



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

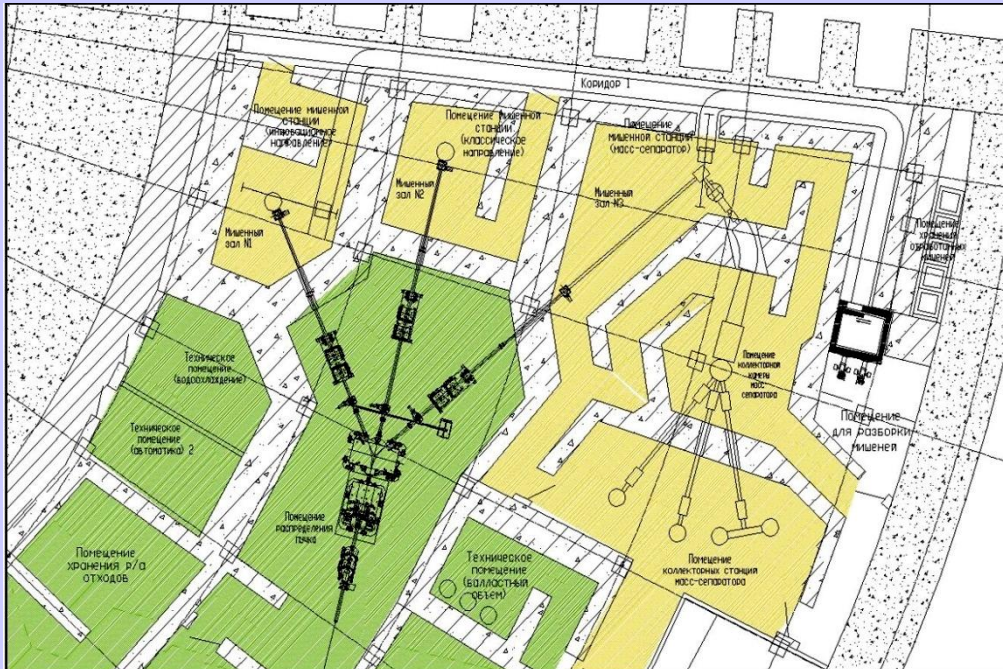
Россия, 188300, Ленинградская область, г. Гатчина, Орлова роща

**В.Н. Пантелеев**

**Проект радиоизотопного комплекса РИЦ-80.  
Новые методы получения медицинских радионуклидов**

# Циклотрон Ц-80 (первый этаж экспериментального зала) с трактами к мишенным станциям (подвал экспериментального зала)

- Три мишенные станции для производства медицинских радионуклидов
- Автоматическая транспортная система для транспортировки облученных мишеней в горячие камеры
- Для производства радионуклидов высокой чистоты на одной из мишенных станций будет установлен масс-сепаратор



## Радионуклиды, планируемые к получению на РИЦ-80

Радионуклид	$T_{1/2}$ (период полураспада)	Мишень
Cu-64	12.7 h	Ni
* Cu-67	2.58 d	Zn
Ge-68	270.8 d	Ga
* Sr-82	25.55 d	Rb
Tc-99	6 h	Mo
In-111	2.8 d	Cd
I-123	13.27 h	Te
I-124	4.17 d	Te
Tb-149	4.1 h	Gd
* Ra-223	11.4 d	ThC
* Ra-224	3.66 d	ThC
* Ac-225	10 d	ThC

Красным и синим помечены радионуклиды, которые планируется получать инновационными масс-сепараторным и высокотемпературным методами на 1-ой и 2-ой станциях

Звездочками помечены радионуклиды, для которых разработаны новые методы выделения

План мероприятий работ по проекту

«Разработка инновационного масс-сепараторного метода для получения медицинских радионуклидов высокой чистоты.»

