

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО  
ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.039.34

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДОВ РАДИОИЗОТОПОВ ИРИДИЯ  $^{189}\text{Ir}$ ,  $^{190}\text{Ir}$ ,  $^{192}\text{Ir}$   
И ПЛАТИНЫ  $^{188}\text{Pt}$ ,  $^{189}\text{Pt}$ ,  $^{191}\text{Pt}$  ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ТОЛСТОЙ МИШЕНИ  
ИЗ ПРИРОДНОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ИРИДИЯ ЯДРАМИ  $^1\text{H}$

© 2026 г. Т. М. Фазлиев\*, Р. А. Алиев, В. А. Загрядский, Е. С. Кормазева,  
К. О. Королев, Т. М. Кузнецова, А. В. Курочкин, В. И. Новиков,  
И. Н. Попов

*Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”*

*Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

*\*e-mail: goldygopher@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.11.2025 г.

После доработки 12.01.2026 г.

Принята к публикации 23.01.2026 г.

Работа посвящена измерению выходов радиоизотопов иридия  $^{189}\text{Ir}$ ,  $^{190}\text{Ir}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  и платины  $^{188}\text{Pt}$ ,  $^{189}\text{Pt}$  и  $^{191}\text{Pt}$  при облучении протонами с энергией около 30 МэВ на циклотроне У-150 НИЦ “Курчатовский институт” толстой мишени из природного металлического иридия. Экспериментальные значения выходов сопоставлялись с соответствующими расчетными результатами, полученными с использованием данных из библиотеки TENDL-2023. На основании полученных в работе экспериментальных результатов о выходе целевого радиоизотопа  $^{189}\text{Ir}$  по реакции  $^{191}\text{Ir}(p,3n)^{189}\text{Pt}(T_{1/2}=10.87\text{ ч}) \rightarrow ^{189}\text{Ir}$  и в прямой реакции  $^{191}\text{Ir}(p,p2n)^{189}\text{Ir}$  сделан вывод о возможности создания  $^{189}\text{Ir}/^{189\text{m}}\text{Os}$ -изотопного генератора с активностью по эмиттеру Оже и конверсионных электронов  $^{189\text{m}}\text{Os}$  на уровне 100 МБк, что обеспечит его применение в клинической практике.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в ядерной медицине приобретает популярность новый подход к терапии онкологических заболеваний, основанный на применении эмиттеров Оже и конверсионных электронов [1, 2]. Согласно работе [3], радиоизотоп  $^{189\text{m}}\text{Os}$  ( $T_{1/2}=5.81\text{ ч}$ ) является одним из наиболее перспективных терапевтических эмиттеров Оже и конверсионных электронов. Преимущества  $^{189\text{m}}\text{Os}$  обусловлены чрезвычайно низкой гамма-постоянной, что исключает побочные радиологические нагрузки при терапии, и возможностью получать  $^{189\text{m}}\text{Os}$  генераторным методом ( $^{189}\text{Ir}/^{189\text{m}}\text{Os}$ ). Предшественник  $^{189\text{m}}\text{Os}$  в генераторе  $^{189}\text{Ir}$  ( $T_{1/2}=13.2\text{ дня}$ )

может быть наработан по реакциям  $^{191}\text{Ir}(p,p2n)^{189}\text{Ir}$ ,  $^{191}\text{Ir}(p,3n)^{189}\text{Pt}(T_{1/2}=10.87\text{ч}) \rightarrow ^{189}\text{Ir}$  на циклотроне У-150 НИЦ “Курчатовский институт”. Для наработки  $^{189}\text{Ir}$  можно использовать мишень из природного иридия, содержание изотопа  $^{191}\text{Ir}$  в котором составляет 37.3%. Поскольку вероятность выхода  $^{189\text{m}}\text{Os}$  при распаде  $^{189}\text{Ir}$  составляет только 7.5% [3], для получения терапевтической активности  $^{189\text{m}}\text{Os}$  важно, чтобы активность  $^{189}\text{Ir}$  в изотопном генераторе была достаточно высокой. С целью оценки возможности наработки радиоизотопа  $^{189}\text{Ir}$  в количестве, достаточном для практического применения в изотопном генераторе  $^{189}\text{Ir}/^{189\text{m}}\text{Os}$ , в настоящей работе был измерен выход  $^{189}\text{Ir}$ , выход изотопа  $^{189}\text{Pt}$ , распадающегося в  $^{189}\text{Ir}$ , а также выходы основных сопутствующих примесных радионуклидов при облучении протонами циклотрона У-150 НИЦ “Курчатовский институт” толстой мишени из природного металлического иридия. Экспериментальные значения выходов сравнивались с расчетными, полученными с использованием ядерных данных библиотеки TENDL-2023 [4].

