



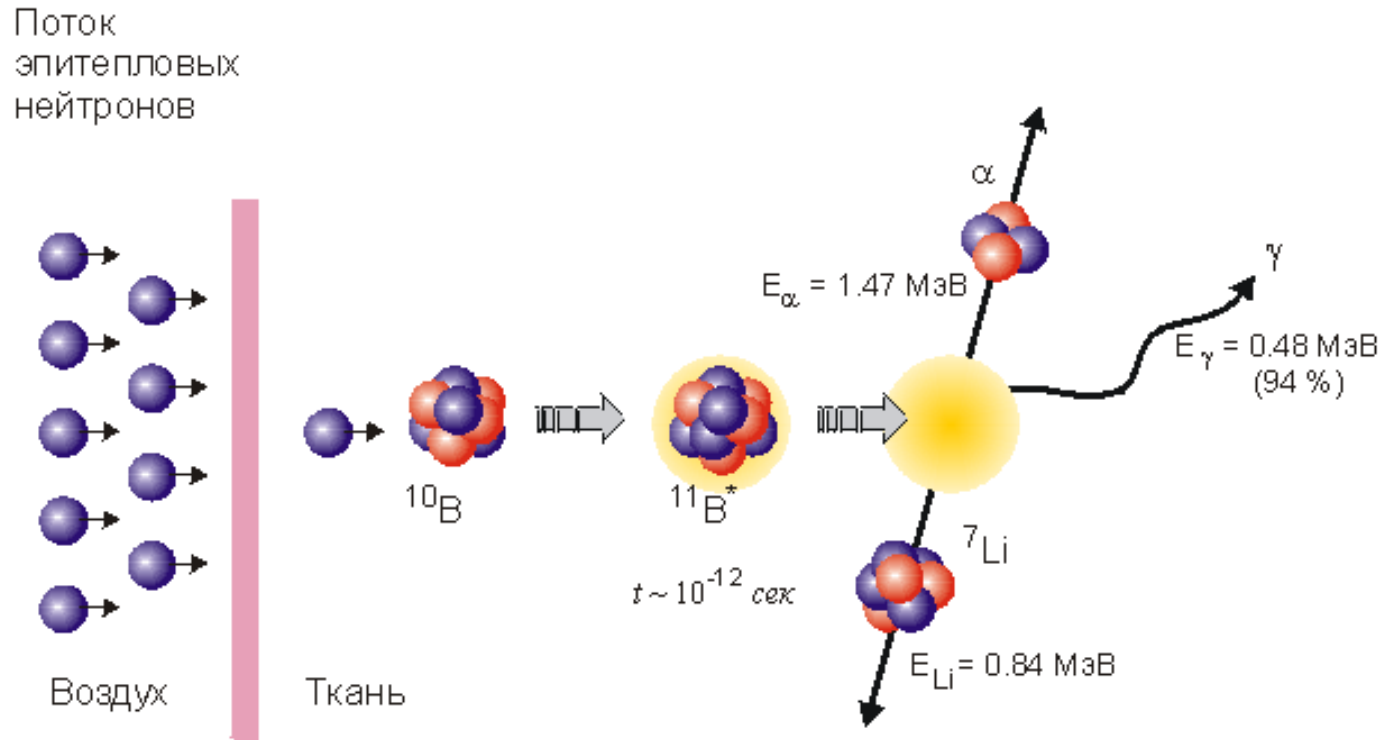
# Институт Ядерной Физики им. Г.И.Будкера

# **ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ДОЗИМЕТРОВ НА ОСНОВЕ LiF ДЛЯ ДОЗИМЕТРИИ В ПОЛЕ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ**

