

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЕННЫЕ ПО ПРОГРАММЕ ПРИЗМА ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕДИЦИНСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ БОР-НЕЙТРОНОЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

Е.А. Кашаева¹, Г.Н. Малышкин¹, С.И. Самарин¹, С.Ю. Таскаев²

¹ *Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики
имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия, g.n.malyshkin@vniitf.ru*

² *Институт ядерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия, taskaev@inp.nsk.su*

Программа ПРИЗМА - моделирование переноса частиц методом Монте-Карло

- Нейтроны, фотоны, электроны, позитроны, ионы
- Спектральные библиотеки ядерных данных: ENDF/B-VI, -VII, ..., EPDL-97, ...
- Тепловые нейтроны: модель свободного газа + модель учета химической связи
- Трехмерная геометрия
- Развитые методы уменьшения статистической погрешности
- Выделение вкладов различных компонент в оцениваемые функционалы

Расчетные исследования по программе ПРИЗМА для бор-нейтронозахватной терапии (BNCT) 2005 – 2016 гг

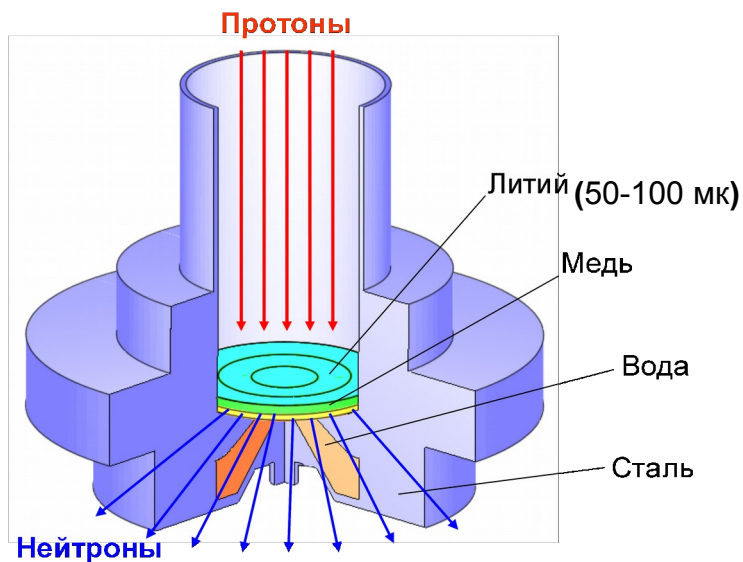
Моделируемые процессы в медицинской установке:

- Перенос протонов в слое Li, рождение нейтронов и гамма-квантов
- Распространение нейтронов и гамма-квантов в системе

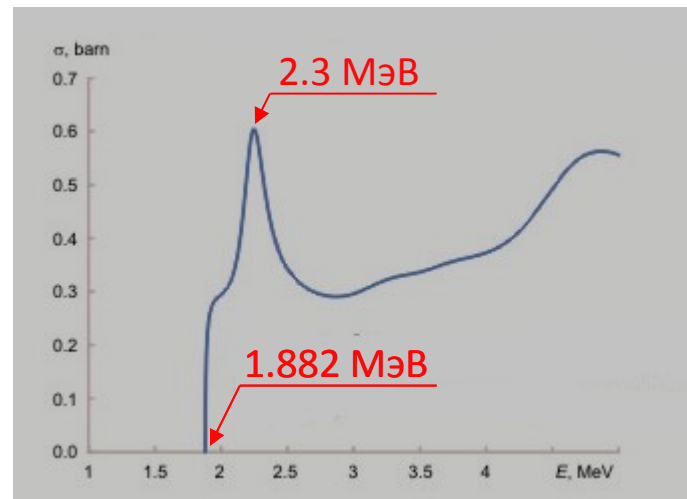
Направления исследований:

- Оптимизация системы формирования пучка нейтронов
- Моделирование радиационных полей вне бункера с установкой
- Сопровождение экспериментов по измерению спектра нейтронов и гамма-квантов
- Расчеты активации конструкционных материалов

Нейтроногенерирующая мишень на медной подложке



Сечение реакции ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$



Энергия протонов

Реакции взаимодействия протонов с Li:

- ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$
- ${}^7\text{Li}(p,p'+\gamma){}^7\text{Li}$, $E_\gamma = 0,478 \text{ МэВ}$
- ${}^7\text{Li}(p, \gamma){}^8\text{Be}$
- ${}^6\text{Li}(p, \gamma) {}^7\text{Be}$

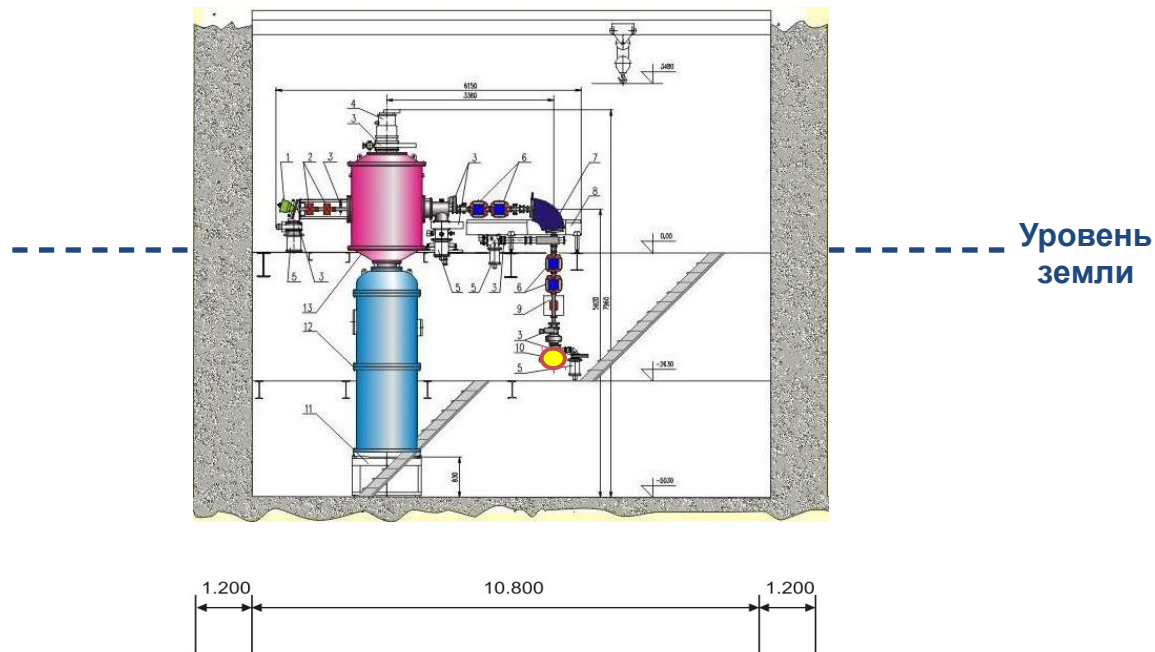
Какой должна быть энергия протонов?

Обычно: 2.3 – 2.8 МэВ

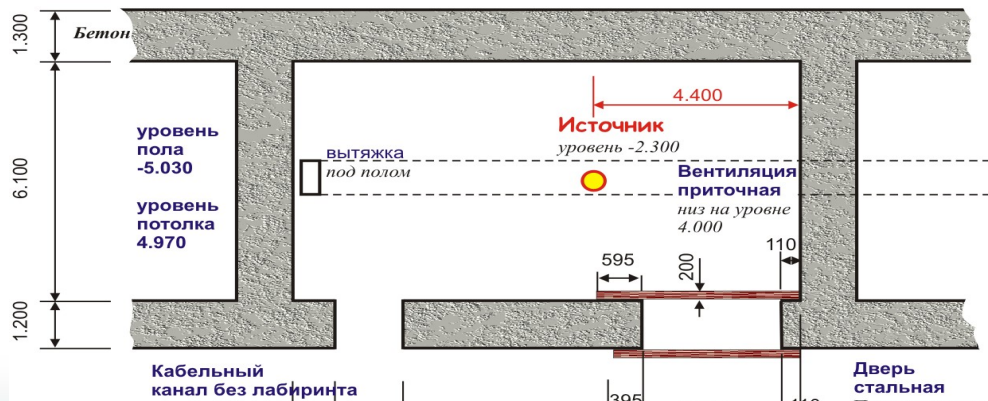
Припороговый режим: 1.915 МэВ ?

