot dL; \quad (3)$$

где L – величина ЛПЭ;

dN/dL – количество треков в интервале ЛПЭ шириной dL ;

$Q(L)$ – коэффициент качества излучения в зависимости от ЛПЭ;

$r(L)$ – биологическая весовая функция.

Для определения коэффициента качества $Q(L)$ существуют две рекомендации Международной комиссии по радиологической защите (ICRP), принятые в 1977 и в 1990 годах [4,5]. Для возможности сравнения с результатами более ранних исследований в данной работе определяются эквивалентные дозы и коэффициенты качества для обеих зависимостей $Q(L)$. Биологическая весовая функция $r(L)$ [6,7] характеризует воздействие частиц с различными значениями ЛПЭ на биологические ткани по критерию выживаемости облучаемых клеток.

Зависимости коэффициентов качества $Q(L)$ и биологической весовой функции $r(L)$ от величины ЛПЭ представлены на рис.4.

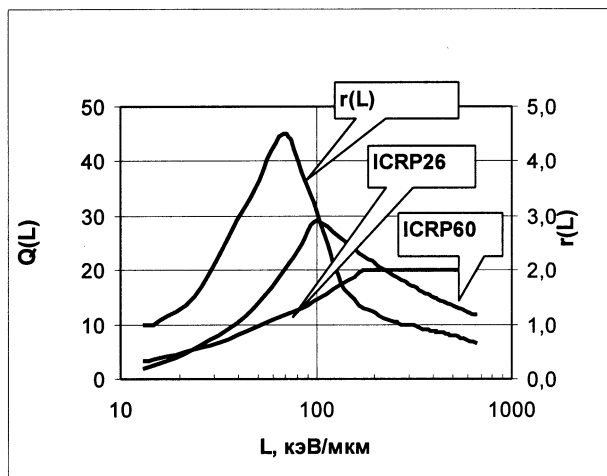


Рис.4. Коэффициенты качества излучения $Q(L)$ и биологическая весовая функция $r(L)$ в зависимости от ЛПЭ

Основные микродозиметрические характеристики протонных пучков с энергиями 150 и 205 МэВ приведены в табл.1 и 2.

Таблица 1. Микродозиметрические характеристики пучка 150 МэВ

t, мм	20	80	120	148
E_{mean}, МэВ	137	100	70	Пик Брэгга
D_{point}, мГр	150	118	72,7	10,8
D, мГр	5,52	6,95	7,86	7,42
D/D_{point}, %	3,68	5,86	10,8	68,7
H(26), мЗв	41,2	43,7	42,0	35,2
Q(26)	7,46	6,29	5,35	4,74
H(60), мЗв	45,6	46,9	42,1	33,7
Q(60)	8,27	6,75	5,36	4,54
R, мCGE	8,77	10,43	10,99	9,90
QF(26)	1,24	1,31	1,47	3,88
QF(60)	1,27	1,34	1,47	3,69
RBE	1,022±0,004	1,029±0,003	1,043±0,007	1,23±0,03

Таблица 2. Микродозиметрические характеристики пучка 205 МэВ

t, мм	0	40	196	233	267
E_{mean}, МэВ	205	188	100	70	Пик Брэгга
D_{point}, мГр	150	150	114	65,9	12,4
D, мГр	2,6	4,31	6,74	6,4	7,35
D/D_{point}, %	1,73	2,87	5,91	9,71	59,5
H(26), мЗв	25,5	33,9	43,1	35,7	38,7
Q(26)	9,79	7,86	6,40	5,58	5,26
H(60), мЗв	30,6	38,3	45,7	36,5	39,3
Q(60)	11,75	8,90	6,78	5,70	5,35
R, мCGE	4,71	7,07	9,98	8,97	10,5
QF(26)	1,15	1,20	1,32	1,45	3,01
QF(60)	1,19	1,23	1,34	1,46	3,08
RBE	1,014±0,003	1,018±0,003	1,029±0,004	1,039±0,004	1,25±0,02

В таблицах 1 и 2 приводятся основные результаты измерений.

t - толщина дополнительного замедлителя;

E_{mean} - средняя остаточная энергия первичного пучка в точке измерения;

D_{point} - поглощенная доза в точке облучения детекторов, измеренная воздушной ионизационной камерой клинического дозиметра.

