

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57>**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО SiO₂ для очистки модельных растворов, содержащих тяжелые металлы**

Научная статья

Федорова С.А.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-0703-8349;¹ Севастопольский государственный университет, Севастополь, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (sveta-fedorova-62[at]yandex.ru)

Аннотация

Достаточно надежным способом очистки сточных вод от тяжелых металлов является использование комбинации различных методов очистки. Чаще всего в основе лежат сорбционные методы. Среди сорбентов перспективным является использование наноструктурированных соединений. В нашей работе приведены результаты исследования сорбции Pb²⁺ наноструктурированным SiO₂ в присутствии Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺. Используя метод полного факторного эксперимента была получена количественная характеристика влияния присутствия катионов Cd²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺ на определение Pb²⁺. Эксперимент проводили в статических условиях (8, 16, 24 суток). Изменение концентрации Pb²⁺ определяли колориметрически плумбоновым методом при λ = 540 нм. В ходе экспериментального исследования с использованием ПФЭ были получены количественные характеристики влияния Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ на определение Pb²⁺. Отмечено, что использование нанопорошка SiO₂ позволяет очистить модельные растворы на 75% в статических условиях. Влияние Cd²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺ на сорбцию Pb²⁺ наноструктурированным SiO₂ существенного влияния не оказывает.

Ключевые слова: наноструктурированный SiO₂, сорбции Pb²⁺, полный факторный эксперимент.**USE OF NANOSTRUCTURED SiO₂ FOR PURIFICATION OF MODEL SOLUTIONS CONTAINING HEAVY METALS**

Research article

Fedorova S.A.^{1,*}¹ ORCID : 0000-0002-0703-8349;¹ Sevastopol State University, Sevastopol, Russian Federation

* Corresponding author (sveta-fedorova-62[at]yandex.ru)

Abstract

A sufficiently reliable way to treat wastewater from heavy metals is to use a combination of different treatment methods. Most often sorption methods are the basis. Among sorbents, the use of nanostructured compounds is promising. Our work presents the results of the study of Pb²⁺ sorption by nanostructured SiO₂ in the presence of Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺. Using the method of full factorial experiment, a quantitative characterization of the effect of the presence of Cd²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺ cations on the determination of Pb²⁺ was obtained. The experiment was conducted under static conditions (8, 16, 24 days). The change in Pb²⁺ concentration was determined colourimetrically by the plumbon method at λ = 540 nm. During the experimental study using PFE, quantitative characterization of the effect of Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ on the determination of Pb²⁺ was obtained. It was observed that the use of SiO₂ nanopowder allows the purification of model solutions by 75% under static conditions. The influence of Cd²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺ on the sorption of Pb²⁺ by nanostructured SiO₂ has no significant effect.

Keywords: nanostructured SiO₂, Pb²⁺ sorptions, full factorial experiment.**Введение**

Побочным эффектом наращивания мощностей производств является увеличение сточных вод промышленных предприятий. При этом ПДК по тяжелым металлам достаточно жесткие. Для очистки сточных вод применяются различные технологические схемы и оборудование. Наиболее эффективным способом очистки сточных вод от тяжелых металлов является комбинация различных методов очистки. Лидирующее место, на сегодняшний день, занимают сорбционные методы. Специалисты [1] считают, что для решения проблемы загрязнения окружающей среды целесообразно использовать нанопористые углеродные материалы. По данным отчета ИКТ «рынок нанотехнологий» [2], к 2032 году по сравнению с 2022 годом объем мирового рынка нанотехнологий увеличится в 3,8 раза (рисунок 1).

