



# Оперативный метод расчёта биологической защиты ускорителей тяжелых ионов низкой энергии

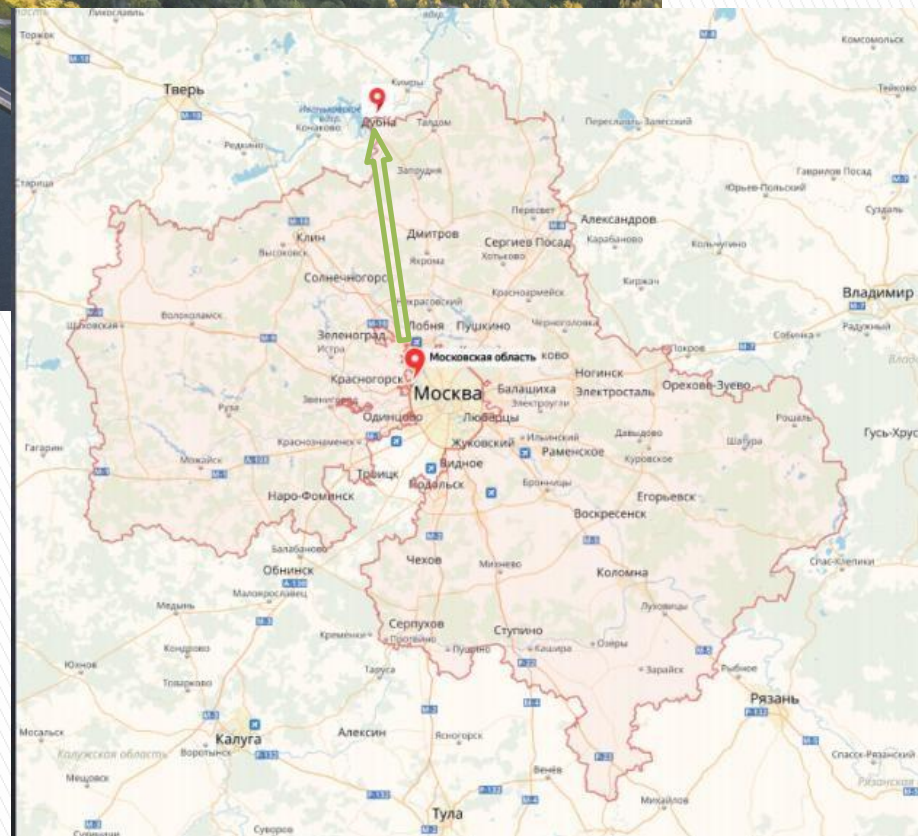
**Р.К. Кабытаева<sup>a,b,c</sup>**

*Ю.Г.Тетерев<sup>a</sup>, С.В.Митрофанов<sup>a</sup>, Е. Болатказыев<sup>a,c</sup>, А.Т. Исатов<sup>a,b,c</sup>, П.А.Комаров<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н. Флерова  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6*

*<sup>b</sup> Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева  
Казахстан, 010000, Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2*

*<sup>c</sup> РГП Институт ядерной физики МЭ, Казахстан, 050032, Алматы, ул. Ибрагимова 1*



<http://www.iinr.ru>



# План доклада

## **I Введение**

## **II Обоснование методики для оперативного расчета**

## **III Тестирование методики**

**Проверка методики расчета выхода нейтронов**

**Проверка расчета угловых распределений**

**Исследование общих закономерностей выходов нейтронов**

## **IV Заключение**

# Введение



## Параметры нового циклотрона ДЦ-140 ЛЯР ОИЯИ

- энергии ионов **2.1** и **4.8** MeV/u;
- Ионы элементов от O до Bi или U;
- Интенсивности:  
**2.1** MeV/u (до Xe  $10^{12}$  с<sup>-1</sup>, Bi :  $1 \times 10^{11}$  с<sup>-1</sup>, U >  $10^9$  )
- 4.8** MeV/u (до Xe >  $10^{11}$  с<sup>-1</sup>, Bi :  $1 \times 10^{10}$  с<sup>-1</sup>)

## Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н.Флерова

Побудительным мотивом для разработки методики оперативного предварительного расчета послужило планируемое [1] в ЛЯР ОИЯИ размещение нового ускорителя тяжелых ионов, предназначенного для прикладных задач, в здании, в котором раньше размещался циклотрон У-200.