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Для измерения выходов радиоизотопов иридия  $^{189}\text{Ir}$ ,  $^{190}\text{Ir}$ ,  $^{192}\text{Ir}$  и радиоизотопов платины  $^{188}\text{Pt}$ ,  $^{189}\text{Pt}$  и  $^{191}\text{Pt}$  в работе была использована активационная методика. Мишень в виде стопки фольг из металлического иридия природного изотопного состава была упакована в специальное мишенное устройство из алюминия, она облучалась протонами на циклотроне У-150 НИЦ “Курчатовский институт”. Каждая фольга в стопке имела толщину 20 мкм. Энергия протонов задавалась параметрами циклотрона, на входе в стопку фольг она составляла 29.6 МэВ. Пробег протонов, рассчитанный по программе SRIM [5], укладывался в толщину мишени. Суммарный поток протонов, падающих на мишень, определялся с помощью интегратора тока. Облучение проводилось при среднем токе пучка протонов около 0.23 мкА до достижения суммарного заряда 0.33 мкА·ч. После облучения и выдержки стопка разбиралась и измерялись активности продуктов реакций в отдельных фольгах по пикам полного поглощения наиболее удобных для регистрации гамма-квантов для каждого из регистрируемых радиоизотопов. В табл. 1 приведены ядерные данные, использованные для определения активностей продуктов реакций.

**Таблица 1.** Ядерные данные продуктов реакции  $^{nat}\text{Ir}(p,x)$

Радиоизотоп	$T_{1/2}$	Тип распада	$E_\gamma$ , кэВ	$I_\gamma$ , %	Реакция получения	Источник
$^{189}\text{Ir}$	13.2 сут	ЭЗ	245.10	6.00	$^{191}\text{Ir}(p,p2n)^{189}\text{Ir}$	[6]
$^{190}\text{Ir}$	11.78 сут	ЭЗ, $\beta^+$	518.55	32.20	$^{191}\text{Ir}(p,pn)^{190}\text{Ir}$	[7]
$^{192}\text{Ir}$	73.83 сут	ЭЗ, $\beta^-$	468.07	47.84	$^{193}\text{Ir}(p,pn)^{192}\text{Ir}$	[8]
$^{188}\text{Pt}$	10.16 сут	ЭЗ, $\beta^+$	423.34	4.30	$^{191}\text{Ir}(p,4n)^{188}\text{Pt}$	[9]
$^{189}\text{Pt}$	10.87 ч	ЭЗ, $\beta^+$	721.38	7.90	$^{191}\text{Ir}(p,3n)^{189}\text{Pt}$	[6]

$^{191}\text{Pt}$	2.83 сут	ЭЗ	538.90	14.40	$^{193}\text{Ir}(p,3n)^{191}\text{Pt} +$ $^{191}\text{Ir}(p,n)^{191}\text{Pt}$	[10]
-------------------	----------	----	--------	-------	---	------

*Примечение.* ЭЗ – электронный захват

Измерения проводили с помощью гамма-спектрометра с детектором из сверхчистого германия фирмы ORTEC HPGe GEM 35P4 (США). Фольги во время измерений устанавливались на расстоянии 6–40 см над поверхностью детектора в зависимости от загрузки спектрометра. “Мертвое” время при измерениях не превышало 5%. Энергетическая зависимость эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов детектором определялась экспериментально с помощью образцовых спектрометрических  $\gamma$ -источников из комплекта ОСГИ. Максимальное время набора аппаратурных  $\gamma$ -спектров не превышало 1 ч. При определении активности вводились расчетные поправки на распад радионуклида за время измерения и самопоглощение  $\gamma$ -квантов в фольгах. В качестве поправки на самопоглощение  $\gamma$ -квантов принималось относительное ослабление пучка  $\gamma$ -квантов соответствующей энергии в направлении детектора слоем иридия, толщина которого равна половине толщины фольги. Массовый коэффициент ослабления для иридия брался из библиотеки данных [11]. Выходы радиоизотопов иридия и платины определялись по формуле

$$V_{\text{экс}} = [Z_1 (1 - \exp(-\lambda T_1)) / Z_2 (1 - \exp(-\lambda T_2))] \sum_{i=1} A_i, \quad (1)$$

