

**РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПУТЕМ
СОРБЦИОННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ИОНОВ РТУТИ(II), НИКЕЛЯ(II), ЦИНКА(II) И МЕДИ(II)
ИЗ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ**

А.Д. Чугунов, Е.Г. Филатова

Александр Дмитриевич Чугунов (ORCID 0000-0002-7700-884X), Елена Геннадьевна Филатова (ORCID 0000-0002-3387-2089)*

Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова, 83, Иркутск, Российская Федерация, 664074

E-mail: chugunovsasha1996@yandex.ru, efila@list.ru*

Данный обзор ставит перед собой цель обобщения новейших и актуальных на сегодняшний день сведений о распространенности загрязнения тяжелыми металлами водных объектов, а также систематизации накопленных знаний о сорбционной очистке сточных вод от тяжелых металлов в ионной форме различного происхождения. Обобщены литературные данные о минеральных и углеродистых сорбентах для извлечения ртути, никеля, цинка и меди, являющихся распространенными поллютантами сточных вод. Показана высокая эффективность модифицированных минеральных сорбентов для решения указанной задачи. Сорбционную емкость по отношению к ионам тяжелых металлов обеспечивают в основном функциональные группы (азот-, кислород- и серосодержащие), способные к хелатированию, комплексообразованию и электростатическому взаимодействию. Для модифицированных минеральных сорбентов характерно увеличение эффективности извлечения ионов тяжелых металлов с ростом температуры. Для природных минералов наблюдается снижение эффективности адсорбции с ростом температуры, что характерно для физического процесса. В условиях сосуществования в растворе нескольких тяжелых металлов средство конкретного иона к сорбенту зависит от зарядового числа элемента, радиуса иона, определяющего степень его гидратации, а также от поляризуемости. Величина адсорбции возрастает с увеличением времени контакта фаз (до наступления равновесия), а также с увеличением дозы сорбента. Восстановленные после адсорбции ионы ртути, никеля, меди и цинка на подложке с развитой удельной поверхностью могут служить сырьем для производства катализаторов, используемых для интенсификации многих химических процессов. Обзор может быть востребован как среди исследователей в области химических наук, так и политиков, частных предпринимателей, экологов и специалистов в области охраны окружающей среды. Обзор может быть полезен при планировании новых исследований в рамках реализации национальных экологических программ.

Ключевые слова: ионы тяжелых металлов, сточные воды, очистка воды, углеродистые и минеральные сорбенты

Для цитирования:

Чугунов А.Д., Филатова Е.Г. Решение проблем экологической безопасности путем сорбционного извлечения ионов ртути(II), никеля(II), цинка(II) и меди(II) из водных растворов и техногенных образований. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 9. С. 6–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6884.

For citation:

Chugunov A.D., Filatova E.G. Solving environmental safety problems by sorption extraction of mercury(II), nickel(II), zinc(II) and copper(II) ions from aqueous solutions and man - made formations. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 9. P. 6–19. DOI: 10.6060/ivkkt.20236609.6884.

SOLVING ENVIRONMENTAL SAFETY PROBLEMS BY SORPTION EXTRACTION OF MERCURY(II), NICKEL(II), ZINC(II) AND COPPER(II) IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS AND MAN - MADE FORMATIONS

A.D. Chugunov, E.G. Filatova

Aleksandr D. Chugunov (ORCID 0000-0002-7700-884X), Elena G. Filatova (ORCID 0000-0002-3387-2089)*
Irkutsk National Research Technical University, Lermontova st., 83, Irkutsk, 664074, Russia
E-mail: chugunovsasha1996@yandex.ru, efila@list.ru*

This review aims to summarize the latest and currently relevant information on the prevalence of heavy metal pollution of water bodies, as well as to systematize the accumulated knowledge about the sorption treatment of wastewater from heavy metals in the ionic form of various origins. The literature data on mineral and carbonaceous sorbents for the extraction of mercury, nickel, copper and zinc, which are common wastewater pollutants, are summarized. The high efficiency of modified mineral sorbents for solving this problem is shown. Sorption capacity with respect to heavy metal ions is provided mainly by the presence of functional groups (nitrogen-, oxygen- and sulfur-containing) capable of chelation, complexation and electrostatic interaction. Modified mineral sorbents are characterized by an increase in the efficiency of extracting heavy metal ions with increasing temperature. For natural minerals, a decrease in the efficiency of adsorption with increasing temperature is observed, which is typical for a physical process. Under conditions of co-existence in a solution of several heavy metals, the affinity of a particular ion for the sorbent depends on the charge number of the element, the radius of the ion, which determines the degree of its hydration, and also on the polarizability. The value of adsorption increases with an increase in the contact time of the phases (until equilibrium is reached), as well as with an increase in the dose of the sorbent. Mercury, nickel, copper, and zinc ions reduced after adsorption on a substrate with a developed specific surface can serve as a raw material for the production of catalysts for many chemical processes. The review can be in demand both among researchers in the field of chemical sciences and politicians, private entrepreneurs, ecologists and environmental specialists. The review can be useful when planning new research within the framework of the implementation of national environmental programs.

Key words: heavy metal ions, waste water, water purification, carbonaceous and mineral sorbents

ВВЕДЕНИЕ

В связи с резким увеличением потребления и производством человечеством материальных благ за последние десятилетия резко возросло антропогенное воздействие на водную среду, по состоянию на 2020 г., общий объем пресной воды составляет 2,5% от мировых запасов. По прогнозам [1], к 2050 г. ограниченный доступ к качественной пресной воде будут ощущать на 3,3 млрд. человек больше, в сравнении с 2000 г. Поллютанты сточных вод (СВ), грунтовых [2] и поверхностных водоемов часто бывают представлены ионами тяжелых металлов (ИТМ).

Основные антропогенные источники ИТМ представлены муниципальными СВ [3], стоками свалок твердых бытовых отходов [4], а также горнодобывающими [5], металлургическими и рудобогатительными [6], гальваническими [7], нефтедобывающими [8], химическими [9] и др. производствами; ИТМ попадают в природные воды при

аварийных разливах нефти и нефтепродуктов [10], с сельскохозяйственными удобрениями [11].

Большинство ИТМ могут накапливаться в живых организмах, обладают мутагенными и канцерогенными свойствами. Важность экологической безопасности водопользования подчеркивает большое количество оригинальных работ и обзоров [12-19], посвященных распространению и влиянию ИТМ на живые организмы в водных объектах.

Несмотря на то, что уровень загрязнения рассматриваемых ИТМ в природных и промышленных водах нормируют на международном уровне (стандарты ВОЗ или ФАО ООН), у разных стран в силу экономико-политических причин различные нормы национальных стандартов качества воды [20]. В России экологическое регулирование по отношению к водным объектам осуществляют посредством Федерального закона от 2002 г. «Об охране окружающей среды», Водного кодекса от 2006 г., а также норм СанПиН, региональных и др. нормативных актов.

В связи с ухудшением международной и региональной экологической обстановки ООН сформулировал одну из 17-ти Глобальных целей устойчивого развития на 2015-2030 гг. «Чистая вода и хорошие санитарные условия» [21]. В июле 2021 г. Президентом РФ был подписан Указ «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации». В документе отмечено, что сохранение уникального эколого-географического достояния России является обязательными условиями для улучшения качества жизни ее населения [22].

В РФ существуют и национальные программы, направленные на обеспечение экологической безопасности водопользования. Так, на реализацию национального проекта «Экология», в рамках которого планируют строительство инфраструктуры для повышения качества питьевой воды в населенных пунктах, в том числе по показателям ИТМ, до 2025 г. выделяется более 4 трлн. руб. [23].

Универсальных методов очистки вод от ИТМ не существует. В настоящем для очистки вод применяют, как правило, комплексную очистку в виде комбинации различных методов.

В структуре комплексной очистки вод важный этап – сорбционная очистка, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами: возможность тонкой очистки СВ, низкая себестоимость и доступность сырья, эффективность работы в широком диапазоне условий эксплуатации, относительно высокая регенеративная способность.

Особое значение в процессах очистки СВ от ИТМ имеет применение природных цеолитов в качестве дешевых и доступных ресурсов для производства высокоэффективных сорбентов. В настоящем известно более 100 модификаций минеральных сорбентов, различающихся по структуре, составу, свойствам и назначению.

На эффективность сорбентов влияет совокупность таких параметров, как размер пор и их распределение, площадь поверхности, химический состав поверхностных пор, прочность, степень чистоты и др. В то же время, на адсорбцию ИТМ и ее механизм оказывают влияние такие факторы процесса, как рН раствора, доза сорбента, начальная концентрация ИТМ, время процесса, температура, влияние сосуществующих ионов.

В настоящем существует большое количество обзоров, посвященных стратегиям очистки вод, в частности от ИТМ [24-31]. Однако ограниченное число обзоров подробно освещают сорбционную очистку и влияние вышеописанных факторов и параметров на эффективность удаления по отношению к ИТМ.

Данный обзор ставит перед собой цель обобщения новейших и актуальных на сегодняшний день сведений о распространенности загрязнений водных объектов, а также систематизации накопленных знаний о влиянии структуры и свойств сорбентов и сорбционного процесса на эффективность адсорбции ионов Hg(II), Ni(II), Zn(II) и Cu(II).