[1] N. Kazarinov *et al.* DESIGN AND SIMULATION OF THE AXIAL INJECTION BEAM LINE OF DC140 CYCLOTRON OF FLNR JINR // Proc. of Conf. «International Particle Accelerator Conference». 2021. P. 1852-1854

[2]. F.Clavier and C.S.Zaidins *Nuclear Instruments and Methods*, 217 (1983) 489-494.

[3]. Z.Y. Guo, P.T. Allen, G. Doucas and H.R. McK. Hyder. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B29 (1987) 500-507 North-Holland. Amsterdam

[4] O.B. Tarasov , D. Bazin *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 266 (2008) 4657–4664

[5] J.F. Ziegler *et al.*, *The Stopping and Range of Ions in Solids*, Pergamon Press, New York, 1985

LIZE<sup>++</sup>, SRIM

# Обоснование методики для оперативного расчета

Выход нейтронов на 1 потерянный ион  $Y$  в зависимости от энергии иона в лабораторной системе координат в единицах MeV/u может быть вычислен с помощью аналитической формулы

$$Y = \frac{N_a 10^{-3} A_b}{A_t} \underbrace{\sigma_0 \eta \int [1 + \operatorname{erf}(\frac{E_{lab} - E_0}{s})]}_{\text{сечение образования нейтронов}} (a + b E_{lab}) dE_{lab} \quad (1)$$

сечение образования нейтронов  $\sigma(E_{lab.})$  в зависимости от энергии иона в лабораторной системе координат  $E_{lab.}$  (MeV/u)

Для иллюстрации на рис. 1 приведен пример аппроксимации этой функцией сечений образования нейтронов при бомбардировке мишени из алюминия ионами углерода и ионами железа мишени из железа, рассчитанных с помощью программы LIZE<sup>++</sup>.

В результате анализа многих сочетаний ионов пучка и мишеней была эмпирически подобрана формула для вычисления значений  $E_0$  и  $s$ -параметров нормального распределения в лабораторной системе координат в единицах MeV/u

$$E_0 = 3.3 + \frac{0.42(E_{cul} - Q)}{\mu} \quad s = 1.13 + \frac{0.11(E_{cul} - Q)}{\mu}$$

Здесь  $Q$  – энергия реакции:  $Q = E_{св1} + E_{св2} - E_{св3}$  (энергии связи ядер пучка, мишени и компаунд ядра, соответственно, а  $\mu = \frac{A_b \cdot A_t}{A_b + A_t}$  – приведенная масса,  $E_{cul}$  – Кулоновский потенциал расталкивания

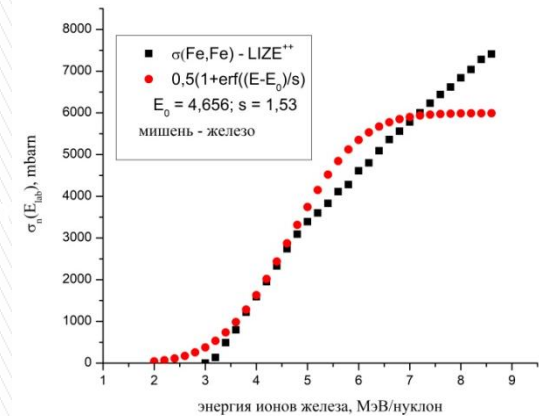
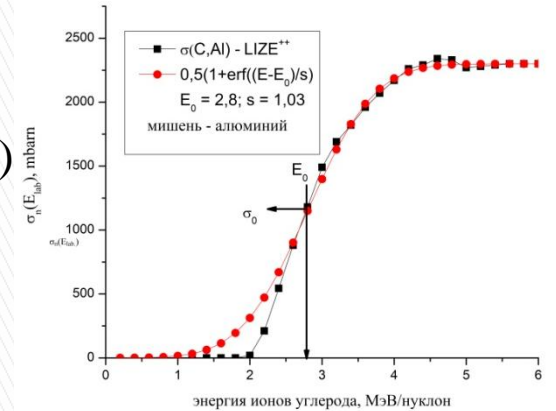


Рис.1.