№	Мероприятие		Стоимость работ, млн. руб.	Сроки выполнения, год.
1	Проведение НИР по масс-сепараторному методу получения целевых радионуклидов Ra-223, Ra-224 и Ac-225			
	1.1	Разработка, изготовление и высокотемпературное тестирование мишенного материала из карбида тория высокой плотности	35	2020 -2021
	1.2	Тестирование мишенного материала из карбида тория высокой плотности с использованием масс-сепаратора ИРИС на пучке синхроциклотрона СЦ-1000	8	2021
2	Проведение НИОКР по проекту «Разработка инновационного масс-сепараторного метода для получения медицинских радионуклидов высокой чистоты.»			
	2.1	Разработка технологической и конструкторской документации всех компонентов рабочего прототипа инновационной мишенной станции, масс-сепаратора, системы вывода пучка на мишень, систем охлаждения мишеней, дистанционного управления и транспортировки мишеней в место их хранения после облучения.	15	2020-2021
	2.2	Закупка материалов, закупка и изготовление стандартного и нестандартного оборудования для работы с высокорadioактивными мишенями и источниками излучения	232	2020-2024
	2.3	Изготовление масс-сепаратора, камеры разводки, 3 ионных трактов.	70	2021- 2022
	2.4	Изготовление рабочего прототипа инновационной масс-сепараторной мишенной станции	60	2021-2022
	2.5	Сооружение радиационной защиты с учетом конструктивных особенностей и расположения элементов масс-сепараторной мишенной станции	55	2022-2023
	2.6	Сборка и проведение испытаний рабочего прототипа инновационной мишенной станции, сочлененной с масс-сепаратором, включая камеру разводки и ионные тракты в месте их расположения на Ц-80 без пучка	15	2023-2024
3	Проведение испытаний рабочего прототипа инновационной мишенной станции, сочлененной с масс-сепаратором, включая камеру разводки и ионные тракты в месте ее расположения на пучке Ц-80 с интенсивностью пучка протонов до 100 мкА		10	2024
	<b>ИТОГО</b>		<b>500</b>	<b>2020-2024</b>

План мероприятий работ по проекту

«Разработка инновационных мишенных устройств для получения генераторных радиоизотопов высокотемпературным методом.»

№	Мероприятие		Стоимость работ, млн. руб.	Сроки выполнения, год.
1	Проведение НИР по высокотемпературному методу получения генераторных радиоизотопов Sr-82 и Ge-68			
	1.1	Высокотемпературное тестирование мишенных материалов в виде хлористого и металлического рубидия и металлического галлия на высоковакуумном стенде	6	2020
	1.2	Облучение мишенных материалов в виде хлористого и металлического рубидия и металлического галлия на пучке синхроциклотрона СЦ-1000 с последующей отработкой процессов выделения целевых радионуклидов высокотемпературным методом	10	2021
2	Проведение НИОКР по проекту «Разработка инновационных мишенных устройств для получения генераторных радиоизотопов высокотемпературным методом.»			
	2.1	Разработка технологической и конструкторской документации всех компонентов рабочего прототипа инновационной высокотемпературной мишенной станции, мишеней, системы вывода пучка на мишень, системы охлаждения мишеней, дистанционного управления и транспортировки мишеней в горячие камеры для их последующей обработки	13	2020-2021
	2.2	Закупка материалов, закупка и изготовление стандартного и нестандартного оборудования для работы с высокорadioактивными мишенями и источниками излучения	220	2020-2024
	2.3	Изготовление рабочего прототипа инновационной мишенной станции для высокотемпературного выделения целевых радионуклидов	56	2021-2022
	2.4	Сооружение радиационной защиты с учетом конструктивных особенностей и расположения элементов мишенной станции	46	2022-2023
	2.5	Сборка и проведение испытаний рабочего прототипа инновационной мишенной станции в месте ее расположения на Ц-80 без пучка	9	2023-2024
3	Проведение испытаний рабочего прототипа инновационной мишенной станции высокотемпературного выделения в месте ее расположения на пучке Ц-80 с интенсивностью пучка протонов до 100 мкА		10	2024
	<b>ИТОГО</b>		<b>370</b>	<b>2020-2024</b>

