

# РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ «РЕАКТОРНЫХ» МЕТАЛЛОВ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

*Ковалев Н.В., Прокошин А.М., Давыдова П.В., Королев В.А.*

*АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина»,  
194021, г. Санкт-Петербург, 2-ой Муринский пр-т, 28*



Исследуются радиационные характеристики благородных металлов платиновой группы, выделенных из отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) реактора ВВЭР-1000. Это так называемые «реакторные» рутений, родий и палладий. При выделении из ОЯТ они радиоактивны, но после выдержки рутения около 27 лет, а родия 13 лет их можно использовать в неограниченном количестве. Выдерживать «реакторный» палладий не имеет смысла в силу периода полураспада его радиоактивного изотопа  $^{107}\text{Pd}$  – 6.5 млн. лет. Согласно нормативным документам, такой палладий можно беспрепятственно использовать только в количестве до 34 г.  $^{107}\text{Pd}$  является мягким бета-излучателем с максимальной энергией  $\beta$ -частиц 34 кэВ. Результаты расчетов показывают, что длина пробега  $\beta$ -частиц от  $^{107}\text{Pd}$  в металлическом палладии составила 0.8 мкм, поэтому «реакторный» палладий излучает только с поверхностного слоя, остальные электроны поглощаются в самом материале. Длина пробега электронов с энергией 34 кэВ в биологической ткани составляет около 20 мкм, что не превышает толщину рогового слоя эпидермиса кожи. Расчеты показали, что мощность эквивалентной дозы (МЭД) на поверхности «реакторного» палладия составляет 0,04 мкЗв/ч, что ниже значения МЭД для населения, вследствие чего делается вывод, что «реакторный» палладий не представляет какой-либо опасности при внешнем контакте.

**Ключевые слова:** отработавшее ядерное топливо, благородные металлы, платиноиды, реакторные и техногенные металлы платиновой группы, рутений, родий, палладий.

**Для цитирования:** Ковалев Н.В., Прокошин А.М., Давыдова П.В., Королев В.А. Радиационные характеристики «реакторных» металлов платиновой группы. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 4. – С. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.04>

## ВВЕДЕНИЕ

В отработавшем ядерном топливе (ОЯТ) содержатся благородные металлы платиновой группы (МПГ) – это рутений (Ru), родий (Rh) и палладий (Pd) [1]. Их количество зависит от вида ядерного топлива и глубины его выгорания. Например, на металлы платиновой группы приходится более 10% осколков деления в топливе реактора ВВЭР-1000 с глубиной выгорания 50,7 МВт·сут/кгТМ, это примерно 5,6 кг/т ОЯТ [2]. В активной зоне реактора БН-1200 с выгоранием 99,2 МВт·сут/кгТМ их количество достигает 16,3 кг/т ОЯТ. Данное значение получено авторами расчетным методом с помощью модели реактора БН-1200 [3] для программного средства (ПС) Serpent [4].

Российская Федерация пошла по пути замыкания ядерного топливного цикла [5]. ОЯТ перерабатывается, извлекается регенерат урана, плутоний, минорные актиниды, продукты деления. Продукты деления являются высокоактивными отходами (ВАО), подлежащими остекловыванию. Концентрация МПГ в растворах ВАО достигает от 850 до 1500 мг/дм<sup>3</sup> [6]. В процессе остекловывания их наличие может приводить к ряду проблем [7–9]. Например, при температуре варки 1100 – 1200°C формируются фазы твердых растворов на основе оксида рутения и элементарных родия и палладия. Причем морфология образующихся частиц весьма разнообразна. При отсутствии достаточного конвективного перемешивания в расплаве происходит образование у дна печи слоя, в котором вязкость и электропроводность могут увеличиваться в 10 раз по сравнению с общим объемом стекла. Такое постепенное накопление твердой металлической фазы на дне электропечи неизбежно приведет к выходу ее из строя. Также помимо образования слоя с высокой электропроводностью возникает существенная проблема, связанная с закупориванием сливного отверстия при донном выпуске расплава. Для решения таких проблем в последние годы разрабатываются способы извлечения МПГ перед процессом остекловывания [10–12].

