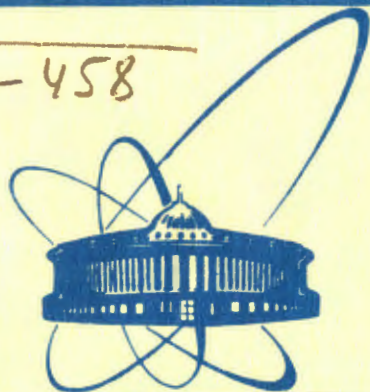


A-458



сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

2435/2-81

18/5-81

16-81-103

В.Е.Алейников, Г.Н.Тимошенко

ВКЛАД ПРОТОНОВ

В ПОКАЗАНИЯ ДОЗИМЕТРОВ ИФК<sub>н</sub> , ДН-А-1

И УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ДЕТЕКТОРОВ

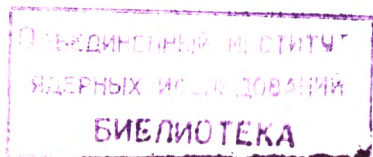
ЗА ЗАЩИТОЙ СИНХРОЦИКЛОТРОНА ЛЯП ОИЯИ

1981

В практической дозиметрии на ускорителях ОИЯИ для определения индивидуальных доз ионизирующих излучений, получаемых сотрудниками Института, применяется методика индивидуального фотографического контроля дозы нейтронов /ИФК<sub>н</sub>/, основанная на использовании пленки с ядерной эмульсией типа "К" толщиной 20 мкм. Из промышленных приборов для определения эквивалентной дозы нейтронов с энергией менее 20 МэВ в полях рассеянного излучения от ускорителей используется сцинтилляционный дозиметр ДН-А-1<sup>/11/</sup> с детектором быстрых нейтронов, представляющим собой диспергированный в плексигласе порошок ZnS(Ag). Основным недостатком указанных методик является значительное завышение эквивалентной дозы нейтронов при интерпретации показаний дозиметров за сплошной защитой ускорителей протонов на высокие энергии. Было высказано мнение<sup>/1/</sup>, что причиной такого завышения является протонный компонент полей излучения, регистрируемый дозиметрами со значительно большей эффективностью, чем нейтроны. В работах<sup>/2,3/</sup> исследованы спектрально-угловые характеристики протонного компонента поля излучения за 2-метровой бетонной защитой при двух геометриях "источник-защита". В работе<sup>/4/</sup> представлен спектр нейтронов в диапазоне энергий  $10^{-8} \div 10^3$  МэВ, измеренный в той же точке поля. Таким образом, имеющаяся информация о поле излучения за защитой в исследованной точке позволяет определить реакцию дозиметров на протонный и нейтронный компоненты поля, оценить достоверность различных методов коррекции показаний ИФК<sub>н</sub> и уточнить степень адекватности показаний ДН-А-1 эквивалентной дозе нейтронов. Помимо этого, становится возможным оценить вклад протонов в реакцию активации углеродсодержащих детекторов, используемых для определения флюенса нейтронов с энергией более 20 МэВ.

#### ВКЛАД ПРОТОНОВ В ПОКАЗАНИЯ ИФК<sub>н</sub>

Чувствительность ИФК<sub>н</sub> с эмульсией толщиной 20 мкм к нейтронам с энергиями от 0,5 до 300 МэВ, падающим нормально на дозиметр, рассчитывалась методом Монте-Карло в работе<sup>/5/</sup>, причем считалось, что треки, наблюдаемые в эмульсии, образуются протонами с энергией  $0,5 \leq E_p \leq 150$  МэВ. Чувствительность дозиметра к протонам, присутствующим в поле излучения, при-