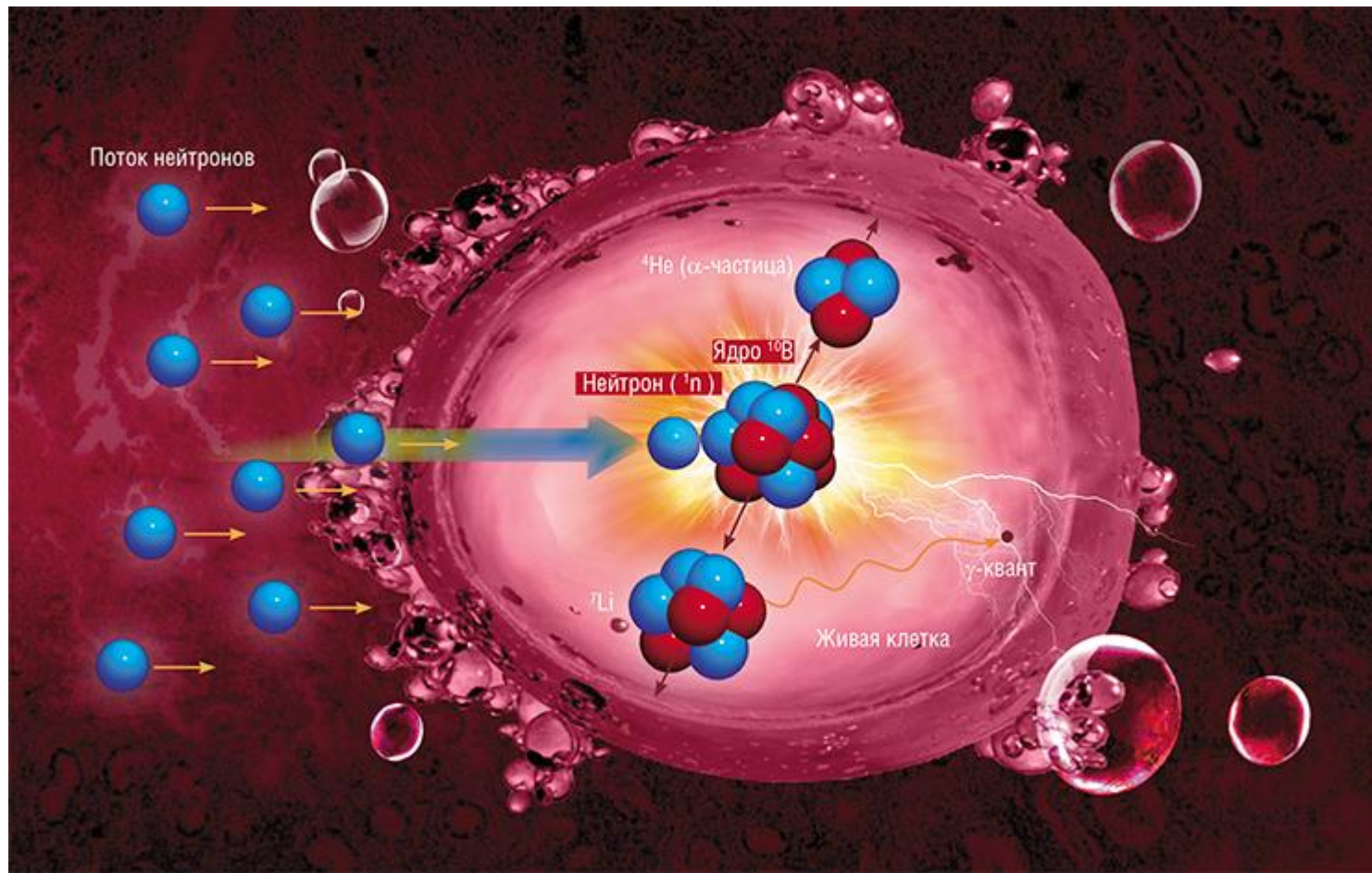
Петриченков М.В., Мельник С.И., Репков А.В., Чудаев В.Я., Шамакина Н.С.,  
Экста В.В., Институт Ядерной Физики им. Г.И. Будкера СО РАН