здесь  $V_{\text{экс}}$  [Бк/мкА·ч] – экспериментальный выход радиоизотопа в толстой мишени;  $A_i$  [Бк] – активность радиоизотопа в  $i$ -й фольге, приведенная к активности в конце облучения;  $Z_1$  [отн. ед.] – показание интегратора тока, соответствующее заряду 1 мкА·ч;  $Z_2$  [отн. ед.] – показание интегратора тока за время облучения;  $\lambda$  [ $\text{с}^{-1}$ ] – постоянная распада радиоизотопа;  $T_1$  – время облучения, равное 1 ч;  $T_2$  [с] – время облучения мишени.

При получении активности  $^{188}\text{Pt}$  по гамма-линии с  $E_\gamma = 423.3$  кэВ ( $K_\gamma = 4.3\%$ ) учитывался вклад в соответствующий суммарный пик полного поглощения гамма-квантов с  $E_\gamma = 420.6$  кэВ ( $K_\gamma = 1.56\%$ ) от активности  $^{190}\text{Ir}$ . При определении выхода  $^{189}\text{Ir}$  в реакции  $^{191}\text{Ir}(p,2n)^{189}\text{Ir}$  учитывался вклад в измеряемую активность  $^{189}\text{Ir}$  результата распада  $^{189}\text{Pt}$ , нарабатанного в реакции  $^{191}\text{Ir}(p,3n)^{189}\text{Pt}(T_{1/2}=10.87 \text{ ч}) \rightarrow ^{189}\text{Ir}$ . На рис. 1, 2 в качестве иллюстрации приведены фрагменты аппаратурных  $\gamma$ -спектров от иридиевой фольги, установленной при облучении первой по ходу пучка протонов, через 3 и 18 дней после облучения.

**Рис. 1.**

**Рис. 2**

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальные и расчетные значения выходов радиоизотопов  $^{189}\text{Ir}$ ,  $^{190}\text{Ir}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{188}\text{Pt}$ ,  $^{189}\text{Pt}$  и  $^{191}\text{Pt}$  при облучении протонами толстой мишени из природного металлического иридия представлены в табл. 2. Погрешности измеренных выходов находятся в интервале 7–13% при доверительной вероятности 68%. Учтенными составляющими погрешностей являлись погрешности определения эффективности детектора, площадей пиков полного поглощения  $\gamma$ -квантов в аппаратурных спектрах и квантовых выходов. Расчетные значения выходов радиоизотопов определялись по формуле

$$V_{\text{расч}} = (1 - \exp(-\lambda T_1)) N F \sum_{i=1} \sigma_i. \quad (2)$$

Здесь  $V_{\text{расч}}$  [Бк/мкА·ч] – расчетный выход радиоизотопа в толстой мишени;  $\lambda$  [ $\text{с}^{-1}$ ] – постоянная распада радиоизотопа;  $T_1$  – время облучения, равное 1 ч;  $N$  – количество ядер соответствующего изотопа иридия во фрагменте фольги площадью  $1 \text{ см}^2$  природного Ir;  $F$  – плотность потока протонов, соответствующая току пучка 1 мкА ( $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ );  $\sigma_i$  – сечение реакции образования радиоизотопа из TENDL 2023 для энергии протонов, соответствующей энергии мишени в середине  $i$ -й фольги.

