

РАДИОХИМИЯ/RADIOCHEMISTRY

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2>

СРАВНЕНИЕ СОРБЦИОННЫХ СВОЙСТВ ФЕРРОЦИАНИДНЫХ СОРБЕНТОВ МАРОК Т-35, НКФ-ГДТ И НКФ-Ц

Научная статья

Суетина А.К.^{1,*}, Воронина А.В.²¹ORCID : 0000-0003-0128-1601;²ORCID : 0000-0002-1116-6335;^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (annasuetina[at]mail.ru)

Аннотация

В статье представлено сравнение сорбционных свойств ферроцианидных сорбентов на носителях: Термоксид-35, НКФ-ГДТ и НКФ-Ц. Проведены исследования статистики сорбции цезия. Определены коэффициенты распределения цезия и статические обменные ёмкости. Полученные коэффициенты распределения цезия сорбентами в широкой области концентраций цезия в растворе сопоставимы и составляют $(3,5-7,5) \cdot 10^4$ мл/г. Самой высокой статической обменной ёмкостью 234 мг/г обладает сорбент НКФ-ГДТ. Изучено влияние на сорбцию цезия макрокомпонентов природных вод. Показано, что сорбенты селективно извлекают цезий в присутствии высоких концентраций натрия в растворе и могут быть использованы для концентрирования цезия из природных и сточных вод с целью их анализа или очистки, сорбенты Т-35 и НКФ-ГДТ — также для переработки жидких радиоактивных отходов.

Ключевые слова: Cs-137, сорбция, ферроцианид, Т-35, НКФ-Ц, НКФ-ГДТ.

COMPARISON OF SORPTION CHARACTERISTICS OF FERROCYANIDE SORBENTS MARKS T-35, NPF-HTD AND NPF-C

Research article

Suetina A.K.^{1,*}, Voronina A.V.²¹ORCID : 0000-0003-0128-1601;²ORCID : 0000-0002-1116-6335;^{1,2} Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (annasuetina[at]mail.ru)

Abstract

The paper presents a comparison of sorption properties of ferrocyanide sorbents on carriers: Termoxid-35, NPF-HTD and NPF-C. Studies of cesium sorption statics have been carried out. Cesium distribution coefficients and static exchange capacities were determined. The obtained cesium distribution coefficients of the sorbents in a wide range of cesium concentrations in solution are comparable and are $(3,5-7,5) \cdot 10^4$ ml/g. The highest static exchange capacity of 234 mg/g is possessed by the sorbent NPF-HTD. The influence of macrocomponents of natural waters on cesium sorption was studied. It is shown that the sorbents selectively extract cesium in the presence of high concentrations of sodium in solution and can be used to concentrate cesium from natural and waste waters for their analysis or purification, sorbents T-35 and NPF-HTD — also for processing of liquid radioactive waste.

Keywords: Cs-137, sorption, ferricyanide, T-35, NPF-C, NPF-HTD.

Введение

В процессе функционирования предприятий ядерного топливного цикла, а также при использовании радиоактивных веществ в научных и технических сферах, образуются значительные объёмы радиоактивных отходов с различным уровнем активности. Наибольшую экологическую угрозу представляют жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) низкого и среднего уровня активности, что обусловлено их большим количеством, высокой совокупной активностью и риском неконтролируемого распространения. В связи с этим проблема очистки ЖРО является одной из ключевых для развития атомной энергетики и связанных с ней отраслей промышленности [1].

Одной из наиболее существенных проблем в переработке ЖРО остается извлечение долгоживущих и токсичных радионуклидов, в число которых входит радионуклид Cs-137. Для этих целей наибольшее распространение получили сорбционные технологии. Сорбционные методы активно применяются в прикладной радиохимии — от очистки загрязнённых сточных и природных вод до переработки жидких радиоактивных отходов. В качестве сорбентов используются как органические ионообменные смолы, так и неорганические сорбенты. Последние обладают важными преимуществами, включая высокую химическую, термическую и радиационную устойчивость, а также, в ряде случаев, высокую селективность по отношению к извлекаемым веществам [2].