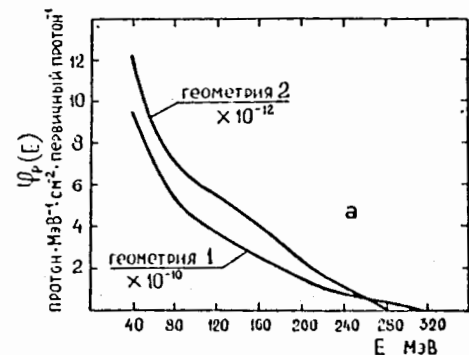
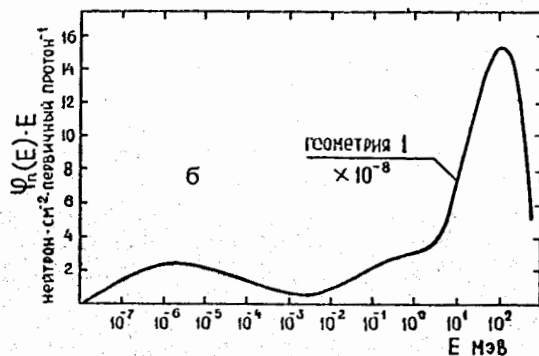


Рис. 1. Спектры нуклонов за 2-метровой бетонной защитой синхротрона ЛЯП ОИЯИ в условиях 1-й и 2-й геометрий. Спектры нормированы на 1 протон пучка. а — спектры протонов, б — спектр нейтронов.



нималась равной 1 трек-протон<sup>-1</sup> для  $15 \leq E_p \leq 150 \text{ МэВ}$  и нулю для  $E_p < 15 \text{ МэВ}$  и  $E_p > 150 \text{ МэВ}$ . Здесь  $E_p = 15 \text{ МэВ}$  — энергия протона, необходимая для проникновения его через упаковку дозиметра. Вклад в показания ИФК<sub>н</sub> протонов, образованных в упаковке дозиметра, при расчетах считался пренебрежимо малым.

На рис. 1а представлены спектры протонов

с энергией более 40 МэВ за 2-метровой бетонной защитой, полученные по результатам работы<sup>3/</sup> для случая, когда пучок протонов с энергией 630 МэВ падал под углом 30° на защиту /геометрия 1/ и для случая, когда пучок протонов полностью тормозился в медной мишени /геометрия 2/. Анализ расчетных спектров протонов за защитой ускорителей<sup>6,7/</sup> показал, что доля протонов в интервале энергий от 0 до 40 МэВ составляет примерно 15 ÷ 30% от числа протонов с энергией более 40 МэВ. Отсутствие экспериментальной информации о спектрах протонов в области энергий до 40 ÷ 50 МэВ не позволяет в настоящее время уточнить вклад таких протонов в общий поток.

На рис. 1б приведен спектр нейтронов в исследованной точке поля излучения за защитой, в условиях геометрии 1<sup>4/</sup>.

Для дозиметра ИФК<sub>н</sub> по известным чувствительностям и спектрам нуклонов определялось число треков от протонов и нейтронов ( $N_p, N_n$ ) на траверсе площадью 0,0225 см<sup>2</sup>, при условии совпадения плоскости облучаемой пленки с внешней плоскостью защиты. Следует отметить, что вследствие сильной анизотропии углового распределения потоков протонов за защитой<sup>2/</sup>, часть протонов /~ 25%/, выходящих из защиты, образует в эмульсии треки,

длина проекций которых менее 5 мкм и не регистрируется при просмотре/случаи, близкие к нормальному падению протонов на пленки/. Полученные результаты после нормировки сравнивались с данными эксперимента<sup>8,9/</sup> в точке 2 /см. рис. 2<sup>9/</sup> /, проведенного в геометрии, близкой к геометрии 2. Пленки, облученные в этом эксперименте, просматривались по методике разделения треков на "серые" и "черные" ( $N_c, N_{ch}$ ) с порогом разделения по энергии протонов 50 МэВ<sup>10/</sup>. Результаты сравнения расчетного числа "серых" и "черных" треков на траверсе, полученного на основании имеющейся информации о спектрально-угловых распределениях нуклонов за защитой и экспериментальных данных из работы<sup>10/</sup>, представлены в табл. 1. Снижение порога разделения треков до 40 МэВ приводит к уменьшению в 1,4 раза расчетного числа всех "черных" треков, что хорошо согласуется с результатами<sup>10/</sup>.

Определение эквивалентной дозы нейтронов по результатам просмотра эмульсий без введения какой-либо коррекции приводит к существенному завышению мощности дозы в исследуемой точке поля излучения /1,62 бэр/ч в условиях геометрии 2/. Применение коррекции<sup>10/</sup> дает значение мощности эквивалентной дозы нейтронов 128 мбэр/ч, а величина, полученная в эксперименте<sup>8/</sup> наиболее достоверными способами, после соответствующей нормировки дает значение мощности эквивалентной дозы 87±11 мбэр/ч.

