

К-636



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3981/2-76

11/x-76

P16 - 9780

М.М.Комочков, М.И.Салацкая

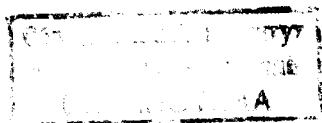
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОЭМУЛЬСИОННОГО МЕТОДА
ИНДИВИДУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ДОЗЫ
ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ

Дубна 1976

P16 - 9780

М.М.Комочков, М.И.Салацкая

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОЭМУЛЬСИОННОГО МЕТОДА
ИНДИВИДУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ДОЗЫ
ОБЛУЧЕНИЯ НЕЙТРОНАМИ



1. Введение

Одним из основных компонентов, определяющих эквивалентную дозу за защитой большинства ядерно-физических установок, являются нейтроны^{/1-3/}. Для индивидуального контроля дозы облучения нейтронами наибольшее распространение получил метод регистрации треков протонов в ядерной эмульсии, которому, в частности, свойственна сравнительно высокая чувствительность в области тепловых и быстрых нейтронов. В ОИЯИ этот метод внедрен в практику индивидуального контроля более 10 лет назад^{/4,5/} и условно обозначается как ИФКн. Применение ядерных фотозмульсий для индивидуального контроля дозы нейтронов сопряжено с рядом известных^{/1/} недостатков, что побудило искать новые, более совершенные методы^{/1,6/}, основанные в своем большинстве на применении термолюминесцентных детекторов /ТЛД/ и детекторов, в которых регистрируют следы радиационных повреждений /ДСРП/.

В настоящей работе проводится сравнение функций чувствительности методов ИФКн, ТЛД и ДСРП с целью установления "конкурентоспособности" ИФКн как индивидуального дозиметра, а также уточняются его основные характеристики в свете данных современной информации.

2. Сравнение чувствительностей ИФКн, ТЛД и ДСРП

Под чувствительностью будем понимать реакцию детектора на единицу эквивалентной дозы; для детекторов ИФКн и ДСРП реакцию измеряют числом треков на еди-

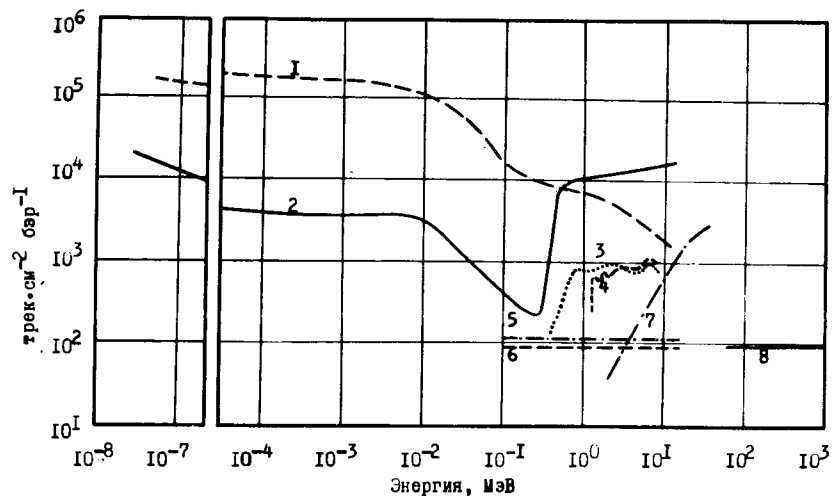


Рис. 1. Чувствительность различных детекторов как дозиметров нейтронов: термолюминесцентные детекторы ${}^6\text{Li}/1/$ и ${}^7\text{Li}/7/$, ядерная фотозмульсия типа "К"/20 мкм/ с фильтрами - 2, детекторы следов радиационных повреждений с радиаторами из ${}^{237}\text{Np}$ - 3; ${}^{232}\text{Th}$ - 4, 6; ${}^7\text{Li}$ - 5; Bi - 8.