Эффективность сорбции веществ из водных растворов зависит не только от свойств самого сорбента, но и от физических и химических характеристик поглощаемого вещества, включая его растворимость. Свойства сорбентов определяются химической структурой их составляющих компонентов, пористой структурой гранул, а также внешними условиями, оказывающими влияние на процесс сорбции, такими как температура, продолжительность контакта фаз,

давление или уровень pH раствора. В свою очередь, характер химической активности поглощаемого вещества влияет на его способность связываться с сорбентом, что является важным фактором при очистке водных растворов [3].

Для селективного извлечения радионуклида Cs-137 наиболее широко применяются сорбенты на основе ферроцианидов, молибдатов и вольфраматов [4]. Особое место среди них занимают ферроцианиды переходных металлов (II), таких как никель, медь, цинк, железо и другие, благодаря их высокой селективности по отношению к Cs-137, особенно в условиях засоленных сред [5]. Эти материалы демонстрируют уникальные сорбционные свойства, позволяющие эффективно извлекать цезий из сложных многокомпонентных растворов.

В рамках проведённого исследования авторами статьи были изучены сорбционные характеристики композиционных ферроцианидных сорбентов Термоксид-35, НКФ-ГДТ и НКФ-Ц, сделана оценка возможности их применения для переработки жидких радиоактивных отходов и радиохимического анализа проб природных вод.

Материалы и методы исследования

В качестве сорбентов для исследования использованы: сорбент Термоксид-35, промышленно производимый АО «Неорганические сорбенты» (г. Заречный), сорбент НКФ-ГДТ и сорбент НКФ-Ц, разработанные на кафедре радиохимии и прикладной экологии ФТИ Уральского федерального университета.

Сорбент Т-35 по химическому составу представляет собой смешанный ферроцианид никеля-калия на основе гидратированного диоксида циркония ZrO_2 [6].

Сорбент НКФ-Ц представляет собой смешанный ферроцианид никеля-калия, нанесенный на целлюлозную матрицу.

Сорбент НКФ-ГДТ является ферроцианидом никеля-калия, химически нанесенным на матрицу гидратированного диоксида титана [7].

Исследование статистики межфазного распределения цезия на сорбентах Т-35, НКФ-Ц и НКФ-ГДТ проводили из предварительно отстоянной водопроводной воды. В раствор добавляли изотоп Cs-137, выполняющий роль радиоактивного индикатора. Объем раствора составлял $V = 50$ мл, масса сорбента — $m = 20$ мг, время контакта фаз составляло одну неделю. Необходимую концентрацию стабильного цезия в растворе обеспечивали добавлением раствора CsCl. Пробы измеряли на альфа-бета-радиометре УМФ-2000 с полупроводниковым детектором (Доза, Россия), отбирая их до и после сорбции.

По результатам измерений рассчитывали степень сорбции S и коэффициент распределения цезия K_d (мл/г) по уравнениям (1) и (2) соответственно:

$$S = \frac{I_{\text{неч}} - I_{\text{равн}}}{I_{\text{исх}}} \quad (1)$$

$$K_d = \frac{S}{1-S} \cdot \frac{V}{m} \quad (2)$$

где $I_{\text{исх}}$ – скорость счёта пробы раствора до сорбции, имп/с;

$I_{\text{равн}}$ – скорость счёта пробы раствора после сорбции, имп/с;

V – объем раствора, мл;

m – масса сорбента, г.

Также были рассчитаны равновесная концентрация цезия в растворе (3) и концентрация цезия в твёрдой фазе (4) по формулам:

$$C_p = C_0 \cdot (1 - S) \quad (3)$$

где C_0 – исходная концентрация в растворе, мг/л;

S – степень извлечения.

$$C_t = K_d \cdot C_p \quad (4)$$

где K_d – коэффициент распределения, мл/г;

C_p – равновесная концентрация в растворе, мг/мл.

Изучено влияние концентрации ионов натрия на процесс сорбции цезия сорбентами Т-35, НКФ-Ц и НКФ-ГДТ, поскольку катион Na^+ способен конкурировать с катионом Cs^+ за сорбционные центры. Эксперименты проводились в статических условиях с использованием модельных растворов, приготовленных на основе дистиллированной воды, содержащей радионуклид Cs-137 в качестве радиоактивного индикатора. Для задания начальной концентрации цезия применялся изотопный носитель в форме раствора CsCl. Концентрация ионов натрия регулировалась добавлением NaCl в диапазоне от 10^{-6} до 1 моль/л. Условия эксперимента включали массу сорбента 20 мг, объём раствора 50 мл и время контакта фаз продолжительностью семь суток.

