



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»



ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

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

В.Н. Пантелеев

Радиоизотопный комплекс РИЦ-80.

Разработка новых методов получения радионуклидов для медицины

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

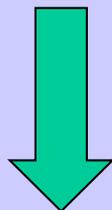
Красным и синим помечены радионуклиды, которые планируется получать инновационными масс-сепараторным и высокотемпературным методами на 1-ой и 2-ой станциях

Звездочками помечены радионуклиды, для которых разработаны новые методы выделения

Работы, поддержанные в качестве аванпроектов Росатомом (Healthcare)

Разработка инновационного масс-сепараторного метода получения $^{223,224}\text{Ra}$, ^{225}Ac и других медицинских радионуклидов высокой чистоты – 4.5 млн. руб.

Разработка инновационных мишенных устройств для получения генераторных радиоизотопов ^{82}Sr , ^{68}Ge и других медицинских радионуклидов на радиоизотопном комплексе РИЦ-80 – 4 млн. руб.



Подготовлены технические задания:

Разработка и создание инновационной мишенной станции, опытных образцов мишеней и масс-сепаратора для получения и наработки радионуклидов альфа-эмиттеров Ra-223,224 и Ac-225, а также других медицинских радиоизотопов масс-сепараторным методом на циклотроне Ц-80. Тестирование созданной системы при токе протонов 100 мкА – 373,26 млн. руб.

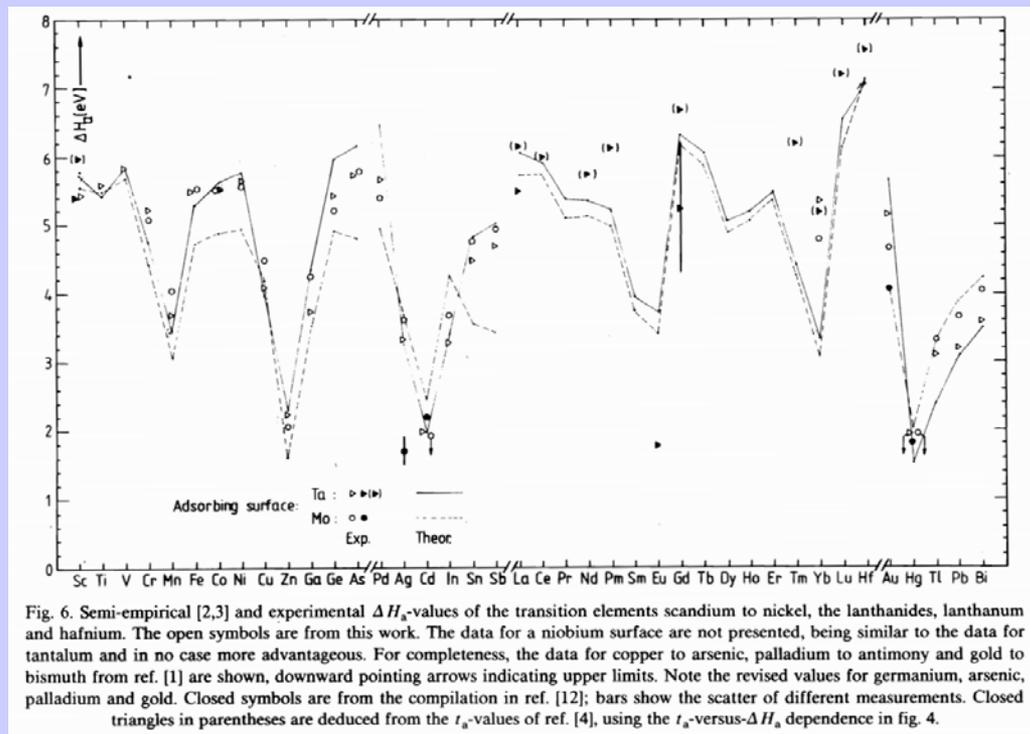
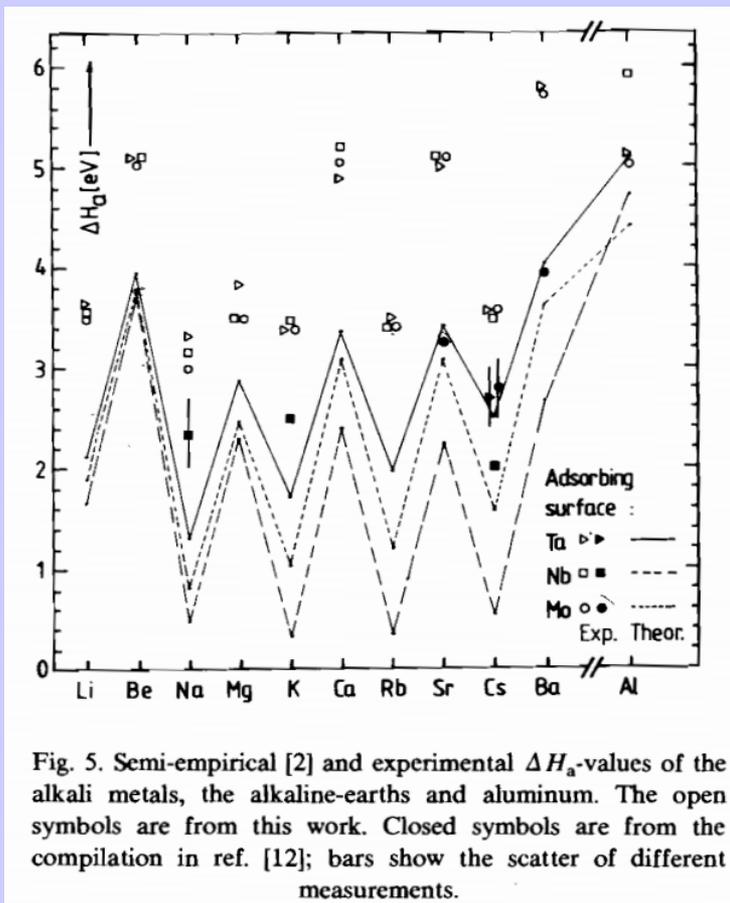
Разработка и создание инновационной мишенной станции, опытных образцов мишеней и устройства транспортировки облученных мишеней в горячие камеры для получения и наработки генераторных радионуклидов ^{82}Sr и ^{68}Ge и других радиоизотопов на циклотроне Ц-80. Тестирование созданной системы при токе протонов 100 мкА – 483 млн.руб.