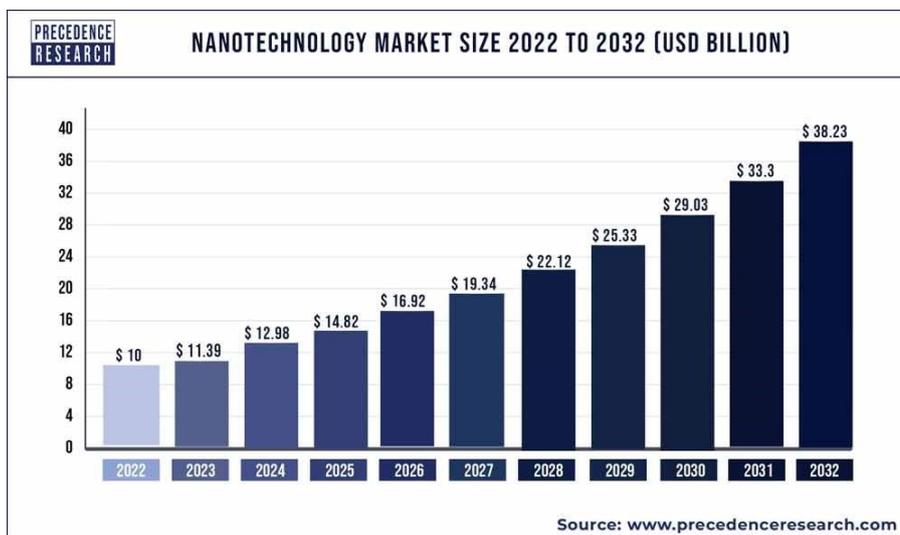


Рисунок 1 - Тенденции роста мирового объема нанотехнологий
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.1>

Примечание: источник [2]

Наноматериалы представляют собой структуры протяженностью менее 100 нм (нанометр, 10^{-9} м) в одном направлении. На этом уровне материалы обладают уникальными, обусловленными размерами, свойствами: химическими, адсорбционными, каталитическими, магнитными, механическими, оптическими, биологическими [3], [4]. Этим объясняется их широкое использование в различных направлениях человеческой деятельности, в том числе в области очистки и обеззараживания воды и сточных вод [3]. Среди наноструктурированных оксидов широкое применение нашел диоксид кремния, как один из наиболее дешевых в производстве порошков ультрадисперсного порядка [5], [6], [7], [8].

Одним из компонентов состава сточных вод является Pb^{2+} . Предварительные исследования [9], [10] показали целесообразность проведения дальнейших исследований по определению эффективности сорбции Pb^{2+} наноструктурированным SiO_2 в присутствии типичных компонентов Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} , характерных для сточных вод промышленных предприятий.

Методы и принципы исследования

Объектом исследования являются модельные растворы, содержащие Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} .

Предметом исследования – использование нанопорошков SiO_2 для очистки модельных растворов от ионов Pb^{2+} .

Целью исследования является определение степени очистки модельных сред от Pb^{2+} на нанопорошке SiO_2 в присутствии иных солей тяжелых металлов: Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} .

Задачи исследования:

1. Проанализировать возможности использования нанопорошка SiO_2 для очистки сточных вод от тяжелых металлов.
2. Провести экспериментальные исследования использования нанопорошка SiO_2 на степень очистки модельных сред от ионов Pb^{2+} в присутствии катионов Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} .

В ходе исследования использовали метод полного факторного эксперимента для подготовки анализируемых проб.

Определение ионов Pb^{2+} проводили фотоколориметрически плумбоновым методом на КФК-3.

Основные результаты

Используемые в работе нанопорошки были предварительно исследованы на электронном микроскопе Phenom World (рисунок 2).

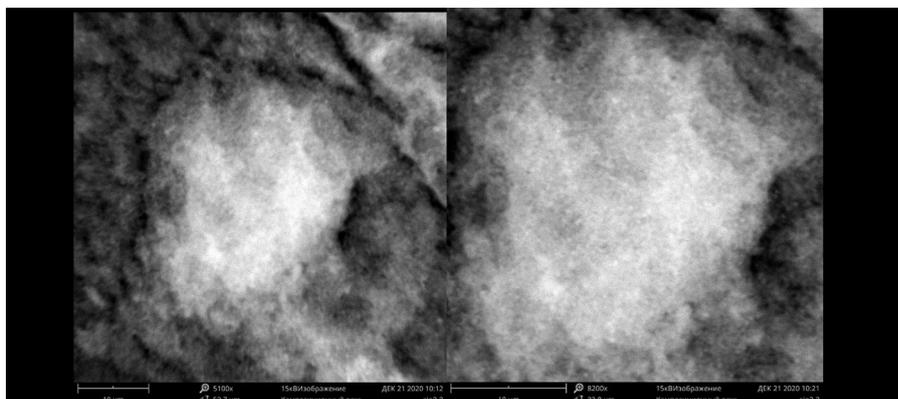


Рисунок 2 - Нанопорошок диоксида кремния:
слева – увеличение в 5100 раз, при общей длине фотокадра в 52,7 мкм; справа – увеличение в 8200 раз, при общей длине фотокадра 32,8 мкм