В научной литературе термин ИТМ не однозначен. Существует несколько критериев отнесения тех или иных элементов к ИТМ, основанных: на плотности (плотность больше плотности железа), на расположении в периодической системе (атомное число более 20) и биолого-токсическом действии [32]. В зависимости от применяемого критерия конкретный список ИТМ и металлоидов может быть разным. Рассматриваемые в данной работе ионы Hg(II), Ni(II), Zn(II) и Cu(II) удовлетворяют все трем критериям. При этом повышенное содержание ИТМ в водных объектах оказывает негативный эффект на биоценозы водоемов в целом. В табл. 1 представлено ранжирование по классам опасности рассматриваемых ИТМ, а также приведены значения предельно-допустимых концентраций сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения ПДК_{р/х}.

Таблица 1

Класс опасности и допустимые концентрации ИТМ
Table 1. Hazard class and permissible concentrations of heavy metal ions

ИТМ	Класс опасности	ПДК _{р/х} , мг·дм ⁻³
Hg(II)	1	0,005
Ni(II)	2	0,01
Zn(II)	2	0,01
Cu(II)	3	0,001

Как видно из представленных данных (табл. 1), к наиболее опасным загрязняющим веществам относят ионы Hg(II). Ртуть – чрезвычайно опасное вредное вещество по оценке воздействия на живые организмы.

Адсорбция ионов ртути(II)

В настоящем известно, что большая часть Hg(II) поступает в водные системы вследствие эрозии литогенных и природо-тектонических пород [33-35]. Основные источники ионов Hg(II) в СВ представлены горнодобывающей промышленностью и сельским хозяйством (где до сих пор применяют Hg(II) при добыче золота и при протравливании семян) [36, 37]); бытовыми и промышленными отходами [38, 39].

Тип и степень проявляемых симптомов зависят не только от дозы и продолжительности воздействия Hg(II), но и от формы (пары, жидкость, неорганические соли или ртутьорганические соединения). По способности к накоплению в живых организмах ионы Hg(II) уступает ряду ИТМ, в том числе Cu(II), Ni (II) и Zn(II) [40, 41]. Предельно-допустимая концентрация ионов Hg(II) в водоемах рыбохозяйственного значения составляет $0,005 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$, что в пять раз выше, чем для ионов Cu(II) (табл. 1).

Известно, что повышенное содержание Hg(II) в организме человека вызывает поражение головного мозга, почек и легких, раздражение дыхательной системы и слизистых оболочек, потерю слуха и мышечной координации, вызывает врожденные пороки развития и психические заболевания у детей [42].

Для удаления ионов ртути(II) из водных растворов в настоящее время используют разнообразные углеродистые и минеральные сорбенты и их модифицированные аналоги. В табл. 2 представлены данные по сорбционной емкости вышеуказанных материалов.

Таблица 2

Сорбционная емкость углеродистых и минеральных сорбентов по отношению к ионам Hg(II)
Table 2. Sorption capacity of carbonaceous and modified mineral adsorbents with respect to Hg(II)

Сорбент	Сорбционная емкость, $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$	Источник
Сорбент на основе рисовой шелухи	5,6	[43]
Сорбент на основе рисовой шелухи, обработанный формальдегидом	21,01	[44]
Сорбент на основе полисульфид-хлопкового масла	122	[45]
Аэрогель графен-диатомовый кремнезем	500	[46]
Биоуголь, модифицированный карбоксиметилхитозаном	594,17	[47]
Летучая зола от сжигания угля	2,82	[48]
Композит $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SiO}_2\text{-SH}$	132	[49]
Цеолит, модифицированный дитизином	13,11	[50]

Как можно видеть из представленных данных в табл. 2, наибольшей сорбционной емкостью $594,17 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ по ионам Hg(II) обладает биоуголь, модифицированный карбоксиметилхитозаном. Значительная сорбционная емкость $500 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ характерна

для аэрогеля «графен-диатомовый кремнезем». Известно, что сорбенты с высокой сорбционной способностью по отношению к ИТМ, композитные и гибридные материалы со стабильными техническими характеристиками, можно получить фиксацией на поверхности носителя органических соединений, содержащих N-, S- или O-функциональные группы [51]. Способность к комплексообразованию с ИТМ серо- и азотсодержащих полимеров, так и соответствующих низкомолекулярных соединений также приводит к повышению сорбционной емкости.

На рис. 1 представлен механизм адсорбции ионов Hg(II), осуществляемый за счет хелатного связывания азотсодержащими группами, а также комплексообразования с полисульфидными цепями и остаточной элементарной серой [45].

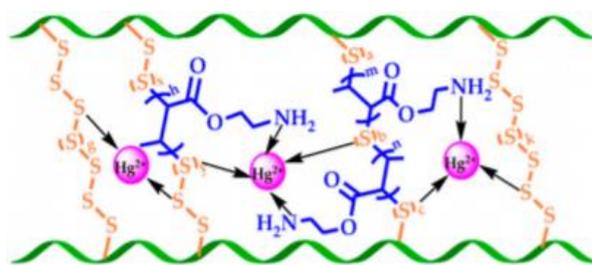


Рис. 1. Механизм адсорбции ионов Hg(II) на модифицированном сорбенте

Fig. 1. The mechanism of mercury adsorption on a modified adsorbent

Установлено, что при изменении pH от 2 до 6 изменяется форма существования ионов Hg(II) в водных растворах [47] (рис. 2).

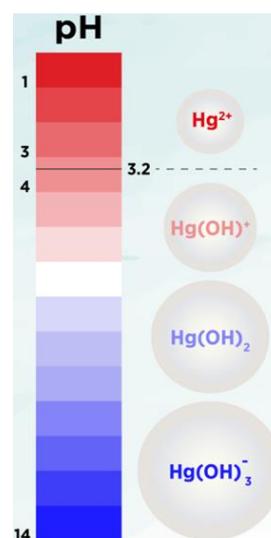


Рис. 2. Зависимость формы существования ртутьсодержащих ионов от pH среды

Fig. 2. Dependence of the form of existence of HM depending on pH

Начальный pH водного раствора влияет на степень ионизации функциональных групп и поверхностный заряд сорбента, формы существования ИТМ и механизм адсорбции (электростатическое взаимодействие, ионный обмен, комплексообразование, осаждение) [52]. В работе [51] показано, что наибольший сорбционный эффект достигается при начальном pH более 3,8. Увеличение значения pH способствует адсорбции ИТМ за счет депротонирования поверхности сорбента, что усиливает электростатическое ее притяжение к ИТМ. Однако сильнощелочная среда усиливает образование гидроксидов с выпадением их в осадки.

Установлено, что температура оказывает положительное влияние на эффективность адсорбции модифицированными сорбентами. Адсорбция ионов Hg(II) полипиррол/тиол-функционализированным цеолитом достигает больших значений за счет эффективного взаимодействия поверхности с возрастающей подвижностью ионов Hg(II), а необходимая энергия активации достигает нужных значений по мере повышения температуры. Полученная в ходе термодинамических расчетов положительная энтальпия говорит об эндотермичности процесса хемосорбции [53]. Экспериментальные данные согласованы с кинетической моделью псевдвторого порядка, что характерно для хемосорбции.

Таким образом, наличие кислород-, азот- и серосодержащих функциональных групп на поверхности сорбента определяют такие параметры, как сорбционную емкость и эффективность адсорбции за счет комплексообразования, хелатирования и электростатического взаимодействия с ИТМ. Для хемосорбции характерно увеличение эффективности извлечения ИТМ с ростом температуры; в то время как для природных и немодифицированных цеолитов происходит снижение эффективности адсорбции с ростом температуры, что характерно для физических процессов.

Адсорбция ионов никеля(II)

Источником поступления ионов Ni(II) в водные объекты могут быть промышленные СВ и отходы выплавки металлов [54], стоки предприятий золотодобычи [55], муниципальные СВ [56, 41], подкисленные (pH 2,9-3,4) шахтные воды угледобычи (как в виде ионов, так и сульфатов или других комплексов) [57]. В качестве одновременного источника и поглотителя ИТМ могут выступать речные донные отложения [58].

Концентрации ИТМ, в том числе ионов Ni(II), в поверхностных водоемах экваториальных стран зависят от времени года, так как в сезон дождей происходит разбавление. Сезонные колебания концентраций ИТМ средней полосы также имеют место быть [59, 60].

Ионы Ni(II) относят к высокоопасным веществам по воздействию на живые организмы (табл. 1). Установлено, что Ni(II) обладает специфической способностью к накоплению в тканях обитателей водных систем в зависимости от их загрязнения [61]. В организме человека Ni(II) проявляет канцерогенные свойства, вызывает отек легких, пневмонию и дыхательную недостаточность, хронический бронхит, повреждает сердце и печень, а также провоцирует аллергические реакции и дерматит. Известно, что нитчатые грибы могут относительно эффективно удалять ионы Ni(II) благодаря клеточной и межклеточной биосорбции, ионному обмену и комплексообразованию с ферментами [62]. В табл. 3 представлены данные по адсорбции ионов Ni(II) различными углеродистыми и минеральными сорбентами.