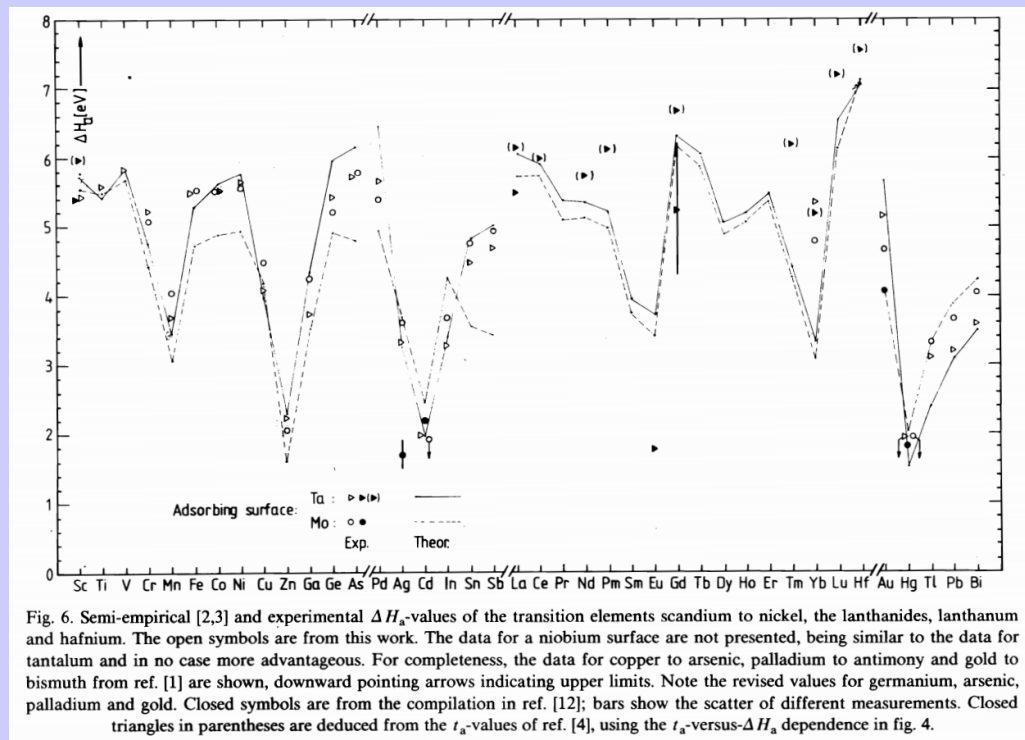
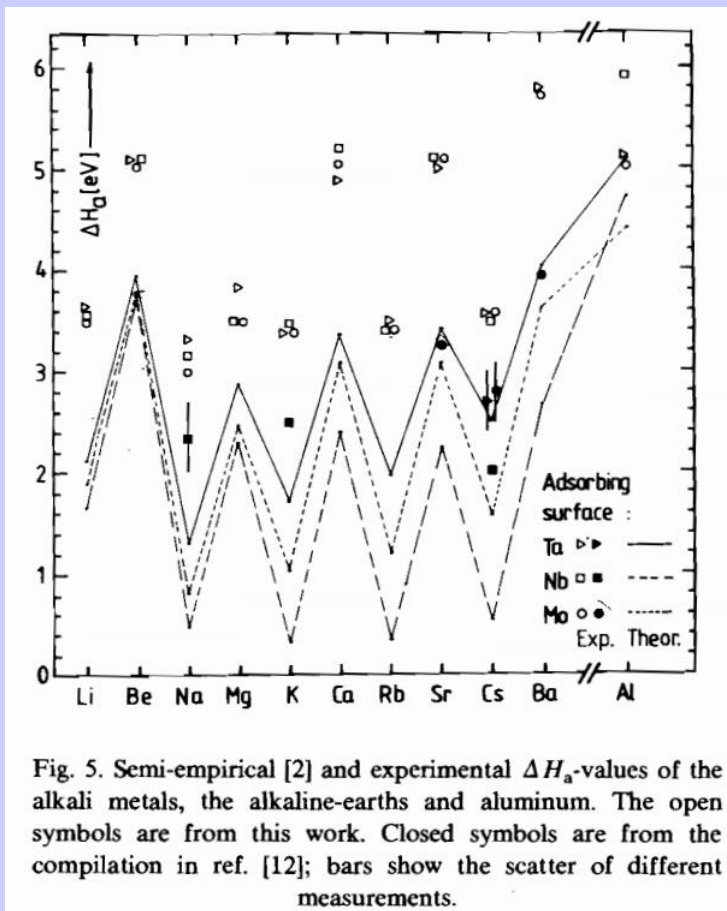
План мероприятий работ по проекту  
 «Разработка мишенных устройств для получения радиоизотопов, выделяемых из мишеней радиохимическими методами.»