Выделенные из ОЯТ металлы платиновой группы могут найти применение в различных областях промышленности, однако необходимо иметь в виду, что в их составе содержатся радиоактивные изотопы. Насколько опасны МПГ, выделенные из ОЯТ, рассматривается в данной статье.

## СОСТАВ «РЕАКТОРНЫХ» МПГ

Расчет состава «реакторных» МПГ в ОЯТ ВВЭР-1000 проводился по ядерно-физической расчетной модели активной зоны реактора [2] программного средства (ПС) Serpent [4]. В таблице 1 приведено расчетное содержание рутения, родия и палладия в тонне ОЯТ. В таблице 2 приведен расчетный изотопный состав МПГ, выделяемый из ОЯТ с учетом его выдержки в течение 10-ти лет перед переработкой.

Таблица 1

### Расчетное содержание рутения, родия и палладия в тонне ОЯТ

Элемент	Масса, кг/т ОЯТ
Рутений	3.04
Родий	0.60
Палладий	1.94

Таблица 2

**Расчетный изотопный состав МПГ, выделенных из ОЯТ ВВЭР-1000 с учетом его выдержки перед переработкой 10 лет**

Изотопы рутения	Масса, %	Изотопы родия	Масса, %	Изотопы палладия	Масса, %
$^{100}\text{Ru}$	5.34	$^{102}\text{Rh}$	<0.01%	$^{104}\text{Pd}$	17.58
$^{101}\text{Ru}$	33.99	$^{102\text{m}}\text{Rh}$	<0.01%	$^{105}\text{Pd}$	26.92
$^{102}\text{Ru}$	35.96	$^{103}\text{Rh}$	100.00%	$^{106}\text{Pd}$	26.49
$^{104}\text{Ru}$	24.71			$^{107}\text{Pd}$	15.28
$^{106}\text{Ru}$	0.01			$^{108}\text{Pd}$	10.24
				$^{110}\text{Pd}$	3.49

### РАДИОАКТИВНОСТЬ «РЕАКТОРНЫХ» МПГ

В составе рутения, родия и палладия, выделенных из ОЯТ, присутствуют радиоактивные изотопы. В таблице 3 приведены характеристики радиоактивных изотопов МПГ. Удельная активность каждого изотопа приведена для выделенного элемента. Необходимо отметить, что по регламентирующим документам «реакторные» МПГ подлежат учету и контролю в системе государственного учета и контроля РВ и РАО (СГУК РВ и РАО), и требуется разрешение органов исполнительной власти, уполномоченных осуществлять государственный санитарно-эпидемиологический надзор, на их использование, пока активность и удельная активность будут больше или равны минимально значимой активности (МЗА) и минимально значимой удельной активности (МЗУА) одновременно (п.3. НП-067-16<sup>1</sup> / НРБ-99/2009<sup>2</sup>, приложение 7, п.3 и п.4). Также приведены МЗА, МЗУА радиоактивных изотопов и время дополнительной выдержки, через которое выделенные элементы можно будет использовать в неограниченном количестве.

Таблица 3

### Характеристики радиоактивных изотопов «реакторных» МПГ и их ограничения

Элемент	Изотоп	Период полураспада	Удельная активность, Бк/г	МЗУА, Бк/г	МЗА, Бк	Выдержка, лет
Рутений	$^{106}\text{Ru}$	373.59 сут	8.05E+09	1.00E+02	1.00E+05	~27
Родий	$^{102}\text{Rh}$	207.0 сут	2.22E+03	1.00E+01	1.00E+06	~5
	$^{102\text{m}}\text{Rh}$	3.74 года	1.03E+03	1.00E+02	1.00E+06	~13
Палладий	$^{107}\text{Pd}$	6.5 млн лет	2.91E+06	1.00E+05	1.00E+08	~32 млн

$^{106}\text{Ru}$  в ходе  $\beta$ -распада превращается в  $^{106}\text{Rh}$  с периодом полураспада 29,8 с, который почти сразу распадается в стабильный  $^{106}\text{Pd}$ . В связи с этим изотоп  $^{106}\text{Rh}$  в выделенном родии, отдельно от рутения, можно не учитывать.