Выход нейтронов на 1 потерянный ион  $Y$  в зависимости от энергии иона в лабораторной системе координат в единицах MeV/нуклон может быть вычислен с помощью аналитической формулы

$$Y = \frac{N_a 10^{-3} A_b}{A_t} \sigma_0 \eta \int [1 + \operatorname{erf} \left( \frac{E_{lab} - E_0}{s} \right)] (a + b E_{lab}) dE_{lab}$$

В диапазоне энергий менее 6 MeV/u дифференциальные потери энергии являются линейными относительно энергии пучка и может быть записана в виде

Анализируя результаты расчета дифференциальных потерь энергии с помощью программ SRIM и LIZE<sup>++</sup> для различных комбинаций пучка и мишени, были подобраны значения для коэффициентов  $a$  и  $b$ , которые зависят от  $Z_b$  бомбардирующего иона и  $A_t$  – атомного веса материала бомбардируемого вещества:

$$a = \frac{0.54}{Z_b} + \frac{2.1 \cdot 10^{-3} \cdot A_t}{Z_b^{0.7} - 2.55} \quad b = \frac{3.1}{Z_b^{2.2}} + \frac{6.8 \cdot A_t}{Z_b^{4.4} - 2 \cdot 10^4}$$

Результаты расчета отличаются от результатов, полученных с помощью программы SRIM не более, чем на 10%!

# Проверка методики расчета выхода нейтронов

Для расчета выходов нейтронов на основе аналитической формулы (1) была создана специальная программа в виде калькулятора (*П.А.Комаров<sup>а</sup>*). Из таблицы энергий связи [6] в программу заведены данные для наиболее востребованных сочетаний ядер пучка и мишени, на основании которых рассчитываются  $Q$  – энергии реакции. По мере необходимости данные могут быть пополнены.

Пример результатов сравнения вычислений выходов нейтронов для случаев наиболее вероятно используемых пучков приведены на Рис.2. Видно, что в подавляющем большинстве случаев результаты вычислений различаются не более чем на  $\pm 50\%$ .

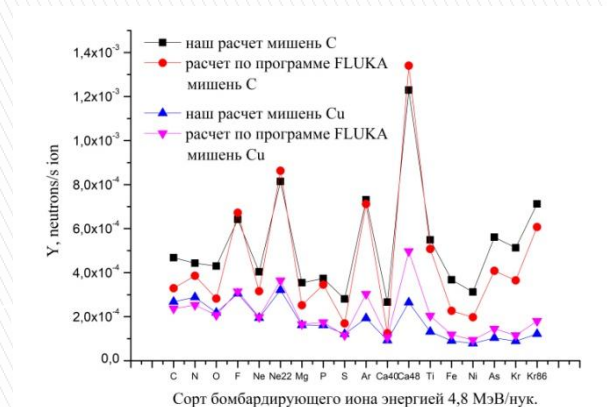
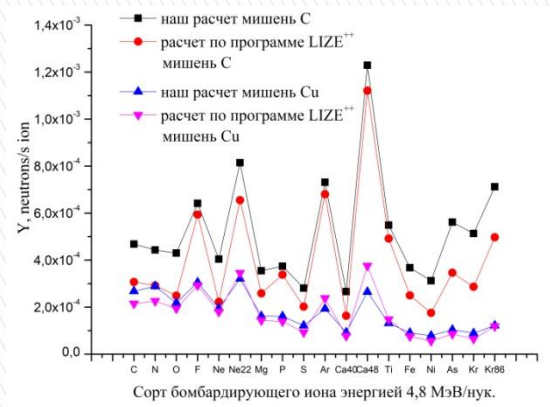


Рис.2а. Сравнения результатов вычислений выходов нейтронов  $Y$  с помощью формулы (8) с результатами программ LIZE++ и FLUKA для случаев наиболее вероятно

используемых пучков

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н. Флерова, Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

[6] <http://amdc.in2p3.fr/web/masstab.html>



# Интерфейс программы

Программа NY&DRCalc.exe позволяет проводить расчеты выхода и углового распределения нейтронов в реакциях тяжелых ионов с энергией от 1 до 6 МэВ/нуклон. Программа может использоваться для оперативной оценки необходимой биологической защиты строящихся и реконструируемых ускорителей тяжелых ионов (*П.А.Комаров<sup>а</sup>*)..