ППСР-2017, Москва

# Бор-нейтронозахватная терапия

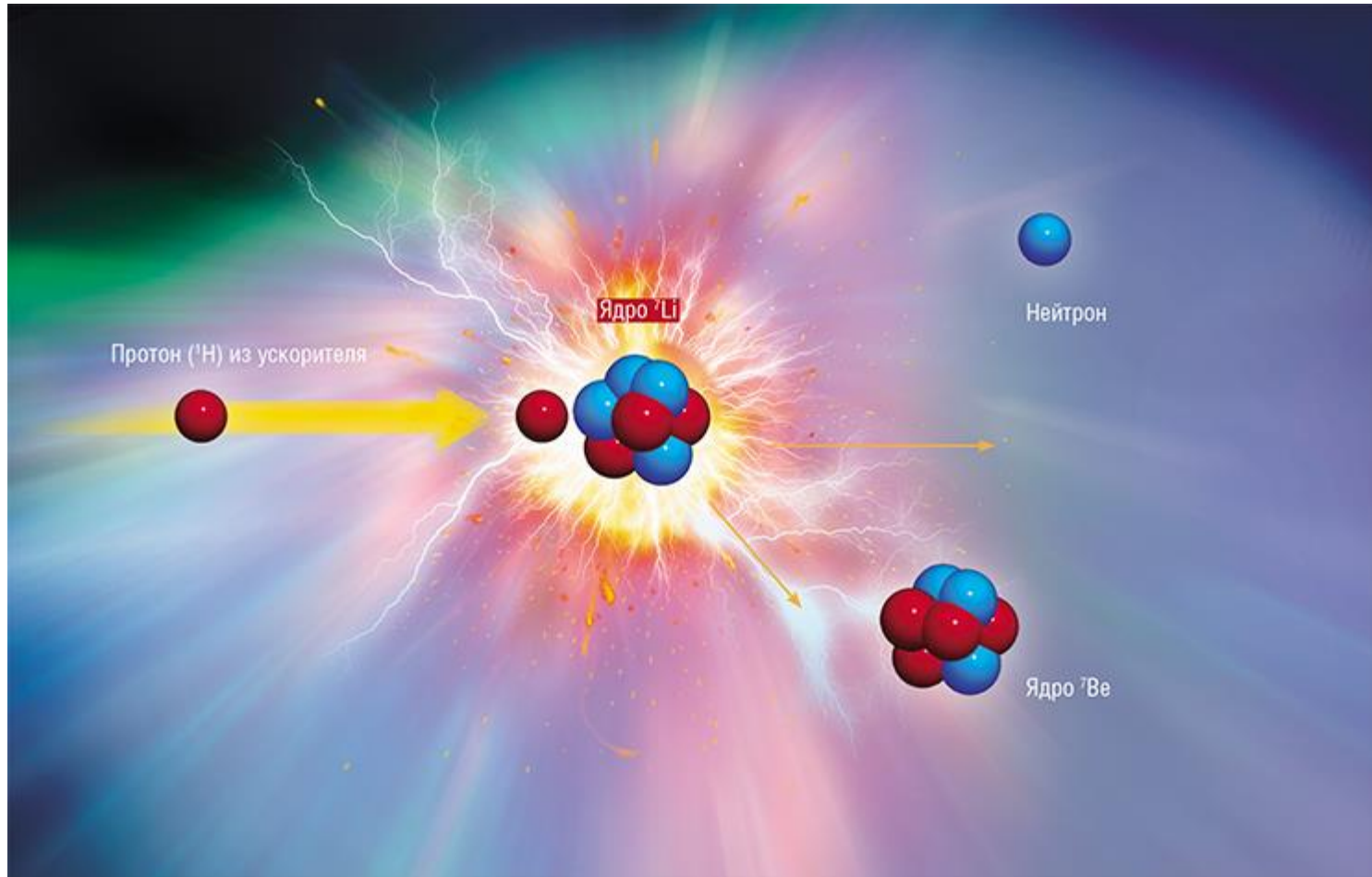


**Концепция появилась в 1936 г.** Борнейтронзахватная терапия позволяет осуществить избирательное поражение раковой опухоли. Вклад «фоновое» облучения протонами отдачи и  $\gamma$ -квантами (реакции  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$  и  $^1\text{H}(n,\gamma)^2\text{H}$ ) уменьшается за счёт более высокой концентрации  $^{10}\text{B}$  в раковых клетках по сравнению со здоровыми.



