

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P16-86-186

**М.М. Комочков**

**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ  
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР  
С МИШЕНЬЮ**

**1986**

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Модернизация синхрофазотрона как ускорителя релятивистских ядер и создание на его основе ускорительного комплекса тяжелых ионов <sup>1/</sup> привели к необходимости разработки метода прогнозирования радиационной обстановки и его экспериментальной проверки.

При разработке метода исходили из условия его доступности для инженеров, проектирующих защиту ускорителей, и возможности использовать информацию о параметрах полей излучений, накопленную в протон-ядерных соударениях. Обоснование такого метода приведено в работах <sup>2,3/</sup> на основе данных экспериментов с релятивистскими ядрами при энергии 86, 213, 337, 400 МэВ/нуклон; 1,05 и 1,54 ГэВ/нуклон: В настоящей работе кратко суммируются некоторые экспериментальные и расчетные результаты исследования радиационной обстановки при взаимодействии релятивистских ядер с энергией 3,65 ГэВ/нуклон с толстой медной мишенью.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Геометрия эксперимента приведена на рис.1. Пучки релятивистских ядер углерода, гелия или протонов при энергии 3,65 ГэВ/нуклон, выведенные в нескольких сеансах по каналу медленного вывода, попадали в центр основания цилиндрической медной мишени диаметром 10 см и толщиной по направлению пучка  $l = 13$  см. Распределение флюенса пучка ядер углерода по основанию мишени, измеренное <sup>\*</sup> термолюминесцентными детекторами (ТЛД-700), показано на рис.2 в качестве примера. Точка пересечения координатных осей совмещена с центром основания мишени; размеры указаны в мм. Подобные распределения наблюдаются для случая протонов и ядер гелия. Около 95% частиц пучка сфокусированы на площади приблизительно  $10 \text{ см}^2$  вблизи центра основания мишени.

Мониторинг пучка осуществлялся с помощью ионизационной камеры <sup>4/</sup>, активационных детекторов <sup>5/</sup> и ТДЛ. Калибровка ионизационной камеры в абсолютных единицах для случая протонов

<sup>\*</sup>) Измерения выполнены Г.Я.Каскановым.

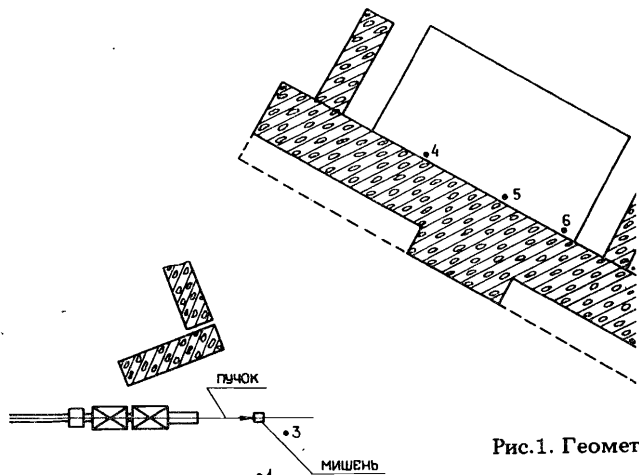


Рис.1. Геометрия эксперимента.

выполнялась с помощью активационных детекторов по реакциям  $^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$  и  $^{27}\text{Al}(p, 3pn)^{24}\text{Na}$ , а для альфа-частиц и ядер углерода — с помощью телескопа из двух быстрых сцинтилляционных счетчиков при сниженном потоке частиц в пучке  $^{4,5/}$ .

В режиме ускорения альфа-частиц и ядер углерода-12 в пучке содержатся ядра с различным значением атомного номера  $Z$ , но с одинаковым отношением  $(Z/A)=0,5$ , где  $A$  - массовое число ядра, и одинаковой величиной импульса на нуклон. Их примесь в режиме ускорения ядер углерода-12 в выведенном пучке составляет от 5-10%  $^{16/}$  до 45%  $^{17/}$ .