The screenshot shows the NY&DRCalc software interface. It is divided into several sections:

- Beam Parameters:**
  - Ion energy: 4.8 MeV/nuc
  - I: 0.1 uA
  - Name / Z: Kr
  - A: 82
  - q: 28
- Target Parameters:**
  - Name / Z: 13
  - A: 27
- Calculations:**
  - Projectile: 82 Kr (28+)
  - Target: 27 Al
  - Compound: 109 In
  - Q react. MeV: -11.2991
  - Ion Energy total: 393.600 MeV
  - Ion Intensity: 2.229E+010 ion/s
  - Ion Beam Power: 1.406 Wt
  - Neutron Yield: 2.255E-004 Neutron/ion
- Geometry:**
  - R: [ ] cm
  - θ: [ ] deg
- Results:**
  - Neutron Flux den.: [ ] cm<sup>-2</sup>\*s
  - Dose Rate: [ ] uSv/h
- Controls:**
  - Buttons: Calculate, Save, Clear
  - Angle step for saving: [ ]

Рис.2б. Интерфейс программы

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н. Флерова, Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6



# Проверка расчета угловых распределений

В расчетах моделировалась ситуация, описываемая для случаев экспериментального измерения углового распределения. Принималось, что в этих экспериментах проводятся измерения потоков с помощью детекторов тепловых нейтронов с шаровыми замедлителями диаметром  $d=201$  мм. Центр каждого детектора отстоит на расстоянии  $R = 1$  м от мишени, бомбардируемой пучком ионов. Детекторы располагаются под углами  $\theta_i = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 120^\circ$  и  $150^\circ$  к направлению бомбардирующего пучка. На расстоянии 1 м от мишени угловой размер каждого детектора для летящих из нее нейтронов  $\Delta\theta = 12^\circ$ .

Коэффициент углового распределения нейтронов от направления пучка  $F(\theta)$  в работе [2] предложено описывать с помощью формулы:

$$F(\theta) = \left(4\pi \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) (\gamma + \sin^2 \frac{\theta}{2})\right)^{-1} \quad (2)$$

$$\gamma = 7 \exp \left(-\frac{2.5\mu\sqrt{2E_{beam}}}{A_t}\right) \quad (3)$$

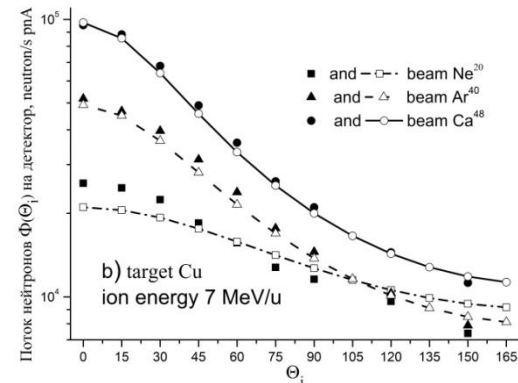
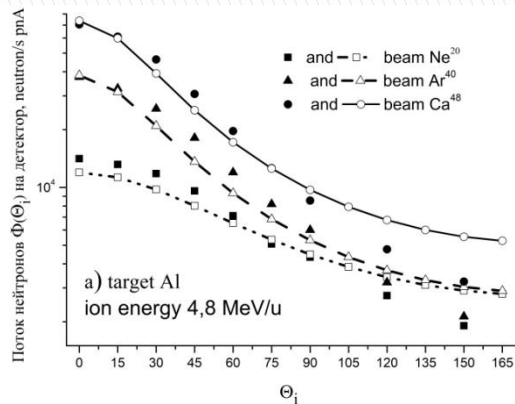
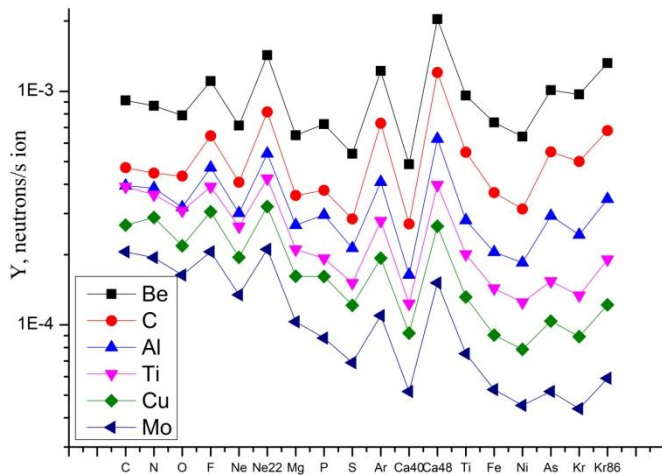


Рис.3. Сравнение результатов расчета с помощью формул (2,3) (открытые символы) и программы FLUKA (закрытые символы) потока нейтронов, падающих на детектор, помещенный на расстоянии 1 м под углом  $\theta_i$ , при бомбардировке ионами  $Ne^{20}$ ,  $Ar^{40}$  и  $Ca^{48}$  толстой мишени а) из Al и б) из Cu

[2] F.Clavier and C.S.Zaidins Nuclear Instruments and Methods, 217 (1983) 489-494.