Получены препараты, которые создают концентрацию изотопа  $^{10}\text{B}$  в опухолевой ткани ~ в 4 раза больше, чем в здоровой ткани. Целесообразность развития технологии нейтронозахватной терапии обусловлена тем, что она ориентирована на лечение таких видов злокачественных опухолей, которые практически не поддаются никаким другим методам: глиобластомы мозга и метастазы меланомы.

# ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ



**Ускорительный источник предпочтительнее реактора по массогабаритам, стоимости и безопасности.**

Поток нейтронов генерируется при сбросе протонного пучка на тонкую литиевую мишень в результате реакции  ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$ .

## Ускоритель-тандем с вакуумной изоляцией для БНЗТ



### Параметры ускорителя:

Энергия протонов до 2.3 МэВ

Ток пучка 5-6 мА (проектно 10 мА), на сеанс: ~ 10 мА\*ч.

Диаметр  $L_i$  мишени 10 см, толщина 100 мкм.

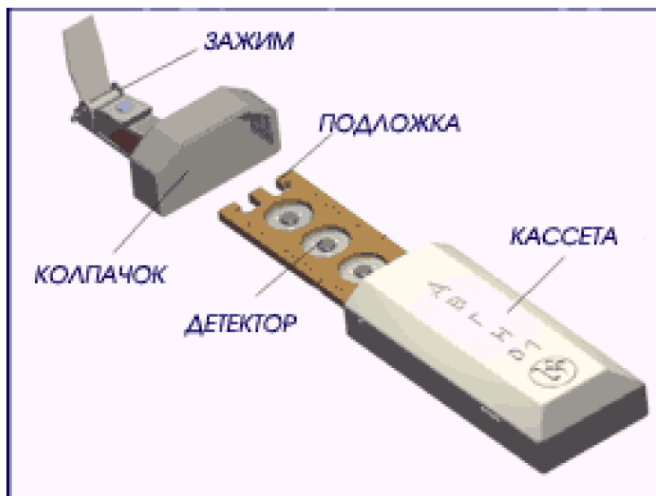
Выход нейтронов при 2.3 МэВ и 10 мА ~  $6E+12 \text{ с}^{-1}$

# Задачи

1. Индивидуальная дозиметрия персонала и радиационный контроль на установке БНЗТ
2. Контроль дозы, получаемой объектом облучения (желательно несколькими способами).

# ИМЕЮЩИЕСЯ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

## Дозиметр ДВГН-01



В альбедном дозиметре ДВГН-01 применяются два детектора ДТГ-4-6 ( ${}^6\text{LiF-Mg,Ti}$ ) и два детектора ДТГ-4-7 ( ${}^7\text{LiF-Mg,Ti}$ ), закрепленные на подложке, которая помещена в кассету. Кассета обеспечивает измерение дозы на глубине  $1,0 \text{ г/см}^2$ .

В крышке кассеты располагаются полиэтиленовый замедлитель быстрых и промежуточных нейтронов, борный поглотитель падающих тепловых нейтронов и медный фильтр, уменьшающий энергетическую зависимость при измерении фотонного излучения. Дозиметр размещается на теле человека или на фантоме в контролируемой точке.

## Основные параметры и характеристики

Порог регистрации, мЗв, не более	<b>0,05</b>
Линейность в диапазоне доз 0,05 мЗв - 10 Зв, %, не более	<b>10</b>
Воспроизводимость для дозы 10 мЗв, %, не более	<b>7,5</b>
Энергетическая характеристика (фотоны): после облучения фотонами с энергией от 15 кэВ до 10 МэВ полученное значение дозы должно отличаться от условно истинного значения, %, не более :	<b>15</b>
Энергетическая характеристика (нейтроны): после облучения нейтронами с различными энергетическими спектрами полученное значение дозы должно отличаться от условно истинного значения, %, не более	<b>50</b>



О применении термолюминесцентных дозиметров для индивидуального мониторинга и мониторинга среды.