Таблица 3

Сорбционная емкость углеродистых и минеральных сорбентов по отношению к ионам Ni(II)
Table 3. Adsorption capacity of carbonaceous and mineral adsorbents with respect to Ni(II)

Сорбент	Сорбционная емкость, мг·г ⁻¹	Источник
Активный уголь на основе листьев нимы	120,6	[63]
Сульфокатионит на основе растительного хлопка и глицидилметакрилата	152,8	[64]
Сорбент на основе скорлупы орехов кешью	18,9	[65]
Сорбент на основе цедры лимона	80	[66]
Сорбент Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃	32,36	[67]
Природный гейландит	5,9	[68]
Аморфный кремнезем	0.12	[69]
Цеолит, обработанный HNO ₃ , HCl, H ₂ SO ₄	24-32	[70]
Композит пумпеллит-2-фенил-4-[1-(2-тиенил)метилен]-5-оксазолон	7,8	[71]
Алюмосиликат-N,N'-бис(3-триэтоксисиллил-пропил)тиокарбамид	80,0	[72]
Бентонит, модифицированный хитозаном (поли-N-ацетил-1,4-β-D-глюкопиранозамин)	21,32	[73]
Комплексный сорбент на основе скорлупы куриных яиц и глинистого известняка	0,39	[74]
Цеолит Y, модифицированный NaOH и гексадецилтриметиламмонием	22,6	[75]
Торф, модифицированный NaOH	0,4	[76]

Как можно видеть из данных табл. 3, наибольшей сорбционной емкостью $152,8 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ обладает сульфокатионит на основе растительного хлопка и глицидилметакрилата, емкость активного угля на основе листьев нимы составляет $120,6 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$. Модификация цеолита CH_3COONa позволяет увеличить адсорбцию Ni(II) на 25-30% [77].

Для модификации природных цеолитов могут быть использованы замещенные силаны с более сложными функциональными группами, содержащими одновременно несколько разных донорных атомов, например, N,N' -бис(3-триэтоксисилилпропил)тиокарбамид [78]. Присутствие тиокарбамидных групп $-\text{HN}-\text{C}(\text{S})-\text{NH}-$ в составе кремнийорганического аппарата приводит к повышению сорбционной способности по отношению к ионам Ni(II) посредством образования ионно-координационных комплексов с донорными атомами азота и серы на поверхности модифицированного сорбента.

На практике СВ обычно содержат различные ИТМ, а также другие сосуществующие ионы (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} и др.). В растворе анионы могут взаимодействовать с ИТМ, причем многовалентные анионы (SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) проявляют большую активность, по сравнению с одновалентными анионами (NO_3^- и Cl^-). В то же время, ИТМ могут участвовать в конкурентной адсорбции, «занимая» сорбционные центры, что ингибирует процесс адсорбции целевого компонента. Сродство ионов к сорбенту зависит от ряда факторов. Наибольшим сродством к сорбенту обладают ионы, имеющие: большой заряд (зарядовое число), большой ионный радиус, меньший объем в гидратированном (сольватированном) состоянии, высокую поляризуемость [79].

Для удаления ионов Co(II) , Ni(II) и Zn(II) в смеси использовали алжирский бентонит в комбинации с хитозаном [73]. Степень очистки составила 80-99% (для однокомпонентных смесей), 54-96% (для бинарных смесей) и 44-58% (для тройных смесей). Сорбционная способность ионов однокомпонентных смесей уменьшалась в ряду: $\text{Zn(II)} > \text{Ni(II)} > \text{Co(II)}$, а многокомпонентных: $\text{Ni(II)} > \text{Co(II)} > \text{Zn(II)}$. В исследовании [80] для очистки воды от Ni(II) использовали N -карбоксиэтилированные хитозаны. Эффективность удаления ИТМ делается ниже в ряду $\text{Cu(II)} > \text{Zn(II)} > \text{Ni(II)}$, что соответствует ряду устойчивости гидрокомплексов для этих ИТМ.

Таким образом, в условиях конкурентной адсорбции большую роль играет зарядовое число и ионный радиус ИТМ.

Адсорбция ионов цинка(II)

Ионы Zn(II) попадают в природные водоемы вследствие эрозии и выщелачивания пород (сфалерит, цинкит, госларит, смитсонит, каламин). В составе СВ горнодобычи, рудообогатительных и металлургических фабрик, гальванических цехов ионы Zn(II) также можно встретить довольно часто [81]. Вышеуказанные ионы относят к высокоопасным веществам по воздействию на живые организмы (табл. 1). Класс опасности ионов Zn(II) – второй. ПДК в водоемах рыбохозяйственного значения составляет $0,01 \text{ мг/дм}^3$.

Zn(II) – микроэлемент, необходимый для функционирования человека. Цинк входит в состав более 300 ферментов, участвует в процессах роста, деления и дифференцировки клеток. Недостаток цинка в организме человека приводит к аллергическим заболеваниям, выпадению волос, хронической усталости. Для жителей России оптимальный уровень потребления цинка – $12 \text{ мг} \cdot \text{сут}^{-1}$ [82]. Превышение этой дозы вызывает поражение ЦНС, влияет на пищеварительную, сердечно-сосудистую и дыхательную системы, вызывает повреждение поджелудочной железы [83]. В табл. 4 представлены данные по адсорбции ионов Zn(II) различными сорбентами.

Таблица 4

Сорбционная емкость углеродистых и минеральных сорбентов по отношению к ионам Zn(II)
Table 4. Sorption capacity of carbonaceous and mineral sorbents in relation to Zn(II) ions

Сорбент	Сорбционная емкость, $\text{мг} \cdot \text{г}^{-1}$	Источник
Система клиноптилолит-шунгит	0,23	[84]
Активный уголь на основе отходов шинного производства	4,995	[85]
Графен	208,33	[86]
Бентонит	12,72	[87]
Синтетический цеолит на основе хвостов добычи железа	51,26	[88]

Как можно видеть из представленных данных в табл. 4, наибольшей сорбционной емкостью $208,33 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ по ионам Zn(II) обладает графен. Максимальная адсорбция ионов Zn(II) магнитным сорбентом, полученным при переработке красного шлама, составила $85,78 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ [89]. Сорбционная емкость по ионам Zn(II) моримотолита в смеси с магнетитом – $89,6 \text{ мг} \cdot \text{г}^{-1}$ [90].

Адсорбция ионов меди(II)

Класс опасности ионов Cu(II) – третий, а предельно-допустимая концентрация в водоемах рыбохозяйственного значения составляет $0,001 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$.

Это связано прежде всего с тем, что медь обладает хорошей реакционной способностью при взаимодействии с органическими и минеральными веществами, в результате образования комплексных соединений, адсорбции, ионного обмена и других процессов. Вещества, содержащие медь, обладают накопительным эффектом, главным образом, в водных объектах, нарушая тем самым деятельность экосистем многочисленных водоемов.

Источники ионов Cu(II) в водоемах представлены в основном горной добычей [91-93]. Также Cu(II) присутствует в водных системах промышленно развитых регионов, в частности Китая, Индии, Латинской Америки, Южного Урала и Приангарья [94-97]. Cu(II) так же, как и Zn(II) – микроэлемент, необходимый для функционирования человека. Главная биологическая функция Cu(II) – каталитическая. В настоящее время известен целый ряд медьсодержащих ферментов (целлоплазмин, тирозиназа, цитохромоксидаза), участвующих в том числе в тканевом дыхании. Медь необходима для процессов гемоглобинообразования, участвует в процессах роста, размножения, пигментации. Потребность в Cu(II) у человека составляет 2 мг·сут⁻¹ [98]. Однако даже небольшое превышение ее концентрации приводит к токсическому действию [99]. Систематическое превышение количества Cu(II) в организме человека приводит к генетически врожденным и нейродегенеративным патологиям [100].

В исследовании [101] для удаления ионов Cu(II) использовали электрогенерируемый коагулянт, обладающий сорбционными свойствами. В работе [102] предложен флокулянт, полученный из осадка СВ на основе крахмала, содержащий ионизируемую карбоксильную группу. Шлам-продукт флокуляции после соответствующей одноступенчатой карбонизации можно использовать в качестве высокоэффективных углеродных электродов, легированных медью, электрохимических суперконденсаторов для хранения энергии.

В настоящее время известно большое количество сорбентов, используемых для извлечения ионов Cu(II) из водных растворов и СВ (табл. 5).

Как можно видеть из данных, представленных в табл. 5, наибольшей сорбционной емкостью 25,4 мг·г⁻¹ обладает активный уголь на основе скорлупы арахиса. Однако сорбционная емкость по ионам Cu(II) значительно ниже емкостей ионов Hg(II), Ni(II) и Zn(II).

В работе [108] изучено удаление ионов Cu(II) из воды древесными опилками вишни, ели, граба и тополя, показавшими наибольшую эффективность (86% – при статистической адсорбции и

88% – при динамической). Изучена адсорбция ионов Cu(II) из СВ смесью природных клиноптилолита и морденита, а также их образцами, модифицированными NaOH и CH₃COOH; время сорбции составило 1 ч. Последовательность сорбционной способности модифицированных материалов при максимальной эффективности 99,58% следующая: смесь цеолитов-1М NaOH > смесь цеолитов-2М NaOH > смесь цеолитов-1М CH₃COOH > смесь цеолитов-2М CH₃COOH [109].