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.2>

Примечание: состав используемого нанопорошка диоксида кремния представлен в таблице 1 и на рисунке 3

Таблица 1 - Состав нанопорошка диоксида кремния

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.3>

Символ элемента	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
O	80,09	70,86		
Si	17,91	27,81	SiO ₂	97,81
C	2,00	1,33		

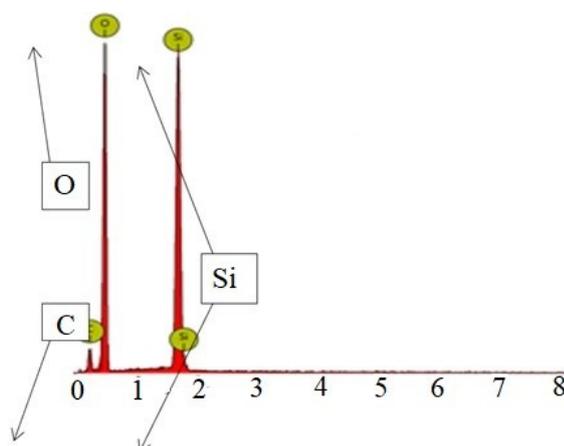


Рисунок 3 - Поэлементный состав
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.4>

Примечание: отключенные элементы: B, I, La, Sb, Te

Было проведено экспериментальное исследование по использованию нанопорошка SiO₂ на степень очистки модельных сред, содержащих Pb²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺.

Для экспериментального определения способности нанопорошков очищать модельные растворы будет проведен полный факторный эксперимент. Готовили 3 серии растворов. В каждой серии было 16 проб с порошком SiO₂. Сами

пробы компоновались из Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} . Также будут сделаны контрольные растворы с Pb^{2+} и нанопорошком SiO_2 . Концентрация Pb^{2+} во всех пробах была постоянной. Исследования проводили в статических условиях. Время экспозиции первой серии проб с нанопорошками 8 дней, второй – 16 дней, третьей – 24 дня

По истечении указанного времени пробы центрифугировали, декантировали, затем отбирали пипеткой Мора аликвоту в 10 мл, которую переносили в мерную колбу на 25 мл. В которой определяли Pb^{2+} плумбоновым методом на КФК-3.

Для проведения эксперимента моделировали состав проб, используя полный факторный эксперимент. В роли выходной величины Y будет выступать значение оптической плотности A . Рабочая матрица для четырехфакторного эксперимента представлена в таблице 2.

Таблица 2 - Рабочая матрица ПФЭ для четырех элементов

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.5>

№ опыта	Pb^{2+} , мг/л	Cd^{2+} , мг/л	Ni^{2+} , мг/л	Cu^{2+} , мг/л	Zn^{2+} , мг/л	Значение выходной величины Y
1	1	1	1	1	1	Y_1
2	1	1	1	1	-1	Y_2
3	1	1	1	-1	1	Y_3
4	1	1	1	-1	-1	Y_4
5	1	1	-1	1	1	Y_5
6	1	1	-1	1	-1	Y_6
7	1	1	-1	-1	1	Y_7
8	1	1	-1	-1	-1	Y_8
9	1	-1	1	1	1	Y_9
10	1	-1	1	1	-1	Y_{10}
11	1	-1	1	-1	1	Y_{11}
12	1	-1	1	-1	-1	Y_{12}
13	1	-1	-1	1	1	Y_{13}
14	1	-1	-1	1	-1	Y_{14}
15	1	-1	-1	-1	1	Y_{15}
16	1	-1	-1	-1	-1	Y_{16}

Концентрация Pb^{2+} во всех пробах была постоянной и составляла 1 мг/л. Минимальная концентрация для других катионов была 0,7 мг/л, а максимальная - 1,4 мг/л. Концентрация нанопорошка во всех пробах составляла 3%.