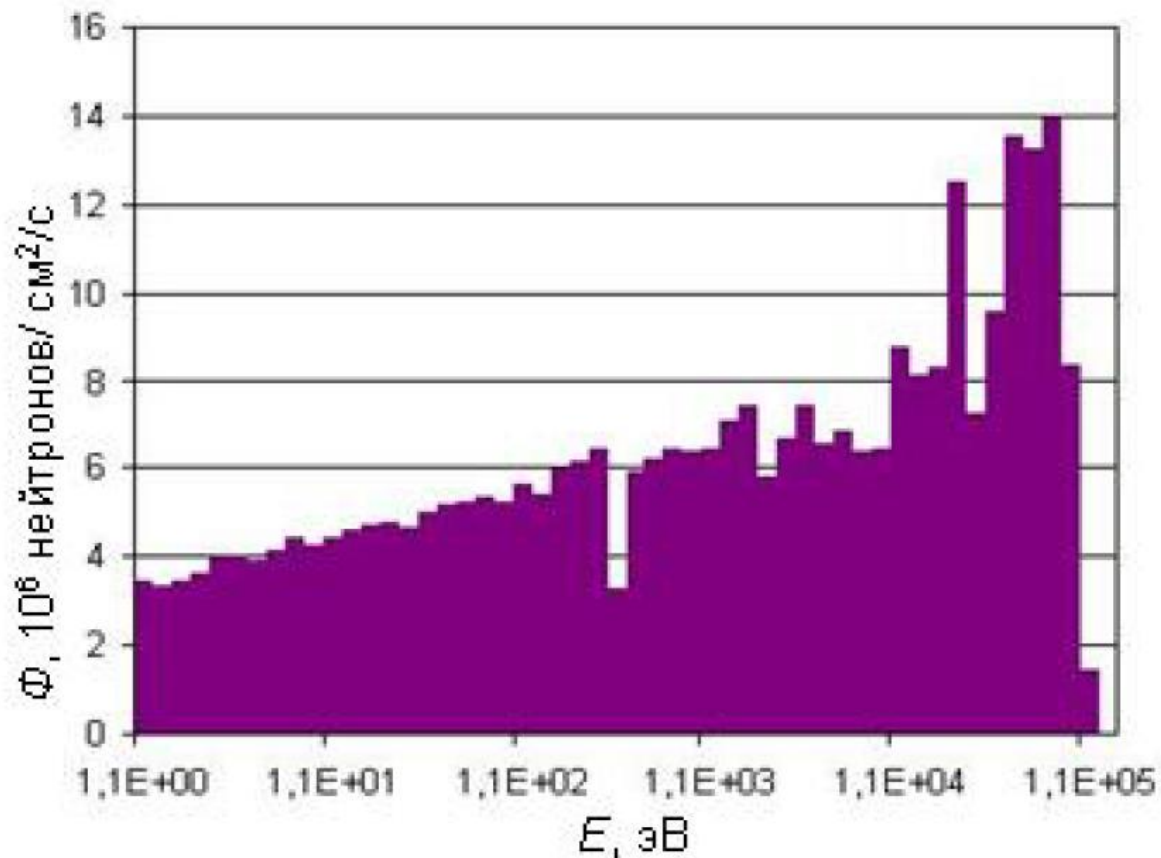
«Handbook of Accelerator Physics and Engineering» A.W.Chao, M.Tigner

Thermoluminescence dosimeters Thermoluminescence dosimeters in the form of  ${}^6\text{Li}$ - ${}^7\text{Li}$  pairs have been used. Two major disadvantages of this technique are its low sensitivity (it is difficult to measure dose-equivalent rates below 100-200  $\mu\text{Sv/y}$ ) and that inadvertent exposure to thermal neutrons must be strictly avoided.