№	Мероприятие		Стоимость работ, млн. руб.	Сроки выполнения, год.
1	Проведение НИР по получению генераторных радиоизотопов Sr-82 и Ge-68 и других радионуклидов радиохимическими методами			
	1.1	Разработка методов с использованием радиохимического выделения Sr-82 и Ge-68 из мишенных материалов в виде хлористого и металлического рубидия и металлического галлия	2	2020
	1.2	Облучение мишенных материалов в виде хлористого и металлического рубидия и металлического галлия на пучке синхроциклотрона СЦ-1000 с последующей отработкой процессов выделения целевых радионуклидов методами “мокрой” радиохимии	10	2021
2	Проведение НИОКР по проекту «Разработка мишенных устройств для получения радиоизотопов, выделяемых из мишеней радиохимическими методами.»			
	2.1	Разработка технологической и конструкторской документации всех компонентов рабочего прототипа радиохимической мишенной станции, мишеней, системы вывода пучка на мишень, системы охлаждения мишеней, дистанционного управления и транспортировки мишеней в горячие камеры для их последующей обработки	9	2020-2021
	2.2	Закупка материалов, закупка и изготовление стандартного и нестандартного оборудования для работы с высокорadioактивными мишенями и источниками излучения	105	2020-2023
	2.3	Изготовление рабочего прототипа мишенной станции для радиохимического выделения целевых радионуклидов	30	2021-2022
	2.4	Сооружение радиационной защиты с учетом конструктивных особенностей и расположения элементов мишенной станции	20	2022
	2.5	Сборка и проведение испытаний рабочего прототипа мишенной станции в месте ее расположения на Ц-80 без пучка	6	2022-2023
3	Проведение испытаний рабочего прототипа мишенной радиохимической мишенной станции в месте ее расположения на пучке Ц-80 с интенсивностью пучка протонов до 100 мкА		8	2023
	<b>ИТОГО</b>		<b>190</b>	<b>2020-2023</b>

**Разработка высокотемпературных методов разделения целевых радионуклидов и мишенного материала в вакууме**

# Значения энергий десорбции различных элементов с поверхности тугоплавких материалов (Nb, Mo, Ta)

R. Kirchner, Nucl. Instr. and Meth. B26(1987) 204 -212

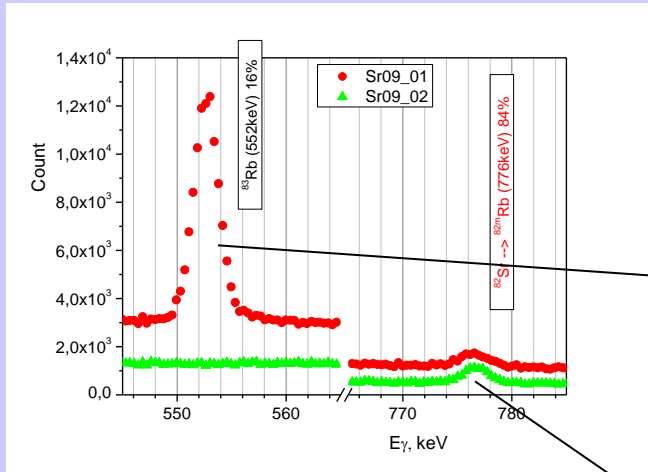


## Энергии десорбции и температуры кипения пар некоторых элементов

Элемент	Rb	Sr	Zn	Cu	Yb	Lu	Ga	Ge
$E_{des}, eV$	3.4	5	2	4	3.2	5.2	3.8	5.2
$T_{boil}, ^\circ C$	688	1382	907	2562	1194	3393	2204	2833



# A new high temperature method of radionuclide separation from irradiated target material



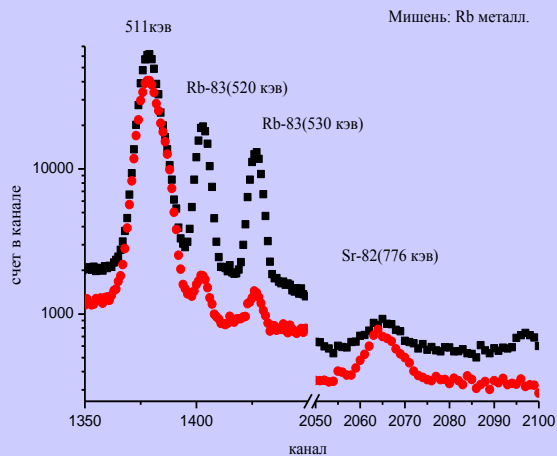
Part of gamma spectra of irradiated RbCl before and after heating in vacuum at a temperature higher 900° C for 1 hour.