Общий вид бункера с установкой

Вид
сбоку

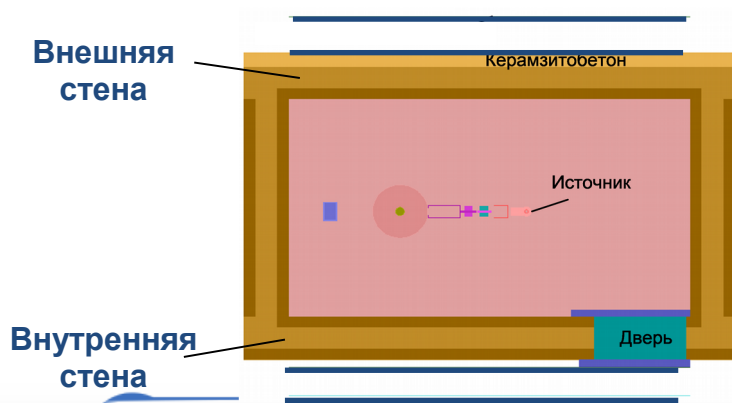
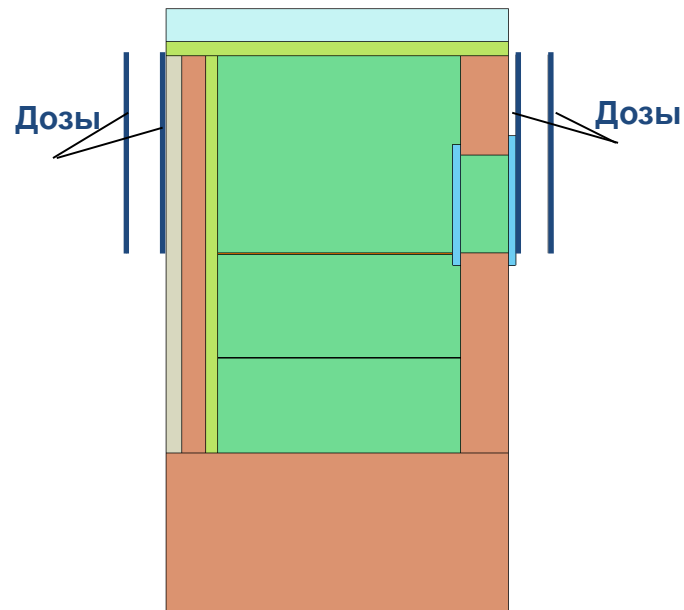
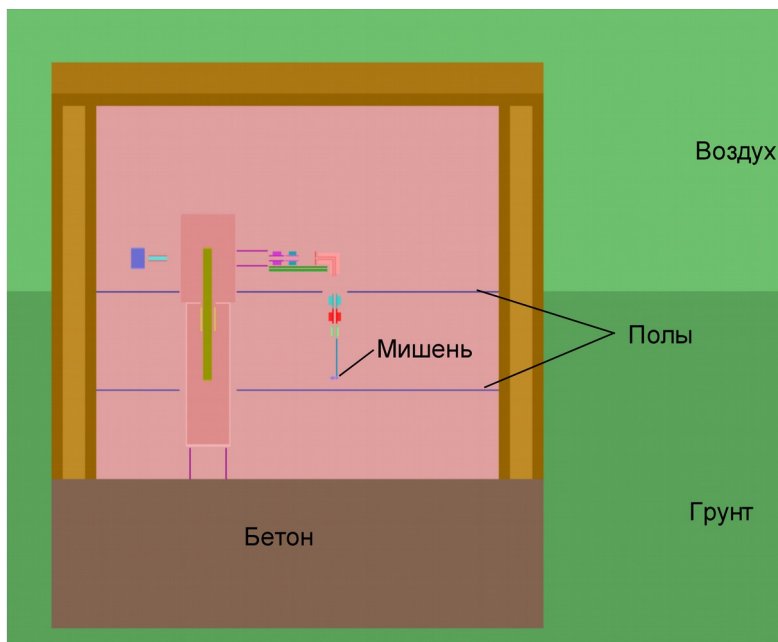


Вид
сверху



Толщина стен:
1.2 - 1.3 м

Расчетная модель



Расчет распределения доз:

- на поверхности стен
- на расстоянии 1 м от стен.

Неаналоговое моделирование (Я.З. Кандиев):

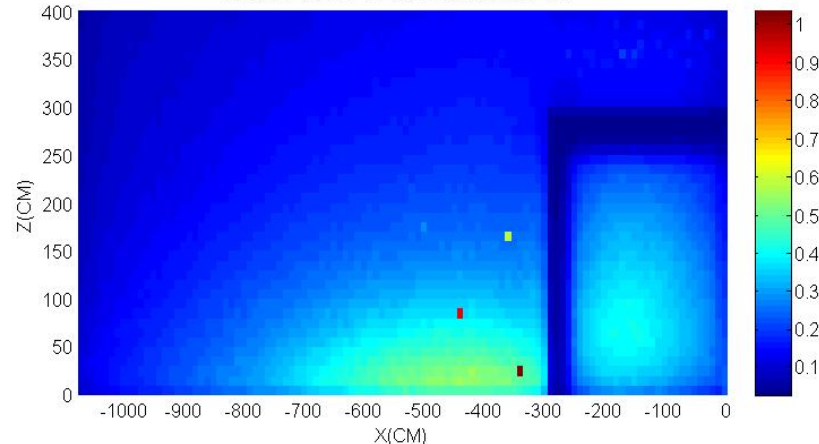
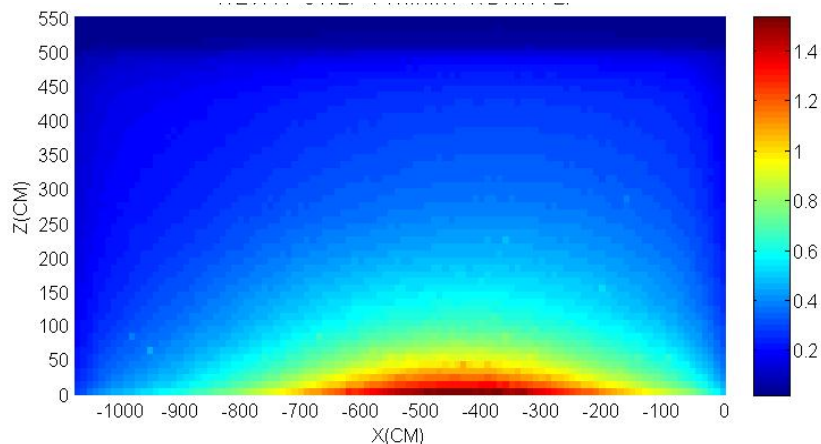
- экспоненциальное преобразование
- весовые окна

Распределение мощности эквивалентной дозы (мкЗв/ч) при энергии протонов 1.915 МэВ, ток 10мА