НРБ-99

Энергия нейтронов, МэВ	Эффективная доза на единичный флюенс, $10^{-12}$ Зв·см <sup>2</sup>
	*ИЗО
тепловые нейтроны	3,30
1,0-7	4,13
1,0-6	5,63
1,0-5	6,44
1,0-4	6,45
1,0-3	6,04
1,0-2	7,70
2,0-2	1,02+1
5,0-2	1,73+1
1,0-1	2,72+1
2,0-1	4,24+1
5,0-1	7,50+1
1,0	1,16+2
1,2	1,30+2
2,0	1,78+2
3,0	2,20+2
4,0	2,50+2
5,0	2,72+2
6,0	2,82+2
7,0	2,90+2
8,0	2,97+2
10	3,09+2
14	3,33+2
20	3,43+2

\* ИЗО - изотропное (4π) поле излучения



Расчетный спектр нейтронов из Li мишени для энергии протонов 1.915 МэВ, токе 10 мА.

Средняя энергия «идеального» нейтронного спектра для БНЗТ 10-13 кэВ, что достигается при энергии протонов 2.3 МэВ, токе пучка 10 мА использованием системы формирования пучка.

# Проблемы

- Терапевтические дозы от нейтронов  $\sim 1-10$  Зв (без учета бора), а ожидаемый отклик «нейтронного» ТЛД на 1-1.5 порядка больше
- Отклик дозиметра, расположенного непосредственно под мишенью может достигать 100-200 Зв. Считыватель должен справляться с подобными величинами.
- Вопросы калибровки на дозы больше 10-20 Зв.
- Вопрос сенсбилизации («эффект памяти больших доз»).

# Решения

- Коррекция/калибровка ТЛД с помощью дозиметра эффективной дозы (ДЭД).
- Использование подходящего считывателя, его модификация.
- Приобретение нейтронного источника.
- Отжиг при высоких температурах.