<sup>1</sup> Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные правила учета и контроля радиоактивных веществ и радиоактивных отходов в организации» (НП-067-16) (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 28 ноября 2016 г. N 503).

<sup>2</sup> Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. N 47).

Из таблицы 3 можно сделать вывод, что МПГ, выделенные из ОЯТ, можно беспрепятственно использовать в количестве: ~12 мкг рутения, ~450 г родия, ~34 г палладия. Если дополнительно выдержать рутений ~27 лет, родий ~13 лет, то их можно использовать в неограниченном количестве. Выдерживать «реакторный» палладий не имеет смысла.

Методы отделения радиоактивного изотопа  $^{107}\text{Pd}$  от палладия, например, лазером [13] или электромагнитной сепарацией [14], на сегодняшний день довольно дорогие. Следовательно, работать с большим объемом «реакторного» палладия без извлечения  $^{107}\text{Pd}$  в соответствии с действующим законодательством можно либо разбавив его природным палладием, либо использовать его в атомной отрасли [15].

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА

С помощью современных программных средств ядерно-физического моделирования можно подробно изучить радиационные характеристики «реакторного» палладия.

Универсальным и наиболее точным методом расчета переноса излучения является метод Монте-Карло [16]. Такой метод применяют широко используемые и общепризнанные программные средства (ПС), такие как MCNP, PHITS, PENELOPE и др. В данной работе используется лицензионное программное средство PHITS [17]. ПС PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) – это программа общего назначения для моделирования переноса частиц методом Монте-Карло, разработанная в сотрудничестве с агентством по атомной энергии Японии (JAEA), институтами RIST, КЕК и другими. ПС может учитывать перенос всех частиц в широком диапазоне энергий, используя все доступные на сегодняшний день модели ядерных реакций и библиотеки ядерных данных.

С помощью ПС PHITS определены поток и мощность эквивалентной дозы (МЭД) от  $\beta$ -частиц и тормозного излучения металлического «реакторного» палладия, а также длина пробега  $\beta$ -частиц в металлическом палладии. Расчетная модель представляет собой пластину толщиной 1 мм металлического палладия с составом, приведенным в табл. 2.

## РАДИАЦИОННАЯ ОПАСНОСТЬ «РЕАКТОРНОГО» ПАЛЛАДИЯ

Единственный радиоактивный изотоп палладия  $^{107}\text{Pd}$  является мягким бета-излучателем. Максимальная энергия  $\beta$ -частиц  $E_{\beta}$  – 0,034 МэВ, средняя – 0,009 МэВ. На рисунке 1 приведен энергетический спектр  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов (тормозное излучение), вылетающих

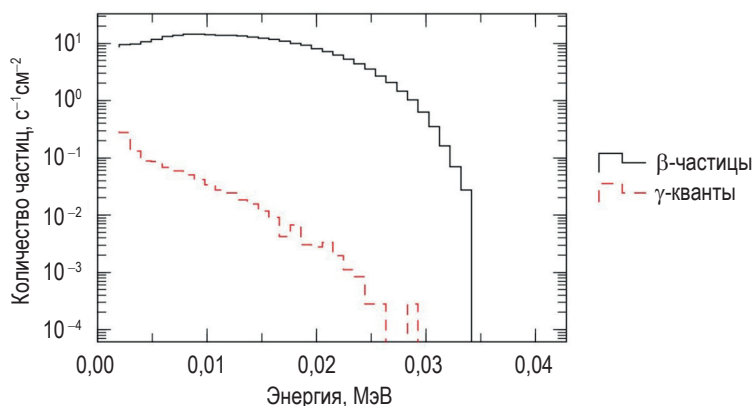


Рис. 1. Энергетическое распределение  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов

с поверхности пластины и попадающих в детектор площадью  $1 \text{ см}^2$ . В результате поток  $\beta$ -частиц составляет  $272 \text{ Б} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ , что меньше регламентируемого –  $820 \text{ Б} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  (для  $E_{\beta} = 0.05 \text{ МэВ}$ ) (см. таблицу 8.4 НРБ-99/2009<sup>2</sup>).