Результаты и обсуждение

Результаты исследования сорбции цезия сорбентами Т-35, НКФ-Ц и НКФ-ГДТ из водопроводной воды представлены в виде изотерм сорбции на рис. 1, 2, 3.

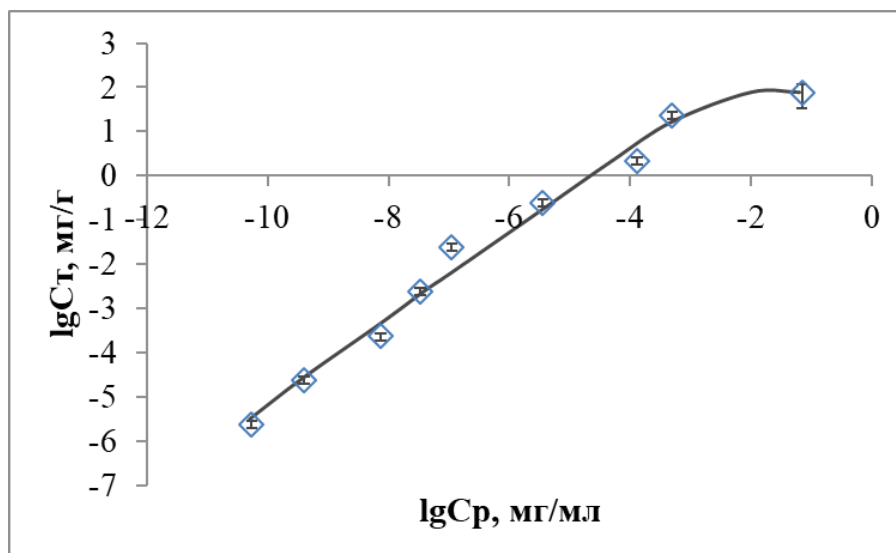


Рисунок 1 - Изотермы сорбции цезия сорбентом Т-35 из водопроводной воды
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.1>

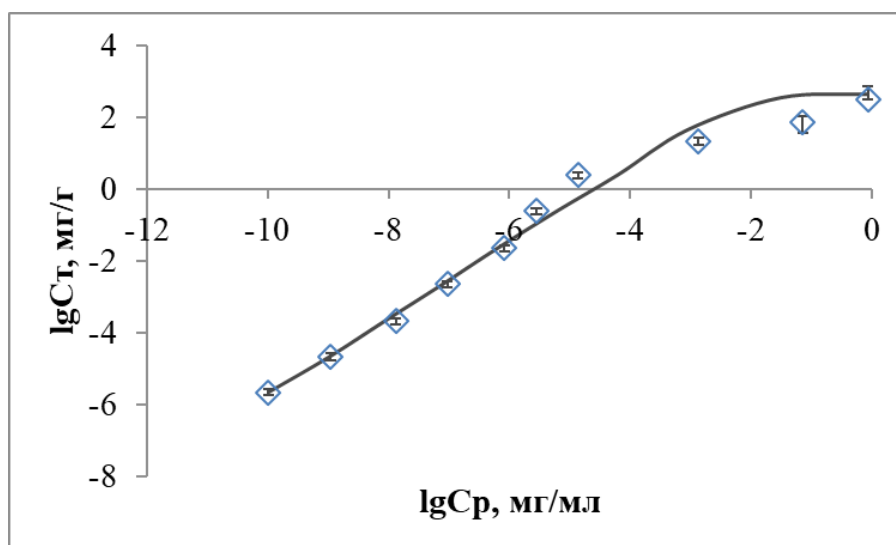


Рисунок 2 - Изотермы сорбции цезия сорбентом НКФ-Ц из водопроводной воды
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.2>