**Таблица 2.** Экспериментальные и расчетные выходы радиоизотопов  $^{189}\text{Ir}$ ,  $^{190}\text{Ir}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{188}\text{Pt}$ ,  $^{189}\text{Pt}$  и  $^{191}\text{Pt}$  при облучении протонами толстой мишени из природного металлического иридия

Реакция	$V_{\text{эксп}}$ , МБк/мкА·ч	$V_{\text{расч}}$ , МБк/мкА·ч TENDL-2023
$^{191}\text{Ir}(p,p2n)^{189}\text{Ir}$	$0.84 \pm 0.10$	0.16
$^{191}\text{Ir}(p,pn)^{190}\text{Ir}$	$1.14 \pm 0.21$	1.12
$^{193}\text{Ir}(p,pn)^{192}\text{Ir}$	$0.31 \pm 0.05$	0.43
$^{191}\text{Ir}(p,4n)^{188}\text{Pt}$	$1.07 \pm 0.20$	0.95
$^{191}\text{Ir}(p,3n)^{189}\text{Pt}$	$304 \pm 31$	413
$^{193}\text{Ir}(p,3n)^{191}\text{Pt} +$ $^{191}\text{Ir}(p,n)^{191}\text{Pt}$	$65 \pm 8$	89

Соответствие энергии протонов положению конкретной фольги в мишени определялось по программе SRIM [5]. Кумулятивный выход радиоизотопа  $^{191}\text{Pt}$  получен суммированием выходов, рассчитанных для реакций  $^{193}\text{Ir}(p,3n)^{191}\text{Pt}$  и  $^{191}\text{Ir}(p,n)^{191}\text{Pt}$ .

Сравнение экспериментальных результатов и расчетных значений показало, что экспериментальный выход  $^{189}\text{Ir}$  в реакции  $^{191}\text{Ir}(p,p2n)^{189}\text{Ir}$  примерно в 5 раз превышает расчетный выход с данными из TENDL-2023. Экспериментальный и расчетный выходы  $^{190}\text{Ir}$  в реакции  $^{191}\text{Ir}(p,pn)^{190}\text{Ir}$  и  $^{188}\text{Pt}$  в реакции  $^{191}\text{Ir}(p,4n)^{188}\text{Pt}$  совпадают в пределах

экспериментальных погрешностей. Экспериментальные выходы  $^{192}\text{Ir}$  в реакции  $^{193}\text{Ir}(p,pn)^{192}\text{Ir}$ ,  $^{189}\text{Pt}$  в реакции  $^{191}\text{Ir}(p,3n)^{189}\text{Pt}$  и кумулятивный выход  $^{191}\text{Pt}$  в реакциях  $^{193}\text{Ir}(p,3n)^{191}\text{Pt} + ^{191}\text{Ir}(p,n)^{191}\text{Pt}$  примерно на 26–27% ниже расчетных значений. Полученные экспериментальные значения выходов  $^{189}\text{Pt}$  и  $^{189}\text{Ir}$  позволяют сделать оценку наработки целевого радиоизотопа  $^{189}\text{Ir}$  на циклотроне У-150 НИЦ “Курчатовский институт”. Согласно расчетам, в результате облучения толстой мишени из природного металлического иридия пучком протонов с током 20 мкА и энергией 30 МэВ примерно в течение 6 ч и последующей выдержки мишени в течение трех суток в ней можно накопить активность  $^{189}\text{Ir}$ , равную примерно 0.9 ГБк. Указанная активность  $^{189}\text{Ir}$  позволяет создать изотопный генератор  $^{189}\text{Ir}/^{189\text{m}}\text{Os}$  с активностью по  $^{189\text{m}}\text{Os}$  до 70 МБк, достаточной для практического применения в клинической практике.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе измерены выходы радиоизотопов  $^{189}\text{Ir}$ ,  $^{190}\text{Ir}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{188}\text{Pt}$ ,  $^{189}\text{Pt}$  и  $^{191}\text{Pt}$  при облучении протонами с энергией около 30 МэВ толстой мишени из природного металлического иридия. Экспериментальные значения выходов сопоставлялись с соответствующими расчетными результатами, полученными с использованием данных из библиотеки TENDL-2023. Согласно полученным экспериментальным данным, на циклотроне У-150 НИЦ “Курчатовский институт” можно наработать активность  $^{189}\text{Ir}$ , позволяющую изготовить  $^{189}\text{Ir}/^{189\text{m}}\text{Os}$ -изотопный генератор с активностью по  $^{189\text{m}}\text{Os}$  на уровне 100 МБк, достаточной для применения в клинической практике.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ku A., Facca V.J., Zhongli Cai Z., Reilly R.M.* // EJNMMI Radiopharm. Chem. 2019. V. 4. P. 1. <https://doi.org/10.1186/s41181-019-0075-2>
2. *Загрядский В.А.* // Российские нанотехнологии. 2023. Т. 18. № 4. С. 564. <https://doi.org/10.56304/S1992722323040179>
3. *Filosofov D., Kurakina E., Radchenko V.* // Nuclear Medicine and Biology. 2021. Т. 94. С. 1. <https://doi.org/10.1016/j.nucmedbio.2020.12.001>
4. *Koning A.J., Rochman D., Sublet J.-Ch. et al.* // Nucl. Data Sheets. 2019. V. 155. P. 1. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2019.01.002>
5. *Ziegler J.F., Ziegler M.D., Biersack J.P.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B. 2010. V. 268. P. 1818. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>

