

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

---

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*На правах рукописи*

---

*Подпись аспиранта*

Тиба Али

---

*ФИО аспиранта*

Разработка методики получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  в ядерной реакции  
 $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$  на циклотроне МГЦ-20 для медицинского применения

---

*наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)*

03.06.01 Физика и астрономия

---

*отрасль науки (цифр и наименование научной специальности)*

03.06.01\_10 Физика атомного ядра и элементарных частиц

---

*наименование направленности (цифр и наименование направления)*

Академическая степень

**Исследователь. Преподаватель-исследователь**

---

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Научный руководитель: *Карасев Платон Александрович, профессор,  
д-р физ.-мат. наук*

---

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Санкт-Петербург, 2022

Научный доклад выполнен в высшей инженерно-физической школе Института электроники и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: *Карасев Платон Александрович, профессор, д-р физ.-мат. наук*

---

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Рецензент: *Бакаев Виктор Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент высшей школы фундаментальных физических исследований.*

---

*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

По своей природе радиоактивные изотопы нестабильны и могут менять зарядовое состояние, массу ядра и т. д. в результате радиоактивного распада испуская при этом разные виды излучений. Эти излучения способны производить ионизацию вещества и поэтому могут быть полезны для использования в медицине. Раздел медицины, использующий ионизирующие излучения и радиоактивные изотопы (в качестве радиофармпрепаратов) для медицинских целей, называется ядерной медициной. Ядерная медицина является важным инструментом в лечении и диагностике ряда заболеваний, в том числе рака [1].

Радиоизотопы по-разному используются как для диагностических (ПЭТ или ОФЭКТ визуализация), так и для терапевтических процедур в зависимости от их физико-химических характеристик. Среди различных изотопов изотоп  $^{64}\text{Cu}$  уникален тем, что он испускает три различных вида излучений ( $\gamma$ -кванты,  $\beta^+$  и  $\beta^-$  частицы). Благодаря испусканию  $\beta^+$  и  $\beta^-$  частиц, этот изотоп можно использовать, как для ПЭТ визуализации, так и для направленной терапии [2].

Изотоп  $^{64}\text{Cu}$  имеет известную химию, которая позволяет его использовать либо в ионной форме ( $^{64}\text{Cu}^{+2}$ ), либо в форме радиофармпрепарата. Использование изотопа  $^{64}\text{Cu}$  в ионной форме способствует удешевлению процесс получения изотопа и делает этот процесс доступным с экономической точки зрения, поскольку отсутствует процесс радиомаркировки дорогостоящих молекул-носителей. Известная химия меди также позволяет использовать изотоп  $^{64}\text{Cu}$  в качестве радиофармпрепарата, путем его присоединения к различным типам молекул (пептиды, антитела и наночастицы) и это приводит к образованию стабильных радиофармпрепаратов с хорошими характеристиками с точки зрения медицины [3,4].

Изотоп  $^{64}\text{Cu}$  может быть получен либо на циклотроне (с использованием протонов), либо на реакторе (с использованием тепловых или быстрых нейтронов). Получение этого изотопа в результате нейтронных реакций имеет ряд ограничений, таких как низкая результирующая удельная активность, ограничение на поток нейтронов и объем мишени. По этой причине представляется, что реакция  $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$  является подходящей реакцией для процесса получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$ , поскольку энергии протонов 10–15 МэВ достаточно для получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  и сечение этой ядерной реакции довольно высокое. В качестве мишени можно использовать как обогащенный, так и природный никель. Использование обогащенной никелевой мишени имеет много проблем, в том числе: обогащенный никелевый порошок - очень дорогой материал, требование к электроосаждению никеля на золотую подложку в сложных условиях (например: время процесса электроосаждения 24–48 часов) и требование к восстановлению мишени после завершения получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  для повторного использования. Все предыдущие причины делают использование обогащенной никелевой мишени непригодным с экономической точки зрения. Были сделаны попытки использования природной никелевой мишени [5,6], однако, предложенные методики также далеки от оптимальных. В данной работе рассматриваются пути эффективного получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  облучением природной никелевой мишени протонами с энергией 10–15 МэВ и способы его радиохимического выделения и очистки.

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является разработка методики получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  путем облучения природной никелевой мишени протонами на циклотроне МГЦ-20 и разработка радиохимической технологии выделения и очистки изотопа  $^{64}\text{Cu}$  из облученной мишени.

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие задачи:

1. Определение сечения ядерной реакции наработки изотопа  $^{64}\text{Cu}$  и возможных побочных изотопов.
2. Разработка методики моделирования и численного расчета наработки всех образующихся изотопов путем облучения протонами никелевой мишени.
3. Оптимизация получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  из природного никеля при облучении протонами с энергией 10 и 15 МэВ на циклотроне МГЦ-20.
4. Облучение природной никелевой мишени протонами для получения информации об активации мишени, проверки расчетных данных и сравнения экспериментальных и расчетных результатов.
5. Разработка процесса радиохимического разделения при работе на природном никелевом растворе.
6. Проверка эффективности технологии разделения при работе с радиоактивными метками (изотопы никеля и кобальта).

### **Научная новизна**

В рамках исследований была проведена разработка расчетной методики получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  из природной смеси изотопов никеля для различных параметров облучения (энергия протонов, ток циклотрона, время облучения и толщина мишени). Получено экспериментальное подтверждение модельных результатов на циклотроне МГЦ-20. Разработана эффективная радиохимическая технология выделения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  из облученной природной фольги и его очистки от примесей.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Значимость работы заключается в разработке расчетной методики для получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$ . Разработанная методика расчета позволяет: 1) определение толщины мишени, оптимальной для получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$ , 2) достижение к параметрам, подходящим для получения максимального количества изотопа  $^{64}\text{Cu}$  с уменьшением образования других изотопов, и 3) определение распределения наработанной активности всех изотопов в зависимости от толщины

мишени (в случае использования мишени в виде нескольких фольг). С другой стороны разработанная технология радиохимического разделения позволяет обработку никелевых природных фольг после облучения и очистку изотопа  $^{64}\text{Cu}$  от изотопов никеля и кобальта.

### **Достоверность и апробация работы**

Разработанная методика расчета дала результаты, совпадающие с литературными данными, в части, где сопоставление было возможным. С другой стороны полученные экспериментальные данные в этой работе, достаточно хорошо совпали с расчетами.

Результаты данного исследования, представлялись и обсуждались на следующих научных конференциях:

- Неделя науки ИФНИТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2020.
- International Conference PhysicA.SPb/2021, ФТИ. им.А.Ф.Иоффе, 2021.

### **Публикации**

Опубликованы 4 статьи в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

### **Представление научного доклада: основные положения**

- ❖ Результаты моделирования и расчета наработки изотопа  $^{64}\text{Cu}$  и побочных изотопов путем облучения протонами мишени из природного никеля,
- ❖ Результаты облучения протонами никелевой фольги на циклотроне МГЦ-20, сравнение между данными эксперимента и расчетными результатами,
- ❖ Результаты разработки технологии и оптимизации этапов радиохимического разделения

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### Объекты и методы исследования

Мишенью для получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  на циклотронах может служить как природный, так и обогащенный (на 99,6%) никель. Поскольку и как известно, приготовление мишени из обогащенного материала очень дорого, использование дешевой мишени из природного никеля кажется более привлекательным. Недостатком использования природной никелевой мишени является низкое содержание изотопа  $^{64}\text{Ni}$  в мишени и образование других радиоизотопов (побочных продуктов) при облучении протонами, что приводит к сложному химическому разделению и выделению  $^{64}\text{Cu}$  из этих примесей. Однако правильный выбор 1) энергии протонов, соответствующей максимуму сечения реакции  $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ , 2) времени выдержки мишени после облучения и 3) смолы ионообменной колонки, используемой для процесса химического разделения позволяют во многом обойти эти трудности.

По предыдущим причинам, в качестве основного материала в данном исследовании была выбрана мишень из природного никеля (фольги с естественным изотопным составом) для проведения расчета и облучения мишени протонами на циклотроне МГЦ-20. В табл. 1 представлен изотопный состав природного химически чистого никеля.

Табл. 1. Физические характеристики и изотопный состав природного никеля.