D - поглощенная доза, измеренная при помощи спектрометра ЛПЭ, для части спектра частиц с высоким значением ЛПЭ ($L > 10$ кэВ/мкм);

H(26) и **H(60)** - эквивалентные дозы, из которых могут быть определены коэффициенты качества **Q(26)** и **Q(60)** для части спектра частиц с высоким значением ЛПЭ.

R – биологически взвешенная доза в единицах CGE (Cobalt Gray Equivalent) для части спектра частиц с высокими значениями ЛПЭ.

Относительная биологическая эффективность **RBE** и коэффициенты качества **QF(26)**, **QF(60)** для всего пучка также могут быть определены на основе этих измерений, исходя из того, что полная поглощенная доза в точке измерения **D_{point}** измеряется ионизационной камерой клинического дозиметра, а увеличение биологической дозы по сравнению с поглощенной дозой (**R-D**) и эквивалентной дозы по сравнению с поглощенной дозой (**H-D**) происходят только в части спектра с высоким значением ЛПЭ ($L > 10$ кэВ/мкм), которая измеряется трековым детектором. В части спектра с низкими значениями ЛПЭ, которая не регистрируется трековыми детекторами, биологическая весовая функция и коэффициент качества излучения равны 1,0 и биологическая и эквивалентная дозы совпадают с поглощенной. Величина относительной биологической эффективности **RBE** и коэффициенты качества **QF(26)**, **QF(60)** для всего пучка могут быть определены из следующих соотношений:

$$RBE = 1 + (R - D) / D_{point} ,$$

$$QF = 1 + (H - D) / D_{point} .$$

Погрешность определения величины **RBE** вычислена как погрешность для косвенных измерений, по известным погрешностям измерения параметров **R**, **D**, **H** и **D_{point}**.

Зависимости коэффициентов качества **QF** от остаточной энергии протонного пучка в точке измерения изображены на рис.4. Из приведенной зависимости следует, что максимальный рост коэффициентов качества протонного пучка происходит вблизи пика Брэгга.



Рис.5. Коэффициенты качества как функция остаточной энергии протонного пучка

4. Выводы

1. С помощью спектрометра ЛПЭ на основе химически травленных детекторов изучался вклад частиц с высокими значениями ЛПЭ ($ЛПЭ > 10$ кэВ/мкм) в дозовые характеристики терапевтических протонных пучков.
2. На основе результатов измерений показано, что наличие частиц с высокими значениями ЛПЭ приводит к повышению относительной биологической эффективности, вычисляемой с использованием биологической весовой функции, до величины около 1,25 в пике Брэгга.
3. Если при малых глубинах проникновения пучка в вещество вклад в поглощенную дозу от частиц с высокими значениями ЛПЭ обусловлен вторичными частицами, то в области пика Брэгга основной вклад в дозу вносят первичные протоны, замедлившиеся до энергии ниже нескольких единиц МэВ.

В дальнейшем предполагается продолжить исследования микродозиметрических характеристик протонных пучков с модифицированным глубинным дозным распределением, использующихся в лучевой терапии пациентов на фазотроне ЛЯП ОИЯИ.