#### ВКЛАД ПРОТОНОВ В ПОКАЗАНИЯ ДН-А-1

Чувствительность гетерогенного детектора ZnS(Ag) + флек-сиглас к протонам в значительной мере определяется его толщиной, рядом технологических параметров /прозрачность, диаметр зерен ZnS(Ag), величина навески/ и порогом электронной схемы дозиметра. Для используемого в ДН-А-1 детектора толщиной 3 мм чувствительность к нормально падающим на торец дозиметра протонам принималась равной:\*

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0 \text{ при } E_p < 30 \text{ МэВ,} \\ \epsilon &= 1 \text{ имп} \cdot \text{протон}^{-1} \text{ при } 30 \leq E_p \leq 60 \text{ МэВ,} \\ \epsilon &= 0,0035 \text{ имп} \cdot \text{протон}^{-1} \text{ при } E_p > 60 \text{ МэВ.} \end{aligned}$$

Здесь  $E_p = 30 \text{ МэВ}$  — энергия протона, достаточная для прохождения его через упаковку детектора и создания в нем регистрируемой вспышки света;  $E_p = 60 \text{ МэВ}$  — энергия протона, при которой световыход становится меньше регистрируемого. При  $E_p > 60 \text{ МэВ}$  чувствительность к протонам принималась равной

\* Чувствительность ДН-А-1 к протонам и нейтронам с энергией более 20 МэВ оценена М.М.Комочковым и В.И.Цовбуном<sup>14/</sup>.

Таблица 1

Сравнение результатов расчета плотности треков /трек·траверс<sup>-1</sup>/ по спектрам нуклонов и результатов просмотра эмульсий с использованием процедуры разделения треков на "серые" и "черные" с порогом разделения 50 МэВ<sup>/10/</sup>.

| $N_p$ | $N_n$ | $N_{p,q}$ | $N_{p,c}$ | $N_q$   | $N_c$ | $\frac{*}{N_q} / 10 /$ | $\frac{*}{N_c} / 10 /$ | $\frac{N_q + N_c}{N_q + N_c} / 10 /$ | $\frac{N_c}{N_c} / 10 /$ | $\frac{N_q}{N_q} / 10 /$ |
|-------|-------|-----------|-----------|---------|-------|------------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 728   | 28,5  | 272       | 510       | 293,5   | 517   | 198,5                  | 463                    | 1,22                                 | 1,12                     | 1,48                     |
| /691/ |       | /181/     |           | /202,5/ |       |                        |                        | /1,09/                               |                          | /1,02/                   |

$N_p, N_n$  - расчетная плотность треков, образованных соответственно протонами и нейтронами.  $N_{p,q}, N_{p,c}$  - расчетная плотность "черных" и "серых" треков, образованных протонами.  $N_q, N_c$  - расчетная плотность "черных" и "серых" треков от протонов и нейтронов. \* - приведено среднее значение результатов просмотра двух эмульсий. Величины без скобок получены в предположении, что доля протонов в спектре с энергией менее 40 МэВ составляет 30% от протонов с энергией более 40 МэВ, а величины в скобках соответствуют 15% вкладу в спектр от протонов с энергией менее 40 МэВ.

чувствительности к нейтронам соответствующей энергии, обусловленной неупругими взаимодействиями нейтронов в детекторе. Так как спектры протонов за защитой /рис. 1/ известны с энергии 40 МэВ, доля протонов с энергией от 30 до 40 МэВ оценивалась аналогично тому, как это делалось для ИФК<sub>Н</sub>. Предполагалось также, что дозиметр ДН-А-1 расположен вплотную к внешней плоскости защиты, т.е. через детектор проходят нуклоны, выходящие из площадки защиты, равной площади переднего торца дозиметра. Чувствительность ДН-А-1 к нейтронам с энергией до 20 МэВ бралась из работы<sup>/11/</sup>.