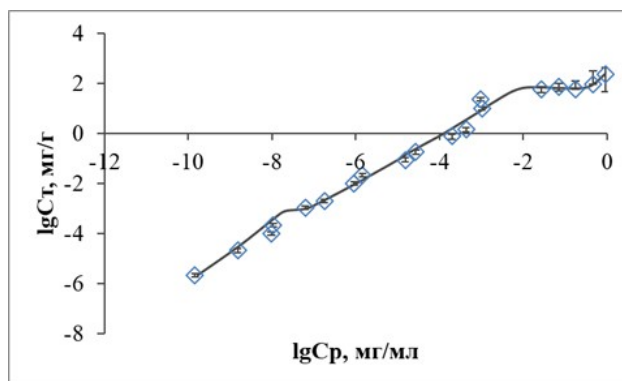


Рисунок 3 - Изотермы сорбции цезия сорбентом НКФ-ГДТ из водопроводной воды
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.3>

Анализ изотермы сорбции сорбентом Т-35 показал, что она состоит из единственного линейного участка, что указывает на наличие одного типа сорбционных центров. На всём интервале исследуемых концентраций изотерма хорошо описывается моделью Лэнгмюра. Генриевский коэффициент распределения цезия для данного сорбента составляет $3,5 \cdot 10^4$ мл/г ($\lg K_d = 4,5 \pm 0,9$). Угол наклона линейного участка изотермы характеризуется тангенсом $\lg \alpha = 0,97 \pm 0,13$, а статическая обменная ёмкость (СОЕ) равна 75 мг/г.

Изотерма сорбции сорбентом НКФ-Ц аналогично состоит из одного участка, что также указывает на наличие одного типа сорбционных центров. Во всём интервале концентраций изотерма подчиняется закономерностям модели Лэнгмюра. Генриевский коэффициент распределения цезия для данного сорбента равен $7,5 \cdot 10^4$ мл/г ($\lg K_d = 4,9 \pm 1,1$). Тангенс угла наклона линейного участка изотермы составляет $\lg \alpha = 1,06 \pm 0,16$, а полная СОЕ = 70 мг/г.

В отличие от предыдущих материалов, изотерма сорбции цезия сорбентом НКФ-ГДТ демонстрирует более сложный профиль, включающий три различных участка. Каждый из этих участков отражает вклад определённых типов сорбционных центров, которые характеризуются своими значениями коэффициентов распределения и обменной ёмкости. Детализированные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты обработки изотермы сорбции сорбентом НКФ-ГДТ

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.4>

| Участки | 1 | 2 | 3 |
|--|--------------------------------|-------------------|------------------------|
| Исходная концентрация цезия в растворе, мг/л | $10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-4}$ | $10^{-3} \div 50$ | $50 \div 3 \cdot 10^3$ |
| $\lg K_d$, мл/г | $4,4 \pm 1,7$ | $3,7 \pm 0,8$ | $2,3 \pm 1,7$ |
| СОЕ, мг/г | 0,001 | 57,5 | 234 |

В результате модифицирования сорбент получается полифункциональный и химизм сорбции цезия сорбентом НКФ-ГДТ различается при различных концентрациях цезия в растворе:

- При концентрациях цезия в растворе до $5 \cdot 10^{-4}$ мг/л цезий сорбируется фазой смешанного ферроцианида никеля-калия:

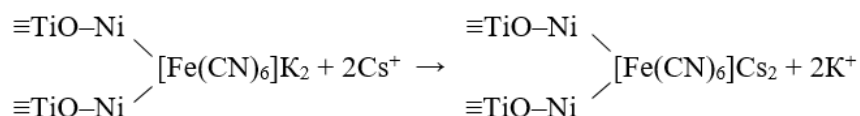


Рисунок 4 - Формула 5

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.5>

Этот химизм является основным при сорбции цезия из природных вод, в которых содержание цезия составляет $10^{-6}-10^{-9}$ г/л [8].

- При концентрациях цезия в растворе $5 \cdot 10^{-4} \div 50$ мг/л цезий сорбируется фазой ферроцианида калия-титанила:

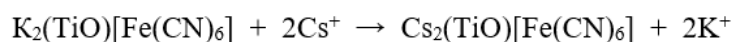


Рисунок 5 - Формула 6

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.6>

- В области высоких концентраций цезия в растворе поглощение цезия сорбентом НКФ-ГДТ происходит за счёт осаждения в порах сорбента малорастворимого ферроцианида никеля-цезия [9].

В таблице 2 представлены сводные данные о составе и сорбционных характеристиках сорбентов Т-35, НКФ-Ц и НКФ-ГДТ.