ницу площади детектора. Чтобы сравнить чувствительность ТЛД с чувствительностью ИФКн и ДСРП, выразим реакцию ТЛД числом эквивалентных треков на единицу площади детектора. Эквивалентность установим исходя из того, что минимальная эквивалентная доза, измеряемая методом ИФКн, - 20 мбэр, а минимальная поглощенная доза гамма-излучения, измеряемая ТЛД /в частности, для детекторов ${}^6\text{Li}$ и ${}^7\text{Li}$ /, - 10 мрад^{7/} при чувствительности к тепловым нейтронам 80 бэр/рад^{18/}.

На рис. 1 приведены чувствительности ИФКн, ТЛД и ДСРП к нейтронам различных энергий. Установление функции чувствительности ИФКн /кривая 2/ к нейтронам описывается в следующем разделе. Чувствительность термолюминесцентного детектора нейтронов ${}^6\text{Li}$ альбедного типа /кривая 1/ заимствована из работы^{18/} при энергии менее 1 МэВ, а при больших энергиях - из работы^{9/}. Функции чувствительности детекторов следов повреждений с радиаторами из ${}^{237}\text{Np}$ /кривая 3/ и ${}^{232}\text{Th}$

/кривая 4/ заимствованы из работы^{12/}. Кривая 7 - зависимость чувствительности ТЛД ${}^7\text{Li}$ от энергии нейтронов по данным работы^{10/}. Данные, представленные цифрами 5, 6, 8, выражают отношения плотностей следов повреждений в пленках при использовании радиаторов из ${}^7\text{Li}$, ${}^{232}\text{Th}$ и Bi соответственно к эквивалентной дозе быстрых нейтронов /кривые 5 и 6/ и эквивалентной дозе нейтронов с энергией более 20 МэВ /кривая 8/^{11/}.

Приведенные на рис. 1 данные показывают, что функции чувствительности всех трех типов детекторов далеки от предпочтительной - константы. По своей чувствительности ДСРП значительно уступают методам ИФКн и ТЛД, что затруднит применение ДСРП в ближайшие годы для индивидуального контроля допустимых доз при повседневном облучении. Данные рис. 1 показывают, что ТЛД имеют более высокую чувствительность, чем ИФКн, к нейтронам с энергиями менее 0,5 МэВ. Для того, чтобы уяснить, в какой степени это существенно, следует обратиться к энергетическому распределению эквивалентной дозы. На рис. 2, в частности, представлены энерге-

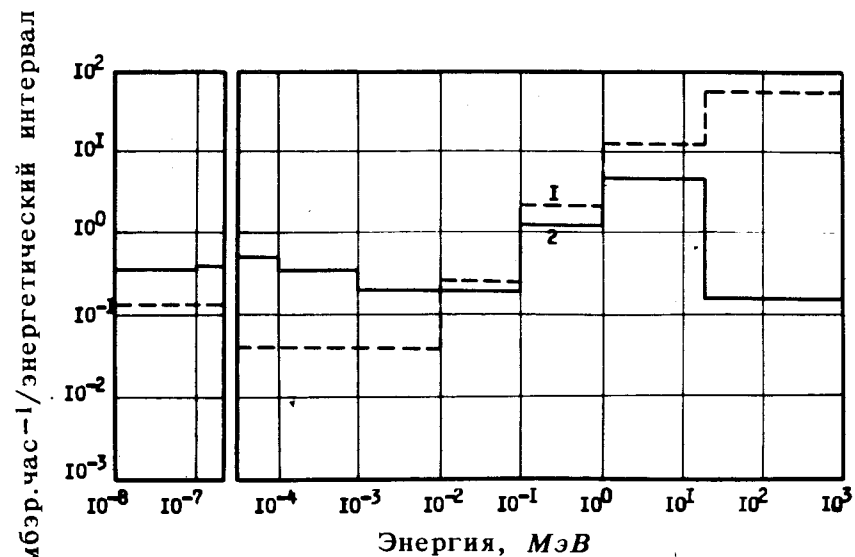


Рис. 2. Энергетическое распределение эквивалентной дозы нейтронов за защитой синхроциклотрона: 1 - спектр "жесткий", 2 - спектр "мягкий".