Значения измерения оптической плотности модельных растворов последней серии опытов (24 дня) представлены в таблице 3. Значения оптической плотности определяли на длине волны 540 нм. На основании результатов полного факторного эксперимента составим таблицу результатов.

Таблица 3 - Значения оптической плотности модельных растворов на 24-ый день эксперимента

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.6>

24 дня SiO_2		540 nm	540 nm	540 nm
Опыт	A1	A2	A3	Acp
1	0,357	0,358	0,357	0,357
2	0,216	0,215	0,216	0,216
3	0,239	0,240	0,239	0,239
4	0,141	0,142	0,141	0,141
5	0,564	0,566	0,565	0,565
6	0,201	0,202	0,201	0,201
7	0,298	0,299	0,299	0,299
8	0,237	0,237	0,239	0,238
9	0,309	0,309	0,310	0,309
10	0,177	0,179	0,175	0,177

11	0,208	0,209	0,207	0,208
12	0,120	0,121	0,122	0,121
13	0,470	0,469	0,470	0,470
14	0,273	0,271	0,272	0,272
15	0,358	0,359	0,358	0,358
16	0,209	0,208	0,209	0,209

Надежность полученных результатов подтверждается оценкой дисперсию среднего значения, представленной в таблице 4.

Таблица 4 - Вычисление дисперсий среднего для значений оптической плотности серии экспериментов (24 дня)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.7>

S_j^2	S_j	S_x	ϵ_p	Δ
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,128
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,213
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,192
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,325
1,000E-06	1,000E-03	2,500E-04	7,950E-04	0,141
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,228
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,154
1,333E-06	1,155E-03	2,887E-04	9,180E-04	0,386
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,148
4,000E-06	2,000E-03	5,000E-04	1,590E-03	0,898
1,000E-06	1,000E-03	2,500E-04	7,950E-04	0,382
1,000E-06	1,000E-03	2,500E-04	7,950E-04	0,657
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,098
1,000E-06	1,000E-03	2,500E-04	7,950E-04	0,292
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,128
3,333E-07	5,774E-04	1,443E-04	4,590E-04	0,220

Используя метод полного факторного эксперимента была получена количественная характеристика влияния присутствия катионов Cd^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} на определение Pb^{2+} (уравнение 1). Все коэффициенты были значимыми.

$$Y = 0,2738 + 0,0083X_1 - 0,0526X_2 + 0,0471X_3 + 0,0769X_4 \quad (1)$$

Сравнение расчетных и экспериментальных значений представлены в таблице 5 и на рисунке 4.

Таблица 5 - Сравнение расчетных и экспериментальных значений определения Pb^{2+} в присутствии катионов Cd^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} плюмбоновым методом

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.8>

Опыт	Аср	Y
1	0,357	0,353
2	0,216	0,200
3	0,239	0,259
4	0,141	0,105
5	0,565	0,459
6	0,201	0,305
7	0,299	0,364
8	0,238	0,211
9	0,309	0,337
10	0,177	0,183
11	0,208	0,243