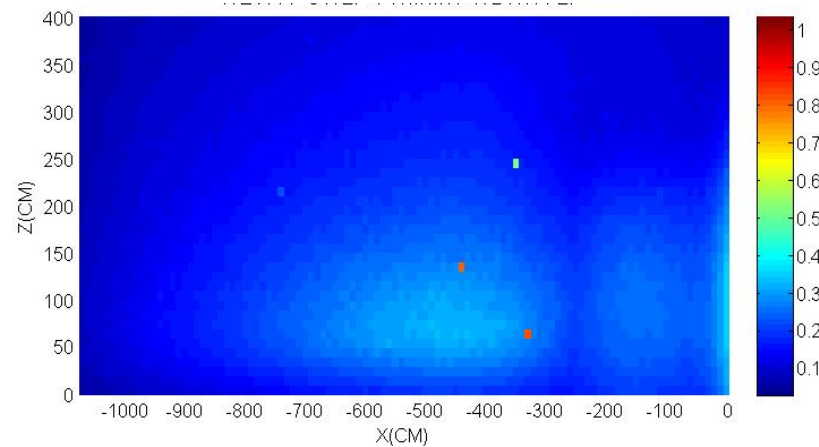
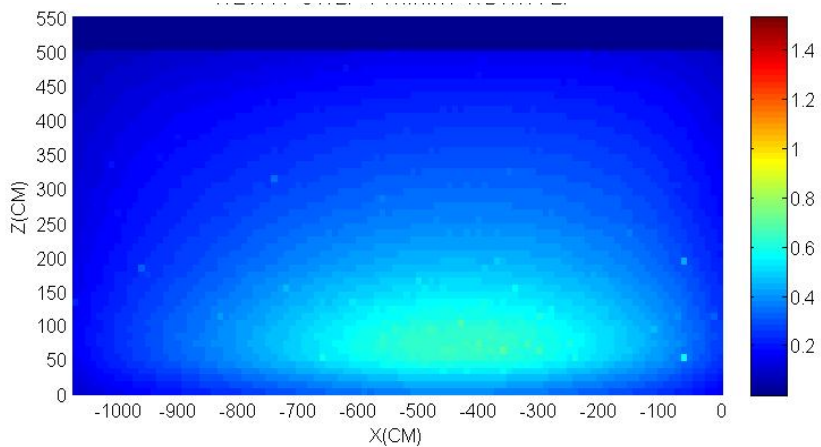
Внешняя стена (улица)

Внутренняя стена с дверью

на поверхности



на расстоянии 1м



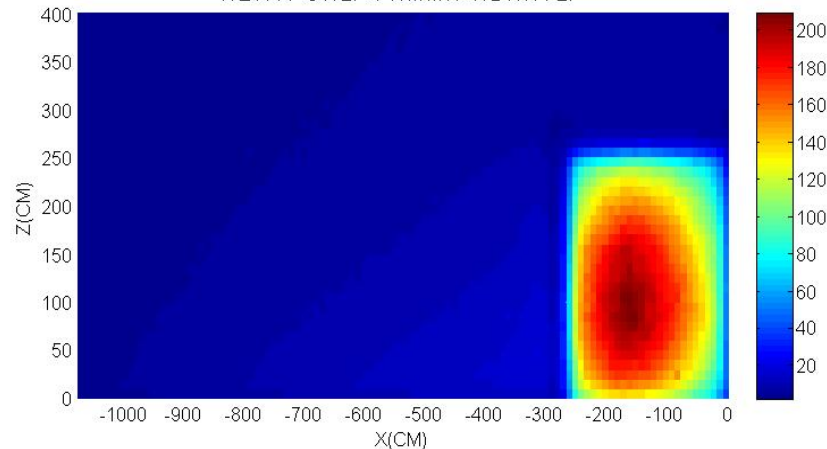
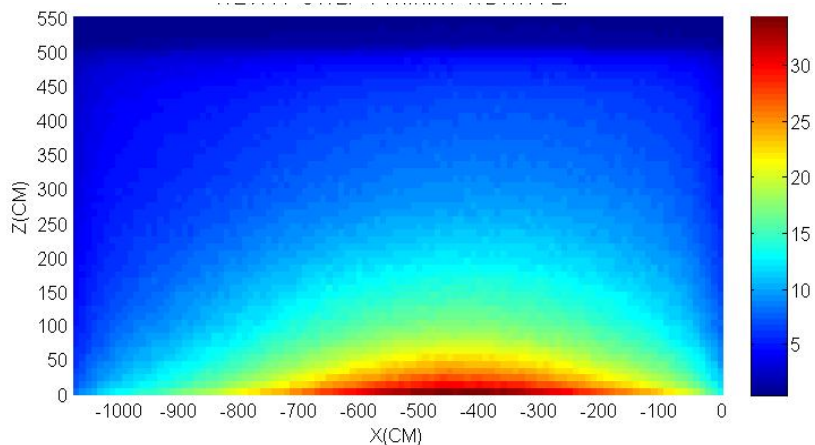
Пространственная сетка: 10×10 см²

Распределение мощности эквивалентной дозы (мкЗв/ч) при энергии протонов 2.5 МэВ, ток 10мА

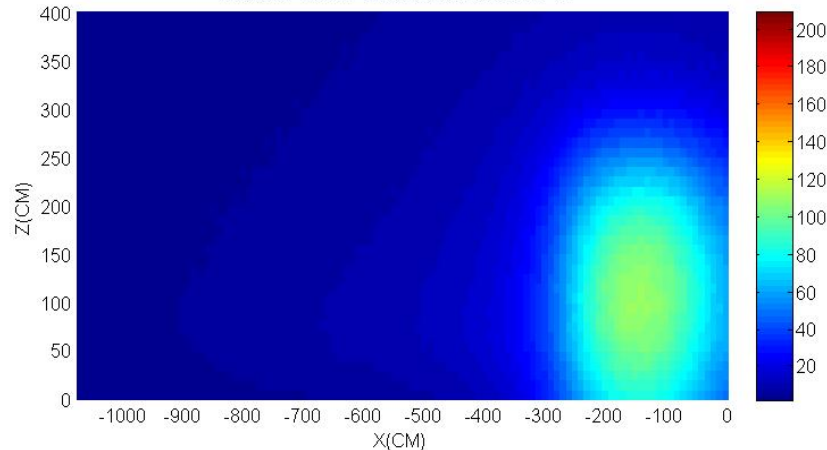
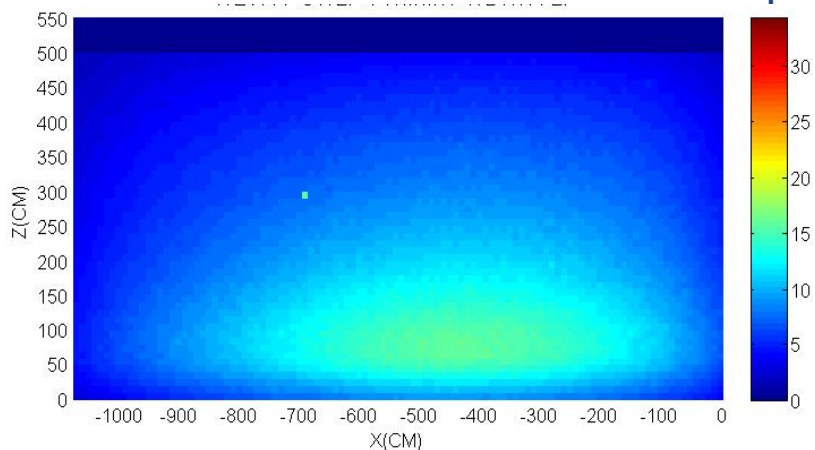
Внешняя стена (улица)