тические распределения эквивалентной дозы за защитой синхроциклотрона ОИЯИ; кривая 1 - соответствует условиям с одним из наиболее "жестких" спектров нейтронов, а кривая 2 - с одним из "мягких" спектров. Эти результаты свидетельствуют о том, что основная часть эквивалентной дозы обусловлена быстрыми нейтронами и нейтронами высоких энергий. Имея в виду это обстоятельство и данные рис. 1, можно утверждать, что ТЛД уступают в целом по чувствительности ИФКн, что делает метод ИФКн наиболее конкурентоспособным по сравнению с другими методами /ТЛД, ДРСП/, разрабатываемыми в последнее время. Вероятно, это положение сохранится в течение нескольких ближайших лет.

3. Чувствительность ИФКн к нейтронам различных энергий и градуировка

Чувствительность метода ИФКн, определяемая плотностью треков протонов на 1 бэр падающих изотропно в телесном угле 2π нейтронов различных энергий, представлена на рис. 1. До энергий нейтронов 0,3 МэВ треки обусловлены протонами из реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ на азоте эмульсии под действием тепловых нейтронов, падающих на человека /фантом/ или отраженных от него при облучении промежуточными нейтронами. Чувствительность ИФКн к нейтронам таких энергий описана в работе ^{/12/}. Для нейтронов с энергией 0,5 ÷ 15 МэВ чувствительность определяется треками протонов отдачи, образующимися при взаимодействии нейтронов с водородом эмульсии и радиатора корректирующего пакетика ^{/4/}. При расчете чувствительности, обусловленной протонами отдачи, учитывались только первые соударения нормально падающих на плоскость эмульсии нейтронов; в соответствии с этим величину эквивалентной дозы первого столкновения для нейтронов вычисляли на основании знания кермы ^{/13/} и коэффициентов качества, рекомендуемых для нейтронов различных энергий в работе ^{/14/}. Переход к условиям изотропного облучения в телесном угле 2π выполняли на основании измерен-

ного отношения числа треков протонов отдачи при изотропном падении нейтронов на плоскость эмульсии к числу треков при нормальном падении; это отношение равно 0,75.

Градуировка кассет ИФКн производилась нами ранее ^{/18/} без фантома нейтронами $\text{Po} + \text{Be}$ или $\text{Pu} + \text{Be}$ источников. Необходимый поток нейтронов рассчитывали исходя из кривой 1-го столкновения. При этом считали, что нейтроны, претерпевшие многократное рассеяние в теле человека, дадут дополнительный вклад в число зарегистрированных протонов, что обеспечит приближение к действительной величине дозы на поверхности тела. В табл. 1 приведены используемые нами для градуировки ИФКн ранее и в настоящее время данные по керме (K) ^{/13/}, максимальной эквивалентной дозе (H) ^{/14/}, коэффициенту качества (\bar{Q}) ^{/14/} и спектру нейтронов $\text{Po} + \text{Be}$ и $\text{Pu} + \text{Be}$ источников. Величины K, H и \bar{Q} в настоящее время взвешены по спектру нейтронов $\text{Pu} + \text{Be}$ источника ^{/15/} для энергий нейтронов $\geq 0,3$ МэВ. Выход нейтронов с такой энергией составляет примерно 90% от полного выхода ^{/15/} для больших $\sim 10^7$ н.с.⁻¹ /источников; для меньших источников почти все нейтроны $\sim 95\%$ будут иметь такую энергию ^{/16/}. Для сравнения в табл. 1 представлены часто используемые данные из работы ^{/17/}.

Значения чувствительности, полученные при градуировке ИФКн с $\text{Pu} + \text{Be}$ источником без фантома (A_1) при использовании величины эквивалентной дозы первого соударения $K \times \bar{Q}$ и на фантоме (A_2) с использованием величины максимальной эквивалентной дозы, оказались равными:

$$A_1 = /1,36 \pm 0,08/ \cdot 10^4 \text{ тр. см}^{-2} \text{ бэр}^{-1};$$

$$A_2 = /1,23 \pm 0,08/ \cdot 10^4 \text{ тр. см}^{-2} \text{ бэр}^{-1};$$

$$A_1 / A_2 = 1,10 \pm 0,08.$$

Расчетная величина чувствительности $1,3 \cdot 10^4 \text{ тр. см}^{-2} \text{ бэр}^{-1}$. Полученные данные свидетельствуют о том, что наличие фантома не полностью обеспечивает дополнительный вклад в число треков на пленке, обусловленный многократным рассеянием нейтронов