12	0,121	0,089
13	0,470	0,442
14	0,272	0,288
15	0,358	0,348
16	0,209	0,194

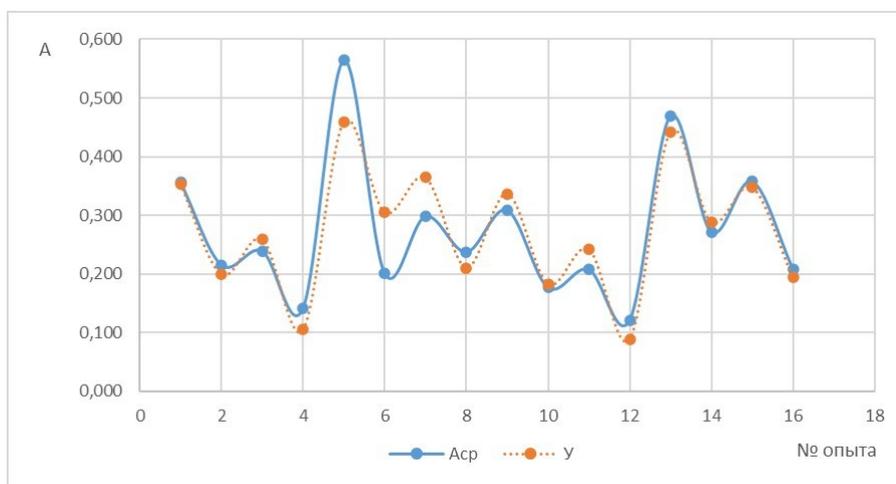


Рисунок 4 - Сравнение расчетных и экспериментальных значений определения Pb^{2+} в присутствии катионов Cd^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} плумбоновым методом
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.9>

Анализ других серий проводился аналогично. Сопоставление итоговых результатов представлено на рисунке 5. Отмечается аналогичный характер изменения содержания Pb^{2+} для различного состава проб во временном интервале.

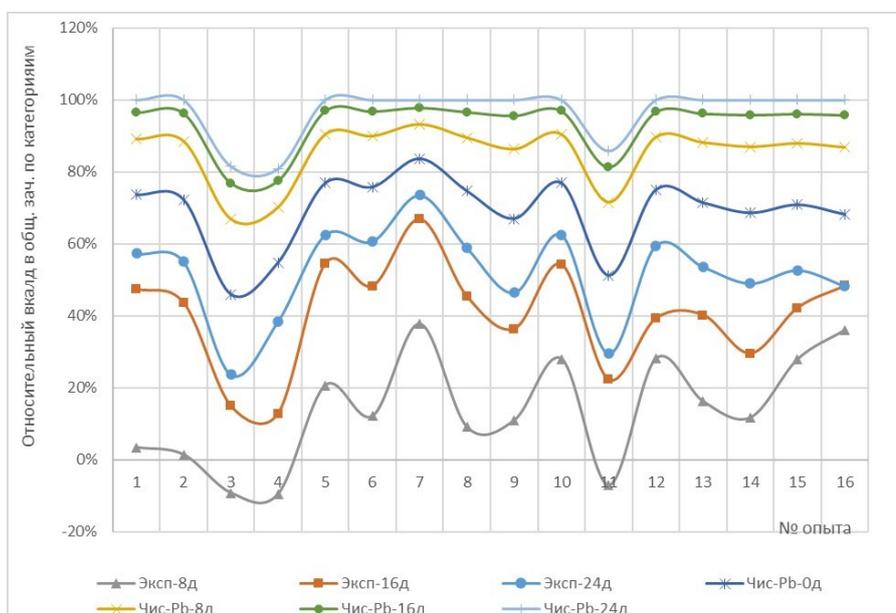


Рисунок 5 - Сравнение 8, 16 и 24 дневных экспериментальных кривых проб модельных растворов с нанопорошком SiO_2 и проб чистого Pb^{2+} с SiO_2 при $\lambda = 540$ нм
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.10>

Использован нормированный график с накоплениями для:

- отображения относительного вклада в общее значение со временем;
- отображения изменения вклада каждого значения со временем.

Как мы видим из графика (см рисунок 5) относительный вклад у значений на экспериментальных кривых со временем растет и составляет около 20% при 8 днях, около 40% при 16 и около 50% при 24 днях. В то же самое время мы видим, как некоторые пробы, а именно 3, 4, 11 показывают сильный провал, что можно объяснить повышенным содержанием никеля во всех трех пробах, а также кадмия – в 3, 4; цинка – в 3, 11 пробах. Одновременно мы наблюдаем вклад выше среднего у проб 5, 7, что можно объяснить сниженным содержанием никеля в них

Из данных эксперимента следует, что раствор содержащий только Pb^{2+} показал снижение содержания свинца на 75%.

Заключение

В ходе экспериментального исследования с использованием ПФЭ были получены количественные характеристики влияния Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} на определение Pb^{2+} . Отмечено, что использование нанопорошка SiO_2 позволяет очистить модельные растворы на 75 % в статических условиях. Влияние Cd^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} на сорбцию Pb^{2+} наноструктурированным SiO_2 существенного влияния не оказывает.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.11>

Conflict of Interest

None declared.