6. *Johnson T.D., Singh B.* // Nucl. Data Sheets. 2017. V. 142. P. 1.  
<https://doi.org/10.1016/j.nds.2017.04.001>
7. *Singh B., Chen J.* // Nucl. Data Sheets. 2020. V. 169. P. 1.  
<https://doi.org/10.1016/j.nds.2020.10.001>
8. *Baglin C.M.* // Nucl. Data Sheets. 2012. V. 113. P. 1871.  
<https://doi.org/10.1016/j.nds.2012.08.001>
9. *Kondev F., Juutinen S., Hartley D.J.* // Nucl. Data Sheets. 2018. V. 150. P. 1.  
<https://doi.org/10.1016/j.nds.2018.05.001>
10. *Basunia S.* // Nucl. Data Sheets. 2024. V. 195. P. 368. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2024.04.002> .
11. *Hubbell J.H., Seltzer S.M.* Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients (version 1.4). // NIST Standard Reference Database 126. 2004.  
<https://doi.org/10.18434/T4D01F>

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

**Рис. 1.** Фрагмент аппаратурного  $\gamma$ -спектра в диапазоне энергий 540–720 кэВ от иридиевой фольги, установленной при облучении первой по ходу пучка протонов, через 3 дня после облучения.

**Рис. 2.** Фрагмент аппаратурного  $\gamma$ -спектра в диапазоне энергий 240–520 кэВ от иридиевой фольги, установленной при облучении первой по ходу пучка протонов, через 18 дней после облучения.