Таблица 1

Сравнение некоторых характеристик источников нейтронов, используемых при градуировке ИФКн

Используемые в ОИЛИ	171/
до 1975 г. /18/	Nachtigall
настоящее время	
источник	$Pu + Be$
	$Pu + Be$
	спектр из ра- по несколько по 15/
	боти
	КИМ спектрам:
$K \text{ рад} \cdot \text{н}^{-1} \text{ см}^2$	$4,3 \cdot 10^{-9}$
	$3,61 \cdot 10^{-9}$
	$3,73 \cdot 10^{-9}$
$H \text{ бэр} \cdot \text{н}^{-1} \text{ см}^2$	-
	$3,73 \cdot 10^{-8}$
\bar{Q}	10
	8,5
	7,5

в фантоме. Поэтому градуировка индивидуальных фотоэмульсионных дозиметров нейтронов на фантоме является более корректной. Однако в целях упрощения в рутинной дозиметрии допустима градуировка дозиметров в свободном пространстве с последующим введением поправки на 10% от полученной при градуировке чувствительности.

Многолетняя практика показала, что величина чувствительности остается постоянной $\pm 10\%$ для различных партий эмульсий, так что можно принять:

$$A = 1,23 \pm 0,15 \cdot 10^4 \text{ тр. см}^{-2} \text{ бэр}^{-1}$$

Верхний предел измеряемой с помощью ИФКн дозы указывался ранее как 15 бэр¹⁹. Позднее при облучении дозиметров нейтронами $Pu + Be$ источника было показано, что пропорциональность между дозой облучения и числом сосчитанных на пленке треков в пределах ошибок, составляющих в эксперименте $7 \div 12\%$, сохраняется по крайней мере до 100 бэр. При этом нужно учитывать, что доза по гамма-излучению /жесткому/ не должна превышать $5P^{14}$, а в случае мягкого гамма-излучения с энергией $40 \div 80 \text{ кэВ}$ - $0,5P$.

4. Достоверность воспроизведения эквивалентной дозы и корректировка показаний ИФКн

Большие отклонения чувствительности ИФКн /кривая 2, рис. 1/ от предпочтительной зависимости в диапазоне энергий $10-500 \text{ кэВ}$, а также завышенные показания при облучении ИФКн в поле релятивистских адронов^{5,20,21/} приводят к необходимости при некоторых условиях прибегать к коррекции показаний ИФКн. В поле нейтронов с энергиями менее 10 МэВ такими условиями, в частности, будут условия за защитой из железа^{22/}. Для введения коррекции показаний ИФКн в подобных ситуациях необходимо знание либо спектра, либо результатов сравнений показаний ИФКн с наиболее достоверными данными об эквивалентной дозе^{21/}. Необходимость

в поправке показаний ИФКн при облучении в поле релятивистских адронов возникает в условиях облучения, при которых вклад релятивистских адронов в суммарную эквивалентную дозу превышает 5%^{5/}. В этих случаях производится коррекция показаний ИФКн двумя описанными в работе^{5/} методами. Использование этих методов предполагает тщательный просмотр эмульсий с поиском звезд с числом лучей ≥ 3 и с делением треков на 2 группы:

а/ треки, насквозь пересекающие эмульсию - N_1 ;

б/ треки, один или оба конца которых лежат внутри эмульсии - N_2 .