Литература

1. J.Charvát: LET spectrometry with polymer track etched detectors. PhD Thesis, Prague, 1986.
2. F.Spurný, J.Bednář, L.Johansson, A.Sätherberg: LET spectra of secondary particles in CR-39 track etch detectors. Radiation Measurements 26, (1996), p.645.
3. F.Spurný, J.Bednář, K.Turek: Spectrometry of linear energy transfer with a track etch detectors. Radiation Measurements 28, (1997), p.515.
4. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26, Annals of ICRP, 1, No. 3, (1977).
5. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Annals of ICRP, 21, No. 1-3, (1990).
6. T.Loncol, V.Cosgrove, J.M.Denis et al. Radiobiological Effectiveness of Radiation Beams with Broad LET Spectra: Microdosimetric Analysis using Biological Weighting Functions. Rad. Prot. Dos. 52, (1994) p.347.
7. A.Wambersie and H.G. Menzel: Dose Specification in Heavy Particle Therapy (A Review). Radiat. Prot. Dosim. 70, (1997), p.517.
8. A.G.Molokanov, F.Spurný, B.Vlček: The Contribution of Secondary Heavy Charged Particles to Dosimetric Quantities of Radiotherapy Proton Beams Using a Track Etch LET Spectrometer. JINR Communication E16-99-98, Dubna, 1999.
9. V.I.Kostjuchenko, A.G.Molokanov, D.F.Nichiporov, F.Spurný, B.Vlcek. Dosimetric and Microdosimetric Characteristics of Clinical Proton Beams. JINR Communication E16-2000-165, Dubna, 2000.

Влчек Б., Молоканов А. Г., Спурны Ф.

P16-2002-72

Микродозиметрические характеристики клинических протонных пучков фазотрона ЛЯП ОИЯИ

Вклад частиц с высокими значениями линейной передачи энергии (ЛПЭ) в дозиметрические и микродозиметрические характеристики клинических протонных пучков с энергиями 150 и 205 МэВ экспериментально изучался с использованием трековых детекторов. Частицы с высокими значениями ЛПЭ — это вторичные тяжелые заряженные частицы, образующиеся в ядерных взаимодействиях, и замедлившиеся протоны в области пика Брэгга. Эти частицы повышают величины коэффициентов качества и величину относительной биологической эффективности (ОБЭ) протонного пучка. Метод измерения спектров ЛПЭ трековыми детекторами позволяет определить вклад частиц с высокими значениями ЛПЭ в дозиметрические характеристики клинических протонных пучков — поглощенную дозу, эквивалентную дозу и ОБЭ.

Трековые детекторы были облучены на различных глубинах клинических пучков протонов с энергиями 150 и 205 МэВ. Спектры ЛПЭ в диапазоне от 10 до 700 кэВ/мкм измерялись трековыми детекторами CR-39 с помощью автоматического анализатора изображений LUCIA-II. Относительный вклад частиц с высокими значениями ЛПЭ в поглощенную дозу возрастает от нескольких процентов на входе пучка до нескольких десятков процентов в области пика Брэгга. ОБЭ растет от 1,02 на входе пучка до величины около 1,25 в пике Брэгга. Максимальная величина коэффициента качества достигает 3,8 в пике Брэгга.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод авторов

Vlcek B., Molokanov A. G., Spurny F.

P16-2002-72

Microdosimetric Characteristics of the Clinical Proton Beams at the JINR Phasotron, Dubna

The contribution of the high LET particles to dosimetric and microdosimetric characteristics of 150 and 205 MeV clinical proton beams was experimentally studied using track etched detectors. Secondary heavy charged particles produced from nuclear interactions and degraded protons at the Bragg peak region are particles with high LET. The method of the LET spectra measurement with track etched detectors allows one to determine the contribution of high LET particles to dosimetric characteristics of clinical proton beams: absorbed dose, equivalent dose and the value of the Relative Biological Effectiveness (RBE).

Track detectors were irradiated in the various depth of clinical proton beams with the primary energies of 150 and 205 MeV. The LET spectra between 10 and 700 keV/μm were measured by means of CR-39 track etched detectors and the automatic optical image analyzer LUCIA-II. The relative contribution of the high LET particles to absorbed dose increases from several per cent at the beam entrance to several tens of per cent at the Bragg peak region. The value of the RBE increases from about 1.02 at the beam entrance to about 1.25 at the Bragg peak. The maximum values of Quality Factor reach 3.8 at the Bragg peak.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 15.05.2002.

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

Усл. печ. л. 0,6. Уч.-изд. л. 0,9. Тираж 240 экз. Заказ № 53275.

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