Рассчитанная максимальная длина пробега  $\beta$ -частиц от  $^{107}\text{Pd}$  в металлическом палладии составила  $0.8 \text{ мкм}$ . Ввиду маленького пробега  $\beta$ -частиц «реакторный» палладий излучает только с поверхностного слоя, остальные электроны поглощаются в самом материале.

Известно, что максимальная глубина проникновения  $\beta$ -частиц энергии  $0,034 \text{ МэВ}$  в биологической ткани  $\sim 20 \text{ мкм}$  [18], что не превышает толщину рогового слоя эпидермиса кожи [19]. Следовательно, вероятность повреждения биологических тканей человека при воздействии снаружи отсутствует.

На рисунке 2 приведен график мощности эквивалентной дозы (МЭД) от  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов вылетающего с поверхности «реакторного» палладия. МЭД на поверхности составляет  $0,04 \text{ мкЗв/ч}$ , что ниже значения МЭД для населения –  $0,06 \text{ мкЗв/ч}$  (см. табл. 3.3.1 ОСПОРБ-99/2010<sup>3</sup>).

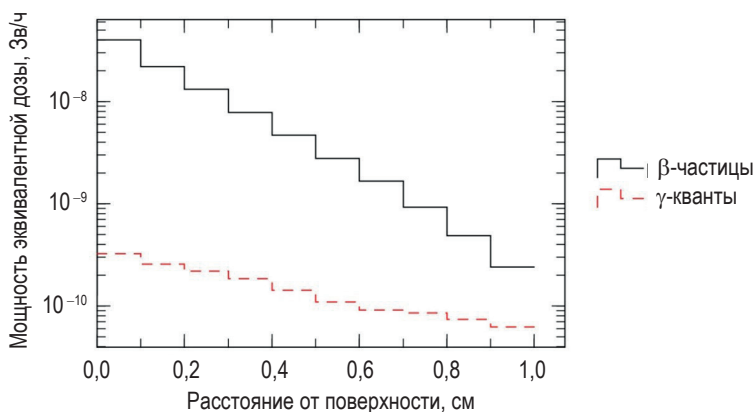


Рис. 2. МЭД от  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов «реакторного» палладия

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделенные из ОЯТ «реакторные» МПГ содержат радиоактивные изотопы  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{102}\text{Rh}$ ,  $^{102\text{m}}\text{Rh}$ ,  $^{107}\text{Pd}$ . Результаты исследования показывают, что при выдержке «реакторного» рутения  $\sim 27$  лет и родия  $\sim 13$  лет их можно использовать в неограниченном количестве. Палладий за счет изотопа  $^{107}\text{Pd}$  с периодом полураспада  $6.5 \text{ млн. лет}$  выдерживать не имеет смысла. Однако результаты расчетов показывают, что с точки зрения радиационной безопасности «реакторный» палладий не представляет какой-либо опасности при внешнем контакте. В литературе [20] описывается экспериментальное изучение радиационных характеристик «реакторного» палладия, которое подтверждают приведенные выше выводы.

Необходимо отметить, что в статье рассматриваются чистые «реакторные» МПГ без примесей других радиоактивных элементов. Открытым остается вопрос о стоимости выделения «реакторных» МПГ в зависимости от степени их очистки.

<sup>3</sup> Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10 Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26 апреля 2010 г. N 40).