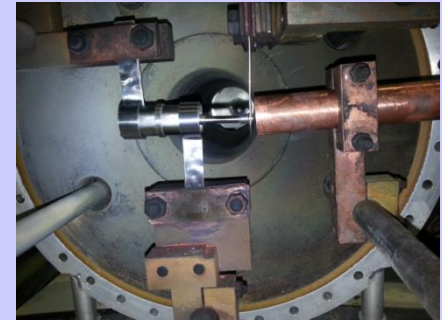
Cavity with RbCl before heating at a temperature lower 800° C



Cavity after heating at a temperature higher 900° C. Target material was completely evaporated



Part of gamma spectra of irradiated Rb (metal) before and after heating in vacuum at a temperature 1000° C for 1 hour.



# Использование высокотемпературного метода для выделения изотопов лютеция из облученного мишенного материала в виде металлического рубидия

## Лютеций-177 используется для эффективного лечения рака простаты

Целевой радиоизотоп  $^{177}\text{Lu}$  продукт распада  $^{177}\text{Yb}$ , который нарабатывают на тепловых нейтронах в реакции  $^{176}\text{Yb}(n,\gamma)^{177}\text{Yb}$ .

$T_{1/2}=6,71$  суток,  $E_{\beta \text{ макс}}=0,497$  МэВ,  $E_{\gamma}=113$  кэВ (6,4%) и 208 кэВ (11%).

Продукт распада  $^{177}\text{Lu}$  - стабильный изотоп  $^{177}\text{Hf}$ .

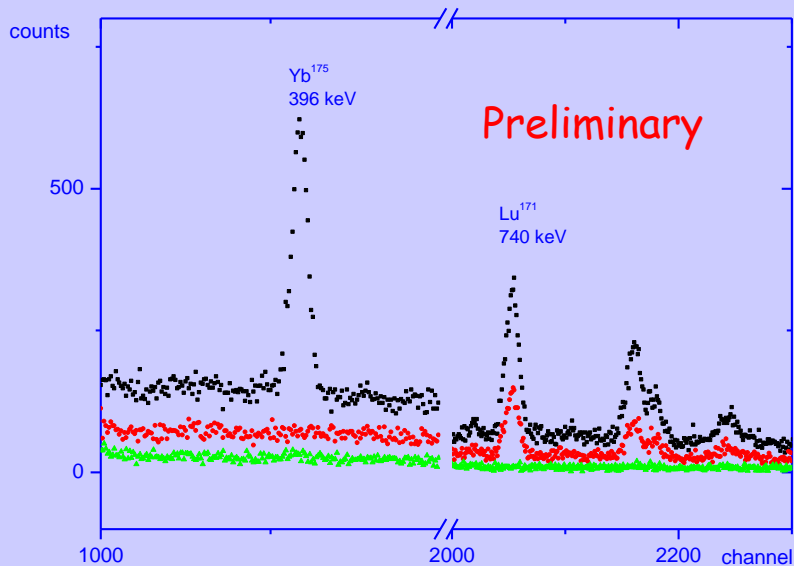
Длина пробега  $\beta$ -частицы  $^{177}\text{Lu}$  в биологической ткани (<2 мм) обеспечивает

избирательное уничтожение опухоли при минимальном повреждении окружающих тканей.

Yb 3.4 eV 1194°C

Lu 5 eV 3393°C

*Для исследования процесса выделения лютеция в качестве мишени использовался металлический иттербий естественного содержания, облученный на пучке протонов СЦ-1000 после деградера энергии 100 МэВ.*

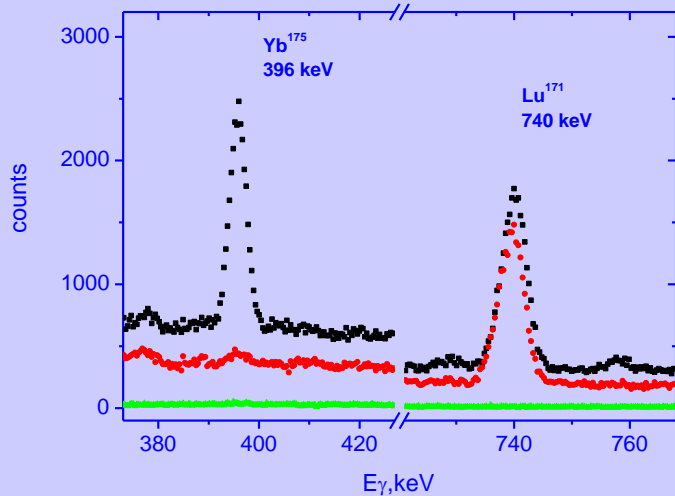


*Черные точки - части гамма спектра капсулы с облученным иттербием до нагрева;  
красные точки - части гамма спектра капсулы после нагрева в течение часа при температуре 950-1000°C;*