Новый подход:

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

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

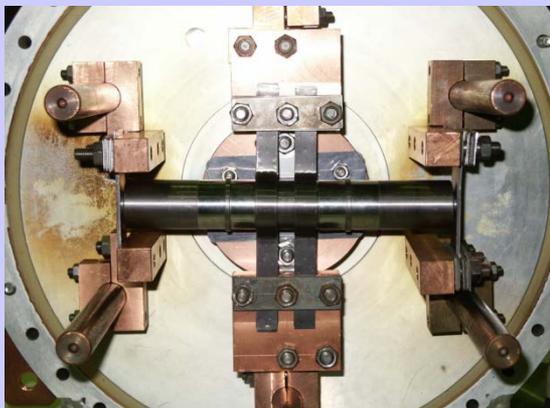
R. Kirchner, Nucl. Instr. and Meth. B26(1987) 204 -212



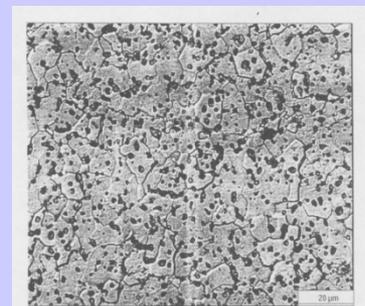
Энергии десорбции и температуры кипения пар некоторых элементов