## Литература

1. Похитонов Ю.А. Выделение платиноидов из отработавшего топлива АЭС и перспективы их использования // Атомная энергия. – 2019. – Т. 127. – № 6. – С. 332 – 339.
2. Ковалев Н.В., Прокошин А.М., Кудинов А.С., Невиница В.А. Расчет нуклидного состава выгружаемого ОЯТ по ядерно-физической модели активной зоны и бесконечной ТВС ВВЭР-1000 // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2024. – № 1. – С. 72 – 82.
3. Ковалев Н.В., Прокошин А.М., Кудинов А.С., Невиница В.А. Использование плутония из отработавшего смешанного топлива РЕМИКС в реакторе БН-1200. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2023. – № 1. – С. 70 – 81. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2023.1.06>
4. Leppanen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaaho T. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 82. – PP. 142 – 150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>
5. Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года. – М.: Госкорпорация «Росатом», 2018. – 62 с.
6. Баторшин Г.Ш., Кириллов С.Н., Смирнов И.В., Сарычев Г.А., Тананаев И.Г., Федорова О.В., Мясоєдов Б.Ф. Комплексное выделение ценных компонентов из техногенных радиоактивных отходов как вариант создания рентабельного ЗЯТЦ. // Вопросы радиационной безопасности. – 2015. – Т. 79. – № 3. – С. 30 – 36. Электронный ресурс: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24833978> (дата доступа: 07.05.2024).
7. Onishi T., Sekioka K., Suto M., Tanaka K., Koyama Sh., Inaba Yu., Takahashi H., Harigai M., Takeshita K. Adsorption of platinum-group metals and molybdenum onto aluminum ferrocyanide in spent fuel solution. // Energy Procedia. – 2017. – № 131. – PP. 151 – 156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.421>
8. Lopukh D.B., Skrigan I.N., Vavilov A.V., Martynov A.P. Numerical Studies of Processes in an Induction Furnace with a Cold Crucible for Vitrification of High-Level Waste That Contains Noble Metals. // Russian Electrical Engineering. – 2023. – № 94. – PP 169 – 173. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371223030100>
9. Labe V., Hollebecque J.F., Gruber P., Lemonnier S., Nonnet H., Puig J., Chauvin E., Boudot E. Incorporation of Noble Metals in High-Level Waste Borosilicate Glass: Focus on Vitrification Process Developments. / Proc. of the WM2014 Conference, Phoenix, Arizona, USA, March 2–6, 2014. Электронный ресурс: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2014/papers/14067.pdf> (дата доступа: 07.05.2024).
10. Mishima R., Inaba Yu., Tachioka S., Harigai M., Watanabe Sh., Onoe J., Nakase M., Matsumura T., Takeshita K. Sorption properties of aluminum hexacyanoferrate for platinum group elements. // Chemistry Letters, – 2020. – Vol. 49. – PP. 83 – 86. DOI: <https://doi.org/10.1246/cl.190741>
11. Wang Q., Sang H., Chen L., Wu Y., Wei Y. Selective separation of Pd (II) through ion exchange and oxidation-reduction with hexacyanoferrates from high-level liquid waste. // Separation and Purification Technology. – 2020. – Vol. 231. – PP. 1 – 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115932>
12. Давыдова П.В., Корнейко Ю.И., Королев В.А., Красников Л.В., Крецер Ю.Л. Извлечение палладия из азотнокислых растворов переработки отработавшего ядерного топлива. // Радиохимия. – 2022. – Т. 64. – № 3. – С. 1 – 4.
13. Shiho Asai, Takumi Yomogida, Morihisa Saeki, Hironori Ohba, Yukiko Hanzawa, Takuma Horita, and Yoshihiro Kitatsuji. Determination of <sup>107</sup>Pd in Pd Recovered by Laser-Induced Photoreduction with Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. // Analytical Chemistry. – 2016. – Vol. 88 (24). – PP. 12227 – 12233. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b03286>
14. Галль Н.Р., Галль Л.Н., Бердников А.С., Семенов А.А., Лизунов А.В., Сафиуллина А.М. Перспективы электромагнитного метода разделения изотопов и возможные пути его модернизации // ВАНТ. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2019. – № 1. – С. 65 – 77.
15. Похитонов Ю.А., Тананаев И.Г. Перспективы использования палладия из отработавшего ядерного топлива АЭС и пути освоения технологии его выделения на радиохимическом предприятии // Радиохимия. – 2022. – Т. 64. – № 3. – С. 203 – 212.

16. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ. – 2012. – 156 с.
17. Sato T., Iwamoto Y., Hashimoto S., Ogawa T., Furuta T., Abe S., Kai T., Matsuya Y., Matsuda N., Hirata Y., Sekikawa T., Yao L., Tsai P.E., Hunter H.N., Iwase H., Sakaki Y., Sugihara K., Shigyo N., Sihver L., Niita K. Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System – PHITS version 3.33. // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2023. – Vol. 61. – № 1. – PP. 127M135. DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2275736>
18. Georgia S.J. Study of the electrons range in soft tissue with the energy up to 50 keV. / International Symposium on Standards, Applications and Quality Assurance in Medical Radiation Dosimetry. Vienna, Austria, 18-21 June 2019. Электронный ресурс: [https://humanhealth.iaea.org/HHW/MedicalPhysics/e-learning/IDOS2019/presentations/Wed/Dosimetry\\_for\\_Radiobiology\\_Experiments/Santos\\_Joana.pdf](https://humanhealth.iaea.org/HHW/MedicalPhysics/e-learning/IDOS2019/presentations/Wed/Dosimetry_for_Radiobiology_Experiments/Santos_Joana.pdf) (дата доступа: 07.05.2024).
19. Lademann J., Richter H., Astner S., Patzelt A., Knorr F., Sterry W., Antoniou Ch. Determination of the thickness and structure of the skin barrier by in vivo laser scanning microscopy. // Laser Physics Letters. – 2008. – Vol. 5. – No. 4. – PP. 311 – 315. DOI: <https://doi.org/10.1002/lapl.200710122>
20. Зайцев Б.Н., Королев В.А., Попик В.П., Прокопчук Ю.З., Чубаров М.Н. Некоторые характеристики «реакторного» палладия. // Радиохимия. – 1988. – №3. – С. 411 – 412.

Поступила в редакцию 10.07.2024

### Авторы

Ковалев Никита Владимирович, научный сотрудник,

E-mail: [Kovalev@khlopin.ru](mailto:Kovalev@khlopin.ru)

Прокошин Александр Михайлович, ведущий инженер,

E-mail: [A.M.Prokoshin@khlopin.ru](mailto:A.M.Prokoshin@khlopin.ru)

Давыдова Полина Викторовна, младший научный сотрудник,

E-mail: [Davydova@khlopin.ru](mailto:Davydova@khlopin.ru)

Королев Владимир Алексеевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н.

E-mail: [VKorolev@khlopin.ru](mailto:VKorolev@khlopin.ru)

UDC 546.98; 621.039.59; 661.898.1

### Radiation Characteristics of Reactor Grade Platinum Group Metals

**Kovalev N.V., Prokoshin A.M., Davydova P.V., Korolev V.A.**

JSC «V.G. Khlopin Radium Institute»,

28 2-oy Murinsky Ave., 194021 St.Petersburg, Russia

### Abstract

The paper examines the radiation characteristics of noble platinum group metals (PGMs) extracted from spent nuclear fuel (SNF) of the VVER-1000 reactor. These are the so-called reactor-grade ruthenium, rhodium and palladium. PGMs are radioactive when extracted from SNF, but after the decay cooling of ruthenium for about 27 years, and of rhodium for about 13 years, they can be used in unlimited quantities. There is no sense in decay cooling of reactor-grade palladium due to its radioactive isotope  $^{107}\text{Pd}$  having a half-life of 6.5 million years. As specified by regulatory documents, such palladium can be freely used only in quantities of up to 34 g.  $^{107}\text{Pd}$  is a soft beta emitter with a maximum beta particle energy of 34 keV. The calculation results show that the mean free path of beta particles from  $^{107}\text{Pd}$  in palladium metal is 0.8  $\mu\text{m}$ ,

so reactor-grade palladium emits only from the surface layer, and other electrons are absorbed in the material itself. The mean free path of electrons with an energy of 34 keV in biological tissue is about 20  $\mu\text{m}$ , which does not exceed the thickness of the skin epidermis/corneous layer. Calculations have shown that the equivalent dose rate (EDR) on the surface of reactor-grade palladium is 0.04  $\mu\text{Sv/h}$ , which is below the public EDR value. As a result, a conclusion is made that reactor-grade palladium does not pose a danger in the event of external contact.

