

Научная статья  
УДК 669.014.2:669.14  
doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.037

## ПРОБЛЕМА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦИРКОНИЯ КАК ЦЕННОГО КОМПОНЕНТА ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

**Виктор Сергеевич Михалюк<sup>1</sup>, Иван Гундарович Тананаев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ООО «Группа компаний «Энергоинжиниринг»», Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья имени И. В. Тананаева Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

<sup>1</sup>viktor.mikhalyuk@yandex.ru

<sup>2</sup>geokhi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2159-8182>

### Аннотация

В статье представлены результаты по выделению из высокоактивных отходов циркония и из оболочек ОЯТ перспективного металла, который широко применяется в различных областях промышленности, в том числе в атомной отрасли

### Ключевые слова:

техногенные отходы, высокоактивные отходы, оболочки отработавшего топлива, цирконий

### Для цитирования:

Михалюк В. С., Тананаев И. Г. Проблема извлечения циркония как ценного компонента из техногенных радиоактивных отходов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 1. С. 210–213. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.037.

Original article

## THE PROBLEM OF EXTRACTING ZIRCONIUM AS A VALUABLE COMPONENT FROM MAN-MADE RADIOACTIVE WASTE

**Viktor S. Mikhalyuk<sup>1</sup>, Ivan G. Tananaev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>GC “Energoinzhenering”, Yekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Tananaev Institute of Chemistry—Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, Apatity, Russia

<sup>1</sup>viktor.mikhalyuk@yandex.ru

<sup>2</sup>geokhi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2159-8182>

### Abstract

The article presents the results of the extraction of zirconium from high-level waste and spent nuclear fuel cladding. Zirconium is a promising metal that is widely used in various industrial fields, including the nuclear industry.

### Keywords:

man-made waste, high-level waste, spent fuel cladding, zirconium

### For citation:

Mikhalyuk V. S., Tananaev I. G. The problem of extracting zirconium as a valuable component from man-made radioactive waste // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 210–213. doi:10.37614/2949-1215.2025.16.1.037.

Президент РФ В. В. Путин в 2001 г. подписал пакет законов, изменяющих часть 3 статьи 50 Закона «Об охране окружающей природной среды», в котором было впервые законодательно сформулировано понятие «отработавшее ядерное топливо» (ОЯТ) как возобновляемое комплексное сырье, при переработке которого образуются дополнительные ресурсы технически важных металлов. Научное обоснование указанного выше понятия основано на реальном составе ОЯТ. Отметим также, что, в отличие от природных руд, ОЯТ является возобновляемым ресурсом.

В составе ОЯТ находятся такие технически важные металлы, как <sup>90</sup>Sr и <sup>147</sup>Pm (необходимые для радиационных источников тока; выход при делении U 5,9 %), <sup>133</sup>, <sup>137</sup>Cs (источник ионизирующего излучения; 6,3 %), <sup>99</sup>Tc (основа катализаторов гидрирования и изомеризации органических соединений и противокоррозионных смесей; 6,11 %), благородные металлы Ru (3,0 %), Rh (0,05 %), Pd (1,4 %),

а также редкоземельные элементы (10 изотопов — от La до Dy — с выходами от 6,5 до  $10^{-5}$  %), составляющие ~30 % от массы всех ОЯТ, РБГ — радиоактивные благородные газы, в том числе Хе и Кг и др. (таблица) [1; 2].

#### Характеристика текущих ВАО от реактора ВВЭР-400 на РТ-1 [1]

| Содержание нуклидов, кг/т |                     |
|---------------------------|---------------------|
| Pu (60 % Pu-239)          | 8,5–9,5             |
| Np                        | 0,3–0,5             |
| Am-241,243                | 0,09                |
| Cm-242,244                | 0,04                |
| Pd                        | 0,3–1,4             |
| Tc                        | 0,8–0,9             |
| La                        | 0,88                |
| Ce                        | 0,82                |
| Nd                        | 0,32                |
| Pm                        | 0,32                |
| Sm                        | 0,03                |
| Eu                        | 0,01                |
| Tb                        | $2 \cdot 10^{-5}$   |
| Sr-90 (Бк/т)              | $2,4 \cdot 10^5$    |
| Cs-137 (Бк/т)             | $3,0 \cdot 10^{15}$ |