# Исследование общих закономерностей выходов нейтронов



Сорт бомбардирующего иона энергией  $4,8 \text{ MeV/u}$ .

Рис.4. Выходы нейтронов  $Y$  при бомбардировке толстых мишеней из Be, C, Al, Ti, Cu и Mo различными пучками энергией  $4,8 \text{ MeV/u}$

Наибольший выход нейтронов при энергии пучков  $4,8 \text{ MeV/u}$  наблюдается для легких мишеней. Выход снижается по мере увеличения атомного номера мишени. При бомбардировке мишеней пучками ядер с избытком нейтронов выход увеличен. В целом выход нейтронов снижается с одновременным увеличением атомных весов ядер пучка и мишени

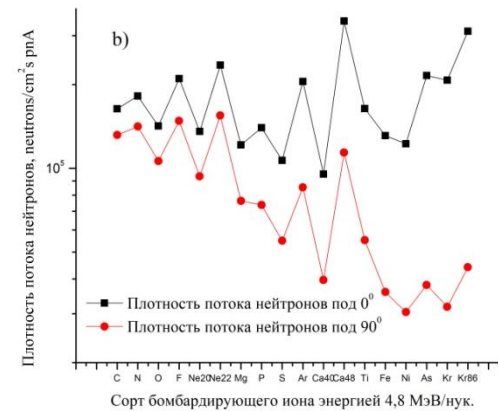
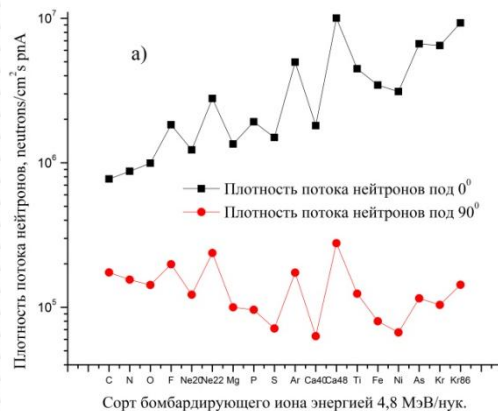


Рис.5. Плотности потока нейтронов на расстоянии  $1 \text{ м}$  под углами  $0^\circ$  и  $90^\circ$  из толстых а) углеродной и б) медной мишеней, бомбардируемых пучком ионов энергией  $4,8 \text{ MeV/u}$