Таблица 2 - Характеристики ферроцианидных сорбентов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.7>

| Сорбент | Доля Ni в фазе сорбента, мг/г | K_d , мл/г | СОЕ, мг/г |
|---------|-------------------------------|----------------------------|-----------|
| Т-35 | 60 | $(3,5 \pm 0,7) \cdot 10^4$ | 75 |
| НКФ-Ц | 80 | $(7,5 \pm 1,7) \cdot 10^4$ | 70 |
| НКФ-ГДТ | 17,6 | $(4,4 \pm 0,3) \cdot 10^4$ | 234 |

Из таблицы очевидно, что сорбент НКФ-ГДТ характеризуется самым низким содержанием никеля в фазе сорбента и более высокой статической обменной ёмкостью. Содержание Ni в активной фазе сорбента Т-35 составляет 60 мг/г [10]. Доля Ni в фазе сорбента НКФ-Ц — 80 мг/г. Содержание Ni в фазе сорбента НКФ-ГДТ составляет только 17,6 мг/г. Коэффициенты распределения цезия сорбентами близки.

Различие в сорбционной ёмкости может проявляться при концентрировании Cs-137 из подземных, морских и высокосолевых вод, содержащих значительное количество компонентов, являющихся химическими аналогами цезия. Это особенно важно при концентрировании цезия из вод большого объёма.

На рис. 6, 7, 8 представлены зависимости коэффициента распределения цезия сорбентами Т-35, НКФ-ГДТ и НКФ-Ц от концентрации натрия в растворе. Сорбенты обладают высокой селективностью к цезию на фоне элемента-аналога натрия. На всём интервале концентраций натрия коэффициенты распределения цезия сорбентами Т-35, НКФ-ГДТ и НКФ-Ц остаются постоянными и составляют соответственно $4,0 \cdot 10^4$, $6,3 \cdot 10^4$ и $1,0 \cdot 10^5$ мл/г.

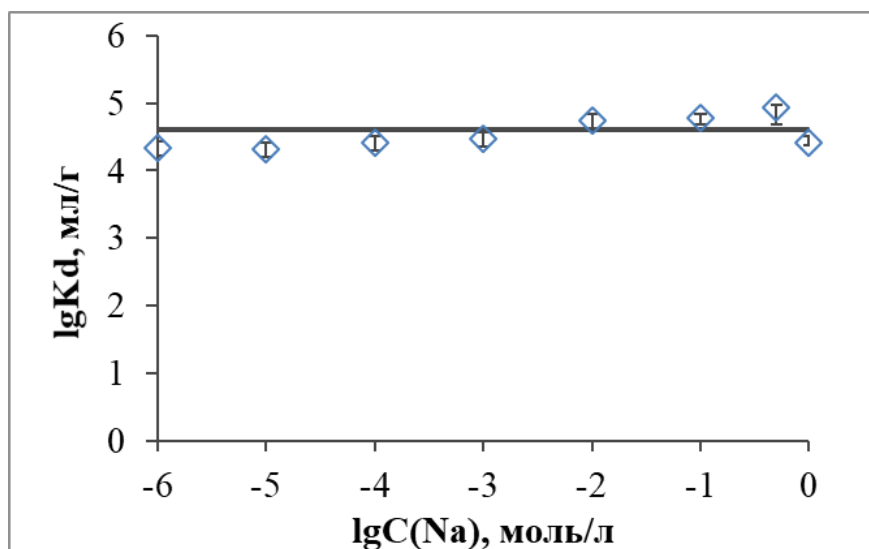


Рисунок 6 - Зависимости коэффициента распределения цезия сорбентам Т-35 от концентрации натрия в растворе
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.8>

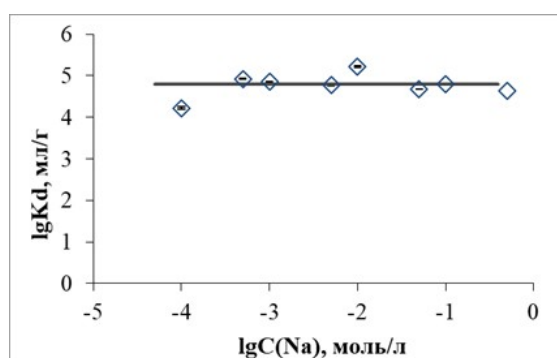


Рисунок 7 - Зависимости коэффициента распределения цезия сорбентам НКФ-ГДТ от концентрации натрия в растворе
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.9>