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

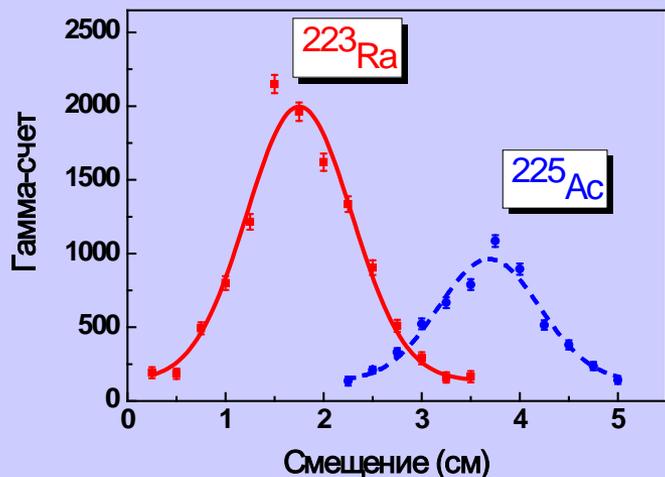
Принцип масс-сепараторной мишени: быстрый выход нуклидов - продуктов реакции при высокой температуре из мишенного вещества при полном его сохранении



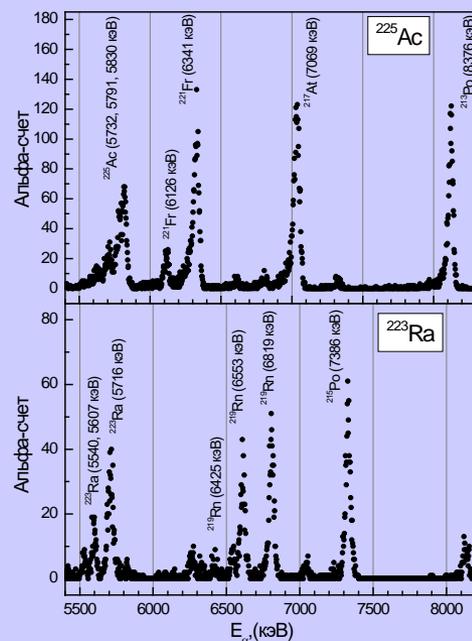
Мишенное устройство с мишенным веществом из монокарбида $U-238$, максимальной рабочей температурой $2400^{\circ}C$, и мощностью резистивного нагрева до 8 кВт



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



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



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

Новый метод получения изотопного генератора альфа-эмиттера $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$

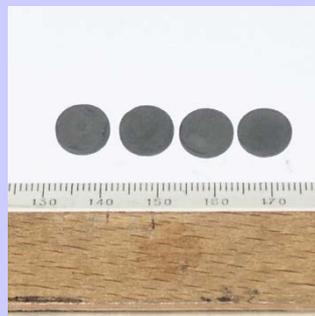
Прототип мишенного устройства для высокотемпературного выделения получаемых радионуклидов



Температура выделения ^{212}Pb - 1230 °C

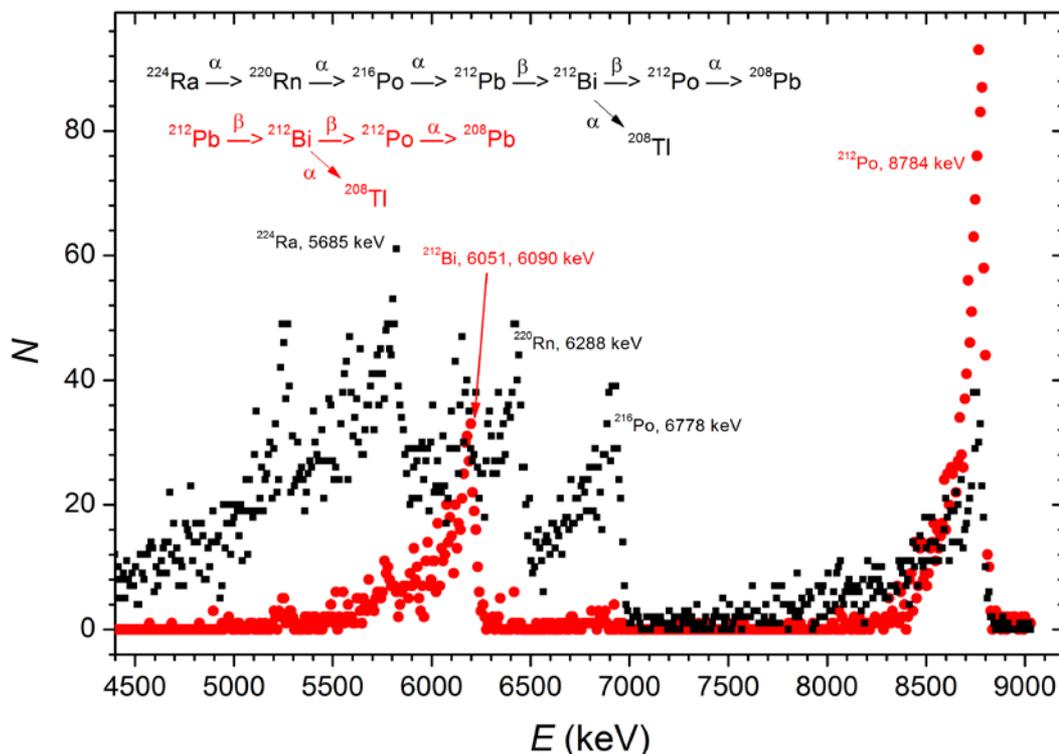
Температура выделения ^{224}Ra - 1500 °C