Таблица 5

Сорбционная емкость углеродистых и минеральных сорбентов по отношению к ионам Cu(II)
Table 5. Adsorption capacity of carbonaceous and mineral adsorbents with respect to Cu(II)

Сорбент	Сорбционная емкость, мг·г ⁻¹	Источник
Активный уголь на основе рисовой соломы	18,4	[103]
Активный уголь на основе скорлупы арахиса	25,4	[104]
Активный уголь на основе шелухи арахиса	10,2	[105]
Сорбент на основе раковины моллюсков, модифицированных окислением	42	[106]
Композитный аэрогель на основе альгината натрия-полиакриламида	2,3	[107]

В работах [110, 111] в качестве модификатора использован хитозан. Модификацию проводили растворением хлопьев хитозана в гликолевой кислоте (1%) с последующим добавлением цеолита Na-X и перемешиванием в течении 6 ч [110]. Полученный сорбент показал эффективность удаления Cu(II) из водных растворов. Процент адсорбции возрастал с увеличением времени контакта фаз (до 120 мин). Дальнейшее увеличение времени не сказывалось на адсорбции, что связано с установлением равновесия в системе с сорбентом. С увеличением количества цеолита эффективность адсорбции также возрастала. Исследована эффективность хитозана, полученного из отходов креветок, на гидроксипатите [111]. Результаты показали эффективность удаления ионов Cu(II) при очистке воды 88-95%. Оптимальная доза хитозана составила от 0,2 до 2 мг·дм⁻³. Установлено, что адсорбция возрастала до установления равновесия в течении первых 30 мин контакта фаз. Скорость удаления ионов Cu(II) гидроксипатитом увеличивалась с увеличением количества сорбента. Почти все ионы Cu(II) (около 100%) удалены 4 г сорбента в 1 дм³ модельного раствора.

Таким образом, доза сорбента и время адсорбции играют значительную роль в процессе удаления ИТМ из водных растворов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведен анализ сорбционных методов очистки СВ от ИТМ, в частности от Hg(II), Ni(II), Zn(II) и Cu(II); обобщены сведения о данных металлах, их источниках поступления в окружающую среду и влиянии на человека. Проанализировано влияние на адсорбцию ИТМ таких факторов процесса, как pH, доза сорбента, начальная концентрация ионов, время контакта фаз, температура и наличие сосуществующих ионов.

Адсорбция ИТМ модифицированными минеральными веществами носит преимущественно химический характер взаимодействия данных ионов с функциональными группами сорбента. Для хемосорбции характерно увеличение эффективности извлечения ИТМ с ростом температуры, в то время как физическая адсорбция с экзотермическим эффектом характерна для природных минералов. В условиях сосуществования в растворе нескольких ИТМ большую роль играет зарядовое число и ионный радиус катионов ТМ, сказывающийся на степени их гидратации при химическом взаимодействии. Адсорбция наиболее подходит для тонкой очистки СВ, чем другие методы. Доза сорбента и время адсорбции также играют значительную роль в процессе удаления ИТМ из водных растворов.

Однако, не следует забывать о том, что ионы Hg(II), Ni(II), Zn(II) и Cu(II) – ценные компоненты, находящие применение в химической и нефтехимической промышленности, например, в качестве катализаторов. Отработанные сорбенты можно рассматривать в качестве потенциальных катализаторов многих химических процессов, что отвечает современной тенденции к энерго- и ресурсосбережению.

В настоящем в качестве катализаторов применяют соли ртути. HgSO₄ используют при производстве синтетической уксусной кислоты из ацетилена по реакции Кучерова. HgCl₂ – катализатор, применяемый в производстве ПВХ [112], сулему используют при гидрохлорировании ацетилена [113], разложении органических солей диазония по реакции Несмеянова. Ртуть как катализатор применяют и в атомной промышленности – при растворении отработавших урановых блоков [114]. В качестве подложки сулемы часто используют активированный уголь, обеспечивающий стабильность и дисперсность катализатора [115, 116].

В настоящем никелевые катализаторы находят применение, главным образом, как катализаторы гидрирования. Так, никель на кремнеземной подложке можно использовать как катализатор метанирования углекислого газа [117]; никель на носителе Nb₂O₅ можно использовать как катализатор гидрирования СО в углеводороды [118]; никель на активированном угле можно использовать при гидрировании функционализированных олефинов [119]; никель на подложке цеолита Socony Mobil-5 использовали при производстве из пальмитиновой кислоты n-алканов, входящих в состав биогидрогенизированного дизельного топлива [120]. В работе [121] авторы говорят о том, что никель, нанесенный на природный сепиолит, может служить эффективным катализатором парового риформинга толуола. Исследование [122] предлагает никелевый катализатор на CeO₂ использовать для паровой конверсии этанола. В работе [123] говорится об использовании никеля на ацетиленовой саже в реакции электрокаталитического окисления глюкозы, применяемой в топливных элементах и медицинской диагностике.

Известно, что цинковый катализатор можно использовать в процессе электровосстановления СО₂ в водном растворе NaCl [124]. Цинксодержащие катализаторы используют для синтеза карбоната глицерина из глицерина и мочевины [125]. Цинковый катализатор предлагают использовать в процессе синтеза метакрилатных фотоотверждаемых материалов [126]. Цинксодержащий материал можно использовать при каталитической этерификации амидов [127], а также в окислительно-восстановительных реакциях [128]. Цеолит, содержащий Zn(II), можно использовать для удаления оксианионов [129].

Медные катализаторы могут быть использованы при восстановлении СО₂ до этилена [130, 131]. Медный катализатор можно использовать в процессе гидрирования фурфурола и его производных [132]. Медь на подложке SiO₂ используют в реакции дегидрирования этанола [133], а также на Al₂O₃ – для его паровой конверсии [134].

Результаты данной работы могут быть полезны для проведения будущих исследований в области очистки СВ в условиях роста объемов промышленных и общегородских СВ при ужесточении экологических норм.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Khilchevskiy V.** // *Bull. Taras Shevchenko Natl. Univ. Kyiv. Geogr.* 2020. N 76–77. P. 6–16. DOI: 10.17721/1728-2721.2020.76-77.1.
2. **Vongdala N., Tran H.-D., Xuan T., Teschke R., Khanh T.** // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2018. V. 16. N 1. P. 22. DOI: 10.3390/ijerph16010022.
3. **Ma J., Wu S., Shekhar N.V., Biswas S., Sahu A.K.** // *Bioinorg. Chem. Appl.* 2020. V. 2020. P. 1–9. DOI: 10.1155/2020/8886093.
4. **Boateng T.K., Opoku F., Akoto O.** // *Appl. Water Sci.* 2019. V. 9. N 2. P. 33. DOI: 10.1007/s13201-019-0915-y.
5. **Wang P., Sun Z., Hu Y., Cheng H.** // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 695. P. 133893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893.
6. **Fabre S., Gimenez R., Elger A., Rivière T.** // *Sensors.* 2020. V. 20. N 17. P. 4800. DOI: 10.3390/s20174800.
7. **Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Matyushenko A.I., Bobrik A.G.** // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 2019. P. 182–191. DOI: 10.17516/1999-494X-0127.
8. **Al-Asadi S.A., Al-Qurnawi W.S., Al Hawash A.B., Ghalib H.B., Alkhlifa N.-H.A.** // *Appl. Water Sci.* 2020. V. 10. N 5. P. 103. DOI: 10.1007/s13201-020-01196-1.
9. **Yitagesu Y.H., Science A.** // *Chem. Mater. Res.* 2019. V. 11. N 2. P. 1–11. DOI: 10.7176/cmr/11-2-01.
10. **Ani J.U., Akpomie K.G., Okoro U.C., Aneke L.E., Onukwuli O.D., Ujam O.T.** // *Appl. Water Sci.* 2020. V. 10. N 2. P. 69. DOI: 10.1007/s13201-020-1149-8.
11. **Vetrimurugan E., Brindha K., Elango L., Ndwandwe O.M.** // *Appl. Water Sci.* 2017. V. 7. N 6. P. 3267–3280. DOI: 10.1007/s13201-016-0472-6.
12. **Zhou Q., Yang N., Li Y., Ren B., Ding X., Bian H., Yao X.** // *Glob. Ecol. Conserv.* 2020. V. 22. P. e00925. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e00925.
13. **Rivera-Parra J.L., Vizcarra C., Mora K., Mayorga H., Dueñas J.C.** // *Biol. Conserv.* 2020. V. 252. P. 108820. DOI: 10.1016/j.biocon.2020.108820.
14. **Bruce M., Limin M.** // *Int. J. Sci. Adv.* 2021. V. 2. N 3. P. 375–386. DOI: 10.51542/ijscia.v2i3.23.
15. **Shifaw E.** // *J. Heal. Pollut.* 2018. V. 8. N 18. P. 1–14. DOI: 10.5696/2156-9614-8.18.180607.
16. **Lu Y., Song S., Wang R., Liu Z., Meng J., Sweetman A.J., Jenkins A., Ferrier R.C., Li H., Luo W., Wang T.** // *Environ. Int.* 2015. V. 77. P. 5–15. DOI: 10.1016/j.envint.2014.12.010.
17. **Yusta-García R., Orta-Martínez M., Mayor P., González-Crespo C., Rosell-Melé A.** // *Environ. Pollut.* 2017. V. 225. P. 370–380. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.02.063.
18. **Khan A., Khan S., Khan M.A., Qamar Z., Waqas M.** // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. V. 22. N 18. P. 13772–13799. DOI: 10.1007/s11356-015-4881-0.
19. **Rana M.N., Tangpong J., Rahman M.M.** // *Toxicol. Reports.* 2018. V. 5. P. 704–713. DOI: 10.1016/j.toxrep.2018.05.012.
20. **Kolobov R., Makritskaya E.** // *Международ. право.* 2020. Вып. 2. P. 25–37. DOI: 10.25136/2644-5514.2020.2.32819.
21. **Титов А.Ф.** Организация Объединенных Наций по промышленному развитию. Интернет-ресурс. URL: <http://www.unido.ru/overview/mdg/> (дата обр. 11.04.23).
22. Указ Президента РФ «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации». Интернет-ресурс. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107030001> (дата обр. 11.04.23).