Для геометрий 1 и 2, при интенсивности пучка первичных протонов  $6,3 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup> были рассчитаны скорости счета дозиметра, обусловленные протонами и нейтронами ( $S_p, S_n$ ), и значение "кажущейся" эквивалентной дозы нейтронов ( $H'$ ), полученной путем умножения суммарной скорости счета ( $S_p + S_n$ ) на градуировочный коэффициент /определенный для ДН-А-1 в поле излучения  $Pu+Be$  источника нейтронов/. Результаты сведены в табл. 2. Видно, что в геометрии 1, в которой отношение потоков протонов и нейтронов достигает 0,11<sup>/2/</sup>, протоны определяют реакцию до-

Таблица 2

Вклад протонов в реакцию ДН-А-1 и эквивалентную дозу за защитой ускорителя в эксперименте<sup>/2,3/</sup>

| Геометрия | $S_p$<br>с <sup>-1</sup> | $S_n$<br>с <sup>-1</sup> | $H'$<br>бэр·ч <sup>-1</sup> | $H_p$<br>бэр·ч <sup>-1</sup> | $H_n$<br>бэр·ч <sup>-1</sup> | $\frac{H'}{H_n}$ | $\frac{H'}{H_p + H_n}$ |
|-----------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------------|
| 1         | 12110                    | 2160                     | 4,3                         | 1,18                         | 0,93                         | 4,6              | 2,0                    |
| 2         | 225                      | 190                      | 0,124                       | 0,018                        | 0,073                        | 1,7              | 1,3                    |

$S_p, S_n$  - расчетные скорости счета ДН-А-1, обусловленные протонами и нейтронами.  $H'$  - "кажущаяся" мощность эквивалентной дозы нейтронов.  $H_p, H_n$  - мощности эквивалентных доз протонов и нейтронов, рассчитанные по измеренным спектрам в диапазоне энергий от 30 до 600 МэВ для протонов и от 10<sup>-8</sup> до 600 МэВ - для нейтронов.

зиметра и значение "кажущейся" дозы. В геометрии 2, при отношении потоков протонов и нейтронов, равно 0,038, их вклад в реакцию дозиметра примерно одинаков. По спектрам нейтронов  $\phi_n(E)$  были рассчитаны эквивалентные дозы  $H_n$ , обусловленные нейтронами, вышедшими из защиты в обеих геометриях /полагалось, что форма спектра нейтронов в геометрии 2 такая же, как и в геометрии 1/:

$$H_n = \max_{10^{-8}}^{600} \int \phi_n(E) \cdot P_n(E, x) dE.$$

Здесь  $P_n(E, x)$  - глубинные распределения эквивалентной дозы единичного потока моноэнергетических нейтронов с энергией  $E$  в фантоме толщиной 30 см<sup>/12/</sup>,  $x$  - координата по глубине фантома. По спектрам протонов  $\phi_p(E)$  вычислялись эквивалентные дозы  $H_p$ , обусловленные протонами, выходящими из защиты с энергией 30-600 МэВ:

$$H = \max_{30}^{600} \int \phi_p(E) \cdot P_p(E, x) dE,$$

где  $P_p(E, x)$ <sup>/12/</sup> определяется для протонов аналогично  $P_n(E, x)$ . Так как с уменьшением энергии протонов в диапазоне от 30 до 600 МэВ функции  $\phi_p(E)$  и  $P_p(E, x)$  монотонно возрастают, то максимум глубинного распределения эквивалентной дозы, обусловленной спектром протонов с  $E \geq 30$  МэВ, лежит в ткани на глубине пробега протонов с энергией 30 МэВ /~0,9 см/. Поэтому

при интегрировании значения  $P_p(E, x)$  для различных энергий протонов брались на глубине 0,9 см. Погрешность вычислений эквивалентной дозы, связанная с приближенным интегрированием, составила 25%. Следует отметить, что погрешность в вычислениях данной дозы возникает также из-за неучета угловых распределений потоков протонов за защитой.