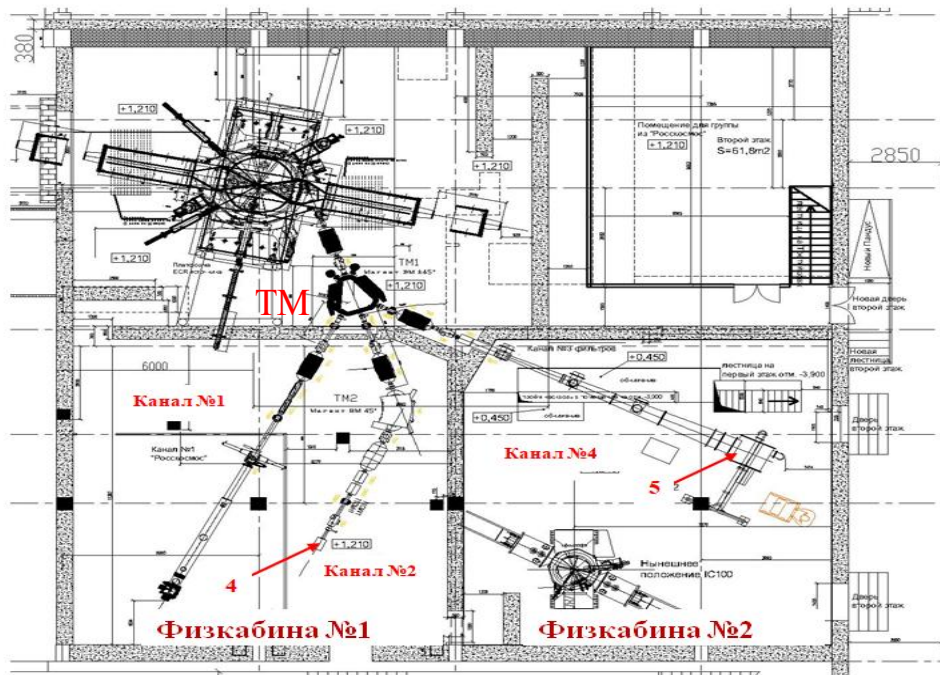


Рис.6. Схема расположения циклотрона ДЦ-140 и специализированных каналов  
 Где: 1- канал облучения ЭКБ; 2- канал для исследования по физике твердого тела и модификации поверхности материалов; 3- резервный канал; 4- канал для производства трековых мембран

Циклотрон ДЦ-140 позволит получать пучки ускоренных ионов от О до Вi с энергиями 2.1 и 4.8 МэВ/нуклон для исследования по физике твердого тела и модификации поверхности материалов, производства трековых мембран и тестирования электронной компонентной базы на одиночные радиационные эффекты.

В состав комплекса прикладных исследований на базе ДЦ140 входят (рис.6):

- циклотрон ДЦ140
- общий начальный участок,
- коммутирующий магнит (ТМ),
- три канала облучения (1,2,4), укомплектованные соответствующим оборудованием и установками для облучения образцов материалов, полимерных пленок и ЭКБ.

Один канал (3) предлагается оставить как резерв для дальнейшего развития.

## Цель:

Целью данной работы является проведение первичных расчетов радиационной обстановки ускорительного комплекса ДЦ-140

[7] Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99. М., Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической

сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999.

[8] Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ - 99/2010). Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Москва: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, – 11 авг. 2010 г. – с. 17.



# Оценка радиационной обстановки ускорительного комплекса ДЦ-140(канал №4)

Одним из основных направлений исследований канала №4 является разработка методов изготовления трековых мембран (ТМ) и их применение в различных областях.

Пучки ионов для производства трековых мембран:

Энергия ионов **2,1** МэВ/нуклон;

Ионы элементов от Ne до Bi;

Интенсивность от Ne до Xe  $10^{12}$  с<sup>-1</sup>.

Тип иона	$^{40}\text{Ar}^{+8}$
Интенсивность ускоряемого иона	$10^{12}$ с <sup>-1</sup>
Энергия иона	2.1 МэВ/нуклон
Суммарная плотность материала стен (бетон)	2.57 г/см <sup>3</sup>
Искомый предел по эквивалентной дозе для персонала группы Б	1.2 мкЗв/час

Для канала №4 циклотрона ДЦ-140 будет использоваться специализированная установка с циклотрона ИЦ-100 (рис.7).