Обычно такой просмотр осуществляется в случаях, когда доза, определенная без коррекции по числу треков на пленке ($D_{\text{каж}}$), более или равна 1/3 предельно допустимой за период контроля дозы. При этом коррекция полученных данных необходима в случаях, когда:

$$1/ D_{\text{каж}} \leq 50 D_{\text{зв}}$$

где $D_{\text{зв}}$ - доза, обусловленная релятивистскими адронами и определяемая по числу звезд N в эмульсии^{5/},

$$D_{\text{зв}} = K_1 \cdot N, \quad K_1 = 0,34 \text{ бэр} \cdot \text{зв}^{-1} \text{ мм}^2$$

и

$$2/ \frac{N_2}{N_1 + N_2} \leq 0,15.$$

Целесообразность и эффективность введения коррекции показаний ИФКн иллюстрируется данными табл. 2. Облучение ИФКн проводилось в условиях "жесткого" и "мягкого" спектров частиц за защитой канала для экспериментов с нейтрино. Показания ИФКн сравниваются с измеренными с помощью системы CERBERUS величинами доз, которые близки к наиболее достоверным по данным работы^{23/}. Сравнение данных показывает, что после коррекции показаний ИФКн имеет место удовлетворительное согласие результатов.

Таблица 2
Сравнение результатов измерения* доз излучений с помощью ИФКн и системы CERBERUS

Компоненты поля излучения	"жесткий" спектр		"мягкий" спектр	
	CERBERUS	ИФКн	CERBERUS	ИФКн
Доза гамма-излучения, рад	0,074	0,040	0,005	0,030
Доза нейтронов с энергией менее 20 МэВ, бэр	0,252	-	0,533	-
Доза адронов с энергией более 20 МэВ, бэр	0,347	0,25	0,008	-
Доза по показаниям ИФКн без коррекции, бэр	-	5,5 5,3 5,4	-	0,28 0,36 0,28
Полная эквивалентная доза нуклонов (по ИФКн - после коррекции), бэр	0,599	1,02 1,01 0,83	0,541	-
Полная эквивалентная доза, бэр	0,673	1,06 1,05 0,87	0,546	0,31 0,39 0,31

* В измерениях с системой CERBERUS участвовали сотрудники группы дозиметрии ЦЕРНа и сотрудник ОРБ ОИЯИ В.Е.Алейников.

5. Регрессия треков

К детекторам, используемым в качестве индивидуальных дозиметров, предъявляются жесткие требования в отношении стабильности показаний в течение времени, прошедшего с момента облучения детектора до снятия с него показаний. В случае эмульсий эта характеристика связана с регрессией скрытого изображения, т.е. исчез-

новением центров проявления во время хранения или ношения облученной эмульсии. Величина регрессии зависит от типа эмульсии, упаковки ее, от условий окружающей среды. Широко используемая в странах Европы и Америки в индивидуальной дозиметрии нейтронов эмульсия Kodak NTA обладает значительной регрессией^{/24-26/}. Так, при обычных условиях /25°С и 53% относительной влажности/ до 50% треков исчезает за 3 недели хранения пленок после облучения^{/26/}. При увеличении температуры и влажности окружающего воздуха процент исчезающих треков возрастает.

В работах^{/4,19/} было показано, что при хранении используемых в ИФКи эмульсий в лабораторных условиях в течение ста дней после облучения их тепловыми нейтронами или нейтронами Po+Be источника уменьшение числа треков не выходило за пределы ошибок. Позднее такой эксперимент был продлен до 6,5 месяцев хранения эмульсий в обычных условиях /t = 18÷21°С, относительная влажность 30÷60%/. Число треков при этом в пределах ошибок /±10%/ оставалось постоянным. Однако указанные условия хранения эмульсий не вполне однозначны и не дают возможности установить верхний предел влажности и температуры, при которых регрессией еще можно пренебречь. С целью получения более определенных данных по регрессии был проведен эксперимент, в котором определялось влияние этого эффекта на число треков в эмульсиях, облученных нейтронами Pu+Be источника и хранившихся в кассетах ИФК-2,3 длительное время в условиях с определенной температурой и влажностью окружающего воздуха. Определенная влажность воздуха создавалась в эксикаторах насыщенными растворами некоторых солей. Температура воздуха в термостатах, куда помещались эксикаторы с кассетами, поддерживалась постоянной.