Review

International Research Journal Reviewers Community
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.142.57.11>

Список литературы / References

1. Нанопористые углеродные материалы спасут наши водоемы // Naked Science. — URL: <https://naked-science.ru/article/column/nanoporistye-uglerodnye-materialy> (дата обращения: 14.03.2024.)
2. Nanotechnology Market // Precedence Research. — URL: <https://www.precedenceresearch.com/nanotechnology-market> (accessed: 03.11.2024)
3. Нанотехнологии в процессах очистки сточных вод // Argel. — URL: <https://www.vo-da.ru/articles/nanotehnologii-ochistki-vody> (дата обращения: 14.03.2024)
4. Косян Д.Б. Биологические эффекты наночастиц диоксида кремния / Д.Б. Косян, А.М. Макаева, Е.А. Русакова // Журнал Современные проблемы науки и образования. — 2018. — № 6. — URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=28276#w0-tab0> (дата обращения: 15.03.2024.)
5. Немущенко Д.А. Исследование распределения наночастиц диоксида кремния в воде затворения / Д.А. Немущенко, В.В. Ларичкин, А.П. Олимпченко и др. // Вестник МГСУ. — 2020. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-raspredeleniya-nanochastits-dioksida-kremniya-v-vode-zatvoreniya> (дата обращения: 11.03.2024)
6. Флоренс-Вивиан И. Влияние SiO_2 - наночастиц на свойства цементных материалов / И. Флоренс-Вивиан, Р. Прадотто, М. Моири и др. // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2018. — № 11. — URL: <https://clck.ru/3A8WwS> (дата обращения: 11.03.2024)
7. Mahmoud M. E. Adsorption of U(VI) ions from aqueous solution using silica nanopowder / M.E. Mahmoud, A.A. Yakout, H. Abdel-Aa et al. // Journal of Saudi Chemical Society. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610316300175> (accessed: 15.03.2024)
8. Mohseni Tabar M. Using silicon dioxide (SiO_2) nano-powder as reinforcement for walnut shell flour/HDPE composite materials / M. Mohseni Tabar, T. Tabarsa, M. Mashkour et al. // J Indian Acad Wood Sci. — 2015. — 12. — P. 15–21. — DOI: 10.1007/s13196-015-0139-1
9. Shamsutdinov A.Sh. Manufacturing, Properties, and Application of Nanosized Superhydrophobic Spherical Silicon Dioxide Particles as a Functional Additive to Fire Extinguishing Powders / A.Sh. Shamsutdinov, N.B. Kondrashova, I. V. Valtisifer et al. // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 2021. — 60 (32). — P.11905-11914. — DOI: 10.1021/acs.iecr.1c01999
10. Potapov V. Hydrothermal SiO_2 Nanopowders: Obtaining Them and Their Characteristics / V. Potapov, R. Fedyuk, D. Gorev // Nanomaterials. — 2020. — 10. — P. 624. — DOI: 10.3390/nano10040624
11. Федорова С.А. Влияние нанопорошка SiO_2 на очистку модельных сред (Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+}) / С.А. Федорова, А.Б. Купов // Инновационные подходы в современной науке. сб. ст. по материалам CXVIII междунар. науч.-практ. конф. — 2022. — № 10 (118). — С.95-98.
12. Федорова С.А. Регрессионная модель очистки модельных сред, содержащих Pb^{2+} , наночастицами WO_3 / С.А. Федорова, А.А. Ярошенко, В.М. Гавриш и др. // Инновационные подходы в современной науке. сб. ст. по материалам CXVIII междунар. науч.-практ. конф. 2022. № 10 (118). С.90-94.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Nanoporistye uglerodnye materialy spasut nashi vodoemy [Nanoporous carbon materials will save our water bodies] // Naked Science. — URL: <https://naked-science.ru/article/column/nanoporistye-uglerodnye-materialy> (accessed: 03.14.2024) [in Russian]
2. Nanotechnology Market // Precedence Research. — URL: <https://www.precedenceresearch.com/nanotechnology-market> (accessed: 03.11.2024)