Новый мишенный материал карбид тория (ThC) высокой плотности



Температура плавления - 2500 °C

Температура кипения \geq 4000 °C

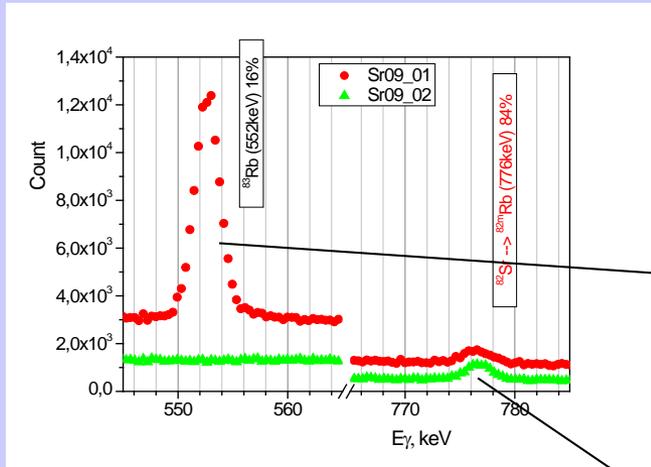


Альфа спектры селективно выделенных на охлаждаемый коллектор ^{212}Pb (1230 °C) и ^{224}Ra (1500 °C) из нового мишенного материала карбида тория (ThC) высокой плотности

Преимущества:

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

A new "alternative" method separation of radionuclides from irradiated target material



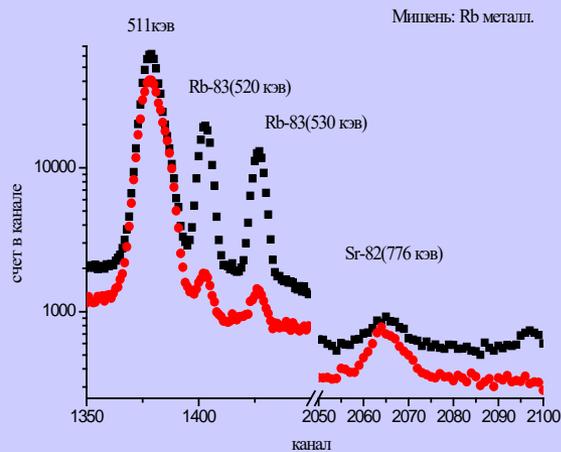
Part of gamma spectra of irradiated RbCl before and after heating in vacuum at a temperature higher 900° C for 1 hour.



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 "альтернативного" метода для выделения изотопов лютеция из облученного мишенного материала в виде металлического рубидия

Для лечения рака простаты эффективно используется радионуклид - лютеций-177.

Целевой радиоизотоп ^{177}Lu продукт распада ^{177}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}Lu - стабильный изотоп ^{177}Hf .