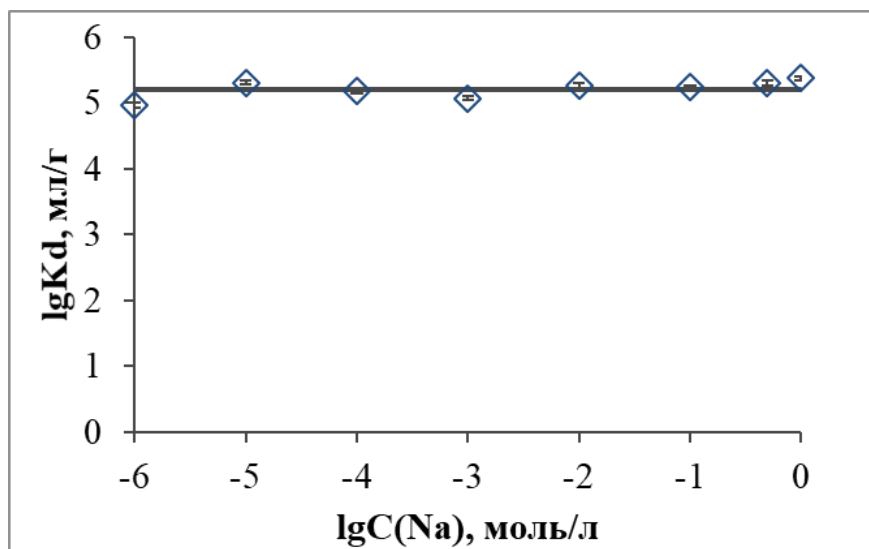


Рисунок 8 - Зависимости коэффициента распределения цезия сорбентам НКФ-Ц от концентрации натрия в растворе

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160s.2.10>

Проведённые исследования показали, что сорбенты обладают хорошими эксплуатационными характеристиками, что делает их потенциально пригодными для решения как технологических задач, так и задач охраны окружающей среды. Сорбенты Т-35 и НКФ-ГДТ могут быть пригодны для удаления Cs-137 из природных, сточных вод и жидких радиоактивных отходов. Сорбент НКФ-ГДТ может иметь преимущество при сорбции цезия из высокосолевых растворов, так как имеет более высокое значение СОЕ. Практическое применение сорбенты могут также найти для радиохимического анализа Cs-137 в водных пробах.

В работе [11] нами предложен метод определения Cs-137 в пробах природных и сточных вод, основанный на концентрировании цезия сорбентами Т-35, НКФ-ГДТ или НКФ-Ц. В работах [12], [13] разработанный метод использован для радиоэкологического мониторинга природных вод на территориях Свердловской и Челябинской областей, для контроля выноса Cs-137 в воды контрольно-наблюдательных скважин пунктов хранения и захоронения радиоактивных отходов.

Заключение

Проведены исследования сорбционно-селективных характеристик ферроцианидных сорбентов марок Т-35, НКФ-Ц, НКФ-ГДТ по отношению к радионуклидам цезия. Определены коэффициенты распределения, статические обменные ёмкости. Исследования показали, что по отношению к ионам цезия ферроцианидные сорбенты проявляют высокую селективность, сорбенты Т-35 и НКФ-ГДТ могут быть использованы как для переработки ЖРО, так и для проведения радиохимического анализа, сорбент НКФ-Ц преимущественно для анализа.

Финансирование

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке, проект № FEUZ-2023-0013.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out with partial financial support, project No. FEUZ-2023-0013.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Милютин В.В. Селективные неорганические сорбенты в современной прикладной радиохимии. / В.В. Милютин, Н.А. Некрасова, Е.А. Козлин // Труды Кольского научного центра РАН. — 2015. — № 5 (31). — С. 418-421.
2. Милютин В.В. Современные сорбционные материалы для очистки жидких радиоактивных отходов от радионуклидов цезия и стронция. / В.В. Милютин, Н.А. Некрасова, В.О. Каптаков // Радиоактивные отходы. — 2020. — № 4 (13). — С. 80-89.
3. Хлынина Н.Г. Изучение сорбционных свойств сорбентов в статических условиях. / Н.Г. Хлынина, И.С. Алексейко // Вестник КрасГАУ. — 2008. — № 1. — С. 92-99.