REFERENCES

1. **Khilchevskiy V.** // *Bull. Taras Shevchenko Natl. Univ. Kyiv. Geogr.* 2020. N 76–77. P. 6–16. DOI: 10.17721/1728-2721.2020.76-77.1.
2. **Vongdala N., Tran H.-D., Xuan T., Teschke R., Khanh T.** // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2018. V. 16. N 1. P. 22. DOI: 10.3390/ijerph16010022.
3. **Ma J., Wu S., Shekhar N.V., Biswas S., Sahu A.K.** // *Bioinorg. Chem. Appl.* 2020. V. 2020. P. 1–9. DOI: 10.1155/2020/8886093.
4. **Boateng T.K., Opoku F., Akoto O.** // *Appl. Water Sci.* 2019. V. 9. N 2. P. 33. DOI: 10.1007/s13201-019-0915-y.
5. **Wang P., Sun Z., Hu Y., Cheng H.** // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 695. P. 133893. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133893.
6. **Fabre S., Gimenez R., Elger A., Rivière T.** // *Sensors.* 2020. V. 20. N 17. P. 4800. DOI: 10.3390/s20174800.
7. **Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A., Matyushenko A.I., Bobrik A.G.** // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.* 2019. P. 182–191. DOI: 10.17516/1999-494X-0127.
8. **Al-Asadi S.A., Al-Qurnawi W.S., Al Hawash A.B., Ghalib H.B., Alkhlifa N.-H.A.** // *Appl. Water Sci.* 2020. V. 10. N 5. P. 103. DOI: 10.1007/s13201-020-01196-1.
9. **Yitagesu Y.H., Science A.** // *Chem. Mater. Res.* 2019. V. 11. N 2. P. 1–11. DOI: 10.7176/cmr/11-2-01.
10. **Ani J.U., Akpomie K.G., Okoro U.C., Aneke L.E., Onukwuli O.D., Ujam O.T.** // *Appl. Water Sci.* 2020. V. 10. N 2. P. 69. DOI: 10.1007/s13201-020-1149-8.
11. **Vetrimurugan E., Brindha K., Elango L., Ndwandwe O.M.** // *Appl. Water Sci.* 2017. V. 7. N 6. P. 3267–3280. DOI: 10.1007/s13201-016-0472-6.
12. **Zhou Q., Yang N., Li Y., Ren B., Ding X., Bian H., Yao X.** // *Glob. Ecol. Conserv.* 2020. V. 22. P. e00925. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e00925.
13. **Rivera-Parra J.L., Vizcarra C., Mora K., Mayorga H., Dueñas J.C.** // *Biol. Conserv.* 2020. V. 252. P. 108820. DOI: 10.1016/j.biocon.2020.108820.
14. **Bruce M., Limin M.** // *Int. J. Sci. Adv.* 2021. V. 2. N 3. P. 375–386. DOI: 10.51542/ijscia.v2i3.23.
15. **Shifaw E.** // *J. Heal. Pollut.* 2018. V. 8. N 18. P. 1–14. DOI: 10.5696/2156-9614-8.18.180607.
16. **Lu Y., Song S., Wang R., Liu Z., Meng J., Sweetman A.J., Jenkins A., Ferrier R.C., Li H., Luo W., Wang T.** // *Environ. Int.* 2015. V. 77. P. 5–15. DOI: 10.1016/j.envint.2014.12.010.
17. **Yusta-García R., Orta-Martínez M., Mayor P., González-Crespo C., Rosell-Melé A.** // *Environ. Pollut.* 2017. V. 225. P. 370–380. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.02.063.
18. **Khan A., Khan S., Khan M.A., Qamar Z., Waqas M.** // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2015. V. 22. N 18. P. 13772–13799. DOI: 10.1007/s11356-015-4881-0.
19. **Rana M.N., Tangpong J., Rahman M.M.** // *Toxicol. Reports.* 2018. V. 5. P. 704–713. DOI: 10.1016/j.toxrep.2018.05.012.
20. **Kolobov R., Makritskaya E.** // *Международ. право.* 2020. N. 2. P. 25–37 (in Russian). DOI: 10.25136/2644-5514.2020.2.32819.
21. **Titov A.F.** United Nations Industrial Development Organization. Internet resource. URL: <http://www.unido.ru/overview/mdg/> (date of the application 04.11.23) (in Russian).
22. Decree of the President of the Russian Federation «On the National Security Strategy of the Russian Federation». Internet resource. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107030001> (date of the application 04.11.23) (in Russian).