## МЕТОДИКА КАЛИБРОВКИ

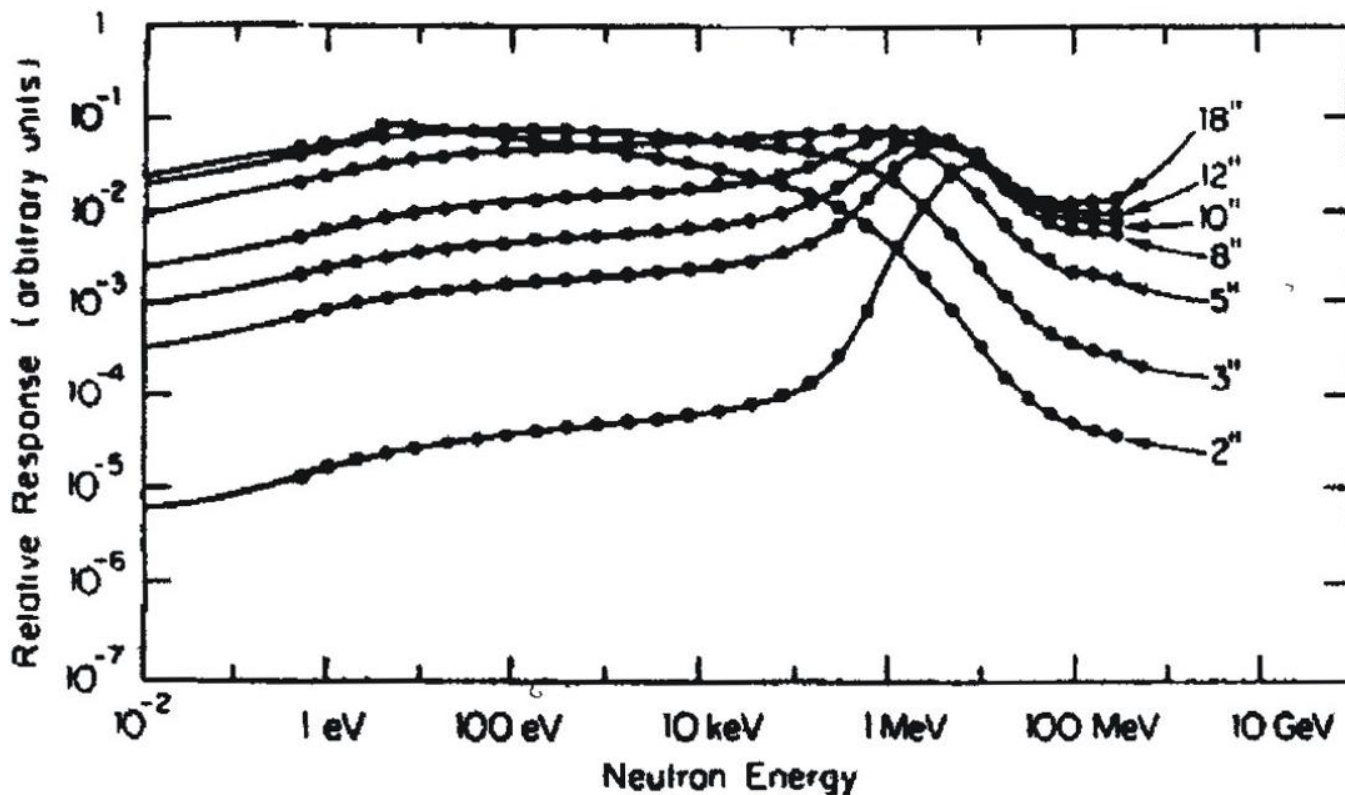


Figure 2: Response of Bonner sphere detector vs neutron energy [3, 4].

**В Протвино ранее был разработан дозиметр эффективной дозы (ДЭД) на основе шарового полиэтиленового фантома диаметром 10", который используется с дозиметрами ДВГН-01 (Ангарск), для работы в условиях спектров нейтронов отличных от калибровочного (Pu-Be источник)**

[1] А.В. Санников и др., *Дозиметр эффективной дозы смешанного излучения*. – Препринт ИФВЭ 2008-1, Протвино, 2008

## Аналог ДЭД в ИЯФ СО РАН



«Овальные» полиэтиленовые замедлители от блоков детектирования системы радиационного мониторингования. Диаметр этих замедлителей 29 см, высота 35 см. На поверхности фантома-замедлителя размещались 5 ДВГН-01; «голый» слайд ДВГН-01 размещался в его центре.

В диапазоне энергии нейтронов от тепловой до 0,5 МэВ\* энергетическая зависимость чувствительности (ЭЗЧ) слайда ДВГН-01 в центре фантома диаметром 29см (11,4") будет примерно в двойку меньше, чем с фантомом диаметром 10". При бóльших энергиях разница будет существенно меньшей. Благодаря этому кривая ЭЗЧ слайда в нашем случае будет ближе по форме к кривой зависимости  $E_{iso}(E)$  (см. [1]), и, не претендуя на высокую точность, мы можем использовать нашу сборку в качестве «условно правильного» дозиметрического средства для определения поправочных коэффициентов для ДВГН-01 непосредственно на рабочих местах (за защитой) и в первых экспериментах непосредственно под нейтроногенерирующей мишенью в ускорительном источнике.



## Размещение аналога ДЭД в 1-м эксперименте



### Параметры пучка:

энергия протонов	2 МэВ
ток пучка	1.35 мА
время экспозиции	7 минут.

# Градуировка по Pu-Be источнику

**Таблица 1.** Результаты калибровки фантома диаметром 29 см со слайдом ДВГН-01 в его центре по Pu-Be источнику нейтронов ( $q = 4,5 \cdot 10^6$  н/с,  $R = 67$  см ).