4. Семенищев В.С. Применение композитных сорбентов на основе ферроцианида никеля при определении содержания радионуклидов цезия в пробах природных вод. / В.С. Семенищев, С.М. Титова, А.В. Воронина и др. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2019. — № 5. — С. 108-123.
5. Пат. 2399974 Российская Федерация, МПК МПК G21F 9/12. Способ очистки от радионуклидов водной технологической среды атомных производств / Шарыгин Л.М.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество Производственно-научная фирма «Термоксид». — № 200911900006; заявл. 2009-05-19; опубл. 2010-09-20, Производственно-научная фирма «Термоксид». — 8 с.
6. Пат. 2113024 Российская Федерация, МПК МПК G21F9/12. Неорганический сферогранулированный композиционный сорбент на основе гидроксида циркония и способ его получения / Шарыгин Л.М., Моисеев В.Е., Муромский А.Ю. и др.; заявитель и патентообладатель Шарыгин Леонид Михайлович. — № 96103092; заявл. 1996-02-20; опубл. 1998-06-10, — 14 с.
7. Пат. 2746194 Российская Федерация, МПК МПК B01J 20/20. Способ получения неорганического ферроцианидного сорбента (варианты) / Воронина А.В., Ноговицына Е.В., Семенищев В.С. и др.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». — № 2019122021; заявл. 2019-07-12; опубл. 2021-04-08, — 48 с.
8. Кульский Л.А. Справочник по свойствам, методам анализа и очистке воды / Л.А. Кульский, И.Т. Гороновский, А.М. Когановский и др. — Киев: Наукова думка, 1980. — 680 с.
9. Воронина А.В. Исследование ферроцианидных сорбентов на основе гидратированного диоксида титана с применением физико-химических методов. / А.В. Воронина, В.С. Семенищев, Е.В. Ноговицына и др. // Радиохимия. — 2012. — № 1. — С. 66-70.
10. ТУ 2641-006-12342266-2004. Сорбент марки Термоксид-35. — Введ. 2004-12-20. — ЗАО Производственно-научная фирма «Термоксид», 2004. — 15 с.
11. Воронина А.В. Определение ^{137}Cs в природных и сточных водах с использованием ферроцианидных сорбентов на различных носителях: сравнительный анализ. / А.В. Воронина, А.К. Сутина // Радиохимия. — 2024. — № 4. — С. 360-371.
12. Сутина А.К. Радиоэкологический мониторинг содержания Cs-137 в природных водах Свердловской и Челябинской областей. / А.К. Сутина, А.В. Воронина // Бутлеровские сообщения. — 2024. — № 4. — С. 103-109. (дата обращения: 04.07.25).
13. Suetina A.K. Testing the method of Cs-137 determination in natural waters. / A.K. Suetina, A.V. Voronina // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — 2025. — 334. — P. 2635-2643. — DOI: 10.1007/s10967-024-09897-6