Изотоп	распространенность изотопов	Период полураспада	Тип распада
$^{58}\text{Ni}$	68%		стабильный
$^{59}\text{Ni}$	редкий	$7.6 \times 10^4$ лет	Захват электронов
$^{60}\text{Ni}$	26%		стабильный
$^{61}\text{Ni}$	1,1%		стабильный
$^{62}\text{Ni}$	3,6%		стабильный
$^{63}\text{Ni}$	Синтетический изотоп	100 лет	Бета распад
$^{64}\text{Ni}$	0,9%		стабильный

Вся экспериментальная работа была проведена на циклотроне МГЦ-20 в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Следующий рисунок показывает мишенную станцию, смонтированную на канале циклотрона МГЦ-20 для облучения мишени протонами и получения разных изотопов.



Рис. 1. Мишенное устройство циклотрона МГЦ-20

Мишени закрепляли на водоохлаждаемой подложке (рис. 2) для поддержания надлежащей температуры во время облучения.



Рис. 2. Система водяного охлаждения медной мишени, синий шланг - подача воды, красный шланг - отвод воды

Для удержания фольги во время облучения использовалось держатель мишени, выполненный из меди (рис. 3), поскольку медь имеет высокий коэффициент теплопроводности и это помогает эффективно уводить тепло во время облучения.

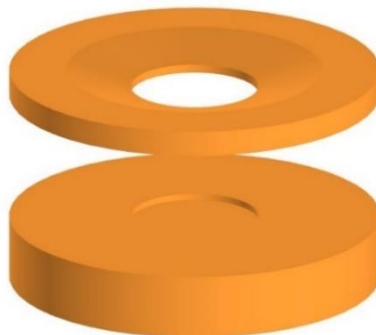


Рис. 3. Медный держатель для удержания фольги во время облучения.

После облучения фольгу Ni необходимо растворить, чтобы получить форму, подходящую для измерения активности, проведения спектрометрического анализа и очистки изотопа  $^{64}\text{Cu}$  от других изотопов. Для проведения гамма-спектрометрического анализа был использован полупроводниковый детектор на основе сверхчистого германия серии GEM-FX5825 и многоканальный цифровой анализатор типа DSPec-50. Жидкосцинтилляционный спектрометрический комплекс (типа СКС-07П-Б11) использовался для бета-спектрометрического анализа

Химическая обработка включает в себя следующие этапы:

1. Подготовка колонки, содержащей смолу АВ-17, для работы,
2. Выдержка мишени 8–12 ч после облучения для распада короткоживущих изотопов,
3. Растворения фольги из природного никеля в  $\text{HCl}$  при  $100^{\circ}\text{C}$
4. Выпаривание раствора досуха и остывание сухого осадка до комнатной температуры,
5. Растворение сухого осадка снова в (6М)  $\text{HCl}$  (взятие аликвоты из полученного раствора с точно известным объемом для анализа),
6. Проливка раствора через колонку,

7. Выгонка содержания колонки при промывке колонки либо (0,5М) HCl, либо колонку промыть 1-ю свободным объемом воды, а затем 1-ю свободным объемом (0,1 или 0,5 М) HCl с повторением 3 раза,
8. Выпаривание раствора содержания колонки досуха при 200<sup>0</sup>С.

Как было отмечено выше, для получения изотопа <sup>64</sup>Сu можно использовать пучок протонов с энергией 10–15 МэВ. Протоны с энергиями 10–15 МэВ могут вызывать в мишени различные ядерные реакции на разных изотопах никеля и таким образом приводить к образованию разных изотопов в качестве побочного продукта. Из сказанного следует, что полезно знать суммарный (как результат различных реакций, см. таблица 2) выход каждого из изотопов и сравнивать его с выходом изотопа <sup>64</sup>Сu.

Табл. 2. Изотопы, образующиеся в мишени при облучении протонами природной смеси изотопов никеля.

Изотоп	Период полураспада	Ядерная реакция	E <sub>threshold</sub> (МэВ)	σ (мб) при энергии 15 МэВ	σ (мб) при энергии 10 МэВ
<sup>55</sup> Co	17,5 часов	<sup>58</sup> Ni(p,α)	1,36	35,7	8,7
<sup>57</sup> Co	271,74 дней	<sup>58</sup> Ni(p,2p) <sup>58</sup> Ni(p,p+n) <sup>57</sup> Ni→ <sup>57</sup> Co <sup>60</sup> Ni(p,α) <sup>61</sup> Ni(p,n+α) <sup>62</sup> Ni(p,2n+α) <sup>58</sup> Ni(p,d)	8,3 12,3 0,3 8,2 18,9 10	149,3	4,9
<sup>58</sup> Co	70,86 дней	<sup>61</sup> Ni(p,α) <sup>62</sup> Ni(p,α+n)	0,7 10,3	0,88	0,78
<sup>57</sup> Ni	35,6 часа	<sup>58</sup> Ni(p,p+n) <sup>58</sup> Ni(p,d)	12,4 10,1	8,8	-
<sup>60</sup> Cu	23,7 мин	<sup>60</sup> Ni(p,n)	7	58,8	79,8
<sup>61</sup> Cu	3,3 часа	<sup>61</sup> Ni(p,n) <sup>62</sup> Ni(p,2n)	3,1 13	186	472
<sup>62</sup> Cu	9,67 мин	<sup>62</sup> Ni(p,n)	5	359,3	498,9
<sup>64</sup> Cu	12,7 часов	<sup>64</sup> Ni(p,n)	2,5	206	647

С целью проведения расчета выходов изотопов были использованы сечения ядерной реакции (приведены в табл. 2), решение уравнения прохождения протонов через вещество (ур. 1) и уравнение образования изотопов (ур. 2) при облучении протонами мишени из природного никеля на циклотроне:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{4\pi}{m_e c^2} \frac{nz^2}{\beta^2} \left( \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left[ \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I} \right) \right] \quad (1)$$

где  $-dE/dx$ , МэВ/см, – удельные ионизационные потери ( $x$  – глубина проникновения протонов);  $z$ , – зарядовые числа снаряда;  $m_e$ , г, – масса электрона;  $e$ , Кл, – заряд электрона;  $c$ , см/с, – скорость света;  $\beta$  – отношение скорости снаряда к скорости света ( $\beta = v/c$ );  $I$ , эВ, – средний ионизационный потенциал;  $\epsilon_0$ , ф/м, – электрическая постоянная;  $n$ , 1/см<sup>3</sup>, – электронная концентрация мишени.

Наработка всех изотопов на различной глубине в мишени определяется по формуле (2):

$$\frac{dN_i}{dx} = \left( \frac{Jn_f}{\lambda e} \right) (1 - \exp(-t_{rad}\lambda)) \sigma(x) \quad (2)$$

где  $N_i$ , 1/см<sup>3</sup> – количество атомов типа  $i$  производимого радиоизотопа;  $J$ , А, – ток циклотрона;  $n_f$  – концентрация ядер изотопа никеля в природном никеле;  $\lambda$ , 1/с – постоянная распада производимого радионуклида;  $t_{rad}$ , с – время облучения мишени.

Для расчета активности каждого изотопа после окончания облучения и после различных времени ожидания использовалось уравнение:

$$A_t = A_0 \exp(-\lambda t), \quad (3)$$

где  $A_0$ , с<sup>-1</sup>, активность изотопа при  $t = 0$ ;  $A_t$ , с<sup>-1</sup>, активность изотопа после времени ожидания  $t$ , с;  $\lambda$ , с<sup>-1</sup>, постоянная распада изотопа

## Результаты и их обсуждение

С целью получения информации об активации никелевой мишени и определения состава изотопов, который образуется в результате ядерных реакций между протонами и изотопами никеля, были облучены 2 образца природного никеля (толщина каждого 300 мкм) на циклотроне МГЦ-20. Для облучения использовался пучок протонов с энергией 15 МэВ (ток пучка 2 мкА) и время облучения – 2 ч. Ниже на рисунках 4–6 представлены результаты спектрометрического анализа двух облученного образца. Видно, что спектры содержат не только энергетические пики 511 и 1345,44 кэВ (энергетические пики, испускаемые от изотопа  $^{64}\text{Cu}$ ), но и другие пики. Эти пики связаны с существованием и образованием других радиоизотопов. Эти изотопы ( $^{55}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Ni}$ ,  $^{60}\text{Cu}$ ,  $^{61}\text{Cu}$ ,  $^{62}\text{Cu}$  и  $^{64}\text{Cu}$ ), определенные при сравнении полученных данных с библиотеками “Decay Radiation Search” и “The Lund/LBNL Nuclear Data Search”.