№ фантома	Показание, «МКЗв/ч»,		Показание, «МКЗв/ч», от прямых нейтронов Pu-Be источника $\dot{\Pi}_{\text{Pu-Be}} = \dot{\Pi}_{\text{б/к}} - \dot{\Pi}_{\text{с/к}}$	$\dot{H}^*(10)$ , МКЗв/ч	$\dot{E}_{\text{ISO}}$ , МКЗв/ч	$g_{\text{amb}} = \frac{\dot{H}^*(10)}{\dot{\Pi}_{\text{Pu-Be}}}$	$g_{\text{eff}}^{\text{ИЗО}} = \frac{\dot{E}_{\text{ISO}}}{\dot{\Pi}_{\text{Pu-Be}}}$
	без конуса $\dot{\Pi}_{\text{б/к}}$	с конусом $\dot{\Pi}_{\text{с/к}}$					
01	400,5	43,06	357,4	89,3	50,26	0,250	0,1406
13	390	47,84	342,1			0,261	0,1469

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

## Нейтроны:

Отклик ТЛД внутри фантома:	7.63 мЗв
Отклик ТЛД на фантоме (усредненный)	40.5 мЗв
Отклик ТЛД под мишенью (2 шт, среднее) (фотоны)	4760 мЗв 45 мЗв
Мощность амб. экв-та дозы под мишенью (для нейтронов, после коррекции)	1960 мЗв/ч

**Значения поправочных коэффициентов для показаний ДВГН-01 в условиях действующего в помещении БНЗТ нейтронного спектра при условии размещения ТЛД на человеке или снаружи на фантоме.**

Для эффективной дозы при изотропном облучении	$\bar{k}_{\text{eff}}^{\text{ISO}} \approx 1/37$
Для амбиентного эквивалента дозы	$\bar{k}_{\text{amb}} \approx 1/21$

# Выводы

- При работе с ТЛД ДВГН-01 в полях с энергетическими спектрами нейтронов, заметно отличающимися от спектра нейтронов калибровочного источника требуется внесение поправок в их показания, иногда достаточно больших.
- Для контроля терапевтической дозы нейтронного облучения необходима замена комплекса АКЖДК-301 с ТЛД ДВГН-01 на другой, способный работать с откликами до 100-200 Зв (АКЖДК 102 РЗ). Вероятно, потребуется и замена «нейтронных» ТЛД дозиметров.
- Для подготовки к предклиническим испытаниям необходимо провести дополнительные эксперименты при других энергиях протонов и калибровку ТЛД на большие «нейтронные» отклики.
- Необходимо провести верификацию полученных данных с результатами измерений, проведенных с помощью активационных фольг и биологических экспериментов.

## Ремарка:

Расчёт всех дозовых компонент и предсказание воздействия на здоровые и опухолевые ткани при проведении БНЗТ являются значительно более сложными задачами, чем определение доз в традиционной лучевой терапии.

Одним из вариантов создания эмпирического алгоритма планирования терапии являются эксперименты на лабораторных животных, для которых хорошо известны кривые доза–эффект.

В самом удачном испытании у трех из пяти животных опухоль рассосалась полностью, что было подтверждено результатами томографии, и животные стали здоровыми [8].



## ЛИТЕРАТУРА

- [1]. А.В. Санников, В.Н. Пелешко, Е.Н. Савитская, С.А. Другаченок, М.М. Сухарев, С.Э. Сухих. *Дозиметр эффективной дозы смешанного излучения*. – Препринт ИФВЭ 2008-1, Протвино, 2008; направлено в АНРИ.
- [2]. А.Г. Алексеев, Н.Н. Бараненков, Г.И. Бритвич, Е.В. Косьяненко, В.А. Пикалов, И.П. Гомонов. *Исследование характеристик нейтронного излучения на ядерно-физических установках для методической поддержки ИДК*. – Препринт ИФВЭ 2003-9, Протвино, 2003.
- [3]. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПиН 2.6.1.2523–09.
- [4]. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). СП 2.6.1.2612–10.
- [5]. Кеирим-Маркус И. Б. *Эквидозиметрия*. – М.: Атомиздат, 1980, 191 с.
- [6]. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. *Защита от ионизирующих излучений: Справочник* – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 496 с.: ил.
- [7] «Handbook of Accelerator Physics and Engineering» A.W.Chao, M.Tigner, World Scientific, 1998-1999.
- [8] <https://scfh.ru/papers/bor-neytronozakhvatnaya-terapiya-raka/>
- [9] <http://www.inp.nsk.su/bnct/>

**ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**  
**им. Г.И. БУДКЕРА**  
**СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**