3. Nanotekhnologii v processah ochistki stochnyh vod [Nanotechnology in wastewater treatment processes] // Argel. — URL: <https://www.vo-da.ru/articles/nanotekhnologii-ochistki-vody> (accessed: 14.03.2024) [in Russian]
4. Kosyan D.B. Biologicheskie efekty nanochastic dioksida kremniya [Biological effects of silicon dioxide nanoparticles] / D.B. Kosyan, A.M. Makaeva, E.A. Rusakova // ZHurnal Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya [Journal of Modern Problems of Science and Education]. — 2018. — No. 6. — URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=28276#w0-tab0> (accessed: 03.15.2024.) [in Russian]
5. Nemushchenko D.A. Issledovanie raspredeleniya nanochastic dioksida kremniya v vode zatvoreniya [Study of the distribution of silicon dioxide nanoparticles in mixing water] / D.A. Nemushchenko, V.V. Larichkin, A.P. Onipchenko et al. // Vestnik MGSU [Bulletin of MSSU]. — 2020. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-raspredeleniya-nanochastits-dioksida-kremniya-v-vode-zatvoreniya> (accessed: 11.03.2024) [in Russian]
6. Florence-Vivian I. Vliyanie SiO₂- nanochastic na svoystva cementnyh materialov [The influence of SiO₂ nanoparticles on the properties of cement materials] / I. Florence-Vivian, R. Pradoto, M. Moini et al. // Vestnik BSTU im. V.G. Shukhova [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. — 2018. — No. 11. — URL: <https://clck.ru/3A8WwS> (accessed: 11.03.2024) [in Russian]
7. Mahmoud M. E. Adsorption of U(VI) ions from aqueous solution using silica nanopowder / M.E. Mahmoud, A.A. Yakout, H. Abdel-Aa et al. // Journal of Saudi Chemical Society. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319610316300175> (accessed: 15.03.2024)
8. Mohseni Tabar M. Using silicon dioxide (SiO₂) nano-powder as reinforcement for walnut shell flour/HDPE composite materials / M. Mohseni Tabar, T. Tabarsa, M.Mashkour et al. // J Indian Acad Wood Sci. — 2015. — 12. — P. 15–21. — DOI: 10.1007/s13196-015-0139-1
9. Shamsutdinov A.Sh. Manufacturing, Properties, and Application of Nanosized Superhydrophobic Spherical Silicon Dioxide Particles as a Functional Additive to Fire Extinguishing Powders / A.Sh. Shamsutdinov, N.B. Kondrashova, I. V. Valtsifer et al. // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 2021. — 60 (32). — P.11905-11914. — DOI: 10.1021/acs.iecr.1c01999
10. Potapov V. Hydrothermal SiO₂ Nanopowders: Obtaining Them and Their Characteristics / V. Potapov, R. Fedjuk, D. Gorev // Nanomaterials. — 2020. — 10. — P. 624. — DOI: 10.3390/nano10040624
11. Fedorova S.A. Vliyanie nanoporoshka SiO₂ na ochistku model'nyh sred (Pb²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺) [The influence of SiO₂ nanopowder on the purification of model media (Pb²⁺, Ni²⁺, Cu²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺)] / S.A. Fedorova, A.B. Kupov // Innovacionnye podhody v sovremennoj nauke. sb. st. po materialam CXVIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Innovative approaches in modern science. Coll. of art. based on materials from the XVIII International. scientific-practical conf]. — 2022. — No. 10 (118). — P.95-98. [in Russian]
12. Fedorova S.A. Regressionnaya model' ochistki model'nyh sred, sodержashchih Pb²⁺, nanochasticami WO₃ [Regression model for purification of model media containing Pb²⁺ with WO₃ nanoparticles] / S.A. Fedorova, A.A. YAroshenko, V.M. Gavrish et al. // Innovacionnye podhody v sovremennoj nauke. sb. st. po materialam CXVIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Innovative approaches in modern science. Coll. of art. based on materials from the XVIII International. scientific-practical conf]. — 2022. — No. 10 (118). — P. 90-94. [in Russian]