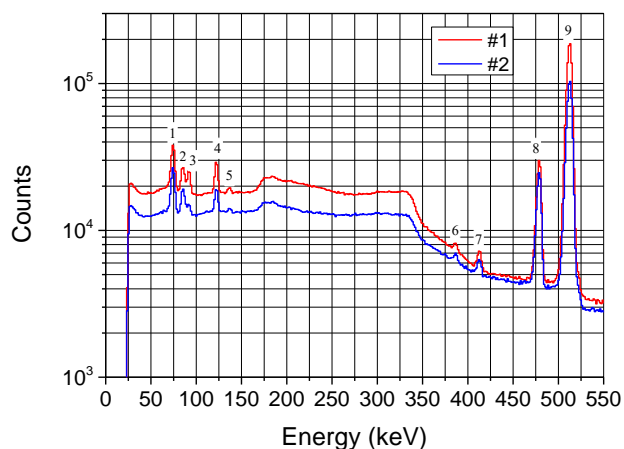


Рис. 4. Спектр гамма-излучения от 0 до 550 кэВ, полученный от облученных никелевых природных образцов. #1- спектр от первого образца, #2- спектр от второго образца.

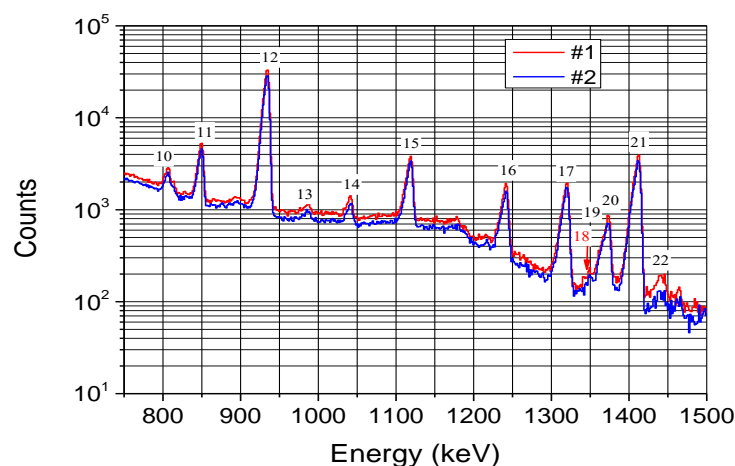


Рис. 5. Спектр гамма-излучения от 750 до 1500 кэВ, полученный от облученных никелевых природных образцов.

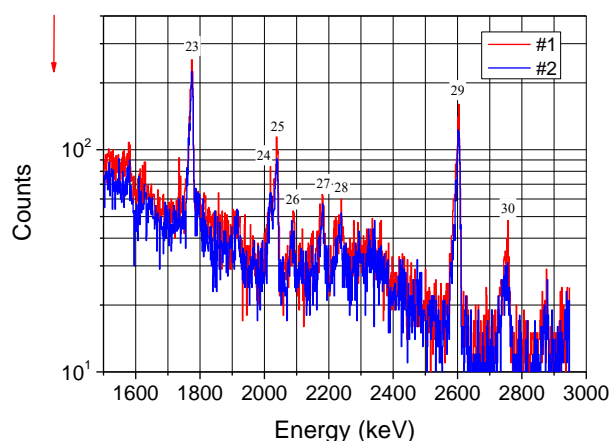


Рис. 6. Спектр гамма-излучения от 1500 до 3000 кэВ, полученный от облученных никелевых природных образцов.

Исходя из проведенных измерений, необходимо выполнить моделирование наработки всех изотопов при различных других условиях для достижения соответствующих параметров (энергия протонов, ток пучка, время облучения и толщина мишени) которые позволят оптимизировать процесс получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  и уменьшить образование примесей.

Для оптимизации получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  из природного никеля проведено моделирование наработки всех предыдущих изотопов (см. в табл. 2). Был определен выход каждого изотопа при использовании протонов с начальными кинетическими энергиями 15 и 10 МэВ, тока циклотрона, равного 2 мкА, 1.5 ч

время облучения и мишени из природного никеля. На рис. 7 представлены результаты вычисления активности изотопов  $^{55}\text{Co}$  и  $^{64}\text{Cu}$  для мишеней различной толщины.

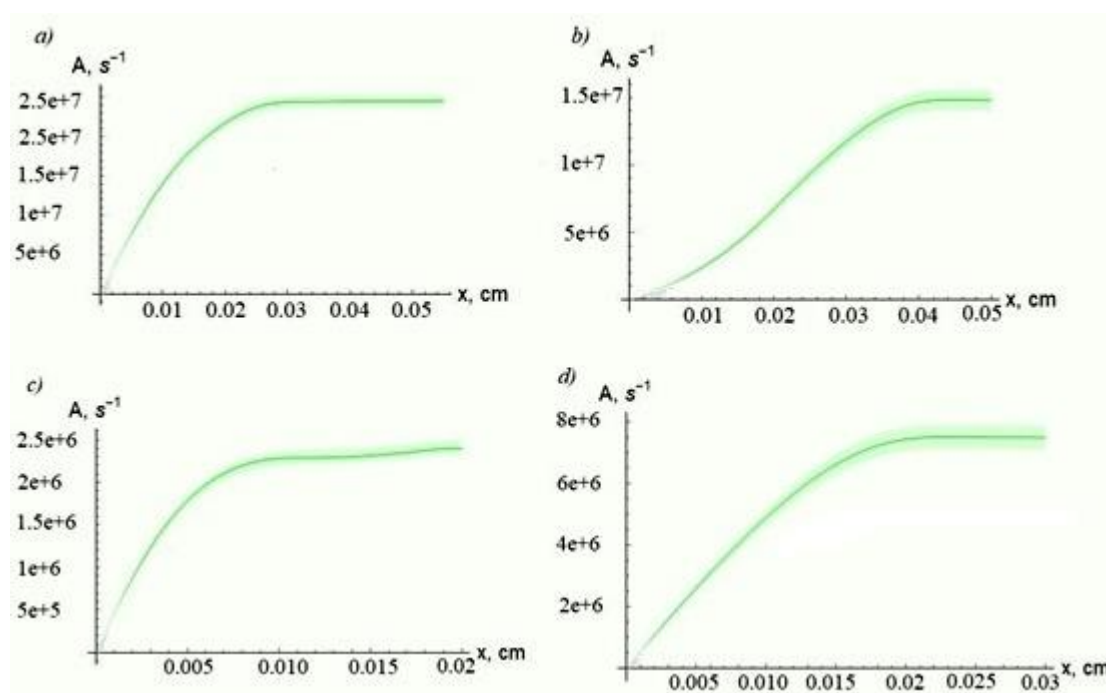


Рис. 7. Зависимости наработанной активности радиоизотопов  $^{55}\text{Co}$  (a, c) и  $^{64}\text{Cu}$  (b, d) от толщины природной никелевой мишени при облучении протонами с начальной кинетической энергией 15 МэВ (a, b) и 10 МэВ (c, d), для времени облучения 1.5 ч.

Результаты расчетов активности наработанных изотопов для различных временных выдержек мишени после окончания облучения приведены в табл. 3, показывающей тоже результаты сравнения значений активности наработанных изотопов к активности наработанного изотопа  $^{64}\text{Cu}$ , образующихся в мишени в результате ядерных реакций при облучении природной смеси изотопов никеля протонами.

Поскольку в природной никелевой мишени при облучении протонами образуется ряд радиоизотопов с коротким периодом полураспада, эффективно проведение облучения мишени с использованием энергии протонов менее 15 МэВ (для уменьшения выхода побочных продуктов) и выдерживать мишень в течение 12–17 часов перед процессом химической обработки мишени и очистки изотопа  $^{64}\text{Cu}$  от примесей (как следует из данных в табл. 3) с целью ослабления активности

изотопов  $^{60}\text{Cu}$  и  $^{62}\text{Cu}$ . Из данных, приведенных в таблице 3 следует, что при оптимизации времени выдержки мишени после облучения, с использованием подходящей схемы химического отделения изотопов никеля и кобальта можно достичь радионуклидной чистоты изотопа  $^{64}\text{Cu}$ , по крайней мере, 99%.

Табл. 3. Результаты расчетов и сравнения значений активности наработанных изотопов к активности изотопа  $^{64}\text{Cu}$ , при облучении природной смеси изотопов никеля протонами 10 и 15 МэВ, ток циклотрона 2 мкА и 1.5 ч время облучения.