Рис.7. Установка облучения полимерных Материалов на циклотроне ИЦ-100

# Оценка радиационной обстановки ускорительного комплекса ДЦ-140(канал №4)

## Расчет защиты от прямого излучения

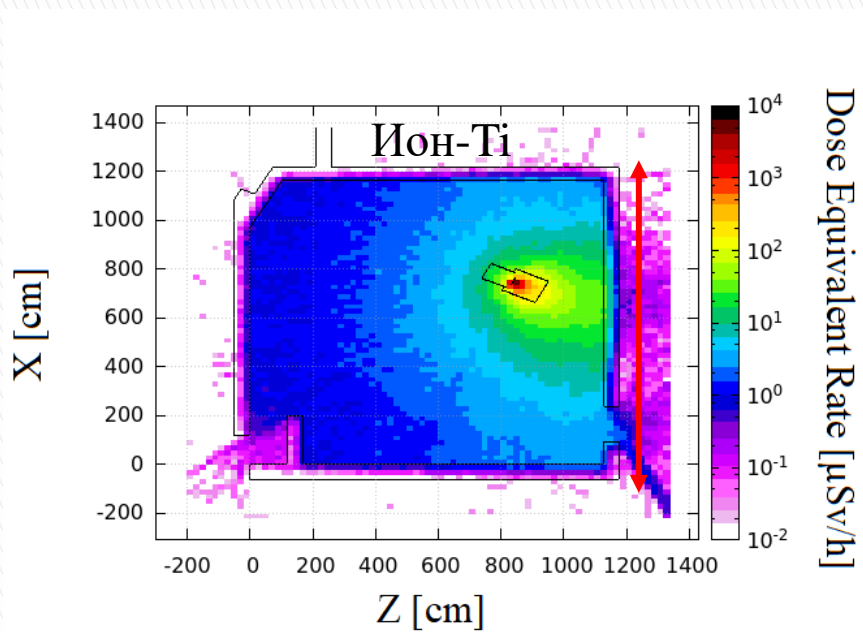


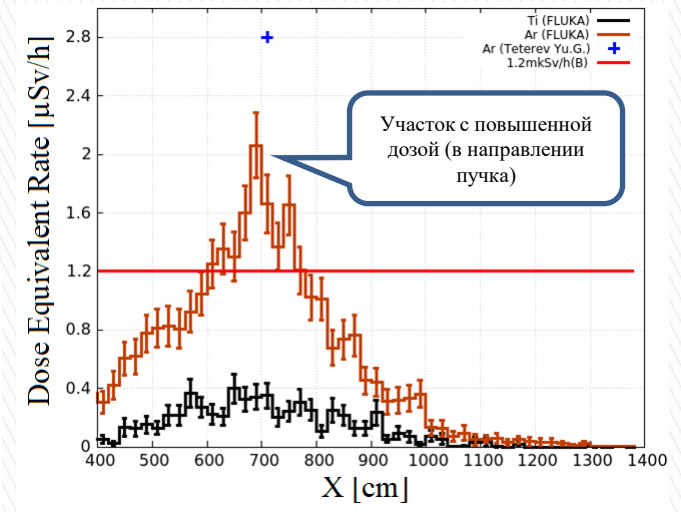
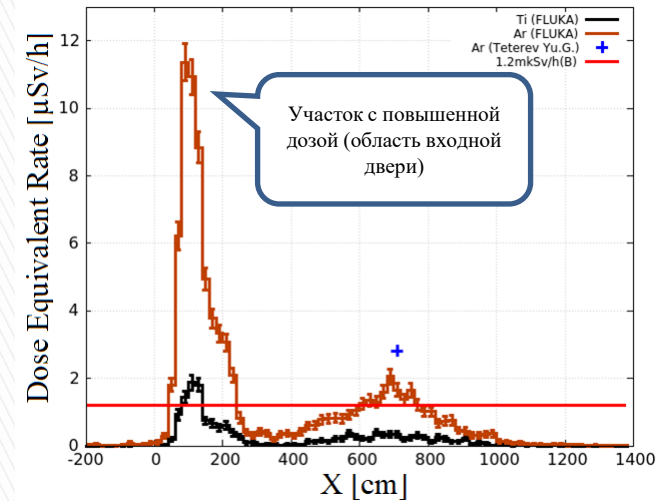
Рис.8. Мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения за защитной стеной 50см (в направлении пучка)

### Модель взаимодействия тяжелых ионов в программе FLUKA

$$E < \sim 0.1 \text{ GeV/n}$$

Boltzmann Master Equation (BME) theory

BME (original code by E.Gadioli *et al.*,  
FLUKA-implementation by F.Cerutti *et al.*)



[8] Battistoni *et al.*, Brazilian Journal of Physics, vol.34 no.3A, September, 2004 “Heavy Ion Interactions from Coulomb barrier to Few GeV/n: Boltzman Master Equation Theory and FLUKA Code Performances”