Внутренняя стена с дверью

на поверхности



на расстоянии 1м

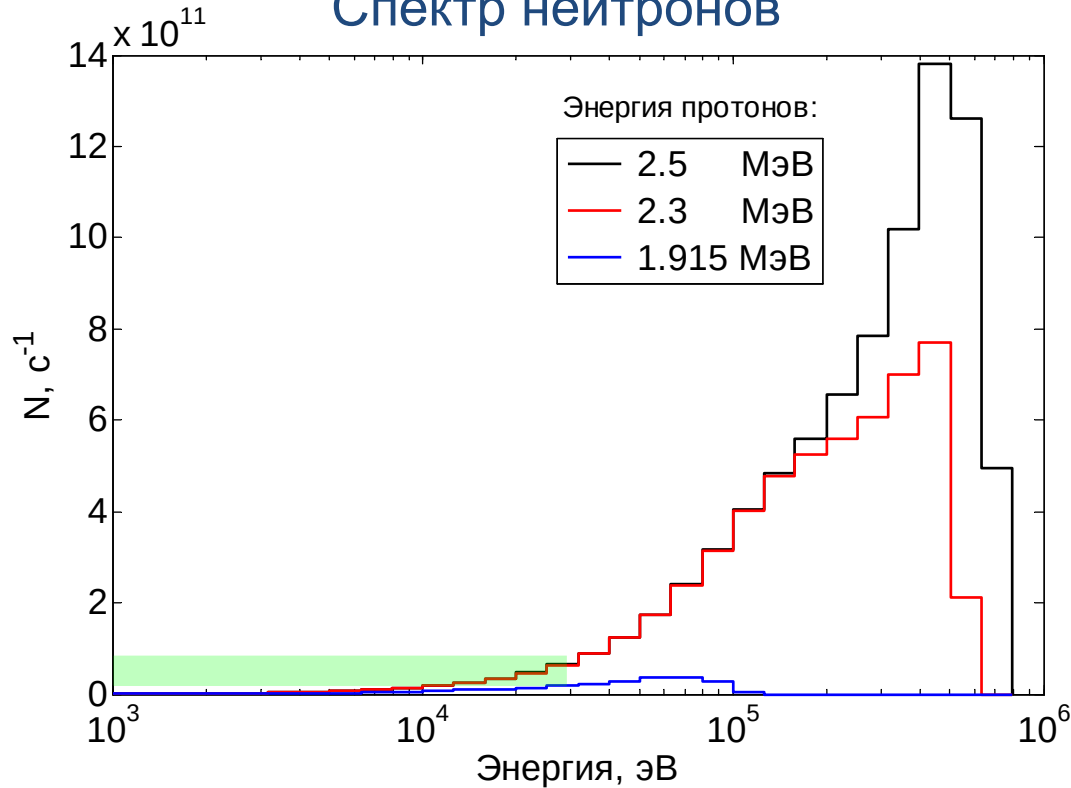


Пространственная сетка: 10×10 см²

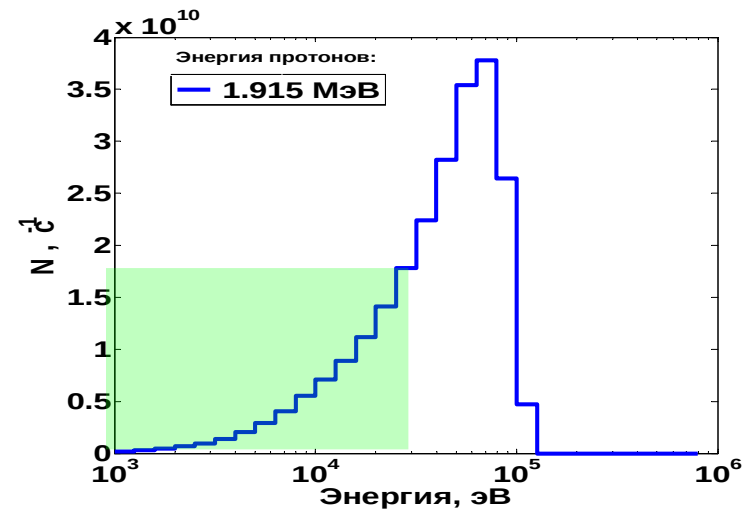
Рождение нейтронов в слое Li

Ток 10 мА $\sim 6 \cdot 10^{16}$ протонов/с

Спектр нейтронов

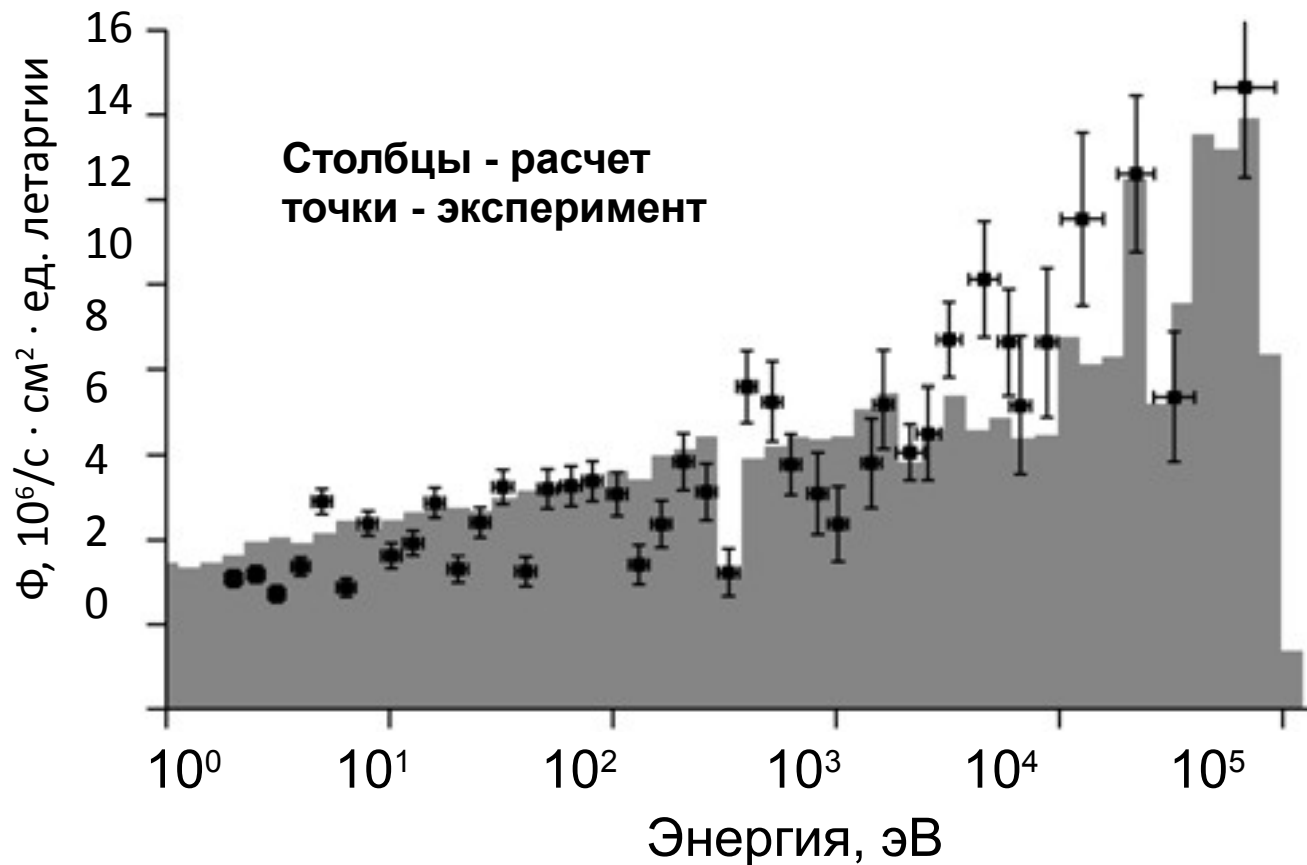


Энергия протонов, МэВ	Выход, 10^{11} нейтронов/с
2.5	82
2.3	54
1.915	2.3

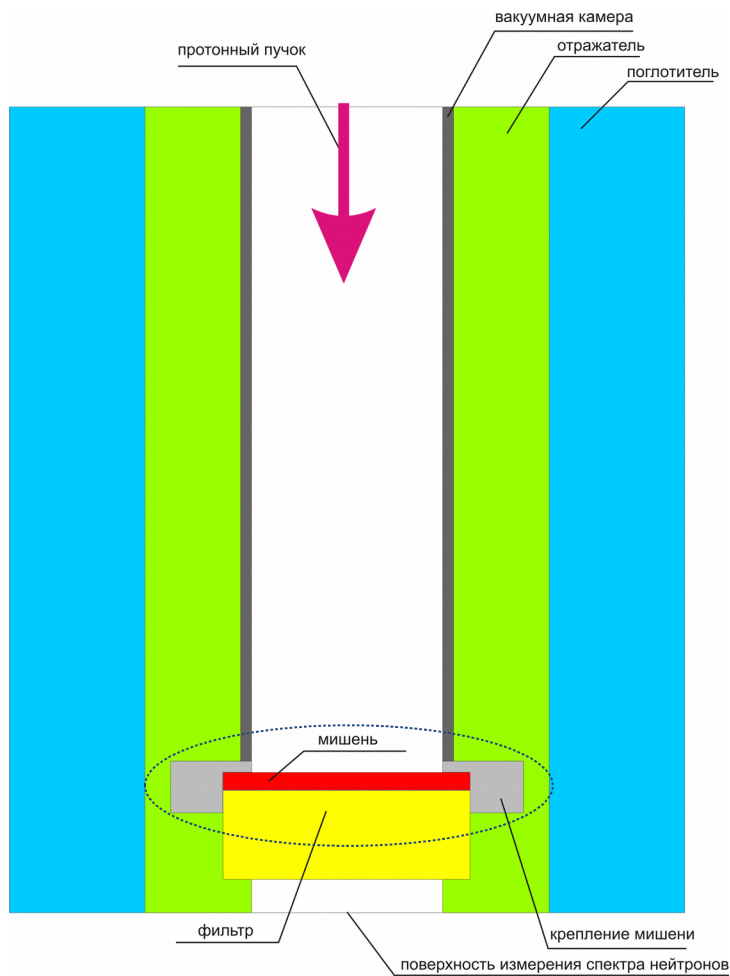


(1 – 30 кэВ) – оптимальный диапазон энергии нейтронов для BNCT

Измерение и расчет спектра нейтронов на выходе мишени при энергии протонов 1.915 МэВ.