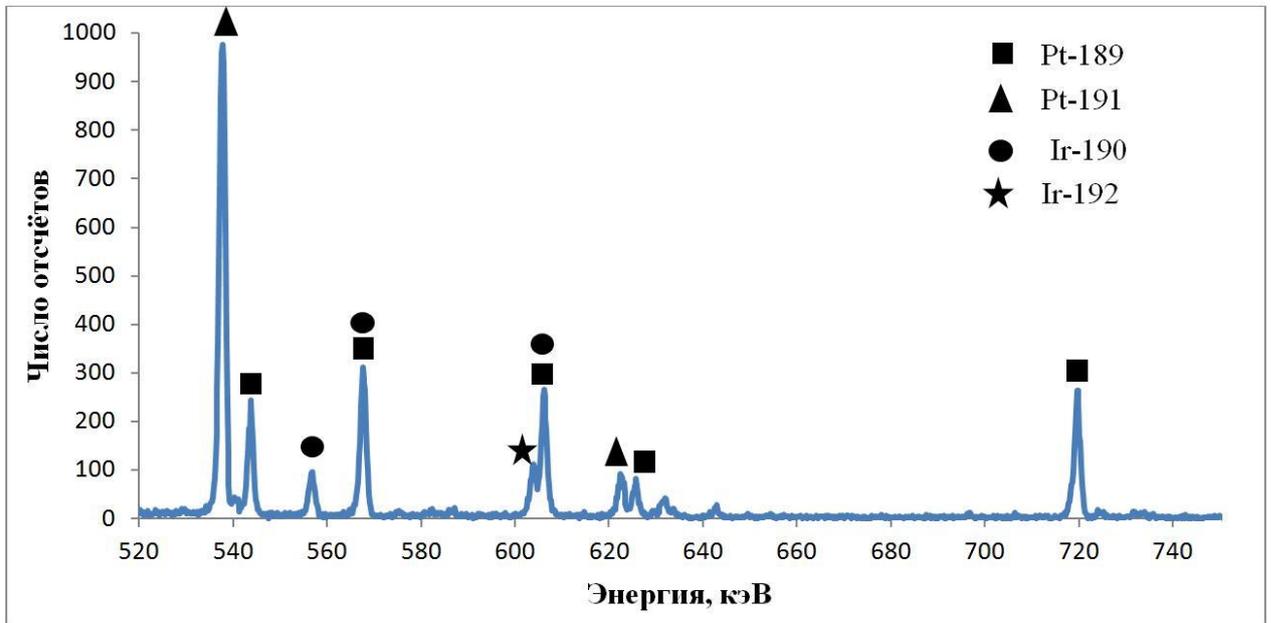


Рис. 1.

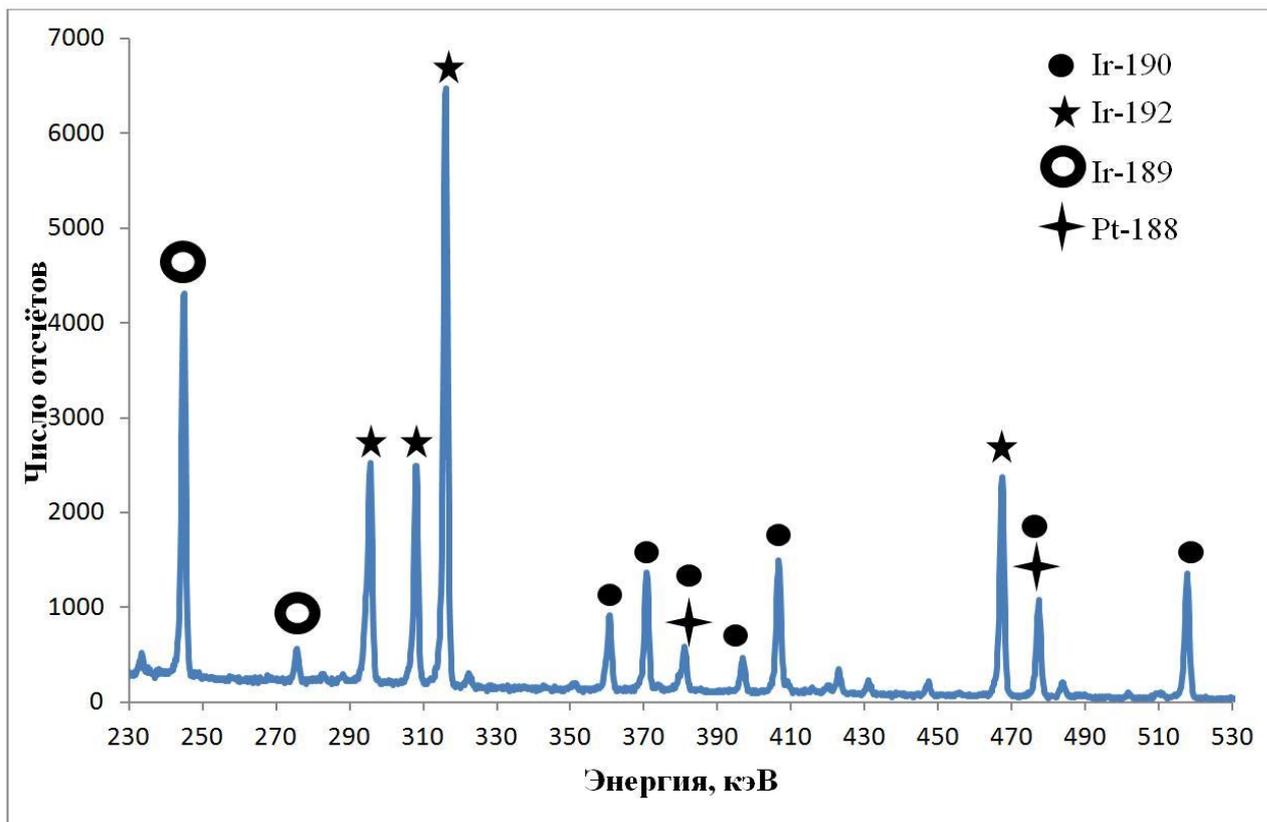


Рис. 2.