Выход излучения из мишени (в основном адронов) определялся  $^{15/}$  по наведенной радиоактивности в фольгах из алюминия и углеродсодержащего материала, в которые заворачивалась мишень. Результаты вычислений числа адронов  $Y_1$ , вылетающих из мишени при падении на нее одной частицы пучка, которые получены на осно-

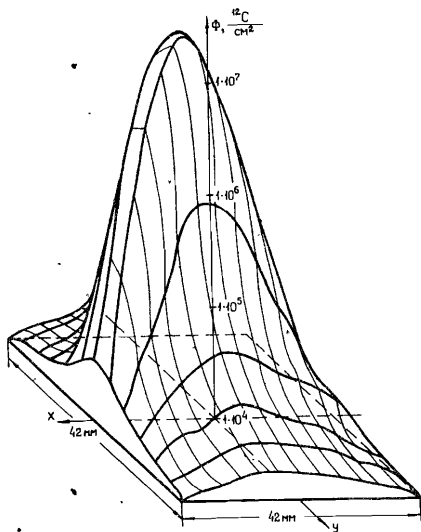


Рис.2. Распределение флюенса ядер углерода энергии 3,65 ГэВ/нуклон в пучке.

ве измерения активности  $^{18}\text{F}$  в алюминиевой фольге (энергия порога образования  $E_a \approx 45$  МэВ) и активности  $^{12}\text{C}$  в углеродсодержащей фольге  $E_a \approx 20$  МэВ), представлены в табл.1. Там же для сравнения даны результаты расчета, основы которого изложены в следующем разделе.

Таблица 1

Выход адронов с энергией больше  $E_a$  из медной мишени, облучаемой протонами, ядрами гелия-4 и углерода-12 при энергии 3,65 ГэВ/нуклон

Частицы пучка	$Y_1$ , адрон/частица пучка			
	Эксперимент		Расчет	
	$E_a > 20$ МэВ	$E_a > 45$ МэВ	$E_a > 20$ МэВ	$E_a > 45$ МэВ
протоны	$4,7 \pm 0,7$	$3,5 \pm 0,5$	4,6	3,3
гелий-4	$18,7 \pm 2,8$	$14,6 \pm 2,2$	16	11,4
углерод-12	$47 \pm 7$	$36 \pm 5$	39	28

Угловое распределение частиц из мишени представлено на рис.3. Результаты эксперимента были получены  $^{15/}$  с помощью углеродсодержащих детекторов с порогом регистрации адронов приблизительно 20 МэВ. Для этого же порога даны результаты расчета дифференциального выхода адронов. Сравнение результатов эксперимента по угловому распределению заряженных частиц  $^{4,8/} dY_3/d\Omega$  с результатами расчета углового распределения адронов с энергией более 100 МэВ  $dY/d\Omega$  показывает, что  $\frac{dY}{d\Omega} \approx 2 \frac{dY_3}{d\Omega}$ . Такого соотношения можно ожидать, если принять во внимание приблизительное равенство между числом возникающих нейтронов и заряженных адронов с энергией более 100 МэВ, которая является суммой порога регистрации телескопом счетчиков заряженных частиц  $^{4/}$  и их средней потери энергии в мишени.

Радиационная обстановка в районе мишени и за защитой приведена в табл.2. Она характеризуется поглощенной тканями человека дозой  $D$  излучения, эквивалентной дозой  $H$  и флюенсом частиц  $\Phi$ , с энергией более 20 МэВ, которые формируются в шести избранных точках при падении на мишень одной частицы пучка. Наиболее полная экспериментальная информация получена в режиме вывода протонов на мишень.