Понимание того, что ОЯТ нельзя рассматривать только как отходы или источник делящихся материалов, возникало еще на заре развития атомной энергетики. Так, первые публикации, касающиеся работ по выделению отдельных продуктов деления из облученного топлива, появились в трудах Второй Женевской международной конференции по мирному использованию атомной энергии (1958 г.) [3]. Здесь в качестве первых важных объектов практического применения, извлекаемых из высокоактивных отходов (ВАО) в процессах репроцессинга ОЯТ, выступили техногенные платиновые металлы. Смысл их выделения из ВАО состоит в том, что предполагаемые объемы их извлечения из техногенных источников могут превысить таковые при добыче из природных запасов [1]. Действительно, величины накопления платиноидов в ОЯТ энергетических реакторах АЭС на одну тонну уран-оксидного отработавшего топлива составляют от ~2 кг Ru, ~0,5 кг Rh и ~1,3 кг Pd в зависимости от степени его выгорания. Нужно учесть, что только в России объем ОЯТ составляет до 100 тыс. тонн.

Кроме текущих ВАО, поступающих при переработке ОЯТ, полезным источником получения ценных радионуклидов могут стать и накопленные радиоактивные отходы, полученные еще в XX в. при выполнении оборонных задач. Так, например, на ФГУП «ПО «Маяк»» многие годы проводится наработка радиоцезия, радиостронция и других нуклидов, востребованных в народном хозяйстве. За рубежом, в Японии, разработана технология извлечения из солевого расплава остеклованных РАО палладия, селена, цезия и циркония [4], а в США ученые из Аргоннской национальной лаборатории исследуют технологию, которая может найти применение для извлечения из ОЯТ редкоземельных элементов [5].

По нашему мнению, еще одним чрезвычайно полезным компонентом, находящимся в составе ОЯТ, является цирконий. Он широко применяется в различных областях техники и технологии, в том числе в атомной промышленности в качестве материала оболочек и конструктивных элементов тепловыделяющих сборок (ТВС), а также для создания различных видов вооружений и военной техники.

Содержание наработанного циркония в одной тонне ОЯТ зависит от типа реактора, глубины выгорания и времени выдержки топлива, составляя от 5 до 13 кг в составе долгоживущего изотопа  $^{93}\text{Zr}$  (период полураспада 1,61 млн лет), а также  $^{88}\text{Zr}$  (83 сут),  $^{95}\text{Zr}$  (64 сут) и  $^{89}\text{Zr}$  (78 ч).

Наиболее яркими примерами практического применения циркония, извлеченного из ВАО, являются: изготовление ТВС (с обогащением выше 98 % по изотопу  $^{90}\text{Zr}$ ), в котором практически

полностью исключается образование долгоживущего изотопа  $^{93}\text{Zr}$  [6], а энерговыработка ТВС увеличивается более чем на 5 % [7]; применение  $\beta$ -активного изотопа  $^{93}\text{Zr}$  в автономных источниках электрической энергии на основе бета-вольтаического эффекта; использование долгоживущего  $^{93}\text{Zr}$  в процессах иммобилизации опасных радионуклидов в минералоподобные матрицы с целью увеличения емкости насыщения ими.

Одним из возможных методов извлечения циркония из азотнокислых ВАО является его выделение в виде осадка молибдата циркония при упаривании рафинатов и обработке кубового остатка перед остекловыванием ВАО [1]. Достигается практически количественное извлечение циркония из раствора, содержащего 250 г/л урана в 3М  $\text{HNO}_3$  при введении  $\text{Cr(VI)}$  при мольном отношении  $\text{Cr(VI)}:\text{Zr(IV)} > 1$  в головной экстракционный блок классической структуры с последующей реэкстракцией целевого элемента совместно с технецием [8]. Но значительно большее его количество (около 30 % от массы) содержится в оболочках и конструкционных элементах ТВС в виде сплава  $\text{Zr-Nb}$ , в котором под действием нейтронного облучения нарабатываются долгоживущие и радиоактивные изотопы  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{92}\text{Nb}$  (34,7 млн лет) и  $^{94}\text{Nb}$  (20,3 тыс. лет).