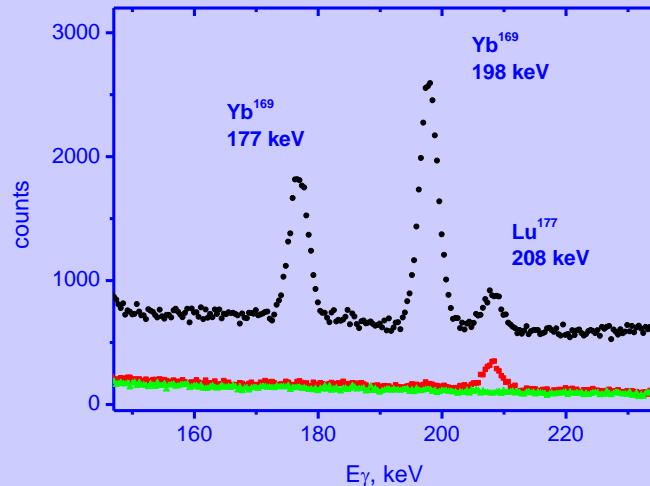
*зеленые точки - спектр капсулы после смыва 10% раствором азотной кислоты.*

# Высокотемпературный метод выделения изотопов лютеция из мишенного материала в виде металлического иттербия ( $^{177}\text{Lu}$ - новый радионуклид для эффективного лечения рака простаты)

Часть гамма-спектра, облученного протонами металлического иттербия, измеренного до и после нагревания в вакууме

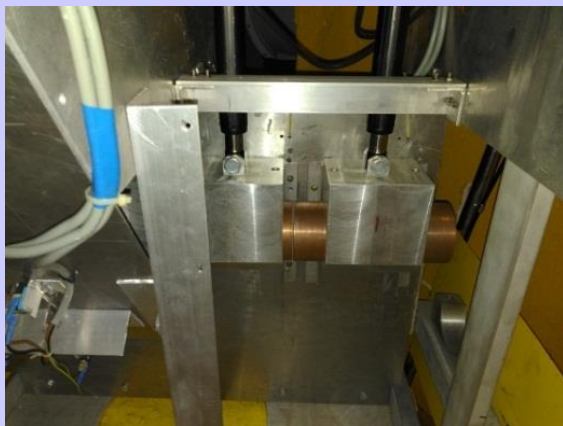


Часть гамма-спектра, облученного нейтронами металлического иттербия, измеренного до и после нагревания в вакууме



Замедлитель нейтронов от нейтронообразующей мишени

Деградер (замедлитель протонов,  $E_p = 100$  МэВ)



# Новый метод получения изотопного генератора альфа-эмиттера $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$ (подана заявка на патентование)

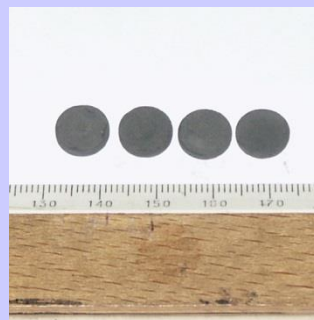
Прототип мишенного устройства для высокотемпературного выделения получаемых радионуклидов