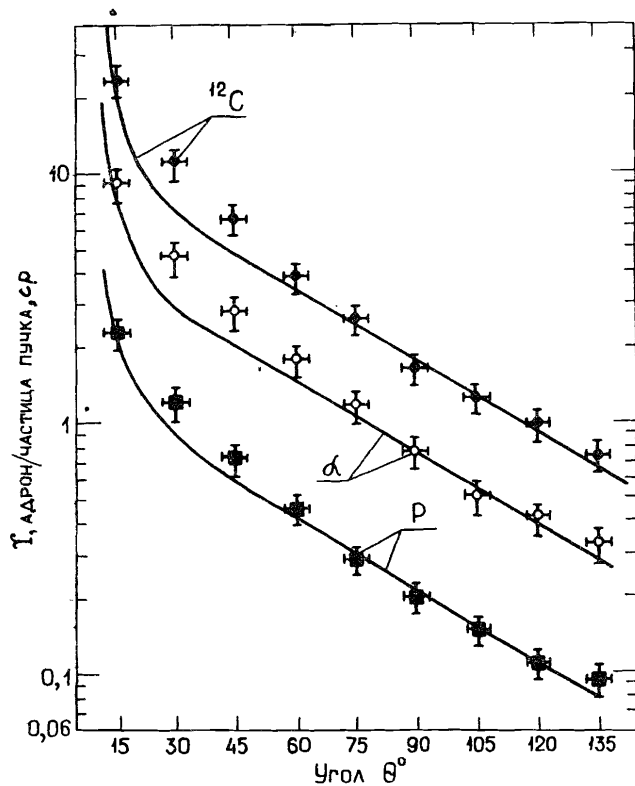


Рис.3. Угловое распределение адронов  $E_n > 20$  МэВ:  $\times$  — измерено; — — — — рассчитано.

### 3. РАСЧЕТ

В основу расчета выхода частиц из мишени, их углового распределения, флюенса частиц, а также дозы излучения положены полуфеноменологические методы, изложенные в [2, 3, 9].

Выход адронов из мишени при облучении ее протонами вычисляется на основе следующей формулы, которая получается как результат интегрирования дифференциального по углу распределения  $dY/d\Omega$  (ф-ла (2) из работы [9]) с учетом поглощения квазиупругих нуклонов (первый член в (1)) в результате неупругих взаимодействий и роста за этот счет каскадной части (второй член в (1)):

$$\nu = 2\pi \left[ 0,45 \frac{\ell e^{-\ell/\lambda_p}}{\lambda_p (1 - e^{-\ell/\lambda_p})} + \frac{3,4(E_p/7,1)^n}{\beta^2 + 1} \sqrt{\frac{A_m}{63,5}} \right], \quad (1)$$

где  $\nu$  - число вторичных адронов с энергией более  $E_n$ , вылетающих из мишени на одно неупругое взаимодействие первичных протонов энергии  $E_p > 0,6$  ГэВ с ядром, массовое число которого равно  $A_m$ ;  $n = 1/2$  при  $E_p < 7,1$  ГэВ и  $n = 1/3$  при  $E_p > 7,1$  ГэВ.

Таблица 2

Дозиметрические параметры поля в районе мишени при падении на нее одной частицы пучка

№ точеч на рис. I	протоны		ядра $^{12}\text{C}$		
	Эксперимент				
	$D, f \text{ рад}$	$H, f \text{ бэр}$	$\Phi, \text{ см}^{-2}$	$D, f \text{ рад}^*$	$H, f \text{ бэр}^*$
I	383	2070	$4,5 \cdot 10^{-6}$	2000	8700
2	97	554	$1,1 \cdot 10^{-6}$	522	2610
3	2830	9340	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$
4	0,37	1,6	$9 \cdot 10^{-9}$	-	-
5	-	0,34	-	-	-
6	0,09	0,5	$6 \cdot 10^{-10}$	-	-
Расчет					
I	640	2560	$6 \cdot 10^{-6}$	4050	$1,6 \cdot 10^4$
2	160	640	$1,5 \cdot 10^{-6}$	900	3600
3	4300	$1,7 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^4$	$10 \cdot 10^4$
4	0,78	3,1	$7,3 \cdot 10^{-9}$	5,6	2,2
5	0,20	0,8	2,0	1,4	5,8
6	0,12	0,48	$1,1 \cdot 10^{-9}$	0,86	3,5

\* Измерения выполнены А.П.Череватенко.

$$\beta = -0,26 + 0,55 \ln E_n - 0,21 \sqrt{\frac{\ell \cdot \Phi}{\lambda_p^2}} \quad (\text{радиан}) \quad (2)$$

при условии, что  $(\ell \cdot \Phi / \lambda_p^2) \leq \ln E_p$ ,  $\Phi = (\Phi_n + \ell) \leq 600 \text{ г/см}^2$ .  
 $3 \text{ МэВ} < E_n \leq 100 \text{ МэВ}$ .