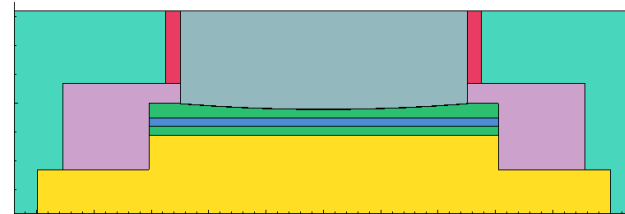


Принципиальная схема системы формирования пучка нейтронов



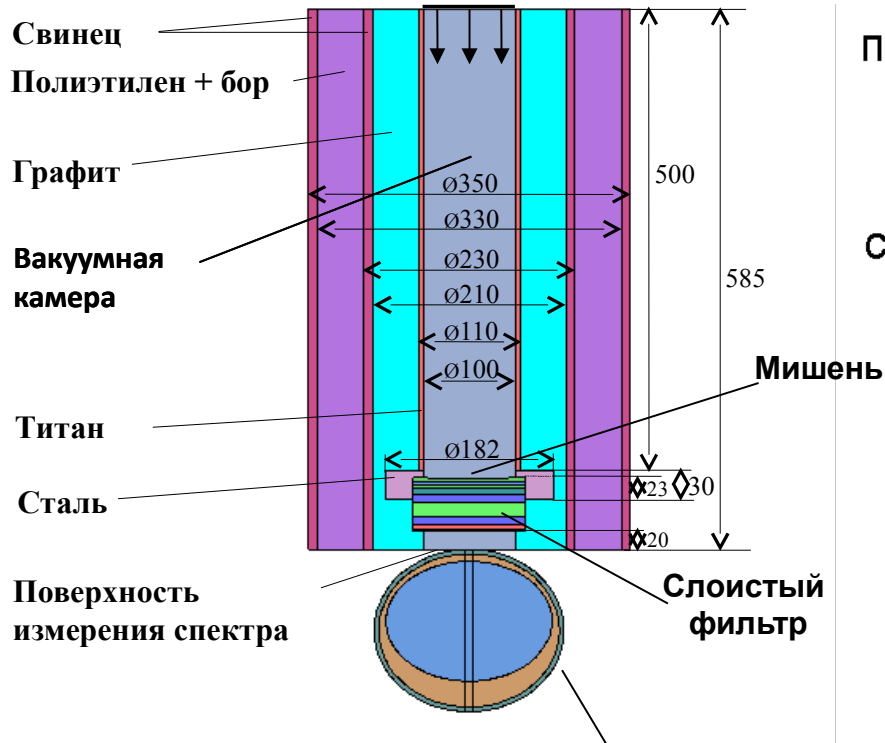
Модельная мишень:

- литий
- медь
- вода
- медь



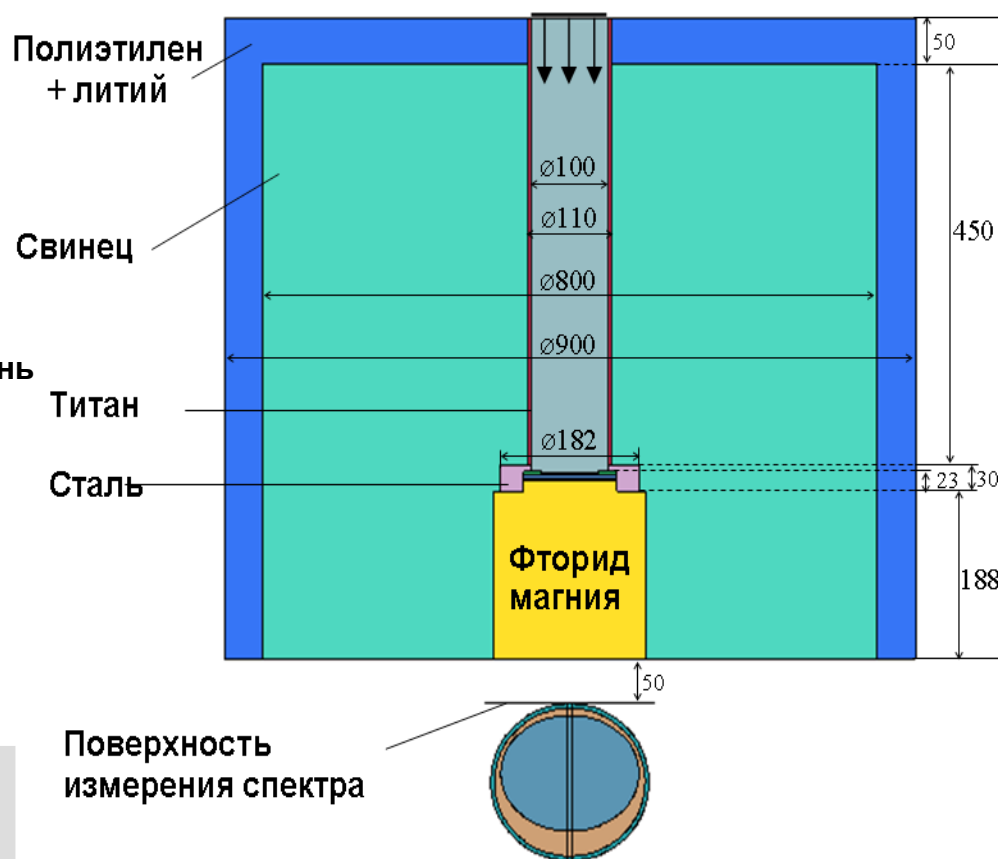
Система формирования пучка нейтронов

1.915 МэВ
протоны



Фантом головы:
три вложенных эллипсоида,
имитирующих по составу
кожу, кость и мозг.
Концентрация ^{10}B : 1 ppm

2.5 МэВ
протоны



Оценка эквивалентной дозы

Относительная биологическая эффективность (ОБЭ)
для опухоли и тканей мозга:

- фотонов - 1.0
- нейтронов – 3.2

Составная биологическая эффективность (СБЕ):

- для опухоли – 3.8
- для тканей мозга – 1.35

Концентрация ^{10}B :

- в опухоли – 52.5 ppm
- в здоровых тканях – 15 ppm

В расчетах оцениваются составляющие дозы:

- $D_{10\text{B}}$ - доза нейтронов на ^{10}B при 1 ppm
- D_{γ} - доза гамма-квантов
- D_{N} - доза нейтронов

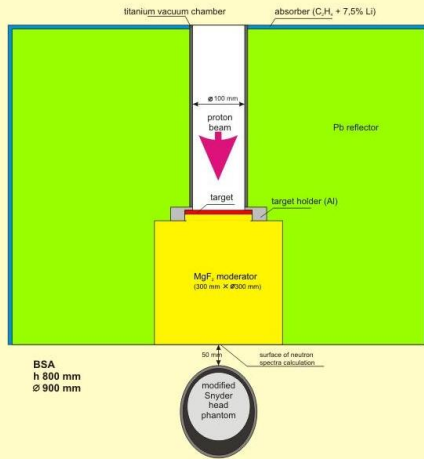
$$\text{Эквивалентная доза в опухоли} = 3.8 * 52.5 * D_{10\text{B}} + D_{\gamma} + 3.2 * (D_{\text{N}} - D_{10\text{B}})$$

$$\text{Эквивалентная доза в ткани} = 1.35 * 15 * D_{10\text{B}} + D_{\gamma} + 3.2 * (D_{\text{N}} - D_{10\text{B}})$$