Изотоп	Активность $A_t \text{ c}^{-1}$ (Отношение $A_t/A_t^{64\text{Cu}}$ )						
	$t=0$	$t=9,67$ мин	$t=23,7$ мин	$t=3,3$ ч	$t=12,7$ ч	$t=17,5$ ч	$t=50$ ч
<i>Начальная кинетическая энергия пучка протонов – 15 МэВ</i>							
$^{55}\text{Co}$	$2,5 \cdot 10^7$ (2,3)	$2,4 \cdot 10^7$ (2,4)	$2,4 \cdot 10^7$ (2,5)	$2,1 \cdot 10^7$ (2,3)	$1,5 \cdot 10^7$ (2,8)	$1,2 \cdot 10^7$ (2,85)	$3,4 \cdot 10^6$ (4,8)
$^{57}\text{Co}$	$2,3 \cdot 10^5$ (0,02)	229996 (0,02)	229990 (0,02)	229919 (0,02)	229689 (0,04)	229572 (0,05)	229781 (0,32)
$^{58}\text{Co}$	17500 (0,002)	17498 (0,002)	17497 (0,002)	17476 (0,001)	17409 (0,003)	17375 (0,004)	17147 (0,02)
$^{57}\text{Ni}$	$4,15 \cdot 10^5$ (0,04)	413699 (0,04)	413819 (0,038)	389166 (0,04)	324061 (0,06)	295139 (0,07)	156722 (0,22)
$^{60}\text{Cu}$	$6,0 \cdot 10^8$ (54,5)	$4,5 \cdot 10^8$ (45,0)	$3,0 \cdot 10^8$ (28,0)	$1,8 \cdot 10^6$ (0,19)	–	–	–
$^{61}\text{Cu}$	$3,7 \cdot 10^7$ (3,4)	$3,5 \cdot 10^7$ (3,5)	$3,4 \cdot 10^7$ (3,2)	$1,8 \cdot 10^7$ (1,9)	$2,5 \cdot 10^6$ (0,5)	$9,3 \cdot 10^5$ (0,2)	1024 (0,001)
$^{62}\text{Cu}$	$5,7 \cdot 10^8$ (51,8)	$2,8 \cdot 10^8$ (28)	$1,0 \cdot 10^8$ (9,3)	–	–	–	–
$^{64}\text{Cu}$	$1,1 \cdot 10^7$ (1,0)	$1,09 \cdot 10^7$ (1,0)	$1,07 \cdot 10^7$ (1,0)	$9,1 \cdot 10^7$ (1,0)	$5,4 \cdot 10^6$ (1,0)	$4,2 \cdot 10^6$ (1,0)	$7,0 \cdot 10^5$ (1,0)
<i>Начальная кинетическая энергия пучка протонов – 10 МэВ</i>							
$^{55}\text{Co}$	$2,4 \cdot 10^6$ (0,30)	$2,4 \cdot 10^6$ (0,32)	$2,3 \cdot 10^6$ (0,30)	$2,1 \cdot 10^6$ (0,30)	$1,5 \cdot 10^6$ (0,40)	$1,2 \cdot 10^5$ (0,40)	$3,3 \cdot 10^5$ (0,66)
$^{57}\text{Co}$	12500 (0,001)	12499 (0,001)	12499 (0,001)	12495 (0,001)	12483 (0,003)	12476 (0,004)	12433 (0,02)
$^{58}\text{Co}$	5500 (0,0007)	5499 (0,0007)	5499 (0,0007)	5492 (0,0008)	5471 (0,001)	5460 (0,001)	5389 (0,01)
$^{60}\text{Cu}$	$1,8 \cdot 10^8$ (24,0)	$1,3 \cdot 10^8$ (17,5)	$9,0 \cdot 10^7$ (12,3)	$5,5 \cdot 10^5$ (0,08)	–	–	–
$^{61}\text{Cu}$	$2,2 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^7$	$1,1 \cdot 10^7$	$1,5 \cdot 10^6$	$5,5 \cdot 10^5$	609

	(2,90)	(2,83)	(2,74)	(1,70)	(0,4)	(0,2)	(0,001)
<sup>62</sup> Cu	$\underline{2,9 \cdot 10^8}$	$\underline{1,4 \cdot 10^8}$	$\underline{5,3 \cdot 10^7}$	–	–	–	–
	(38,6)	(19,0)	(7,3)				
<sup>64</sup> Cu	$\underline{7,5 \cdot 10^6}$	$\underline{7,4 \cdot 10^6}$	$\underline{7,3 \cdot 10^6}$	$\underline{6,3 \cdot 10^6}$	$\underline{3,7 \cdot 10^6}$	$\underline{2,8 \cdot 10^6}$	$\underline{0,5 \cdot 10^6}$
	(1,0)	(1,0)	(1,0)	(1,0)	(1,0)	(1,0)	(1,0)

*Примечание.* Представлены значения активности наработанных изотопов  $A_t$ , а также отношений величины  $A_t$  к соответствующей активности наработанного изотопа <sup>64</sup>Cu (в скобках) для различных временных выдержек  $t$  после окончания облучения. Прочерки обозначают, что активность изотопа ниже 1 распада в секунду.

Для проверки расчетных результатов было проведено облучение на циклотроне МГЦ-20. Облучение сделано с использованием энергии протонов 13 МэВ, тока пучка 4 мкА и времени облучения 3 ч. В качестве мишени брались 3 фольги Ni толщиной 100 мкм каждый с естественным изотопным составом (природная смесь изотопов никеля).

Химическая обработка облученных фольг проведена по следующему протоколу:

1. Выдержка облученных фольг 12 ч после облучения для распада короткоживущих изотопов,
2. Растворение фольг в 5 мл (11,7М) HCl в течение 4 ч при 100<sup>0</sup>С,
3. Выпаривание раствора досуха при 200<sup>0</sup>С в течение 1 ч и остывание сухого осадка до комнатной температуры,
4. Растворение снова сухого осадка 4 мл (6М) HCl,
5. Взятие аликвоты объемом 20 мкл из полученного раствора для анализа.

После завершения спектрометрического анализа аликвоты объемом 20 мкл был получен следующий спектр.

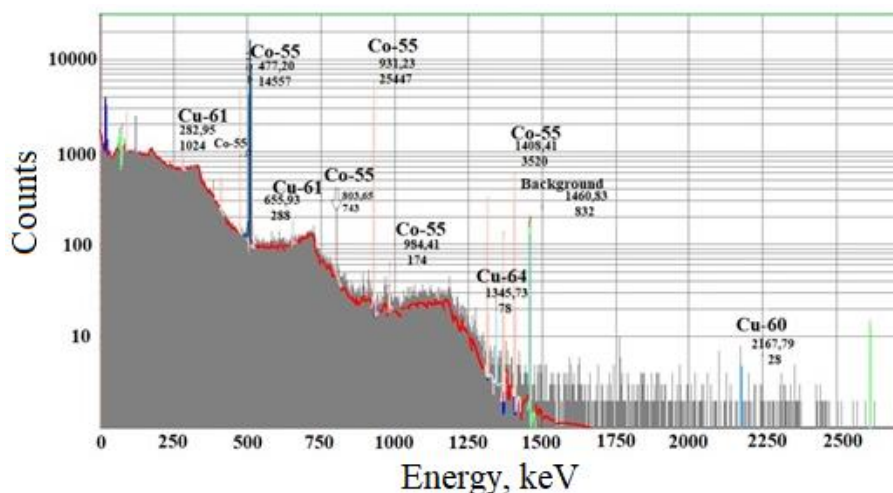


Рис. 8. Спектр от аликвоты (20 мкл), полученной из облученного препарата природной смеси изотопов никеля.

На энергетическом спектре (рис. 8) видно пик при значении энергии 1345,77 кэВ, который свидетельствует о присутствии изотопа  $^{64}\text{Cu}$  в образце. Установлено, что активность изотопа  $^{64}\text{Cu}$  в аликвоте объемом 20 мкл составила 45 кБк (с погрешностью 30 %), тогда как полный раствор (4 мл) содержал изотоп  $^{64}\text{Cu}$  с активностью 9 МБк. Эта активность достигалась через 21 ч после облучения. Таким образом, можно заключить, что активность  $^{64}\text{Cu}$  сразу по окончании облучения составляла  $30 \pm 9$  МБк.