# Оценка радиационной обстановки ускорительного комплекса ДЦ-140(канал №4) *Оценка толщины защиты для перекрытия*

Ион-Ti

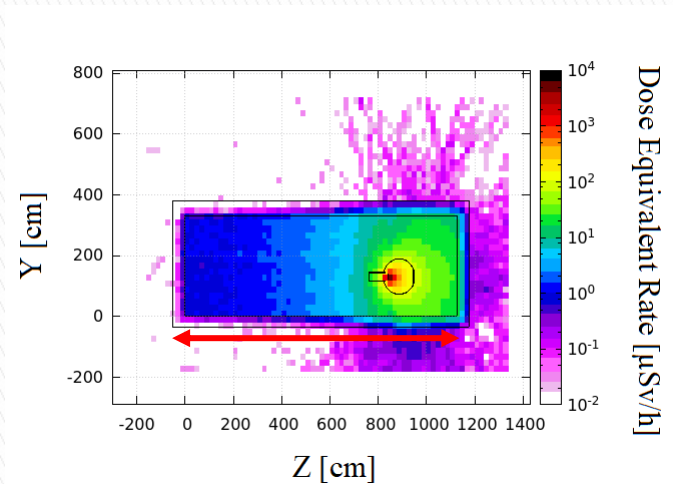


Рис.9. Мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения

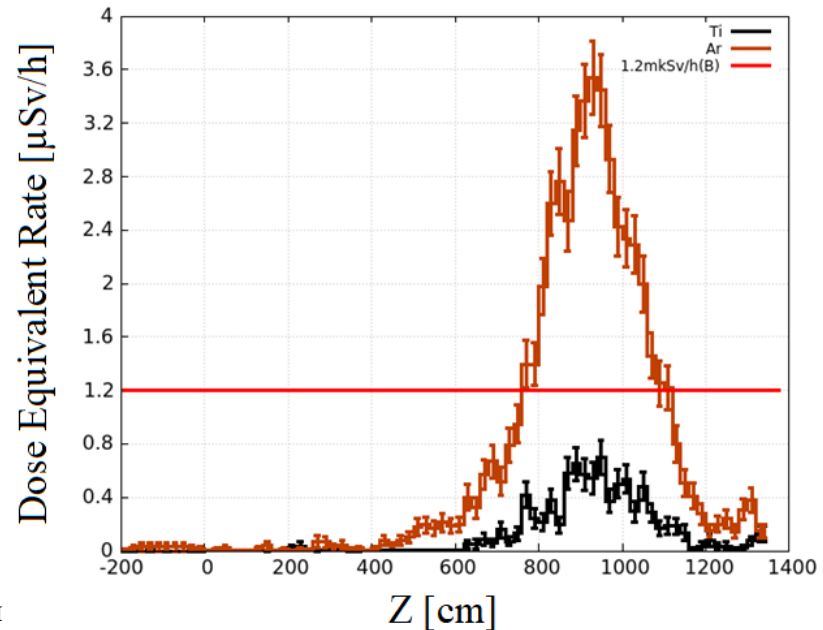


Рис.10. Мощность эквивалентной дозы нейтронного излучения сразу под перекрытием

Высота стен:330см

Толщина верхнего перекрытия (потолок):50см

Толщина нижнего перекрытия (пол): 35см

Заключение:

- 1) Значение мощности дозы над защитным перекрытием составило  $\sim 0.2$  мкЗв/час. Следовательно, толщина защиты 50 см обеспечит требуемый уровень излучения меньше 12 мкЗв/час (персонал А) на верхнем этаже.
- 2) Значение мощности дозы сразу под защитным перекрытием составило  $\sim 0.7$  мкЗв/час. Следовательно, толщина защиты 35 см обеспечит требуемый уровень излучения меньше 12 мкЗв/час (персонал А).



# Заключение

✓ Представлены простые аналитические формулы для оперативной оценки выхода и углового распределения нейтронов, необходимые для расчета биологической защиты ускорителей тяжелых ионов энергией от 1 до 6 МэВ/нуклон;

✓ Результаты расчетов сравнивались с результатами расчетов с помощью программ LIZE<sup>++</sup> и FLUKA и с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

В результате проведенных сравнений можно утверждать, что предлагаемая методика расчета выхода и углового распределения нейтронов из толстых мишеней может быть использована для оперативной оценки необходимой биологической защиты строящихся и реконструируемых ускорителей тяжелых ионов энергией от 1 до 6 MeV/u. Отклонение результатов этих расчетов от более точных не превышает коэффициента два, что сравнимо с результатами отклонений при расчете биологических защит, связанных с некоторым разнообразием спектров рождающихся нейтронов и отклонениями в защитных свойствах используемых материалов или их толщины



# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

## Оперативный метод расчёта биологической защиты ускорителей тяжёлых ионов низкой энергии

**Р.К. Кабытаева** <sup>a,b,c</sup>

*Ю.Г.Тетерев<sup>a</sup>, С.В.Митрофанов<sup>a</sup>, Е. Болатказыев<sup>a,c</sup>, А.Т. Исатов<sup>a,b,c</sup>, П.А.Комаров<sup>a</sup>*

*<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н. Флерова  
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6*

*<sup>b</sup> Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева  
Казахстан, 010000, Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2*

*<sup>c</sup> РГП Институт ядерной физики МЭ, Казахстан, 050032, Алматы, ул. Ибрагимова 1*