Спектры и дозы для энергии протонов 1.915 и 2.5 МэВ

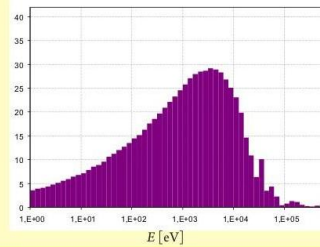
Ordinary mode
(direct therapeutic neutron beam)
@ 2.3-3 MeV protons for ${}^7\text{Li}(p,n){}^7\text{Be}$

Dose rate @ 10 mA ~ 1 RBE Gy per minute
Advanced depth ~ 6 – 10 cm
Therapeutic ratio ~ 4 – 6

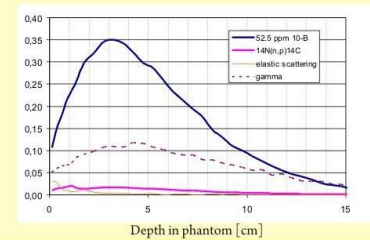


neutron energy spectrum

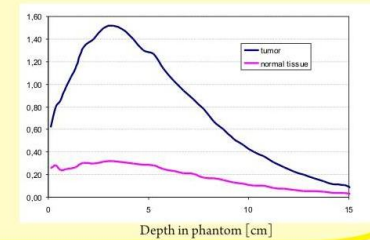
Φ [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{lethargy unit}$]



Kerma-rate [Gy/min]



RBE Gy/min]



Dose rate @ 10 mA – 1.5 RBE Gy / min

Advantage depth – 11 cm

Therapeutic ratio – 5

Near-threshold mode
@ 1.915-1.95 MeV protons

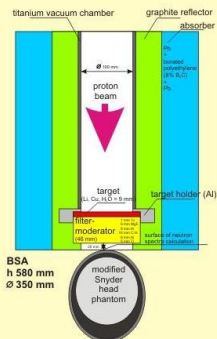
[Kandiev, et al. ARI 69 (2011) 1632]

Dose rate @ 10 mA – 0.5-1 RBE Gy / min

Advantage depth – 7 cm

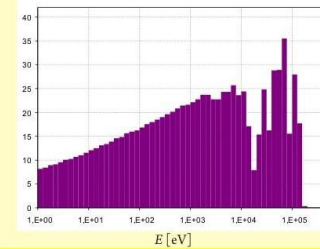
Therapeutic ratio – 2.5

advantage – low yield of neutrons and low activation of the lithium target and the facility

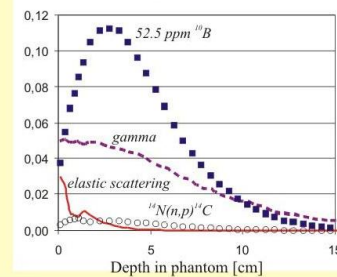


neutron energy spectrum

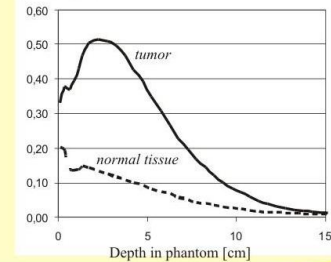
Φ [$10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{lethargy unit}$]



Kerma-rate [Gy/min]

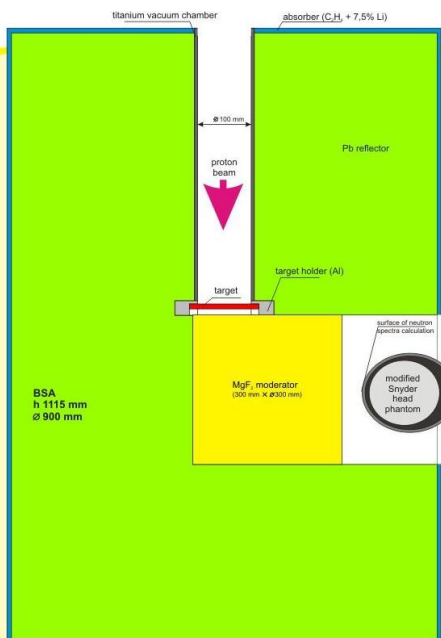


RBE Gy/min]



Ортогональная проекция.

Спектры и дозы для энергии протонов 2.5 МэВ



Orthogonal mode
@ 2.3-2.5 MeV protons

Dose rate @ 10 mA – 3 RBE Gy / min

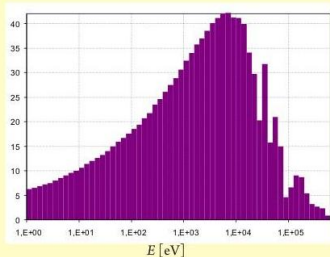
Advantage depth – 12 cm

Therapeutic ratio – 4

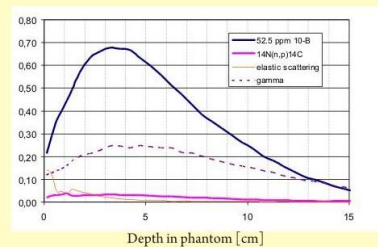
advantage – high dose rate
à la gantry possibility

neutron energy spectrum

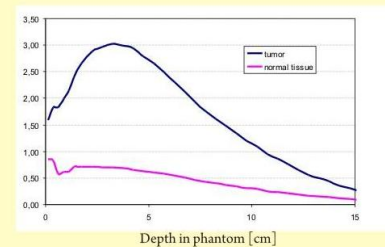
$\Phi [10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{lethargy unit}]$



Kerma-rate [Gy/min]

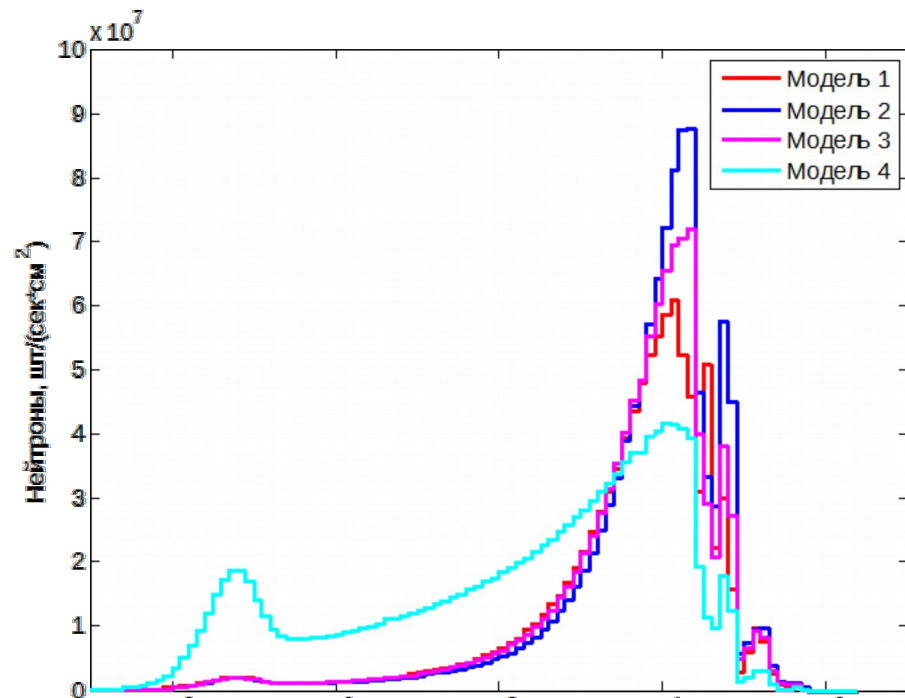
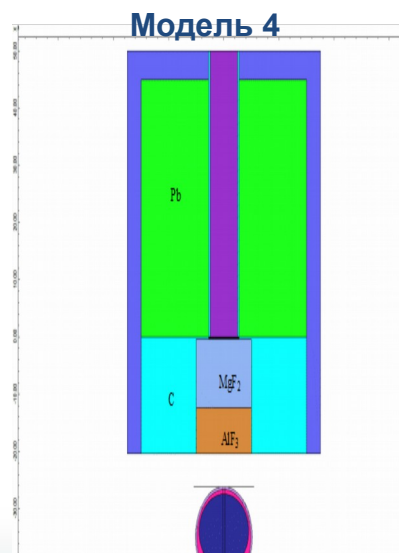
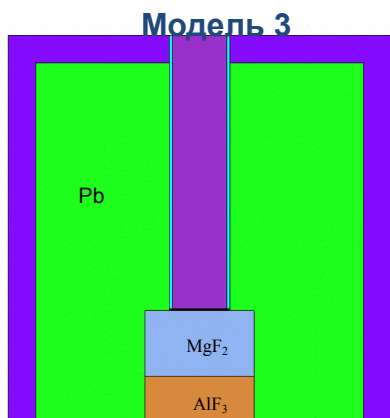