Результат расчета наведенной активности на основе исходных данных, определяемых условиями эксперимента, приведена на рис. 9. Видно, что при использовании пучка протонов с энергией 13 МэВ оптимальной толщиной мишени для получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  является 300–350 мкм.

Из результата вычисления можно определить активность изотопа  $^{64}\text{Cu}$  при облучении мишени толщиной 300 мкм в течение 3 часов протонами с энергией 13 МэВ (ток пучка 4 мкА). Результат моделирования показывает, что активность изотопа  $^{64}\text{Cu}$  составляет  $47 \pm 3$  МБк. Достижимый уровень значимости наблюдаемого отклонения результата расчета от измерения 0,07. Таким образом результаты измерения и расчета находятся в согласии при уровне значимости 0,05.

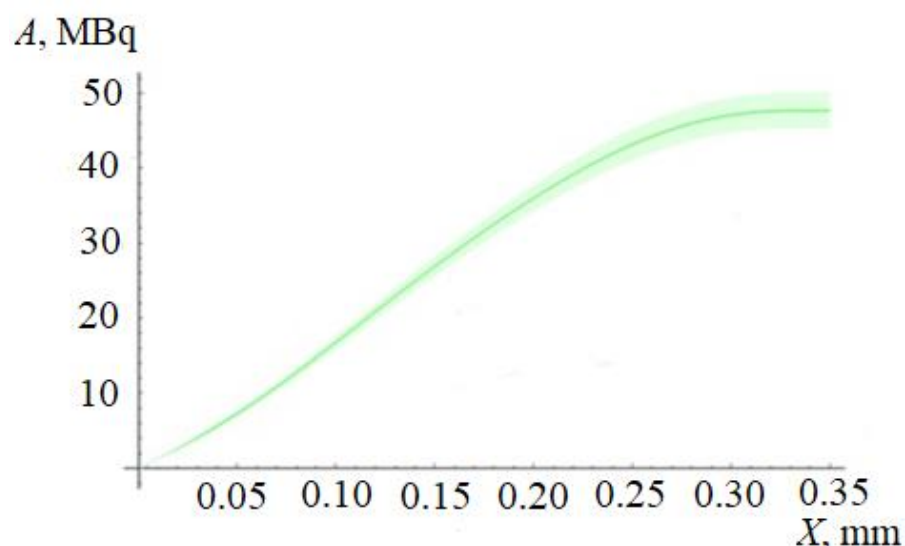


Рис. 9. Зависимости наработанной активности изотопа  $^{64}\text{Cu}$  от толщины мишени из природного никеля при использовании протонов с начальной кинетической энергией 13 МэВ для времени облучения 3 ч.

Линиями показаны кривые зависимостей, а полосами – погрешности их определения (связаны с погрешностями нахождения сечения реакции)

Для разработки технологии радиохимического разделения были проведены серия экспериментов на растворе природного никеля, полученного путем растворения двух природных никелевых фольг (толщина каждой 150 мкм) в (6M) HCl. Уменьшение времени растворения было важной задачей, поскольку для полного растворения в большинстве случаев требуется около 3 часов, и это приводит к потере активности при работе с облученными фольгами. Для ускорения растворения использовался с медленным добавлением перекись водорода. Время растворения было успешно сокращено до 10–15 минут.

Второй задачей было определение размера зерна смолы АВ-17 эффективно для процесса разделения. Использовалась смола АВ-17 размером зерна (150μ). Эта смола была исключена из-за медленной проливки раствора через колонну. Так как время образования одной капли составляло 12 минут, использование такого размера зерна неэффективно и его использование приводит к большой потере времени.

В следующей таблице показаны этапы работы с использованием смолы АВ-17 с размером зерна (14/32 $\mu$ ).

Табл. 4. Этапы работы на природном никеле с использованием смолы АВ-17 (14/32 $\mu$ ).

Этап работы	Время проведения этапа	Отметка исполнителя	Примечание
1. Подготовка колонки к работе (промывка колонки последовательно водой, 6М HCl, водой).	22 мин	Объем смолы 2 мл	20 мл водой 10 мл (6М) HCl 20 мл водой
2. Растворение фольги из природного никеля при нагреве.	10 мин	2 фольги, толщина каждой 150 мкм	5мл (6М) HCl + 4 мл H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> при 100 <sup>0</sup> C
3. Выпаривание раствора. Снижение температуры до комнатной.	50 мин	Ожидание 20 мин после выпаривания для снижения температуры	Первые 30 мин при 150 <sup>0</sup> C а затем при 200 <sup>0</sup> C
4. Подготовка раствора для работы	4 мин	Растворение сухого осадка	3 мл (6М) HCl
5. Проливка раствора через колонку	3 мин	4 мл = 2 свободных объема	Перед проливкой раствора, колонку промыли 4 мл (6М) HCl
6. Промывание колонки	12 мин	20 мл = 10 свободных объема	20 мл (6М) HCl
7. Выгонка содержания колонки	8 мин		2 мл водой, а затем 2 мл (0,1М) HCl с повторением три раза
8. Выпаривание раствора	30 мин		При 200 <sup>0</sup> C

После получения сухого осадка (этап № 8, рис. 10) видно, что наблюдался желтый цвет, и это означает, что раствор содержания колонки содержал изотопы никеля и колонка неэффективна для процесса очистки. Это приводит к необходимости уменьшения размера зерна смолы и увеличению объема кислоты для промывания колонки.



Рис. 10. После завершения выпаривание раствора (этап No. 8).

Следующий доступный размер зерна был (41 $\mu$ ). Табл. 5 показывает этапы работы с использованием смолы АВ-17 размером зерна (41 $\mu$ ).

Табл. 5. Этапы работы на природном никеле с использованием АВ-17 (41 $\mu$ ).

Этап работы	Время проведения этапа	Отметка исполнителя	Примечание
1. Заполнение колонки ионообменной смолой АВ-17.	37 мин		Объем смолы 1 мл
2. Подготовка колонки к работе (промывка колонки последовательно водой, 6М HCl, водой).	1ч 50 мин		10 мл водой 5 мл (6М) HCl 10 мл водой
3. Растворение фольги из природного никеля при нагреве.	10 мин		5мл (6М) HCl + 4 мл H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> при 100 <sup>0</sup> C
4. Выпаривание раствора досуха. Снижение температуры до комнатной.	33 мин	+ 10 мин для остывания до комнатной температуры	Первые 30 мин при 150 <sup>0</sup> C а затем при 200 <sup>0</sup> C
5. Подготовка раствора для работы	7 мин	Растворение сухого осадка	3 мл (6М) HCl
6. Проливка раствора через колонку	50 мин	Собрали раствор после проливки + 2 мл (6М) HCl	Перед проливкой раствора, колонку промыли 2 мл (6М) HCl

7. Промывание колонки	1 ч 30 мин	20 мл = 20 свободных объемов	20 мл (6М) HCl
8. Выгонка содержания колонки	36 мин		1 мл водой, а затем 1 мл (0,5М) HCl с повторением три раза
9. Выпаривание раствора	20 мин		При 200 <sup>0</sup> С

После завершения всех предыдущих этапов и выпаривания раствора содержания колонки (этап № 9, рис 11.6) установлено, что раствор содержал мало никеля и такой размер зерна смолы эффективно для очистки и химического разделения.

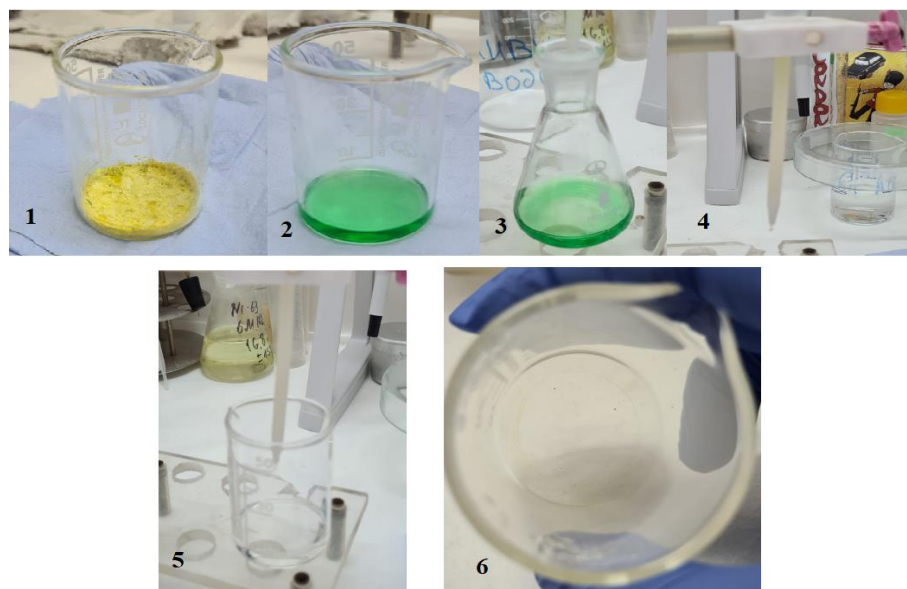


Рис. 11. 1. Выпаривание раствора никеля (этап № 4), 2. Растворение сухого осадка 3 мл (6М) HCl (этап № 5), 3. После проливки раствора и 2 мл (6М) HCl, 4. После промывания колонки 20 мл (6М) HCl (этап № 7), 5. Выгонка содержания колонки водой и (0,5М) HCl (этап № 8) и 6. Выпаривания раствора (этап № 9).