**Keywords:** spent nuclear fuel, noble metals, platinoids, platinum group metals, PGMs, reactor PGMs, man-made PGMs, ruthenium, rhodium, palladium, spent nuclear fuel, SNF.

**For citation:** Kovalev N.V., Prokoshin A.M., Davydova P.V., Korolev V.A. Radiation Characteristics of Reactor Grade Platinum Group Metals. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 4, pp. 47 – 55. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.04> (in Russian).

### References

1. Pokhitonov Yu.A. Recovery of platinoids from NPP spent nuclear fuel and outlook for their use. *Atomic Energy*. 2020, v. 127, no. 6, pp. 367 – 374. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00638-y>
2. Kovalev N.V., Prokoshin A.M., Kudinov A.S., Nevinitsa V.A. Calculation of the nuclide composition of unloaded SNF using a nuclear physics model of the core and endless fuel assembly of VVER-1000. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and reactor constants*. 2024, no. 1, pp. 72 – 82 (in Russian).
3. Kovalev N.V., Prokoshin A.M., Kudinov A.S., Nevinitsa V.A. Use of remix spent mixed fuel plutonium in the BN-1200 reactor. *Nuclear Energy and Technology*. 2023, no. 9(2), pp. 131 – 136. DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.9.107762>
4. Leppanen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*. 2015, v. 82, pp. 142 – 150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>
5. *Strategy for the development of nuclear energy in Russia until 2050 and prospects for the period until 2100*. Moscow, State Corporation «Rosatom» Publ., 2018, 62 p. (in Russian).
6. Batorshin G.Sh., Kirillov S.N., Smirnov I.V., Sarychev G.A., Tananaev I.G., Fedorova O.V., Mya-soedov B.F. Complex extraction of valuable components from anthropogenic radioactive waste as an option of establishing cost-effective closed nuclear fuel cycle. *Journal of radiation safety issues*. 2015, v. 79, no. 3, pp. 30 – 36. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24833978> (accessed Mar. 07, 2024) (in Russian).
7. Onishi T., Sekioka K., Suto M., Tanaka K., Koyama Sh., Inaba Yu., Takahashi H., Harigai M., Takeshita K. Adsorption of platinum-group metals and molybdenum on to aluminum ferrocyanide in spent fuel solution. *Energy Procedia*. 2017, no. 131, pp. 151–156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.421>
8. Lopukh D.B., Skrigan I.N., Vavilov A.V., Martynov A.P. Numerical Studies of Processes in an Induction Furnace with a Cold Crucible for Vitrification of High-Level Waste That Contains Noble Metals. *Russian Electrical Engineering*. 2023, no. 94, pp. 169 – 173. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068371223030100>
9. Labe V., Hollebecque J.F., Gruber P., Lemonnier S., Nonnet H., Puig J., Chauvin E., Boudot E. Incorporation of Noble Metals in High-Level Waste Borosilicate Glass: Focus on Vitrification Process Developments. *Proc. of the WM2014 Conference, Phoenix, Arizona, USA, March 2-6, 2014*. WM Symposia Publ., 2014, pp. 1 – 12. Available at: <https://archivedproceedings.econference.io/wmsym/2014/papers/14067.pdf> (accessed Mar. 07, 2024)
10. Mishima R., Inaba Yu., Tachioka S., Harigai M., Watanabe Sh., Onoe J., Nakase M., Matsumura T., Takeshita K. Sorption properties of aluminum hexacyanoferrate for platinum group elements. *Chemistry Letters*. 2020, v. 49, pp. 83 – 86. DOI: <https://doi.org/10.1246/cl.190741>