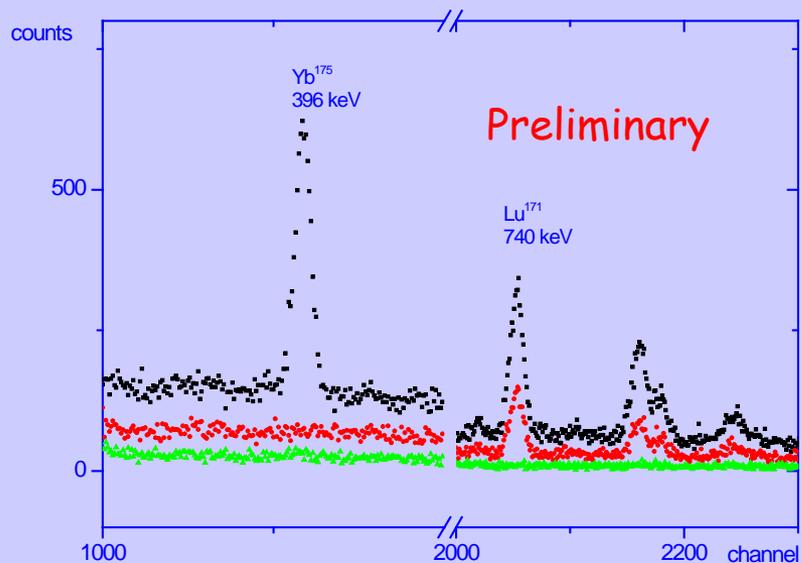
Длина пробега β -частицы ^{177}Lu в биологических тканях (<2 мм) обеспечивает

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.

до нагрева
после нагрева
после смыва

Заключение

С использованием нового метода высокотемпературного выделения целевых радионуклидов в высоком вакууме получены первые результаты по выделению генератора альфа-эмиттера $^{212}\text{Pb}/^{212}\text{Bi}$, а также бета излучателя Lu-177 , получаемого в реакции на тепловых нейтронах.

Выигранные аванпроекты по использованию новых методов получения генераторных радионуклидов Sr-82 и Ge-68 , а также радионуклидов альфа-эмиттеров Ra-223,224 и Ac-225 позволяют надеяться на получение финансирования от Росатома на проектирование и строительство двух соответствующих инновационных мишенных станций.

Написаны и согласованы с НИИЭФА два технических задания на НИОКР по созданию этих станций на пучках Ц-80.

Публикации

V.N. Panteleev, A.E. Barzakh, L.Kh. Batist, D.V. Fedorov, V.S. Ivanov, S.A. Krotov, P.L. Molkanov, F.V. Moroz, S.Yu. Orlov, Yu.M. Volkov, *Target Development for Cu-67, Sr-82 Radionuclide Production at the RIC-80 Facility*. *Physics of Particles and Nuclei*, 2018, Vol. 49, No. 1, pp. 75-77

В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах, Л.Х. Батист, Д.В. Федоров, В.С. Иванов, С.А. Кротов, П.Л. Молканов, С.Ю. Орлов, М.Д. Селиверстов, Ю.М. Волков. *Новый метод получения генераторного радионуклида Sr-82 и других медицинских радионуклидов*. *Журнал технической физики*, том 88, вып. 9, (2018) 1296.

Конференции

Panteleev V.N., et al., *New method development for medical radionuclide Ra-223,224 and Ac-225 production*. Sixth international conference on radiation and application in various fields of research - RAD2018
RAD -2018 Conference, Ohrid, June 18-22.

Seliverstov M.D., et al., *Surface ionization ion source of a high efficiency*. International conference on electromagnetic isotope separators and related topics, CERN, Geneva, 16-21 Sept. 2018.

Пантелеев В.Н. и др. Радиоизотопный комплекс РИЦ-80. *Разработка новых методов получения радионуклидов для медицины*. Первый Международный Форум онкологии и радиологии, Москва, 23-28 сентября.

Пантелеев В.Н. и др. Радиоизотопный комплекс РИЦ-80. *Новые методы получения генераторного радионуклида Sr-82 и других медицинских радионуклидов*. Девятая Российская конференция с международным участием "Радиохимия 2018," 17-21 сентября, 2018 г., Санкт-Петербург.