Использована метка 2 мкл изотопа  $^{63}\text{Ni}$  с активностью  $3,48 \cdot 10^5$  кБк  $\pm 15\%$  для проверки эффективности работы смолы АВ-17 размером зерна (41 $\mu$ ) как показана на табл. 6. Время полураспада изотопа  $^{63}\text{Ni}$  составляет 101,2 года и испускает 100%  $\beta^-$  ( $E_{\text{max}} = 66,9$  кэВ и  $E_{\text{avg}} = 18$  кэВ).

Табл. 6. Этапы работы очистки раствора, к которому добавлена метка изотопа никеля-63 с использованием смолы АВ-17 (41μ).

Этап работы	Время проведения этапа	Отметка исполнителя	Примечание
Растворение фольги из природного никеля при нагреве.	12 мин	2 фольги, толщина каждой 150 мкм	5мл (6М) HCl + 4 мл H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> при 100 <sup>0</sup> С
Выпаривание раствора досуха. Снижение температуры до комнатной.	50 мин	+ время для остывания температуры	Первые 30 мин при 150 <sup>0</sup> С а затем при 200 <sup>0</sup> С
Подготовка раствора для работы	5 мин	Растворение сухого осадка	5 мл (6М) HCl
Проливка раствора через колонку	1 ч 25 мин	Собрали раствор после проливки + 2 мл (6М) HCl	Перед проливкой раствора, колонку промыли 2 мл (6М) HCl
Промывание колонки	3 ч 10 мин	20 мл = 20 свободных объемов	20 мл (6М) HCl
Выгонка содержания колонки	15 мин		3 мл (0,5М) HCl

После окончания всех этапов химического разделения проводился бета-спектрометрический анализ полученных растворов (растворы показаны на рис. 12.3 и 12.4) для определения активности изотопа <sup>63</sup>Ni с использованием жидкосцинтилляционного спектрометрического комплекса (тип СКС-07П-Б11).

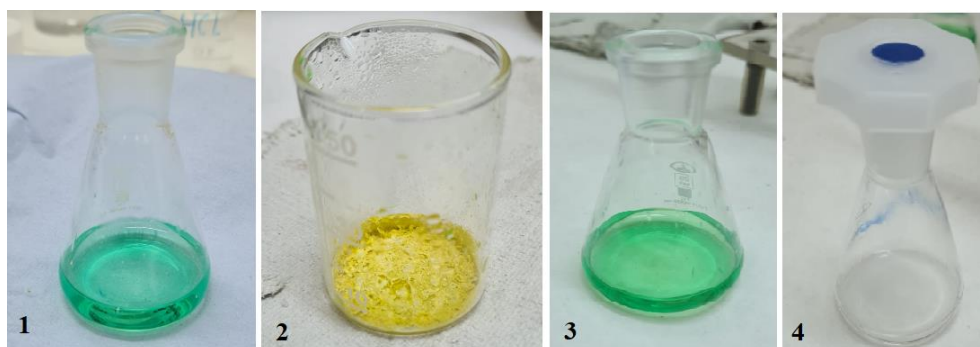


Рис. 12. 1. Раствор, полученный после растворения 2 фольги из природного никеля (суммарная толщина 300 мкм), 2. Осадок после выпаривания раствора никеля досуха, 3. После проливки раствора никеля с меткой через колонку + 2 мл (6М) HCl, 4. Выгонка содержания колонки.

Результаты спектрометрического анализа приведены ниже и показали, что активность раствора (рис. 12.3) с меткой  $^{63}\text{Ni}$  составила 174 кБк/мл  $\pm 15\%$ . Результаты анализа тоже показали, что активность раствора содержания колонки (рис 12.4) менее 0,37 Бк.

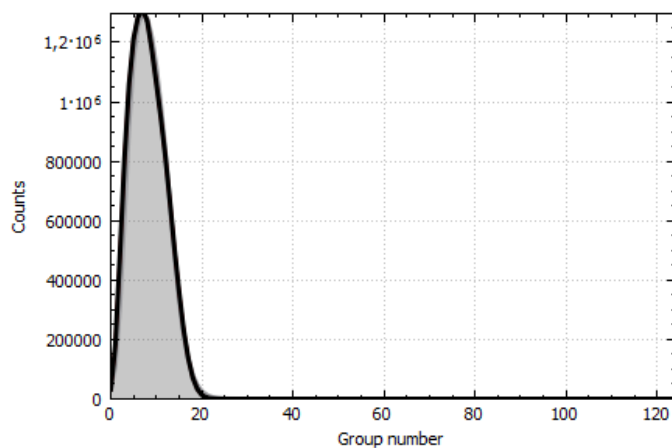


Рис. 13. Спектр аликвоты, взятой после проливки раствора никеля с меткой через колонку.

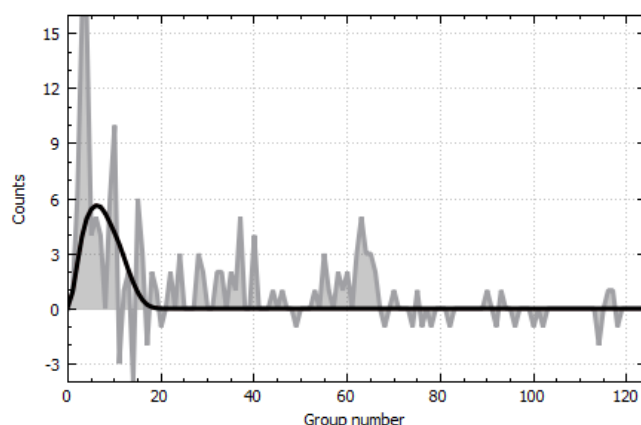


Рис. 14. Спектр аликвоты объемом 1 мл, взятой из раствора содержания колонки.

Рис. 13 показывает, что раствор объемом 7 мл (после проливки раствора никеля через колонку) содержал максимальную активность изотопа  $^{63}\text{Ni}$  и составила 174 кБк/мл. На рис. 14 показано спектр, полученный от раствора содержания колонки и видно, что этот раствор без активности (спектр фона). Из сказанного следует, что смола эффективна для процесса разделения поскольку смола не содержала изотопы никеля после проливки раствора и конечный раствор содержал очень мало активности (как ожидается) по результатам спектрометрического анализа.

Для оценки эффективности смолы при работе с кобальтом был проведен эксперимент с добавлением метки изотопа кобальта к раствору никеля. Использована метка изотопа  $^{57}\text{Co}$  объемом 20 мкл с активностью 14,5 МБк (погрешность 5%). Время полураспада изотопа  $^{57}\text{Co}$  составляет 271,74 дней. Ниже (рис. 15, табл. 7) постановлен результаты гамма-спектрометрического анализа метки кобальта.