Результаты эксперимента, представленные на рис. 3, показывают, что в обычных условиях /t = 25°С, относи-

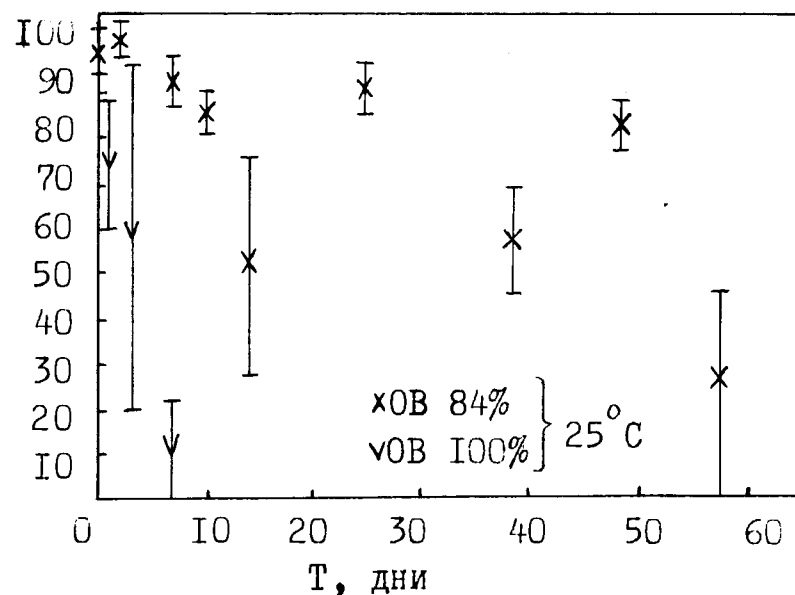
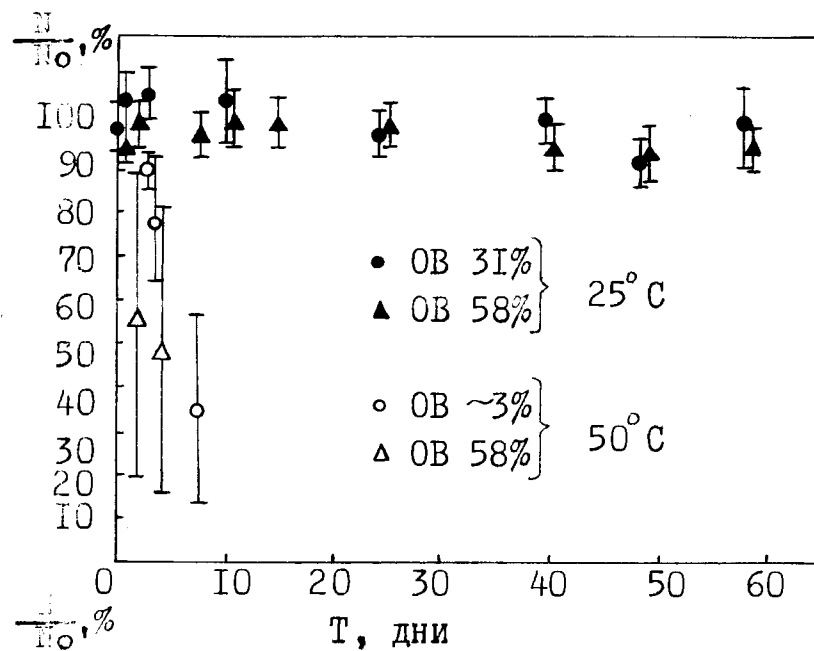


Рис. 3. Зависимость относительного числа треков в эмульсии типа "К"/ИФКи/от времени хранения T в условиях с различной температурой и относительной влажностью (OB).

тельная влажность менее 60%/ число треков на облученных пленках оставалось в пределах ошибок эксперимента постоянным. Это согласуется с прежними результатами для "лабораторных" условий. Однако в условиях повышенной влажности /84%/ даже при температуре 25°С уже через 2 недели хранения эмульсии регрессия становится заметной и в значительной степени неопределенной.

В очень жарком и влажном климате / $t=50^{\circ}\text{C}$, 100%-ная относительная влажность/ эмульсия разрушается.