Новый мишенный материал карбид тория (ThC) высокой плотности



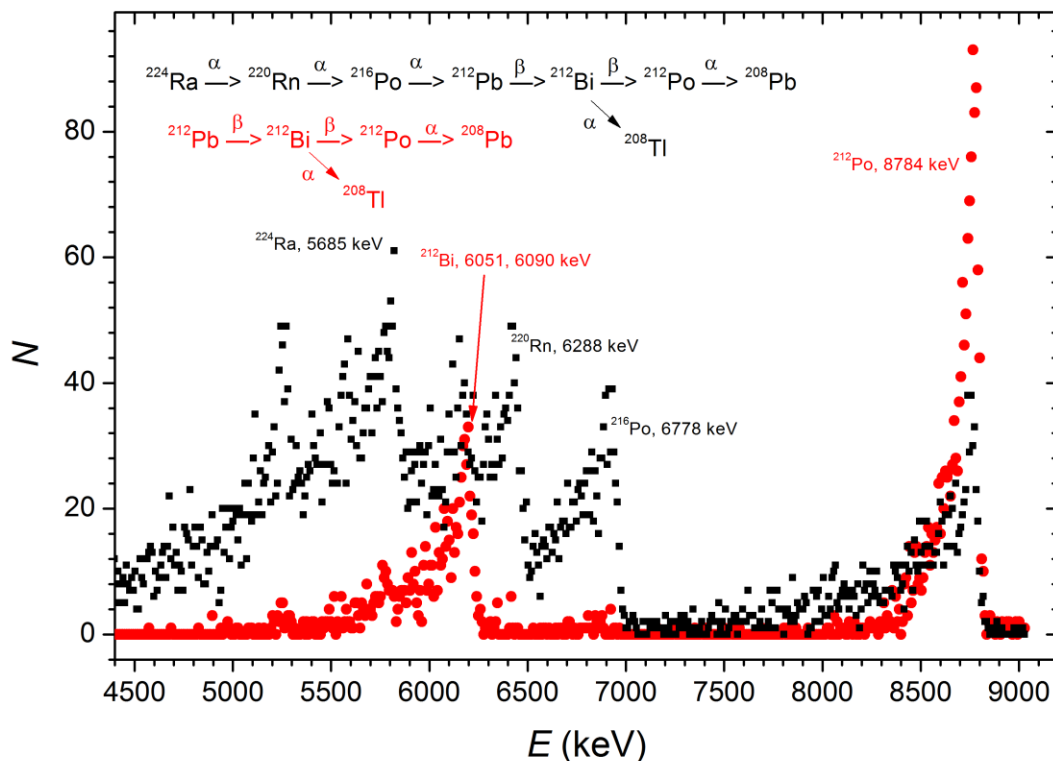
Температура выделения  $^{212}\text{Pb}$  - 1230 °C

Температура выделения  $^{224}\text{Ra}$  - 1500 °C



Температура плавления - 2500 °C

Температура кипения ~ 3500 °C



Альфа спектры селективно выделенных на охлаждаемый коллектор  $^{212}\text{Pb}$  (1230 °C) и  $^{224}\text{Ra}$  (1500 °C) из нового мишенного материала карбида тория (ThC) высокой плотности

Преимущества:

- Полное отсутствие ЖРО (жидких радиоактивных отходов);
- Использование одной и той же мишени для постоянного накопления целевых радионуклидов.
- Для накопления  $^{212}\text{Pb}$  и  $^{224}\text{Ra}$  может быть использована мишень после ее долгой ( $\geq 10$  сут) работы на пучке для получения других радионуклидов.

## Публикации

1. ...A. E. Barzakh..., D. V. Fedorov..., V. N. Fedosseev..., M P.L. Molkanov, M.D. Seliverstov, et al *Fine structure in the adecay of 218At* . Phys. Rev. C 99, 044306 (2019).
2. ...D. V. Fedorov..., V. Fedosseev..., et P.L. Molkanov, et al . *Inverse odd-even staggering in nuclear charge radii and possible octupole collectivity in 217,218,219At revealed by in-source laser spectroscopy*Phys. Rev. C 99, 054317 (2019).
3. A.E. Barzakh..., D. V. Fedorov..., V. N. Fedosseev..., M P.L. Molkanov, M.D. Seliverstov,-*Shape A. staggering of mid-shell mercury isotopes from in-source laser spectroscopy compared B. with density functional theory and Monte Carlo shell model calculations* Phys. Rev. C. C 99, 064317 (2019).
4. L. Ghys, A. N. Andreyev, ..., A. Barzakh, et al.  *$\alpha$ -decay properties of 200,202Fr*, Phys. Rev. C 100, 054310 (2019)
5. E. Verstraelen , ... , A. Barzakh, et al. *Search for octupole-deformed actinium isotopes using resonance ionization spectroscopy*, Phys. Rev. C 100, 044321 (2019)

## Премии

Вторая премия в области физики низких энергий на конкурсе научных работ НИЦКИ-ПТИЯФ

А. Е. Барзах, П. Л. Молканов, М. Д. Селиверстов, Д. В. Федоров  
*Эффект чередования форм у нейтронно-дефицитных изотопов ртути*