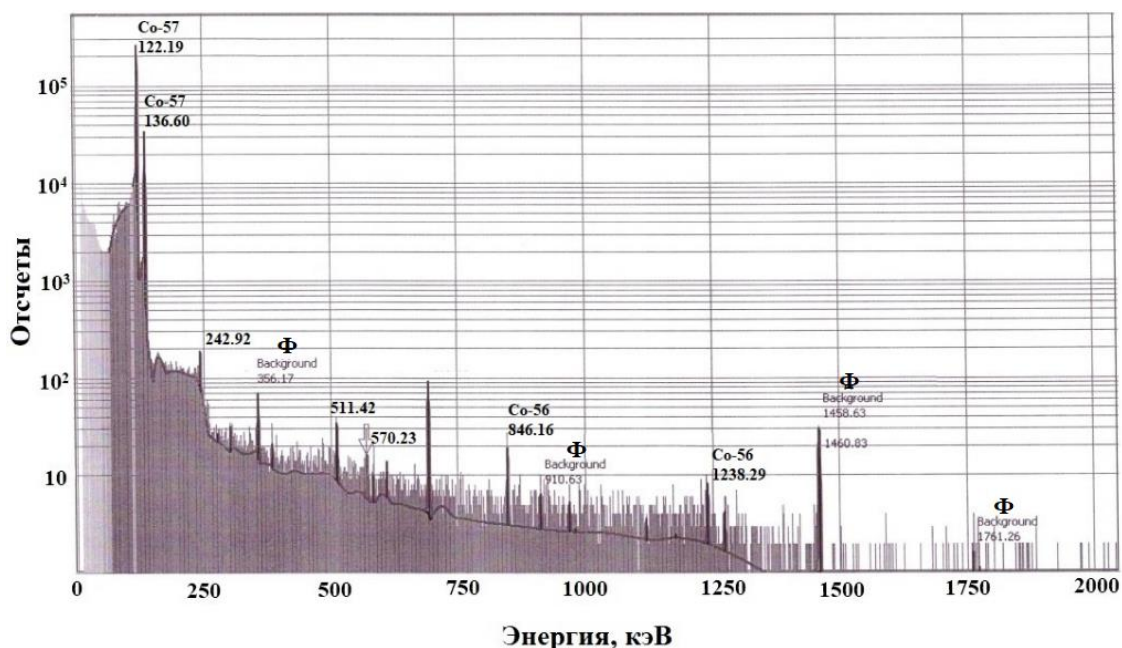


Рис. 15. Спектр гамма-излучения от метки изотопа  $^{57}\text{Co}$ . Ф- Фоновый спектр.

Табл. 7. Результаты спектрометрического анализа метки  $^{57}\text{Co}$ .

Радиоизотоп	Площадь, импульс	Абсолютная погрешность, импульс	Активность МБк	Относительная погрешность (%)
$^{57}\text{Co}$	1074000	16000	14,5	4
122,06	952000	12000	14,5	5
136,47	121000	4000	14,6	8
692,41	500	40	15	21
$^{56}\text{Co}$	130	30	0,0049	16
846,77	84	18	0,0049	22
977,41	<3,1		<0,019	
1175,10	<4,0		<0,017	
1238,29	40	9	0,0048	23
1771,35	6,5	1,5	0,0049	25
1460,83 ( $^{40}\text{K}$ )	<17			

После окончания выпаривания раствора содержания колонки флакон на рис. 16.2 использован для спектрометрического анализа.

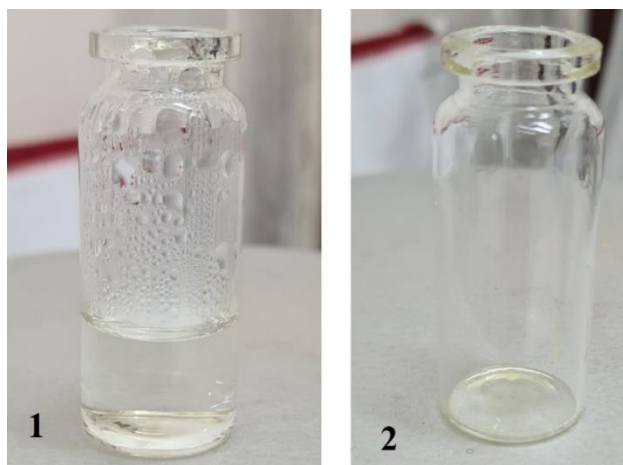


Рис. 16. 1. Раствор содержания колонки, 2. После выпаривания раствора досуха.

Результаты спектрометрического анализа приведен на рис. 17 и табл. 8 и показали, что осадка, полученного после выпаривания раствора содержания колонки содержал только 7 кБк (2000 раз меньше, чем начальная активность). Установлено, что смола АВ-17 размером зерна (41 $\mu$ ) эффективно для очистки от никеля и кобальта.

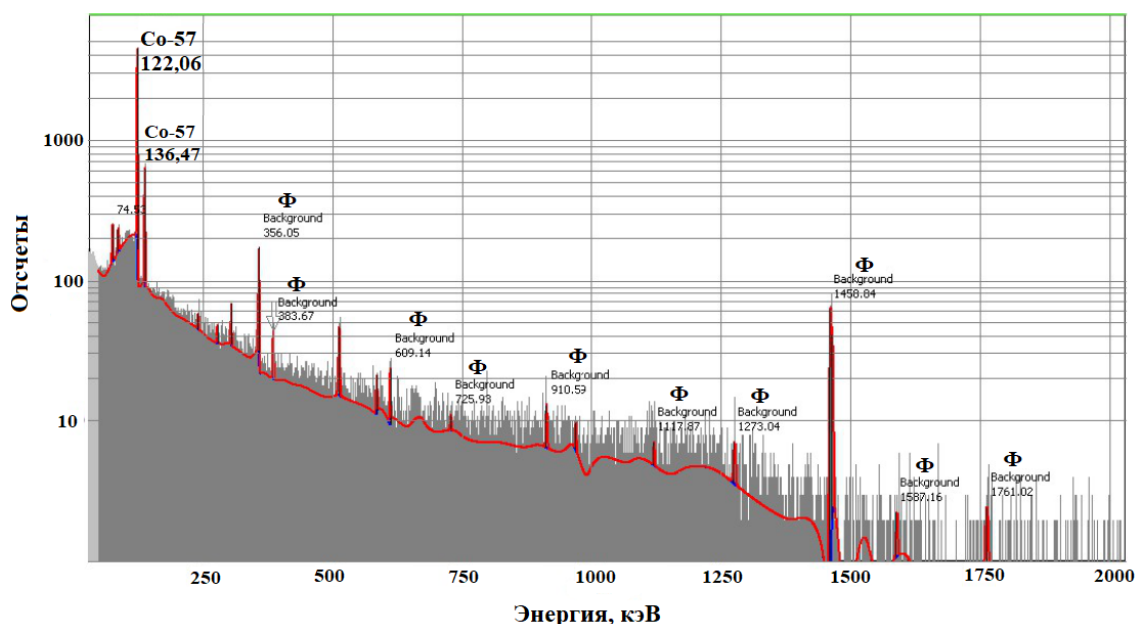


Рис. 17. Спектр гамма-излучения, полученный от осадка (приведен на рис. 7.2). Ф-Фоновый спектр.

Табл. 8. Результаты спектрометрического анализа осадка, полученного после выпаривания раствора содержания колонки.

Радиоизотоп	Площадь, импульс	Абсолютная погрешность, импульс	Активность кБк	Относительная погрешность (%)
<sup>57</sup> Со	17600	400	7,08	4
122,06	15640	270	7,0	4
136,47	2000	90	7,2	7
<sup>40</sup> К	270	50	7,8	18
1460,80	270	50	7,8	18
Неопознанный	980	60		
74,53	580	40		
85,11	400	40		
Фон	2090	70		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изотоп  $^{64}\text{Cu}$  обладает многими преимуществами, которые делают его важным для использования в ядерной медицине, поскольку этот изотоп испускает 3 типа излучения ( $\gamma$ -кванты,  $\beta^+$  и  $\beta^-$ ), что приводит к его применению либо для терапии, либо для ПЭТ визуализации

В настоящей работе разработана расчетная методика и численное моделирование для получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$ . Рассмотрен процесс наработки изотопа  $^{64}\text{Cu}$  путем облучения протонами природной никелевой мишени на циклотроне МГЦ-20. В результате моделирования была определена оптимальная толщина мишени в зависимости от энергии протонов для получения максимального количества изотопа  $^{64}\text{Cu}$  в соответствии со следующим:

1. Толщина составляет 200–300 мкм при энергии протонов 10 МэВ,
2. Толщина составляет 300–350 мкм при энергии протонов 13 МэВ,
3. Толщина составляет 400–500 мкм при энергии протонов 15 МэВ,

Было выполнено моделирование и рассчитан выход изотопов в никелевой природной мишени при облучении протонами с энергией 10 и 15 МэВ для оптимизации получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$ . Было замечено, что при облучении протонами с энергией менее 15 МэВ меньше образование побочных изотопов, и было обнаружено, что в условиях, близких к идеальным, можно ожидать, что радионуклидная чистота изотопа  $^{64}\text{Cu}$  может составлять не менее 99%.