11. Wang Q., Sang H., Chen L., Wu Y., Wei Y. Selective separation of Pd (II) through ion exchange and oxidation–reduction with hexacyanoferrates from high-level liquid waste. *Separation and Purification Technology*. 2020, v. 231, pp. 1 – 10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115932>
12. Davydova P.V., Korneyko Yu.I., Korolev V.A., Krasnikov L.V., Kretser Yu.L. Recovery of palladium from nitric acid solutions of spent nuclear fuel reprocessing. *Radiochemistry*. 2022, v. 64, no. 3, pp. 280 – 283. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1066362222030031>
13. Shiho Asai, Takumi Yomogida, Morihisa Saeki, Hironori Ohba, Yukiko Hanzawa, Takuma Horita, Yoshihiro Kitatsuji. Determination of  $^{107}\text{Pd}$  in Pd Recovered by Laser-Induced Photoreduction with Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*. 2016, v. 88(24), 12227–12233 p. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b03286>
14. Gall N.R., Gall L.N., Berdnikov A.S., Semenov A.A., Lizunov A.V., Safulina A.M. Prospects for the electromagnetic method of isotope separation and possible ways of its modernization. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedeniye i Novyye Materialy*. 2019, no. 1, pp. 65 – 77 (in Russian).
15. Pokhitonov Y.A., Tananaev I.G. Prospects for the use of palladium from NPP spent nuclear fuel and ways to design the technology of its recovery at a radiochemical enterprise. *Radiochemistry*. 2022, vol. 64, no. 3, pp. 270 – 279. DOI: <https://doi.org/10.1134/S106636222203002X>
16. Gurevich M.I., Shkarovsky D.A. *Calculation of neutron transfer by the Monte Carlo method using the MCU program: Tutorial*. Moscow, MEPhI Publ., 2012, 156 p.
17. Sato T., Iwamoto Y., Hashimoto S., Ogawa T., Furuta T., Abe S., Kai T., Matsuya Y., Matsuda N., Hirata Y., Sekikawa T., Yao L., Tsai P.E., Hunter H.N., Iwase H., Sakaki Y., Sugihara K., Shigyo N., Sihver L., Niita K. Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System – PHITS version 3.33. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2023, vol. 61, no 1, pp. 127 – 135. DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2275736>
18. Georgia S.J. Study of the electrons range in soft tissue with the energy up to 50 keV. *Proc. of the International Symposium on Standards, Applications and Quality Assurance in Medical Radiation Dosimetry, Vienna, June 18–21, 2019*. Available at: [https://humanhealth.iaea.org/HHW/MedicalPhysics/e-learning/IDOS2019/presentations/Wed/Dosimetry\\_for\\_Radiobiology\\_Experiments/Santos\\_Joana.pdf](https://humanhealth.iaea.org/HHW/MedicalPhysics/e-learning/IDOS2019/presentations/Wed/Dosimetry_for_Radiobiology_Experiments/Santos_Joana.pdf) (accessed Mar. 07, 2024).
19. Lademann J., Richter H., Astner S., Patzelt A., Knorr F., Sterry W., Antoniou Ch. Determination of the thickness and structure of the skin barrier by in vivo laser scanning microscopy. *Laser Physics Letters*. 2008, vol. 5, no. 4, pp. 31 – 315. DOI: <https://doi.org/10.1002/lapl.200710122>
20. Zaitsev B.N., Korolev V.A., Popik V.P., Prokopchuk Yu.Z., Chubarov M.N. Some characteristics of “reactor” palladium. *Radiochemistry*. 1988, no. 3, pp. 411–412 (in Russian).

## Authors

Nikita V. Kovalev, Researcher,

E-mail: [kovalev@khlopin.ru](mailto:kovalev@khlopin.ru)

Alexander M. Prokoshin, Leading Engineer,

E-mail: [A.M.Prokoshin@khlopin.ru](mailto:A.M.Prokoshin@khlopin.ru)

Polina V. Davydova, Junior Researcher,

E-mail: [Davydova@khlopin.ru](mailto:Davydova@khlopin.ru)

Vladimir A. Korolev, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [VKorolev@khlopin.ru](mailto:VKorolev@khlopin.ru)