Список литературы на английском языке / References in English

1. Milyutin V.V. Selektivny'e neorganicheskie sorbenty' v sovremennoj prikladnoj radioximii [Selective inorganic sorbents in modern applied radiochemistry]. / V.V. Milyutin, N.A. Nekrasova, E.A. Kozlin // Proceedings of the Kola Scientific Center of RAS. — 2015. — № 5 (31). — P. 418-421. [in Russian]
2. Milyutin V.V. Sovremennyye sorbcionny'e materialy' dlya ochistki zhidkix radioaktivny'x otkhodov ot radionuklidov ceziya i stronciya [Modern Sorption Materials for Cesium and Strontium Radionuclide Extraction from Liquid Radioactive Waste]. / V.V. Milyutin, N.A. Nekrasova, V.O. Kaptakov // Radioactive Waste. — 2020. — № 4 (13). — P. 80-89. [in Russian]
3. Xly'nina N.G. Izuchenie sorbcionny'x svojstv sorbentov v staticheskix usloviyax [Study of sorption properties of sorbents in static conditions]. / N.G. Xly'nina, I.S. Aleksejko // Bulletin of KrasGAU. — 2008. — № 1. — P. 92-99. [in Russian]
4. Semenishhev V.S. Primenenie kompozitny'x sorbentov na osnove ferrocianida nikelya pri opredelenii soderzhaniya radionuklidov ceziya v probax prirodny'x vod [The use of composite sorbents based on nickel ferrocyanide in determination of cesium radionuclides in natural water samples]. / V.S. Semenishhev, S.M. Titova, A.V. Voronina et al. // Water Sector of Russia. — 2019. — № 5. — P. 108-123. [in Russian]
5. Pat. 2399974 Russian Federation, IPC МПК G21F 9/12. Sposob ochistki ot radionuklidov vodnoj texnologicheskoy sredy' atomny'x proizvodstv [Method of purification from radionuclides of aqueous technological environment of nuclear production facilities] / Shary'gin L.M.; the applicant and the patentee Closed Joint-stock Company Production and scientific company "Thermoxide". — № 200911900006; appl. 2009-05-19; publ. 2010-09-20, Proizvodstvenno-nauchnaya firma «Termoksid». — 8 p. [in Russian]
6. Pat. 2113024 Russian Federation, IPC МПК G21F9/12. Neorganicheskiy sferogranulirovannyj kompozicionnyj sorbent na osnove gidroksida cirkoniya i sposob ego polucheniya [Inorganic spherogranulated composite sorbent based on zirconium hydroxide and method of its preparation] / Shary'gin L.M., Moiseev V.E., Muromskij A.Yu. et al.; the applicant and the patentee Sharygin Leonid Mihajlovich. — № 96103092; appl. 1996-02-20; publ. 1998-06-10, — 14 p. [in Russian]
7. Pat. 2746194 Russian Federation, IPC МПК B01J 20/20. Sposob polucheniya neorganicheskogo ferrocianidnogo sorbenta (varianty) [Method of preparation of inorganic ferrocyanide sorbent (variants)] / Voronina A.V., Nogovicy'na E.V., Semenishhev V.S. et al.; the applicant and the patentee Ural Federal University. — № 2019122021; appl. 2019-07-12; publ. 2021-04-08, — 48 p. [in Russian]
8. Kulskii L.A. Handbook of water properties, methods of analysis and treatment / L.A. Kulskii, I.T. Goronovskii, A.M. Koganovskii et al. — Kiev: Naukova dumka, 1980. — 680 p. [in Russian]
9. Voronina A.V. Issledovanie ferrocianidny'x sorbentov na osnove gidratirovannogo dioksida titana s primeneniem fiziko-ximicheskix metodov [A study of ferrocyanide sorbents on hydrated titanium dioxide support using physicochemical methods]. / A.V. Voronina, V.S. Semenishhev, E.V. Nogovicy'na et al. // Radiochemistry. — 2012. — № 1. — P. 66-70. [in Russian]
10. ТУ 2641-006-12342266-2004. Сорбент марки Термоксид-35 [The sorbent of the Thermoxide-35 brand]. — Introduced 2004-12-20. — JSC «Termoxid». — 2004. — 15 p. [In Russian]

11. Voronina A.V. Opredelenie¹³⁷Cs v prirodny'x i stochny'x vodax s ispol'zovaniem ferrocianidny'x sorbentov na razlichny'x nositelyax: sravnitel'ny'j analiz [Determination of¹³⁷Cs in natural water and waste streams using ferrocyanide sorbents based on various supports: a comparative analysis]. / A.V. Voronina, A.K. Suetina // Radiochemistry. — 2024. — № 4. — P. 360-371. [in Russian]
12. Suetina A.K. Radioe'kologicheskij monitoring sodержaniya Cs-137 v prirodny'x vodax Sverdlovskoj i Chelyabinskoy oblastej [Radioecological monitoring of Cs-137 content in natural waters of the Sverdlovsk and Chelyabinsk regions]. / A.K. Suetina, A.V. Voronina // Butlerov Communications. — 2024. — № 4. — P. 103-109. (accessed: 04.07.25). [in Russian]
13. Suetina A.K. Testing the method of Cs-137 determination in natural waters. / A.K. Suetina, A.V. Voronina // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. — 2025. — 334. — P. 2635-2643. — DOI: 10.1007/s10967-024-09897-6