RBE Gy/min]



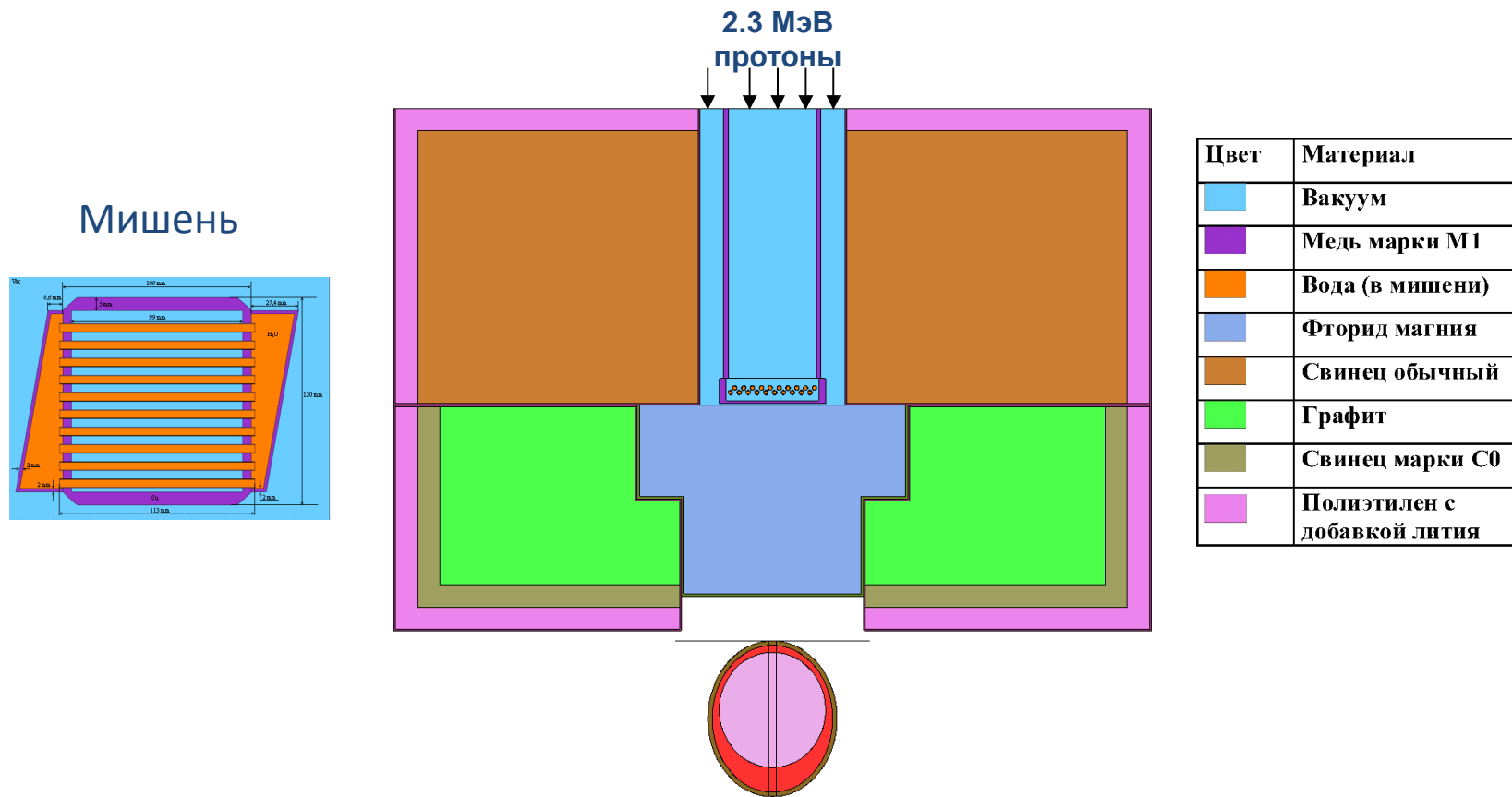
Оптимизация состава замедлителя и отражателя для энергии протонов 2.3 МэВ

Модель	Замедлитель	Отражатель
1	MgF ₂	Pb
2	AlF ₃	Pb
3	MgF ₂ + AlF ₃	Pb
4	MgF ₂ + AlF ₃	Pb + C



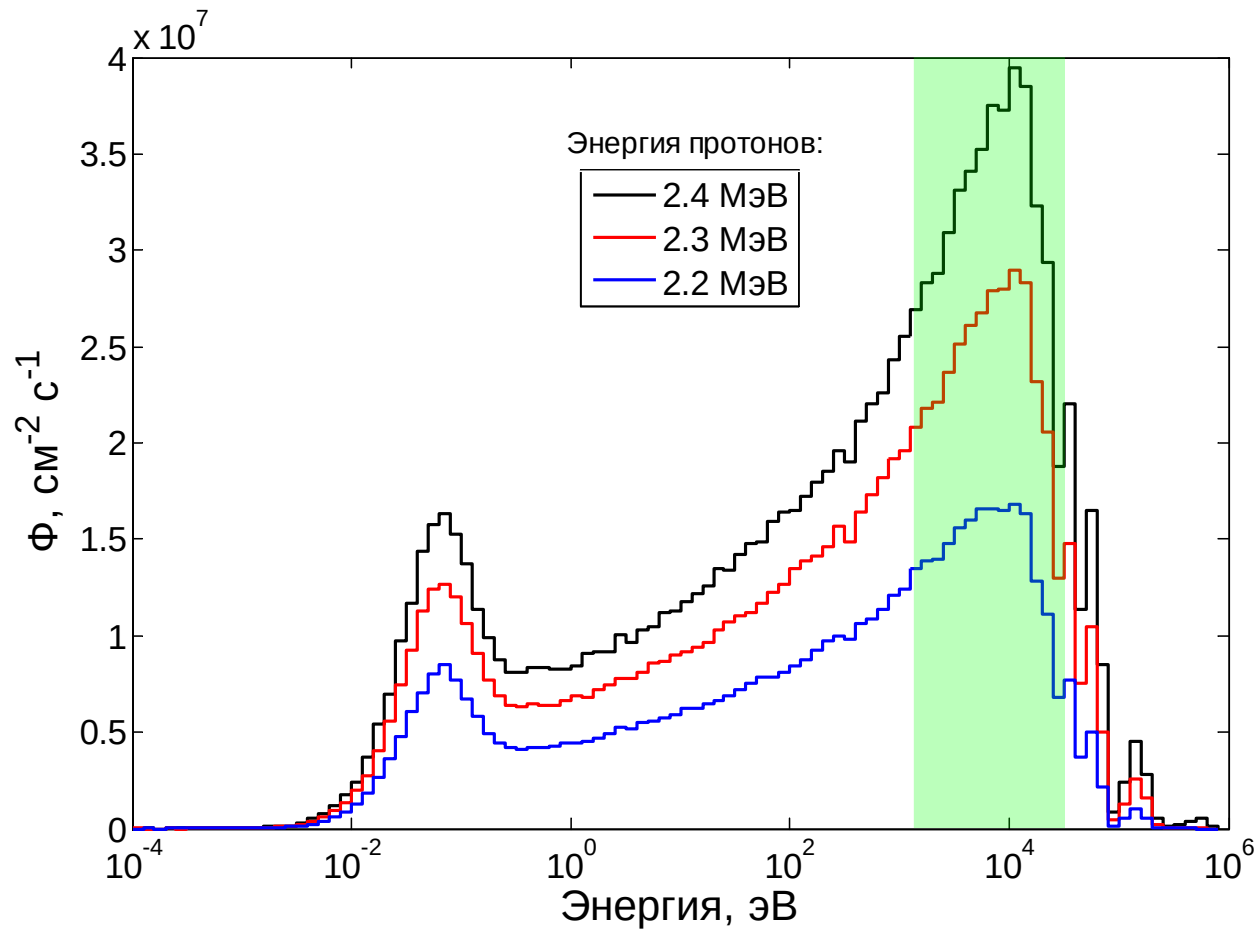
Лучший результат:
составной замедлитель
+
составной отражатель