3 фольги (каждая толщиной 100 мкм) из природного никеля (природная смесь изотопов никеля) были облучены протонами с энергией 13 МэВ для сравнения с результатами расчета, основанными на экспериментальных данных. По спектрометрическому анализу и измеренной активности аликвоты была получена активность изотопа  $^{64}\text{Cu}$  на момент окончания облучения, которая составила  $30 \pm 9$  МБк. Расчет выхода изотопа  $^{64}\text{Cu}$  в условиях, соответствующих экспериментальным, дал значение  $47 \pm 3$  МБк. Достигнутый уровень значимости

наблюдаемого отклонения результата расчета от измерения составил 0,07. Таким образом установлено, что результаты расчета и измерения находятся в согласии при уровне значимости 0,05, т. е. согласие хорошее.

При работе с природным никелем была разработана технология химического разделения. Время растворения природной никелевой фольги было успешно сокращено до 10–15 минут вместо 3 ч. По результатам взвешивания стакана растворения было обнаружено, что смола АВ-17 размером зерна (41μ) подходит для процесса очистки. На основе результатов экспериментов с меткой изотопов никеля-63 и кобальта-57, установлено, что смола эффективна для выделения, поскольку раствор содержания колонки был без активности при работе с меткой никеля и содержал активность в 2000 раз меньшую, чем начальная активность при работе с меткой кобальта.

**Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы  
(диссертации):**

**Публикации в других изданиях SCOPUS**

1. Тиба А., Егоров А. Ю., Бердников Я. А., Ломасов В.Н. Производство изотопа меди-64 путем облучения циклотронной мишени из природного никеля пучком протонов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 1. — С. 138–146.
2. Тиба А., Бердников Я. А. Оптимизация получения изотопа меди-64 из природного никеля на циклотроне // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2021. Т. 14. № 2. С. 81–89.
3. Тиба А. и др. Особенности получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  на циклотроне МГЦ-20 СПбПУ // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2022. Т. 15. № 2. С. 56–63.
4. A Tiba, Ya. A Berdnikov and A. Yu Egorov. Production of the isotope copper-64 by using natural nickel target with proton energy 17 MeV and beam current 10  $\mu\text{A}$  at cyclotron. Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2103. No. 1. 4 Pp.

**Список литературы**

1. **G. Kramer-Marek., J. Capala.** The role of nuclear medicine in modern therapy of cancer // Journal of Tumor Biology. 2012. Vol. 33. No. 3. – Pp. 629-640.
2. **Jalilian A.R., Jr J.O.** The current status and future of theranostic copper-64 radiopharmaceuticals // Iran Journal of Nuclear Medicine. 2017. Vol. 25. No. 1. Pp. 1–10.
3. **Holland J. P., Riccardo F., Anderson C. J., Lewis J. S.** Copper-64 radiopharmaceuticals for oncologic imaging // PET Clinics. 2009. Vol. 4. No. 1. Pp. 49–67.
4. **Boschi A., Martini P., Janevik-Ivanovska E., Duatti A.** The emerging role of copper-64 radiopharmaceuticals as cancer theranostics // Drug Discovery Today. 2018. Vol. 23. No. 8. Pp. 1489–1501.

5. **Chakravarty R., Chakraborty S., Dash A.**  $^{64}\text{Cu}^{2+}$  ions as PET probe: An emerging paradigm in molecular imaging of cancer // *Molecular Pharmaceutics*. 2016. Vol. 13. No. 11. Pp. 3601–3612.
6. **Szűcs Z., Takács S., Alirezapour B.** Development of cost-effective method for production of  $^{64}\text{Cu}$  from  $^{\text{nat.}}\text{Ni}$  // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2014. Vol. 302. No. 2. Pp. 1035–1038.

**Аспирант: Тиба Али**

**ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ  
НА НАУЧНЫЙ ДОКЛАД  
Аспиранта Тиба Али**

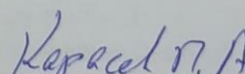
выполненный на тему: «*Разработка методики получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  в ядерной реакции  $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$  на циклотроне МГЦ-20 для медицинского применения*»

Использование изотопа  $^{64}\text{Cu}$  весьма перспективно, поскольку известная химия меди позволяет с одной стороны - использовать самостоятельные ионы, а также в качестве метки радиофармпрепарата, путем его присоединения к различным типам молекул. Получение изотопа  $^{64}\text{Cu}$  возможно несколькими путями, например, облучением реакторными нейтронами, или ускоренными протонами по реакции  $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$ . С экономической точки зрения удобен второй подход, но для его реализации перспективно использовать природную смесь изотопов никеля вместо изотопно-чистого  $^{64}\text{Ni}$ . Для этого необходимо решить ряд проблем, поэтому работа аспиранта является актуальной. В ходе работы им было проведено моделирование наработки изотопа  $^{64}\text{Cu}$  и сопутствующих радиоактивных элементов при облучении протонами природной смеси изотопов никеля для различных параметров пучка и мишени. Полученные результаты верифицированы экспериментально и разработана эффективная радиохимическая технология выделения и очистки  $^{64}\text{Cu}$  от радиоактивных и других примесей. Полученные результаты отражены в представленной выпускной квалификационной работе. Проведенные исследования позволяют дать технологические рекомендации для проектирования эффективной промышленной технологии получения, выделения и очистки изотопа  $^{64}\text{Cu}$ .

В ходе работы аспирант проявил аккуратность, интерес и желание проводить исследования, получил и обработал значительный объем данных. В квалификационной работе описан ряд новых интересных результатов, которые требуют дальнейшей разработки. К сожалению, анализ существующих проблем и возможных путей их решения остался несколько недостаточен. Считаю, что работа Тиба Али заслуживает оценки «*хорошо*» и желаю ему в дальнейшем проявлять больше самостоятельности и смелости в решении возникающих проблем, глубже рассматривать стоящие перед ним вопросы.

Научный руководитель: КАРАСЕВ Платон Александрович – доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

  
подпись

  
инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » 2022г.

**РЕЦЕНЗИЯ  
НА НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

Аспирант: Тиба Али

Направление подготовки (направленность): 03.06.01 Физика и астрономия  
(03.06.01\_10 Физика атомного ядра и элементарных частиц)

Группа: 4960301/81001

Наименование темы: Разработка методики получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  в ядерной реакции  $^{64}\text{Ni}(p,n)^{64}\text{Cu}$  на циклотроне МГЦ-20 для медицинского применения

Рецензент: Бакаев Виктор Анатольевич (к.ф.-м.н., доцент Высшей школы фундаментальных физических исследований)

Отмеченные достоинства:

Научный доклад посвящен решению одной из задач ядерной медицины, которая успешно применяется для лечения и диагностики ряда заболеваний, в том числе онкологических. При этом большую важность представляет получение радионуклидов с определенными физико-химическими характеристиками для дальнейшего их использования в диагностических и терапевтических процедурах.

В данной работе проведена разработка расчетной методики получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$  из природной смеси изотопов никеля для различных параметров облучения и получено экспериментальное подтверждение результатов расчетного моделирования измерениями на циклотроне МГЦ-20.

Следует отметить, что среди различных изотопов меди изотоп  $^{64}\text{Cu}$  уникален тем, что испускает  $\gamma$ -кванты,  $\beta^+$  и  $\beta^-$  частицы. Автором научного доклада разработана радиохимическая технология выделения этого изотопа из облученной природной фольги и его очистки от примесей.

Отмеченные недостатки:

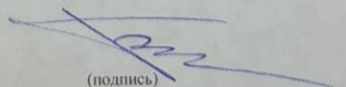
Было бы полезным выполнить в данной работе более подробный литературный анализ путей получения изотопа  $^{64}\text{Cu}$ .

Хотелось бы увидеть в качестве одного из результатов работы технологию получения РФП на основе изотопа  $^{64}\text{Cu}$ .

Заключение:

Представленный автором научный доклад соответствует предъявляемым к таким работам требованиям и заслуживает оценки «хорошо», а сам Тиба Али достоин присвоения квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

Рецензент



(подпись)

В.А. Бакаев

(расшифровка подписи)

«\_\_» \_\_ 2022г.