23. Национальный проект «Экология» 2019-2025. Экоблог. Интернет-ресурс. URL: <https://vyvoz.org/blog/nacionalnyj-proekt-jekologija-2019-2024/>. (дата обращения 11.04.23).
24. **Mehta R.N., Saini D.** // *Arch. Pet. Environ. Biotechnol.* 2017. V. 2. N 4. P. 1–11. DOI: 10.29011/2574-7614.100105.
25. **Diya'uddeen B.H., Wan M.A., Abdul A.** // *Process Saf. Environ. Prot.* 2011. V. 89. N 2. P. 95–105. DOI: 10.1016/j.psep.2010.11.003.
26. **Ali I., Peng C., Khan Z.M., Naz I., Sultan M.** // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2018. V. 93. N 10. P. 2817–2832. DOI: 10.1002/jctb.5648.
27. **Izydorczyk G., Mikula K., Skrzypczak D., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka K.** // *Environ. Res.* 2021. V. 197. P. 111050. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111050.
28. **Lutzu G.A., Ciurli A., Chiellini C., Di Caprio F., Concas A., Dunford N.T.** // *J. Environ. Chem. Eng.* 2021. V. 9. N 1. P. 104926. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104926.
29. **Obinna I.B., Ebere E.C.** // *Anal. Methods Environ. Chem. J.* 2019. V. 2. N 3. P. 5–38. DOI: 10.24200/amecj.v2.i03.66.
30. **Bouabidi Z.B., El-Naas M.H., Zhang Z.** // *Environ. Chem. Lett.* 2019. V. 17. N 1. P. 241–257. DOI: 10.1007/s10311-018-0795-7.
31. **Филатова Е.Г.** // *Изв. вузов. Приклад. химия и биотехнология.* 2015. № 2 (13). С. 97–109.
32. **Vernet J.P.** // *Impact Heavy Met. Environ.* 1992. N 3. P. 175–181. DOI: 10.1016/0300-483x(94)90042-6.
33. **Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М.** Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2011. 77 с.
34. **Барабашин Т.О., Кораблина И.В., Павленко Л.Ф., Скрышник Г.В., Богачев А.Н., Белоусов В.Н.** // *Тр. ВНИРО.* 2020. Т. 181. С. 187–205. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-181-187-205.
35. **Suami R.B., Salah D.A., Kabala C.D., Otamonga J.P., Mulaji C.K., Mpiana P.T., Poté J.W.** // *Heliyon.* 2019. V. 5. N 12. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e03049.
36. **Gafur N., Sakakibara M., Sano S., Sera K.** // *Water.* 2018. V. 10. N 11. P. 1507. DOI: 10.3390/w10111507.
37. **Bufetova M.V.** // *South Russ. Ecol. Dev.* 2015. N 3. P. 112. DOI: 10.18470/1992-1098-2015-3-112-120.
38. **Petukhov V.I., Petrova E.A., Losev O.V.** // *Water Resour.* 2019. V. 46. N 1. P. 103–111. DOI: 10.1134/S0097807818050160.
39. **Ioele G., De Luca M., Grande F., Durante G., Trozzo R., Crupi C., Ragno G.** // *Water.* 2020. V. 12. N 8. P. 2214. DOI: 10.3390/w12082214.
40. **Sun X., Li B., Liu X., Li C., Sun X., Li B., Liu L.** // *J. Chem.* 2020. P. 1–13. DOI: 10.1155/2020/7971294.
41. **Wu X., Cobbina S.J., Mao G., Xu H., Zhang Z., Yang L.** // *Env. Sci. Pollut. Res. Int.* 2016. N 23(9). P. 8244–8259. DOI: 10.1007/s11356-016-6333-x.
42. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2014 году». 2015. С. 328. Интернет-ресурс: https://irkobl.ru/sites/ecology/GosDoklad_Final.pdf. (дата обращения 11.04.23).
43. **Krishanani K., Meng X., Christodoulatos C., Vhristodoulatos V., Boddy V.** // *J. Hazard. Mater.* 2008. V. 153. N 3. P. 1222–1234. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.113.
44. **Joseph L., Jun B.-M., Flora J.R., Park C.M., Yoon Y.** // *Chemosphere.* 2019. V. 229. P. 142–159. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.198.
45. **Chen Y., Yasin A., Zhang Y., Zan X., Liu Y., Zhang L.** // *Materials (Basel).* 2020. V. 13. N 3. P. 632. DOI: 10.3390/ma13030632.
23. National project «Ecology» 2019-2025. Ecoblog. Internet resource. URL: <https://vyvoz.org/blog/nacionalnyj-proekt-jekologija-2019-2024/>. (date of the application 04.11.23) (in Russian).
24. **Mehta R.N., Saini D.** // *Arch. Pet. Environ. Biotechnol.* 2017. V. 2. N 4. P. 1–11. DOI: 10.29011/2574-7614.100105.
25. **Diya'uddeen B.H., Wan M.A., Abdul A.** // *Process Saf. Environ. Prot.* 2011. V. 89. N 2. P. 95–105. DOI: 10.1016/j.psep.2010.11.003.
26. **Ali I., Peng C., Khan Z.M., Naz I., Sultan M.** // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2018. V. 93. N 10. P. 2817–2832. DOI: 10.1002/jctb.5648.
27. **Izydorczyk G., Mikula K., Skrzypczak D., Moustakas K., Witek-Krowiak A., Chojnacka K.** // *Environ. Res.* 2021. V. 197. P. 111050. DOI: 10.1016/j.envres.2021.111050.
28. **Lutzu G.A., Ciurli A., Chiellini C., Di Caprio F., Concas A., Dunford N.T.** // *J. Environ. Chem. Eng.* 2021. V. 9. N 1. P. 104926. DOI: 10.1016/j.jece.2020.104926.
29. **Obinna I.B., Ebere E.C.** // *Anal. Methods Environ. Chem. J.* 2019. V. 2. N 3. P. 5–38. DOI: 10.24200/amecj.v2.i03.66.
30. **Bouabidi Z.B., El-Naas M.H., Zhang Z.** // *Environ. Chem. Lett.* 2019. V. 17. N 1. P. 241–257. DOI: 10.1007/s10311-018-0795-7.
31. **Filatova E.G.** // *Izv. Vuzov. Prikl. Khim. Biotekhnol.* 2015. N 2 (13). P. 97–109 (in Russian).
32. **Vernet J.P.** // *Impact Heavy Met. Environ.* 1992. N 3. P. 175–181. DOI: 10.1016/0300-483x(94)90042-6.
33. **Titov A.F., Talanova V.V., Kaznina N.M.** Physiological Basis of Plant Resistance to Heavy Metals. Tutorial; Institute of Biology KarRC RAS. Petrozavodsk Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2011. 77 p. (in Russian).
34. **Barabashin T.O., Korablina I.V., Pavlenko L.F., Skripnik G.V., Bogachev A.N., Beloysov V.N.** Content of toxic substances in the deep-sea and coastal areas of the Black Sea off the Crimean Peninsula in spring —autumn, 2019. *Tr. VNIRO.* 2020. V. 181. P. 187–205 (in Russian). DOI: 10.36038/2307-3497-2020-181-187-205.
35. **Suami R.B., Salah D.A., Kabala C.D., Otamonga J.P., Mulaji C.K., Mpiana P.T., Poté J.W.** // *Heliyon.* 2019. V. 5. N 12. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e03049.
36. **Gafur N., Sakakibara M., Sano S., Sera K.** // *Water.* 2018. V. 10. N 11. P. 1507. DOI: 10.3390/w10111507.
37. **Bufetova M.V.** // *South Russ. Ecol. Dev.* 2015. N 3. P. 112. DOI: 10.18470/1992-1098-2015-3-112-120.
38. **Petukhov V.I., Petrova E.A., Losev O.V.** // *Water Resour.* 2019. V. 46. N 1. P. 103–111. DOI: 10.1134/S0097807818050160.
39. **Ioele G., De Luca M., Grande F., Durante G., Trozzo R., Crupi C., Ragno G.** // *Water.* 2020. V. 12. N 8. P. 2214. DOI: 10.3390/w12082214.
40. **Sun X., Li B., Liu X., Li C., Sun X., Li B., Liu L.** // *J. Chem.* 2020. P. 1–13. DOI: 10.1155/2020/7971294.
41. **Wu X., Cobbina S.J., Mao G., Xu H., Zhang Z., Yang L.** // *Env. Sci. Pollut. Res. Int.* 2016. N 23(9). P. 8244–8259. DOI: 10.1007/s11356-016-6333-x.
42. State report «On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2014». 2015. p. 328. Internet resource: https://irkobl.ru/sites/ecology/GosDoklad_Final.pdf. (date of the application 04.11.23) (in Russian).
43. **Krishanani K., Meng X., Christodoulatos C., Vhristodoulatos V., Boddy V.** // *J. Hazard. Mater.* 2008. V. 153. N 3. P. 1222–1234. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.113.