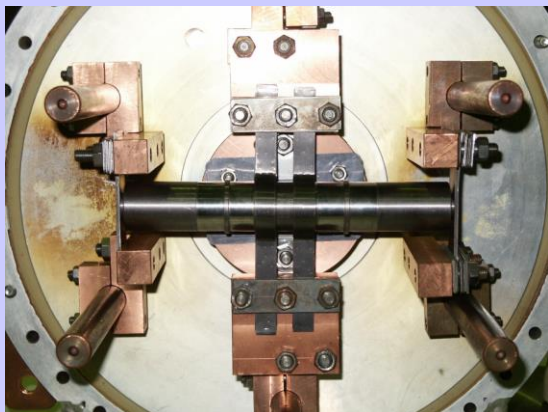
Вторая премия в области методических исследований на конкурсе методических работ НИЦКИ-ПТИЯФ

В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах, Л.Х. Батист, Д.В. Федоров, В.С. Иванов, П.Л. Молканов, С.Ю. Орлов, М.Д. Селиверстов, Ю.М. Волков  
*Новые методы получения ионных пучков изотопов радия для фундаментальных исследований и медицинских приложений*

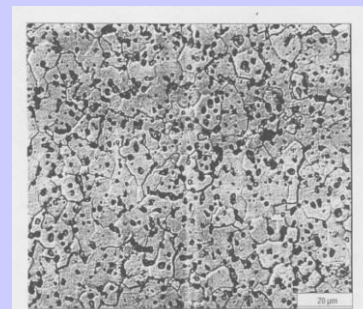
## Конференции

Выступления А.Е. Барзаха, В.Н. Пантелеева, М.Д. Селиверстова с устными докладами на 5-ти международных конференциях

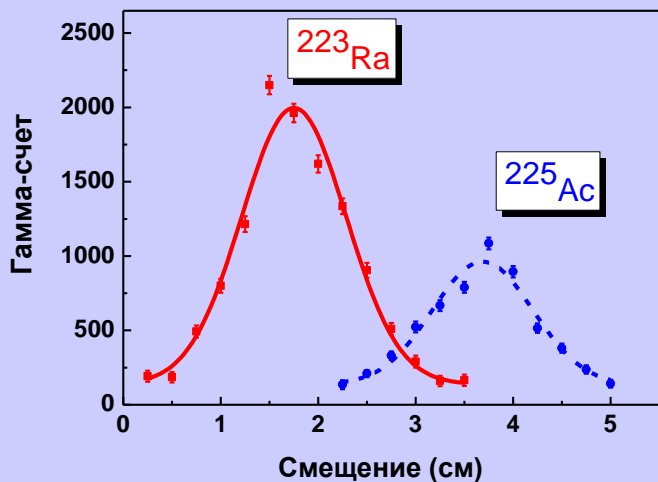
# Принцип масс-сепараторной мишени: быстрый выход нуклидов - продуктов реакции при высокой температуре из мишенного вещества при полном его сохранении



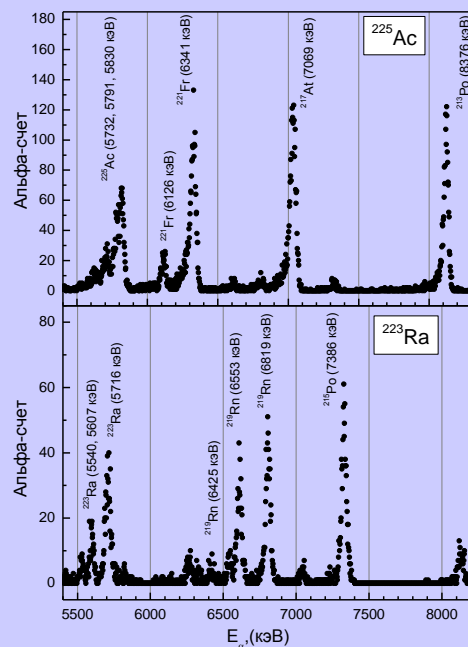
Мишенное устройство с мишенным веществом из монокарбида **U-238**, максимальной рабочей температурой 2400°C, и мощностью резистивного нагрева до 8 кВт



Мишенный материал - монокарбид урана ( $^{238}\text{U}$ ) высокой плотности.  $T_{\text{пл}} = 2600^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{кип}} \geq 4000^\circ\text{C}$



Разделенные радионуклиды  $^{223}\text{Ra}$  и  $^{225}\text{Ac}$ , имплантированные в коллектор масс-сепаратора



Альфа спектры разделенных с помощью масс-сепаратора изотопов  $^{225}\text{Ac}$ ,  $^{223}\text{Ra}$