Нейтроногенерирующая мишень на танталовой подложке



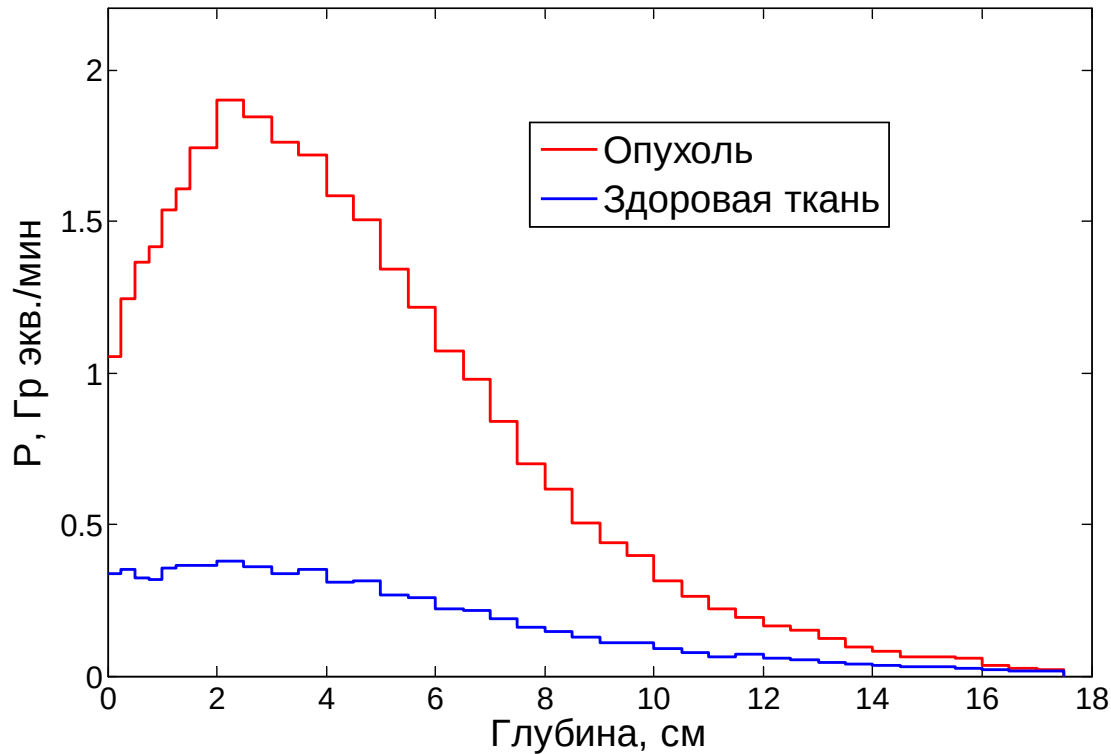
Расчетная модель выполнена по проектным чертежам изготовленной мишени и системы формирования пучка

Спектр нейтронов на поверхности фантома



Максимум спектра нейтронов лежит в эпитепловой области энергий

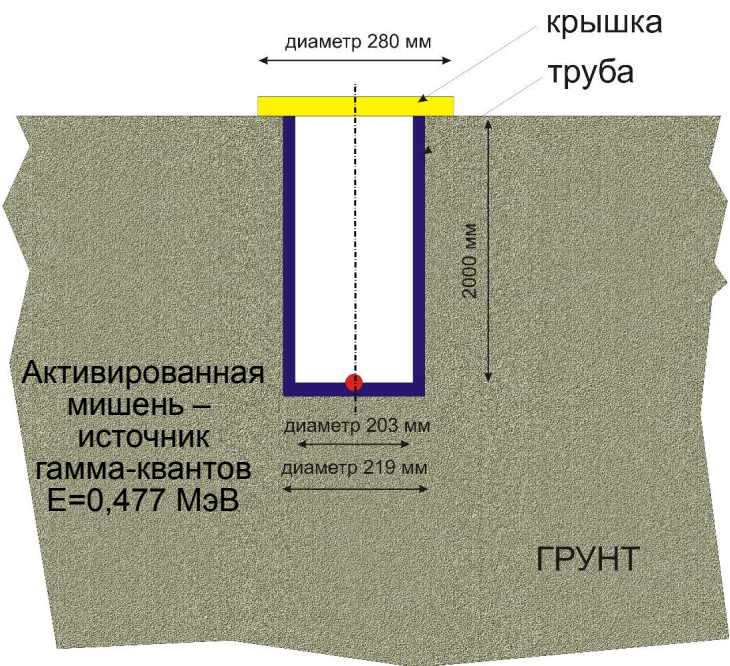
Распределение мощности эквивалентной дозы в фантоме для энергии протонов 2.3 МэВ



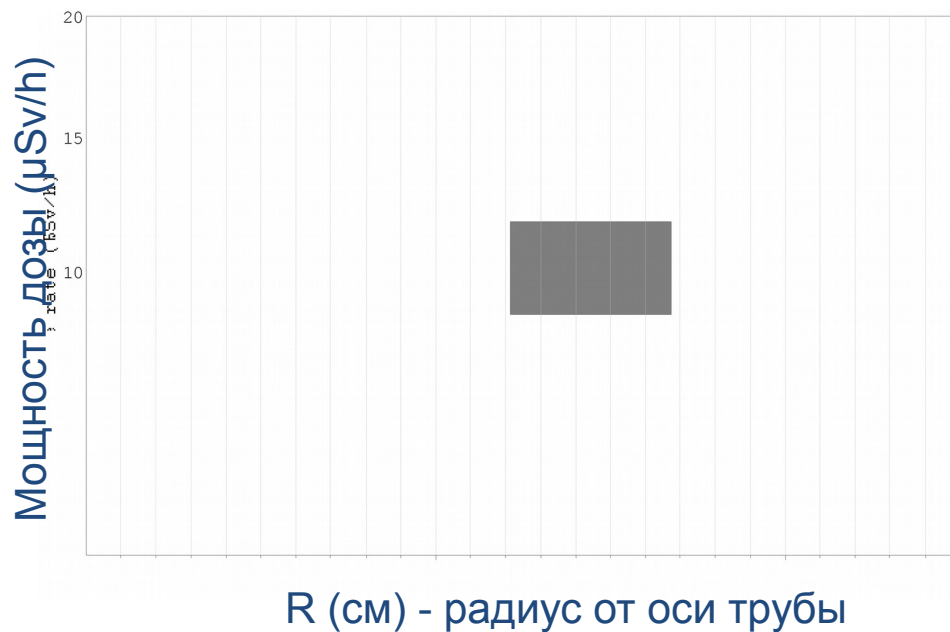
Терапевтическое отношение - 5.2

Глубина терапии - 10 см

Временное хранилище активированных мишеней



Мощность дозы на высоте 0.5 м над хранилищем при различной толщине H свинцовой крышки



Заключение

За десятилетие сотрудничества коллективов ИЯФ и РФЯЦ-ВНИИТФ в области бор-нейтронозахватной терапии по программе ПРИЗМА выполнен большой объем разносторонних расчетных исследований.

Они способствовали лучшему пониманию экспериментально наблюдаемых физических явлений и выполнению работ по оптимизации конструкции разрабатываемой медицинской установки.

Спасибо за внимание!