46. **Hasanpour M., Hatami M.** // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2020. V. 284. P. 102247. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102247.
47. **Ifthikar J., Jiao X., Ngambia A., Wang T., Khan A., Jawad A., Xue Q., Liu L., Chen Z.** // *Bioresour. Technol.* 2018. V. 262. P. 22–31. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.04.053.
48. **Gadore V., Ahmaruzzaman M.** // *J. Water Process. Eng.* 2021. V. 41. P. 101910. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101910.
49. **Nuernberg G.B., Moreira M.A., Ernani P.R., Almeida J.A., Maciel T.M.** // *J. Environ. Manage.* 2016. V. 183. P. 667–672. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.08.062.
50. **Plaza A., Kolodyńska D., Halas P., Gęca M., Franus M., Hubicki Z.** // *Adsorpt. Sci. Technol.* 2017. V. 35. N 9–10. P. 834–844. DOI: 10.1177/0263617417716367.
51. **Kragović M., Pašalić S., Marković M., Petrović M., Nedeljković B., Momčilović M., Stojmenović M.** // *Minerals.* 2018. V. 8. N 1. P. 11. DOI: 10.3390/min8010011.
52. **Веденяпина М.Д., Курмышева А.Ю., Кулайшин С.А., Кряжев Ю.Г.** // *Химия твердого топлива.* 2021. Вып. 2. С. 18–41. DOI: 10.31857/S0023117721020092.
53. **Javadian H., Taghavi M.** // *Appl. Surf. Sci.* 2014. V. 289. P. 487–494. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.020.
54. **Huang Z., Liu C., Zhao X., Dong J., Zheng B.** // *Environ. Sci. Eur.* 2020. V. 32. N 1. P. 23. DOI: 10.1186/s12302-020-00305-w.
55. **Poshtegal M.K., Mirbagheri S.A.** // *Environ. Eng. Geosci.* 2019. V. 25. N 2. P. 179–188. DOI: 10.2113/EEG-1996.
56. **Reis M.M., Santos L.D., da Silva A.J., de Pinho G.P., Rocha L.M.** // *J. Appl. Sci.* 2020. V. 15. N 2. P. 1. DOI: 10.4136/ambi-agua.2440.
57. **Фетисова Н.Ф.** // *Изв. Томск. политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов.* 2021. Т. 332. № 1. С. 141–152. DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.
58. **Kien C.N., Noi N.V., Son L.T., Ngoc H.M., Tanaka S., Nishina T., Iwasaki K.** // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2010. V. 56. N 2. P. 344–356. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2010.00451.x.
59. **Zhang Z., Wang J.J., Ali A., DeLaune R.D.** // *Environ. Monit. Assess.* 2016. V. 188. N 11. P. 628. DOI: 10.1007/s10661-016-5639-y.
60. **Касимов Н.С., Лычагин М.Ю., Чалов Р., Шинкарева Г.Л., Пашкина М.П., Романченко А.О., Промахова Е.В.** // *Вестн. Москов. ун-та. Сер. 5. География.* 2016. Вып. 3. С. 67–81.
61. **Felix L.P., Perez J.E., Contreras M.F., Ravasi T., Kosel J.** // *Toxicol. Reports.* 2016. V. 3. P. 373–380. DOI: 10.1016/j.toxrep.2016.03.004.
62. **Siddiquee S., Rovina K., Azad S.A.** // *J. Microb. Biochem. Technol.* 2015. V. 07. N 06. DOI: 10.4172/1948-5948.1000243.
63. **Wani A., Muthuswamy E., Savithra G.H., Mao G., Brock S., Oupický D.** // *Pharm. Res.* 2012. V. 29. N 9. P. 2407–2418. DOI: 10.1007/s11095-012-0766-9.
64. **Ергожин Е.Е., Никитина А.И., Кабулова Г.К., Бектемов Н.А.** // *Химия растительного сырья.* 2013. Вып. 1. С. 67–72.
65. **Kumar P.S., Ramalingam S., Kirupha S.D., Murugesan A., Vidhyadevi T., Sivanesan S.** // *Chem. Eng. J.* 2011. V. 167. N 1. P. 122–131. DOI: 10.1016/j.cej.2010.12.010.
66. **Thirumavalavan M., Lai Y.-L., Lin L.-C., Lee J.-F.** // *J. Chem. Eng. Data.* 2010. V. 55. N 3. P. 1186–1192. DOI: 10.1021/je900585t.
67. **Ibrahim R.K., Hayyan M., AlSaadi M.A., Hayyan A., Ibrahim S.** // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. V. 23. N 14. P. 13754–13788. DOI: 10.1007/s11356-016-6457-z.
44. **Joseph L., Jun B.-M., Flora J.R., Park C.M., Yoon Y.** // *Chemosphere.* 2019. V. 229. P. 142–159. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.198.
45. **Chen Y., Yasin A., Zhang Y., Zan X., Liu Y., Zhang L.** // *Materials (Basel).* 2020. V. 13. N 3. P. 632. DOI: 10.3390/ma13030632.
46. **Hasanpour M., Hatami M.** // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2020. V. 284. P. 102247. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102247.
47. **Ifthikar J., Jiao X., Ngambia A., Wang T., Khan A., Jawad A., Xue Q., Liu L., Chen Z.** // *Bioresour. Technol.* 2018. V. 262. P. 22–31. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.04.053.
48. **Gadore V., Ahmaruzzaman M.** // *J. Water Process. Eng.* 2021. V. 41. P. 101910. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101910.
49. **Nuernberg G.B., Moreira M.A., Ernani P.R., Almeida J.A., Maciel T.M.** // *J. Environ. Manage.* 2016. V. 183. P. 667–672. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.08.062.
50. **Plaza A., Kolodyńska D., Halas P., Gęca M., Franus M., Hubicki Z.** // *Adsorpt. Sci. Technol.* 2017. V. 35. N 9–10. P. 834–844. DOI: 10.1177/0263617417716367.
51. **Kragović M., Pašalić S., Marković M., Petrović M., Nedeljković B., Momčilović M., Stojmenović M.** // *Minerals.* 2018. V. 8. N 1. P. 11. DOI: 10.3390/min8010011.
52. **Vedenyapina M.D., Kurmysheva A.Yu., Kulayshin S.A., Kryazhev Yu.G.** // *Khim. Tverdogo Topliva.* 2021. N 2. P. 18–41 (in Russian). DOI: 10.31857/S0023117721020092.
53. **Javadian H., Taghavi M.** // *Appl. Surf. Sci.* 2014. V. 289. P. 487–494. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.11.020.
54. **Huang Z., Liu C., Zhao X., Dong J., Zheng B.** // *Environ. Sci. Eur.* 2020. V. 32. N 1. P. 23. DOI: 10.1186/s12302-020-00305-w.
55. **Poshtegal M.K., Mirbagheri S.A.** // *Environ. Eng. Geosci.* 2019. V. 25. N 2. P. 179–188. DOI: 10.2113/EEG-1996.
56. **Reis M.M., Santos L.D., da Silva A.J., de Pinho G.P., Rocha L.M.** // *J. Appl. Sci.* 2020. V. 15. N 2. P. 1. DOI: 10.4136/ambi-agua.2440.
57. **Fetisova N.F.** // *Izv. Tomsk. Politekh. Univ. Inzhiniring Georesursov.* 2021. V. 332. N 1. P. 141–152 (in Russian). DOI: 10.18799/24131830/2021/1/3007.
58. **Kien C.N., Noi N.V., Son L.T., Ngoc H.M., Tanaka S., Nishina T., Iwasaki K.** // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2010. V. 56. N 2. P. 344–356. DOI: 10.1111/j.1747-0765.2010.00451.x.
59. **Zhang Z., Wang J.J., Ali A., DeLaune R.D.** // *Environ. Monit. Assess.* 2016. V. 188. N 11. P. 628. DOI: 10.1007/s10661-016-5639-y.
60. **Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov R., Shinkareva G.L., Pashkina M.P., Romanchenko A.O., Promakhova E.V.** // *Vestn. Moskov. Univ. Ser. 5. Geografiya.* 2016. N 3. P. 67–81 (in Russian).
61. **Felix L.P., Perez J.E., Contreras M.F., Ravasi T., Kosel J.** // *Toxicol. Reports.* 2016. V. 3. P. 373–380. DOI: 10.1016/j.toxrep.2016.03.004.
62. **Siddiquee S., Rovina K., Azad S.A.** // *J. Microb. Biochem. Technol.* 2015. V. 07. N 06. DOI: 10.4172/1948-5948.1000243.
63. **Wani A., Muthuswamy E., Savithra G.H., Mao G., Brock S., Oupický D.** // *Pharm. Res.* 2012. V. 29. N 9. P. 2407–2418. DOI: 10.1007/s11095-012-0766-9.
64. **Ergozhin E.E., Nikitina A.I., Kabulova G.K., Bektemov N.A.** // *Khimiya Rastit. Syr'ya.* 2013. N 1. P. 67–72 (in Russian).
65. **Kumar P.S., Ramalingam S., Kirupha S.D., Murugesan A., Vidhyadevi T., Sivanesan S.** // *Chem. Eng. J.* 2011. V. 167. N 1. P. 122–131. DOI: 10.1016/j.cej.2010.12.010.