В части будущего использования циркония, выделенного из состава оболочек ОЯТ, может стать разработка и внедрение перспективного хлорного способа удаления из оболочек остатков топлива и высокоактивного ниобия, обогащение целевых изотопов  $^{90}\text{Zr}$  до 98 % с последующим разделением изотопов на основе различий в их физических свойствах [9].

Получение в результате упомянутого процесса мало активируемого циркония позволит улучшить эксплуатационные и технологические характеристики ТВС (увеличение более чем на 5 % энерговыработки, улучшение баланса нейтронов, повышение среднего выгорания топлива, увеличение длины топливного цикла), вернуть в промышленный оборот не менее половины обращающегося на рынке металла; ликвидировать зависимость атомной отрасли от импорта циркония, который, согласно отчету Счетной палаты РФ, в период с 2018 по 2020 г. составлял до 85 % [10]; повысить рентабельность процессов переработки ОЯТ и обращения с РАО.

#### Список источников

1. Тананаев И. Г., Мясоедов Б. Ф. Проблемы ядерного топливного цикла // Журнал Российского химического общества им. Д. И. Менделеева. 2010. Т. LIV, № 3. С. 6–8.
2. Баторшин Г. Ш., Кириллов С. Н., Смирнов И. В., Сарычев Г. А., Тананаев И. Г., Фёдоров О. В., Мясоедов Б. Ф. Комплексное выделение ценных компонентов из техногенных радиоактивных отходов как вариант создания рентабельного ЗЯТЦ // Вопросы радиационной безопасности — И. С. Труды Второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева 1958. Доклады советских ученых. Получение и применение изотопов / под общ. ред. акад. Г. В. Курдюмова и чл.-кор. АН СССР И. И. Новикова. М.: Атомиздат, 1959. С. 7–24.
3. <https://www.atomic-energy.ru/news/2019/03/20/93413>.
4. <https://www.anl.gov/article/argonne-innovations-squeeze-more-out-of-used-nuclear-fuel-and-rare-earth-materials>.
5. Апсэ В. А., Шмелев А. Н., Куликов Г. Г. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 1997. № 5. С. 30–35.
6. Троценко Н. М., Чельцов А. Н., Соснин Л. Ю. Исследование процессов синтеза бинарного фторида циркония с повышенной летучестью и термостойкостью // Перспективные материалы. 2011. № 10. С. 316.
7. Пат. РФ / Сытник Л. В., Зильберман Б. Я., Блажева И. В., Шадрин А. Ю., Пузиков Е. А., Голецкий Н. Д., Кухарев Д. Н., Боровиков Е. А., Федоров Ю. С. № 2 454 741, 2012.
8. Пат. РФ. Способ получения высокообогащенных изотопов циркония / Аржаткина О. А., Михалюк В. С., Хомяков С. Г., Чуйков С. Ф. № 2 660 850, 2016.
9. <https://www.mining-portal.ru/publish/vlasti-vspomnili-pro-redkie-metally/>.
10. Отчет о результатах контрольного мероприятия «Оценка эффективности управления государственным фондом недр в 2018–2019 годах и истекшем периоде 2020 года в целях устойчивого обеспечения базовых отраслей экономики страны видами минерального сырья, ресурсы которых недостаточны и обеспечиваются в том числе за счет импорта». С. 14. URL: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/64f/86t1xajzpwu5blnw66q0rieuy094t8oj.pdf>.