Заключение

Сравнительно высокая чувствительность фотоэмульсионного метода индивидуального контроля доз облучения нейтронами широкого энергетического диапазона, возможность анализа считываемой информации, а также накопленный опыт работы и доступность метода позволяют предполагать, что он сохранит в ближайшие годы свою конкурентоспособность при сравнении с методами, развиваемыми в последнее время, такими, как термолюминесцентный и метод регистрации следов повреждений.

В работе приведены основные характеристики ИФКн в свете данных современной информации. Достоверность воспроизведения эквивалентной дозы нейтронов при индивидуальном контроле с помощью ИФКн в настоящее время не отвечает рекомендациям МКРЕ^{/14/}, что побуждает искать пути совершенствования метода.

Авторы благодарят группу сотрудников Отдела радиационной безопасности ОИЯИ за просмотр эмульсий.

Литература

1. *Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes. Proc. of a Symposium. Vienna, 11-15 December 1972, v. II, IAEA, Vienna, 1973.*

2. *H. W. Patterson and R. H. Thomas. Accelerator Health Physics. Academic Press, New York and London, 1973.*
3. *Л.Н. Зайцев и др. Основы защиты ускорителей. Атомиздат, М., 1971.*
4. *Л.С. Золин и др. АЭ, т. 13, 467 /1962/.*
5. *М.М. Комочков, М.И. Салацкая. Препринт ОИЯИ, P16-8175, Дубна, 1974.*
6. *K. Becker. Solid State Dosimetry. CRC Press, Cleveland, Ohio, USA, 1973.*
7. *В.И. Иванов. Курс дозиметрии. Атомиздат, М., 1970.*
8. *J. R. Harvey et al. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes. Proc. of a Symposium, Vienna 11-15 December 1972, IAEA, Vienna, 1973, 199.*
9. *R. G. Alsmüller, Jr., J. Barish. Health Phys., v. 26, p. 13 /1974/.*
10. *М. Н. Момени. Health Phys., v. 27, p. 217 /1974/.*
11. *В. J. Tymons et al. Report DI/HP/168, CERN, Geneva, 1973.*
12. *М. Г. Гелев и др. Препринт ОИЯИ, P16-9749, Дубна, 1976.*
13. *R. L. Bach and R. S. Caswell. Radiation Research, v. 35, p. 1-25 /1968/.*
14. *Радиационная безопасность. Величины, единицы, методы и приборы, под ред. И. Б. Кеурим-Маркуса. Атомиздат, М., 1974.*
15. *H. Kluge et al. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes. Proc. of a Symposium, IAEA, Vienna, v. 1, 13 /1973/.*
16. *Н. Д. Тюфяков и др. АЭ, т. 34, с. 349 /1973/.*
17. *D. Nachtigall. Health Phys., v. 13, p. 213 /1967/.*
18. *М. И. Салацкая и др. Радиационная физика. 11, Изд - во АН Латв. ССР, Рига, 1964.*
19. *М. Г. Гелев и др. Препринт ОИЯИ, 16-6243, Дубна, 1972.*
20. *V. E. Aleinikov et al. Proc. of Int. Congr. on Protec. Against Acceler. and Space Rad., CERN, 71-16, v. 1, p. 282 /1971/.*
21. *В. Е. Алейников и др. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes. Proc. of a Symposium, Vienna, 11-15 December, 1972, v. II, p. 363, IAEA, Vienna, 1973.*
22. *Л. Р. Кимель, В. П. Машкович. Защита от ионизирующих излучений. Справочник, Атомиздат, М., 1966.*
23. *M. Höfert. Report DI/HP/187, CERN, Geneva, 1975.*
24. *J. Jasiak and T. Musialowicz. Nucleonica, v. 17, p. 647 /1972/.*

25. *P.N.Krishnamurthy et al. Neutron Monitoring for Radiation Protection Purposes. Proc. of a Symposium, IAEA, Vienna, v. II, 343 /1973/.*
26. *E.Piesch and A.M.Sayed. Nucl. Instr. and Meth., v. 123, p. 397-402 /1975/.*

*Рукопись поступила в издательский отдел
11 мая 1976 года.*