Здесь  $\ell$  и  $\Phi$  - длина и диаметр мишени соответственно,  $\Phi_n$  - диаметр пучка частиц, а  $\lambda_p$  - длина до неупругого взаимодействия протона с ядром в мишени.

Число неупругих соударений протонов в количестве  $J$ , падающих на мишень, есть

$$\eta = J(1 - e^{-\ell/\lambda_p}). \quad (3)$$

Выход адронов из мишени будет

$$Y = \eta \nu. \quad (4)$$

При взаимодействии релятивистского ядра  $j$  с мишенью выход адронов может быть рассчитан на основе метода эквивалентных протонов, обоснованного в работах <sup>/2,3/</sup> с помощью выражения

$$Y_j = Y_{j, np} + \nu \sum_{i=1}^j \eta_i N_i, \quad (5)$$

где  $Y_{j, np}$  - число нейтронов и протонов, как фрагментов первичного ядра-снаряда  $j$ , выходящих из мишени;  $N_i$  - число эквивалентных протонов для релятивистского ядра-снаряда  $i$ , как падающего на мишень, так и образующегося в ней в виде его фрагмента. Фрагменты от фрагментов в расчет не принимались. Зависимость  $N_i$  от массового числа ядра-снаряда  $A_i$  заимствована из работы <sup>/3/</sup>. Число неупругих взаимодействий  $\eta_i$  рассчитывалось как разность между числом возникших фрагментов в мишени и числом вышедших из нее. Сечение образования фрагментов (кроме нуклонов, для которых  $i=1$ ) заимствовано из работы <sup>/11,12/</sup>. Сечение неупругого взаимодействия релятивистских ядер рассчитывалось по формуле, предложенной в работе <sup>/10/</sup>, и принималось не зависящим от энергии ядра-снаряда в диапазоне ее изменения при прохождении в мишени. Число протонов и нейтронов, как фрагментов первичного ядра-снаряда с  $A_i < 20$  при одном его неупругом взаимодействии с ядром-мишенью, находилось интегрированием дифференциального по углу распределения

$$(d\nu/d\Omega)_{j, np} = N(20e^{-11\theta} + 5,2e^{-7,28\theta}), \quad (6)$$

где  $N$  - число эквивалентных протонов в ядро-ядерном соударении, а  $\theta$  - угол наблюдения по отношению к пучку в радианах. Некоторым основанием для формулы (6) служили данные работ <sup>/11,13/</sup> и рис.3 из работы <sup>/3/</sup>. Поток выходящих из мишени фрагментов  $i$  в расчете на одно первичное ядро-снаряд  $j$  определяется с помощью следующей формулы

$$Y_{j,i} = \frac{\lambda_i \lambda_j}{\lambda_{ji} (\lambda_i - \lambda_j)} \left[ e^{-\ell/\lambda_i} - e^{-\ell/\lambda_j} \right], \quad (7)$$

где  $\lambda_j$  и  $\lambda_i$  - длины до неупругого взаимодействия первичного ядра-снаряда и его фрагмента  $i$  с ядром вещества мишени соответственно, а  $\lambda_{ji}$  - длина пробега первичного ядра-снаряда до образования фрагмента  $i$ .

Дифференциальное по углу распределение адронов от мишени описывается формулой

$$\frac{dY_j}{d\Omega} = \frac{dY_{j, np}}{d\Omega} + \frac{d\nu}{d\Omega} \sum_{i=1}^j \eta_i N_i. \quad (8)$$

Как и в случае выхода адронов, в расчет принимаются первичные ядра, бомбардирующие мишень, и все его фрагменты, включая протоны и нейтроны ( $i=1$ ). При облучении мишени протонами:

$$\frac{dY_p}{d\Omega} = \eta \frac{d\nu}{d\Omega} = \eta (46e^{-10,1\theta} + 3,4 \left(\frac{E_p}{7,1}\right)^n \sqrt{\frac{A_m}{63,5}} e^{-\beta\theta}) \left(\frac{\text{адрон}}{\text{ср}}\right), \quad (9)$$