В обеих геометриях наблюдается превышение "кажущейся" мощности дозы нейтронов  $H'$  по отношению к  $H_n$ , тем большее, чем больше протонов присутствует в поле излучения. Однако отношение  $H'$  к мощности суммарной эквивалентной дозы излучения  $H_n + H_p$  не превышает 2 даже в случае геометрии 1. Это подтверждает сделанное ранее предположение<sup>1/</sup> о том, что в полях излучения за сплошной защитой ускорителей дозиметр ДН-А-1 измеряет величину, близкую к суммарной эквивалентной дозе излучения. В условиях геометрии 2, соответствующей наиболее типичным ситуациям формирования нуклонных полей за защитой ускорителя, эквивалентная доза  $H_p$ , обусловленная протонным компонентом поля, существенно меньше эквивалентной дозы  $H_n$ , обусловленной нейтронами. В геометрии 1, характеризующейся большим содержанием протонов, вклад эквивалентной дозы  $H_p$  в суммарную эквивалентную дозу нуклонов, выходящих из защиты, становится значительным.

#### ВКЛАД ПРОТОНОВ В РЕАКЦИЮ АКТИВАЦИИ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ДЕТЕКТОРОВ

Для оценки радиационной обстановки на ускорителях широко применяются углеродсодержащие активационные детекторы. Флюенс нейтронов с энергией более 20 МэВ определяется по скорости реакции активации. Однако интерпретация показаний такого детектора в терминах флюенса нейтронов в поле излучения, содержащем протоны, некорректна, в силу того, что сечение реакции  $^{12}\text{C}(p, x)^{11}\text{C}$  превышает сечение реакции  $^{12}\text{C}(n, x)^{11}\text{C}$  вплоть до энергий нуклонов  $\sim 1 \text{ ГэВ}^{13/}$ . Некорректность такой интерпретации сильно зависит от вида спектра протонов и возрастает с увеличением доли протонов в суммарном потоке нуклонов и со "смягчением" спектра протонов. При расчете вклада протонов в показания детектора делалось предположение, что детектор тонкий и ионизационные потери энергии протонов на его толщине незначительны. В условиях геометрии 1, при интерпретации показаний детектора в терминах флюенса нейтронов, погрешность результатов, обусловленная протонами, достигает 21%<sup>4/</sup>. Во второй геометрии вклад протонов в погрешность результатов существенно меньше и составляет 5%.

#### ВЫВОДЫ

1. Подтверждено, что причиной значительного завышения показаний ИФК<sub>н</sub> и ДН-А-1 в полях излучения за сплошной защитой ускорителя являются протоны. Применение метода коррекции показаний ИФК<sub>н</sub>, описанного в работе<sup>10/</sup>, позволило с точностью до коэффициента 1,5 определить эквивалентную дозу нейтронов.

2. В полях излучения за сплошной защитой ускорителя, в которых вклад протонов в суммарный поток нуклонов превышает 10%, следует при определении флюенса нейтронов с помощью углеродсодержащих детекторов учитывать завышение их показаний за счет протонов.

3. Для излучения реакций дозиметров, регистрирующих нейтроны по протонам отдачи, необходимо уточнить характер поведения спектров протонов в области энергий менее 50 МэВ.

В заключение авторы благодарят М.М.Комочкова и М.И.Салацкую за полезные обсуждения и поддержку в работе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алейников В.Е. и др. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes, vol.2, p. 363, IAEA, Vienna, 1973.
2. Алейников В.Е. и др. Kernenergie, 1979, No. 22, p. 416.
3. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, 16-12732, Дубна, 1979.
4. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Д9-80-637, Дубна, 1980, с. 82.
5. Манько Б.В. Труды РИАН СССР, 1977, №30, с. 86.
6. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Д9-80-637, Дубна, 1980, с. 83.
7. Гельфанд Е.К. Труды РИАН СССР, 1975, №22, с. 242.
8. Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-8179, Дубна, 1974.
9. Комочков М.М., Салацкая М.И. ОИЯИ, Р16-8175, Дубна, 1974.
10. Гельфанд Е.К. и др. ОИЯИ, Р16-12552, Дубна, 1979.
11. Голованов Н.А. и др. Труды СНИИП, Атомиздат, М., 1964, вып. 1, с. 36.
12. Атлас дозовых характеристик внешнего ионизирующего излучения /под ред. Е.Е.Ковалева/, Атомиздат, М., 1978.
13. Bizard G. et al. Nucl. Instr. Meth., 1975, p. 129.
14. Алейников В.Е. и др. В кн.: Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes. vol. II, 1973, p. 363; Proc. Symp. IAEA, Vienna, 11-15 December, 1972.

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 февраля 1981 года.