## References

1. Tananaev I. G., Myasoedov B. F. Problemy yadernogo toplivnogo tsikla [Problems of the nuclear fuel cycle]. *Zhurnal Rossiyskogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva* [Zhurnal Rossiyskogo khimicheskogo obshchestva im. D. I. Mendeleeva], 2010, vol. LIV, No. 3, pp. 6–8. (In Russ.).
2. Batoshin G. Sh., Kirillov S. N., Smirnov I. V., Sarichev G. A., Tananaev I. G., Fyodorov O. V., Myasoedov B. F. Kompleksnoe vydelenie tsennykh komponentov iz tekhnogennykh radioaktivnykh otkhodov kak variant sozdaniya rentabel'nogo ZYATs [Comprehensive isolation of valuable components from man-made radioactive waste as an option for creating a cost-effective nuclear power plant]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — I. S. Trudy Vtoroy Mezhdunarodnoy konferentsii po mirnomu ispol'zovaniyu atomnoy energii, Zheneva 1958. Doklady sovetskikh uchennykh. Poluchenie i primeneniye* [Radiation Safety Issues—I. S. Proceedings of the Second International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva 1958. Reports of Soviet scientists. Production and application of isotopes]. Moscow, Atomizdat, 1959, pp. 7–24. (In Russ.).
3. <https://www.atomic-energy.ru/news/2019/03/20/93413>.
4. <https://www.anl.gov/article/argonne-innovations-squeeze-more-out-of-used-nuclear-fuel-and-rare-earth-materials>.
5. Apse V. A., Shmelev A. N., Kulikov G. G. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika* [Izvestiya vuzov. Nuclear power engineering], 1997, No. 5, pp. 30–35. (In Russ.).
6. Trotsenko N. M., Chel'tsov A. N., Sosnin L. Yu. Issledovanie protsessov sinteza binarnogo florida tsirkoniya s povyshennoy letuchest'yu i termostoykost'yu [Investigation of the synthesis of binary zirconium fluoride with increased volatility and heat resistance]. *Perspektivnye materialy* [Promising materials], 2011, no. 10, pp. 316. (In Russ.).
7. Pat. RF. Sytnik L. V., Zil'berman B. Ya., Blazheva I. V., Shadrin A. Yu., Puzikov E. A., Goletskij N. D., Kukharev D. N., Borovikov E. A., Fyodorov Yu. S. No. 2 454 741, 2012.
8. Pat. RF. *Sposob polucheniya vysokookobogashchennykh izotopov tsirkoniya* [Method of obtaining highly enriched zirconium isotopes]. Arzhatkina O. A., Mikhalyuk V. S., Khomyakov S. G., Chuykov S. F. No. 2 660 850, 2016.
9. <https://www.mining-portal.ru/publish/vlasti-vspomnili-pro-redkie-metally/>.
10. Otchet o rezultatah kontrol'nogo meropriyatiya “Ocenka effektivnosti upravleniya gosudarstvennym fondom nedr v 2018–2019 godah i istekshem periode 2020 goda v tselyakh ustojchivogo obespecheniya bazovykh otrasley ekonomiki strany vidami mineral'nogo syr'ya, resursy kotorykh nedostatochny i obespechivayutsya v tom chisle za schet importa” [Report on the results of the control event "Assessment of the effectiveness of the management of the state subsoil fund in 2018–2019 and the future period of 2020 in order to sustainably provide the basic sectors of the country's economy with types of mineral raw materials, the resources of which are insufficient and are provided, among other things, by natural resources import account", p. 14. Available at: <https://ach.gov.ru/upload/iblock/64f/86t1xajzpwu5blnw66q0rieuy094t8oj.pdf>.

## Информация об авторах

**В. С. Михалюк** — научный советник;

**И. Г. Тананаев** — академик РАН, доктор химических наук, заместитель генерального директора ФИЦ КНЦ РАН по научной работе.

## Information about the authors

**V. S. Mikhalyuk** — Scientific Advisor;

**I. G. Tananaev** — DSc (Chemistry), Deputy CEO FRC KSC RAS.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 09.07.2025; принята к публикации 23.07.2025.

The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 09.07.2025; accepted for publication 23.07.2025.