Флюенс частиц находится как

$$\phi_j = \frac{1}{r^2} \frac{dY_j}{d\Omega}, \quad (10)$$

где  $r$  - расстояние от мишени до точки, в которой рассчитывается флюенс. Поглощенная тканями человека доза излучения по аналогии с (8) запишется следующим образом:

$$D_j = \frac{1}{r^2} h (d\nu/d\Omega)_{j, np} \eta_j + D_{pm} \sum_{i=1}^j \eta_i N_i. \quad (11)$$

Здесь  $h$  - коэффициент перехода от флюенса протонов и нейтронов к поглощенной дозе, для условий эксперимента  $h \approx 10^{-11}$  рад.нуклон<sup>-1</sup> м<sup>-2/14/</sup>,  $\eta_j$  - число неупругих взаимодействий первичных ядер-снарядов в мишени;  $D_{pm}$  - поглощенная тканями доза излучения от мишени, приходящаяся на одно неупругое взаимодействие протона, имеющего ту же энергию, что и первичное ядро-снаряд в расчете на один нуклон:

$$D_{pm} = \frac{1}{r^2} (3,1 \cdot 10^{-10} e^{-10,1\theta} + 2,25 \cdot 10^{-11} \left(\frac{E_p}{7,1}\right)^n \sqrt{\frac{A_m}{63,5}} e^{-\beta\theta}). \quad (12)$$

Угол  $\theta$  отсчитывается в радианах,  $r$  - в метрах, а  $E_a$  в формуле (2) принимается равной 20 МэВ.

Усредненный по многим измерениям коэффициент качества излучений приблизительно равен 4; при этом условии эквивалентная доза излучений будет

$$H_j = 4D_j. \quad (13)$$

Флюенс и доза излучения за защитой находятся умножением величин, определяемых формулами (10)÷(13), на  $e^{-d/\lambda(\theta, E_p)}$ , где  $d$  - толщина защиты на отрезке расстояния между мишенью и интересующей точкой. Зависимости  $\lambda(\theta, E_p)$  от угла  $\theta$  и энергии протонов или ядер-снарядов в расчете на один нуклон представлены на рис.4.

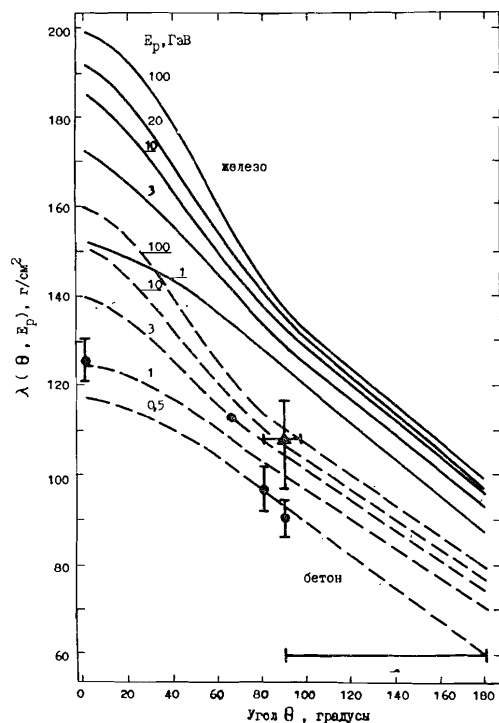


Рис.4. Зависимость длины ослабления адронов в железе и бетоне  $\lambda(\theta, E_p)$  от угла их вылета  $\theta$  из толстой мишени (поглотителя) для различных энергий протонов, бомбардирующих мишень:

●, ⊕ - данные эксперимента, } бетон;  
 $E_p = 0,5$  ГэВ,  
 — результаты оценки }  
 ⊕ - совокупность результатов экспериментов на ускорителях (грунт, бетон).

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные о дозиметрических параметрах поля излучения, представленные на рис.3, а также в табл.1 и 2, свидетельствуют о том, что согласие между результатами эксперимента и расчета находится в основном в пределах коэффициента 2. Это не распространяется на угловое распределение адронов (рис.3) при бомбардировке мишени протонами, т.к. именно для этого случая была найдена величина коэффициента (0,21) перед корнем в (2) из условия наилучшего согласия измеренных и рассчитанных данных. Можно ожидать еще лучшего согласия между результатами расчета и эксперимента по выходу и угловому распределению адронов, если учесть в расчете образование частиц фрагментами второго поколения, а также упругое и кулоновское рассеяние частиц, вылетающих из ядер в результате неупругих взаимодействий. Однако и описанный в [2,3,9] и уточненный в настоящей работе метод расчета параметров поля излучения дает возможность с хорошей достоверностью оценивать радиационную обстановку при взаимодействии релятивистских ядер с мишенями.

В заключение автор выражает благодарность Л.Г.Бескровной и А.Р.Крылову за полезные обсуждения результатов расчета, а Г.Я.Касканову и А.П.Череватенко за предоставление указанных в тексте результатов эксперимента.

В заключение автор выражает благодарность Л.Г.Бескровной и А.Р.Крылову за полезные обсуждения результатов расчета, а Г.Я.Касканову и А.П.Череватенко за предоставление указанных в тексте результатов эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Александров В.С. и др. ОИЯИ, Р9-83-613, Дубна, 1983.  
 Комочков М.М. ОИЯИ, Р16-82-432, Дубна, 1982.  
 Комочков М.М. ОИЯИ, Р16-83-190, Дубна, 1983.  
 Алейников В.Е., Тимошенко Г.Н. ОИЯИ, 16-83-359, Дубна, 1983.  
 Бамблевский В.П. ОИЯИ, 16-85-35, Дубна, 1985.  
 Aksinetov V.D. et al. JINR, E1-12713, Dubna, 1979.  
 Мартынов А.С. ОИЯИ, 1-83-105, Дубна, 1983.  
 Крылов А.Р. и др. ОИЯИ, 16-85-347, Дубна, 1985.  
 Комочков М.М. ОИЯИ, Р16-81-377, Дубна, 1981.  
 Ставинский В.С. ОИЯИ, 2-80-66, Дубна, 1980.  
 Olson D.L. et. al. Phys. Rev. 1983, C 28, p. 1602.  
 Kuznetsov A.A. JINR, E1-83-334, Dubna, 1983.  
 Madey R. et. al. In: Proc. of the 7th High Energy Heavy Ion Study (Ed. by R. Bock.), GSI, Darmstadt, October 8-12, 1984. Darmstadt, 1984, p. 397.  
 Алейников В.Е. и др. ОИЯИ, Р16-82-466, Дубна, 1982.

Рукопись поступила в издательский отдел  
 31 марта 1986 года.

Комочков М.М.

P16-86-186

Некоторые результаты исследования радиационной обстановки при взаимодействии релятивистских ядер с мишенью

Выполнено сравнение результатов эксперимента с результатами расчета дозиметрических параметров поля излучения, полученными с помощью феноменологической модели в случаях взаимодействия протонов, альфа-частиц и ядер углерода с энергией 3,65 ГэВ/нуклон с мишенью. Рассчитанные и измеренные выходы и угловые распределения адронов из мишени согласуются в пределах 25 процентов; доза излучения - в пределах коэффициента 2. Вклад взаимодействий фрагментов (включая нуклоны) ядра-снаряда углерода в выход адронов из медной мишени длиной 13 см и диаметром 10 см составляет около 50 процентов. Описанный метод расчета параметров поля излучения дает возможность с хорошей достоверностью оценивать радиационную обстановку как вблизи мишени, так и за защитой.

Работа выполнена в Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1986

Перевод О.С.Виноградовой

Komochkov M.M.

P16-86-186

Some Results on Radiation Environment Investigation from Target Bombardment by Relativistic Nuclei

The results of experiments and calculations by the phenomenological model in the cases of interaction protons, of alpha-particles and carbon nuclei at the 3.65 GeV/nucleon energy have been compared. Calculated and measured yield and angular distributions of hadron from the target agree at 25 per cent accuracy. Contribution of the fragment interactions (including nucleons) of a carbon nucleus-projectile into the hadron yield from the 13 cm length and 10 cm diameter copper target is as high as 50 per cent. The described calculation method of the radiation field parameters gives possibility to estimate with a good reliability the radiation environment both near the target and behind the shielding.

The investigation has been performed at the Department of Radiation Safety and Radiation Researches, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1986