68. Dada A.O., Olalekan A.P., Olatunya A.M., Dada O. // *IOSR J. Appl. Chem.* 2012. V. 3. N 1. P. 38–45. DOI: 10.9790/5736-0313845.
69. Sandoval O.G., Trujillo G.C., Orozco A.E. // *Water Resour. Ind.* 2018. V. 20. P. 15–22. DOI: 10.1016/j.wri.2018.07.002.
70. Ferella F., Leone S., Innocenzi V., De Michelis I., Taglieri G., Gallucci K. // *J. Clean. Prod.* 2019. V. 230. P. 910–926. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.175.
71. Wamba A.G., Kofa G.P., Koungou S.N., Thue P.S., Lima E.C., dos Reis G.S., Kayem J.G. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2018. V. 6. N 2. P. 3192–3203. DOI: 10.1016/j.jece.2018.04.062.
72. Pomazkina O.I., Filatova E.G., Pozhidaev Y.N. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surfaces.* 2017. V. 53. N 3. P. 416–421. DOI: 10.1134/S2070205117030182.
73. Ferhat M., Kadouche S., Lounici H. // *Desalin. Water Treat.* 2016. V. 57. N 13. P. 6072–6080. DOI: 10.1080/19443994.2015.1012559.
74. Makuchowska-Fryc J. // *Ecol. Chem. Eng. S.* 2019. V. 26. N 1. P. 165–174. DOI: 10.1515/eces-2019-0012.
75. Tran H.N., Van Viet P., Chao H.-P. // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. V. 147. P. 55–63. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.08.027.
76. Гревцев Н.В., Ятлук Г.М., Суворов А.Л., Ютлук Ю.Г. // *Общ. вопр. хим. технологии.* 2005. Вып. 8. С. 428–433.
77. Maulana I., Takahashi F. // *J. Water Process. Eng.* 2018. V. 22. P. 80–86. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.01.013.
78. Лебедева О.В., Сипкина Е.И., Бочкарева С.С., Пожидаев Ю.Н. // *Физикохимия пов-ти и защита материалов.* 2019. Т. 55. Вып. 1. С. 59–64. DOI: 10.1134/S0044185619010133.
79. Криулин Б. Сборник лекций по физической химии. Модуль 3. Лекция 3. Ионообменная хроматография. URL: <https://pandia.ru/text/80/236/20426.php> (дата обращения 11.04.23).
80. Bratskaya S.Y., Pestov A.V., Yatluk Y.G. // *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2009. V. 339. N 1–3. P. 140–144. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2009.02.013.
81. Логинава Е.В. Гидроэкология. Минск: БГУ. 2011. 300 с.
82. Сальникова Е.В. // *Микроэлементы в медицине.* 2016. Вып. 17(4). P. 11–15.
83. Chasapis C.T., Ntoupa P.-S.A., Spiliopoulou C.A., Stefanidou M.E. // *Arch. Toxicol.* 2020. V. 94. N 5. P. 1443–1460. DOI: 10.1007/s00204-020-02702-9.
84. Petrushka I., Bratus O., Petrushka K. // *Environ. Probl.* 2021. V. 6. N 2. P. 64–68. DOI: 10.23939/ep2021.02.064.
85. Cherono F., Mburu N., Kakoi B. // *Heliyon.* 2021. V. 7. N 11. P. e08254. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e08254.
86. Pan M., Wu G., Liu C., Lin X., Huang X. // *Nanomaterials.* 2018. V. 8. N 10. P. 806. DOI: 10.3390/nano8100806.
87. Cao L., Li Z., Xiang S., Huang Z., Ruan R., Liu Y. // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 284. P. 448–455. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.03.043.
88. Izidoro J.C., Kim M.C., Bellelli V.F., Pane M.C., Botelho Junior A.B., Espinosa D.C., Tenório J.A. // *J. Sustain. Min.* 2019. DOI: 10.1016/j.jsm.2019.11.001.
89. Dong W., Liang K., Qin Y., Ma H., Zhao X., Zhang L., Zhu S., Yu Y., Bian D., Yang J. // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. N 8. P. 1519. DOI: 10.3390/app9081519.
90. Nhien H.T., Nguyen G.T. // *Appl. Environ. Res.* 2019. P. 73–83. DOI: 10.35762/AER.2019.41.2.7.
91. Pizarro J., Vergara P.M., Rodríguez J.A., Valenzuela A.M. // *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 181. N 1–3. P. 747–754. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.076.
92. Darricau L., Elghali A., Martel P., Benzaazoua M. // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. N 5. P. 2298. DOI: 10.3390/app11052298.
66. Thirumavalavan M., Lai Y.-L., Lin L.-C., Lee J.-F. // *J. Chem. Eng. Data.* 2010. V. 55. N 3. P. 1186–1192. DOI: 10.1021/je900585t.
67. Ibrahim R.K., Hayyan M., AlSaadi M.A., Hayyan A., Ibrahim S. // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2016. V. 23. N 14. P. 13754–13788. DOI: 10.1007/s11356-016-6457-z.
68. Dada A.O., Olalekan A.P., Olatunya A.M., Dada O. // *IOSR J. Appl. Chem.* 2012. V. 3. N 1. P. 38–45. DOI: 10.9790/5736-0313845.
69. Sandoval O.G., Trujillo G.C., Orozco A.E. // *Water Resour. Ind.* 2018. V. 20. P. 15–22. DOI: 10.1016/j.wri.2018.07.002.
70. Ferella F., Leone S., Innocenzi V., De Michelis I., Taglieri G., Gallucci K. // *J. Clean. Prod.* 2019. V. 230. P. 910–926. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.175.
71. Wamba A.G., Kofa G.P., Koungou S.N., Thue P.S., Lima E.C., dos Reis G.S., Kayem J.G. // *J. Environ. Chem. Eng.* 2018. V. 6. N 2. P. 3192–3203. DOI: 10.1016/j.jece.2018.04.062.
72. Pomazkina O.I., Filatova E.G., Pozhidaev Y.N. // *Prot. Met. Phys. Chem. Surfaces.* 2017. V. 53. N 3. P. 416–421. DOI: 10.1134/S2070205117030182.
73. Ferhat M., Kadouche S., Lounici H. // *Desalin. Water Treat.* 2016. V. 57. N 13. P. 6072–6080. DOI: 10.1080/19443994.2015.1012559.
74. Makuchowska-Fryc J. // *Ecol. Chem. Eng. S.* 2019. V. 26. N 1. P. 165–174. DOI: 10.1515/eces-2019-0012.
75. Tran H.N., Van Viet P., Chao H.-P. // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018. V. 147. P. 55–63. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2017.08.027.
76. Grevtsev N.V., Yatluk G.M., Suvorov A.L., Yutluk Yu.G. // *Obshch. Vopr. Khim. Tekhnol.* 2005. N 8. P. 428–433 (in Russian).
77. Maulana I., Takahashi F. // *J. Water Process. Eng.* 2018. V. 22. P. 80–86. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.01.013.
78. Lebedeva O.V., Sipkina E.I., Bochkareva S.S., Pozhidaev Yu.N. // *Physiko-Khim. Poverkh. Zashchita Mater.* 2019. V. 55. N 1. P. 59–64 (in Russian). DOI: 10.1134/S0044185619010133.
79. Kriulin B. Collection of lectures on physical chemistry. Module 3. Lecture 3. Ion-exchange chromatography. Internet resource URL: <https://pandia.ru/text/80/236/20426.php> (date of the application 04.11.23) (in Russian).
80. Bratskaya S.Y., Pestov A.V., Yatluk Y.G. // *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.* 2009. V. 339. N 1–3. P. 140–144. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2009.02.013.
81. Loginova E.V. Hydroecology: a course of lectures. Minks BГУ. 2011. 300 p. (in Russian).
82. Salmikova E.V. // *Mikroelementy Meditsine.* 2016. N 17(4). P. 11–15 (in Russian).
83. Chasapis C.T., Ntoupa P.-S.A., Spiliopoulou C.A., Stefanidou M.E. // *Arch. Toxicol.* 2020. V. 94. N 5. P. 1443–1460. DOI: 10.1007/s00204-020-02702-9.
84. Petrushka I., Bratus O., Petrushka K. // *Environ. Probl.* 2021. V. 6. N 2. P. 64–68. DOI: 10.23939/ep2021.02.064.
85. Cherono F., Mburu N., Kakoi B. // *Heliyon.* 2021. V. 7. N 11. P. e08254. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e08254.
86. Pan M., Wu G., Liu C., Lin X., Huang X. // *Nanomaterials.* 2018. V. 8. N 10. P. 806. DOI: 10.3390/nano8100806.
87. Cao L., Li Z., Xiang S., Huang Z., Ruan R., Liu Y. // *Bioresour. Technol.* 2019. V. 284. P. 448–455. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.03.043.
88. Izidoro J.C., Kim M.C., Bellelli V.F., Pane M.C., Botelho Junior A.B., Espinosa D.C., Tenório J.A. // *J. Sustain. Min.* 2019. DOI: 10.1016/j.jsm.2019.11.001.
89. Dong W., Liang K., Qin Y., Ma H., Zhao X., Zhang L., Zhu S., Yu Y., Bian D., Yang J. // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. N 8. P. 1519. DOI: 10.3390/app9081519.

93. **Koshovskiy T.S., Sanin A.Y., Puzanova T.A., Tkachenko O.V.** // *Water Sect. Russ. Probl. Technol. Manag.* 2019. N 5. P. 49–62. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-5-4.
94. **Wu J., Lu J., Zhang C., Zhang Y., Lin Y., Xu J.** // *Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J.* 2020. V. 26. N 8. P. 2011–2026. DOI: 10.1080/10807039.2019.1634466.
95. **Kong P., Cheng X., Sun R., Chen L.** // *Water.* 2018. V. 10. N 1. P. 73. DOI: 10.3390/w10010073.
96. **Gribovskiy E.Y., Nohrin D., Davydova N.** // *Agrar. Bull.* 2018. V. 176. N 9. P. 4–10. DOI: 10.32417/article_5be27bf3a75196.11741678.
97. **Руш Е.А., Королева Г.П.** // *Системный анализ. Моделирование. Транспорт. Энергетика. Строительство.* 2011. Вып. 2. С. 185–189. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-5-4.
98. **Тедеева И.Р., Кубалова Л.М.** // *Современ. наукоемк. технологии.* 2014. Вып. 7–2. С. 92–92.
99. **Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я., Фокина А.И., Лялина Е.И.** // *Теор. проблемы экологии.* 2016. Т. 1. Вып. 1. P. 4–13.
100. **Milne D.** // *Am. J. Clin. Nutr.* 1998. N 67(5). P. 1041S–5S. DOI: 10.1093/ajcn/67.5.1041S.
101. **Филатова Е.Г., Дударев В.И., Николаенко Р.А.** // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 7. С. 54–60. DOI: 10.6060/ivkkt.20216407.6392.
102. **Hankins N.P., Lu N., Hilal N.** // *Sep. Purif. Technol.* 2006. V. 51. N 1. P. 48–56. DOI: 10.1016/j.seppur.2005.12.022.
103. **Singha B., Das S.K.** // *Colloids Surf. B Biointerfaces.* 2013. V. 107. P. 97–106. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2013.01.060.
104. **Witek-Krowiak A., Szafran R.G., Modelski S.** // *Desalination.* 2011. V. 265. N 1–3. P. 126–134. DOI: 10.1016/j.desal.2010.07.042.
105. **Li Q., Zhai J., Zhang W., Wang M., Zhou J.** // *J. Hazard. Mater.* 2007. V. 141. N 1. P. 163–167. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.109.
106. **Qin L., Feng L., Li C., Fan Z., Zhang G., Shen C., Meng Q.** // *J. Clean. Prod.* 2019. V. 228. P. 112–123. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.249.
107. **Wang Z., Yang Q., Zhao X., Wei G.** // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. N 22. P. 4754. DOI: 10.3390/app9224754.
108. **Demcak S., Balintova M., Demcakova M., Zinicovscaia I., Yushin N., Frontasyeva M.V.** // *Nov. Biotechnol. Chim.* 2019. V. 18. N 1. P. 66–71. DOI: 10.2478/nbec-2019-0009.
109. **Dignos E.C., Gabejan K.E., Olegario-Sanchez E.M., Mendoza H.D.** // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. V. 478. P. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/478/1/012030.
110. **Halas P., Kolodyńska D., Plaza A., Geçer M., Hubicki Z.** // *Adsorpt. Sci. Technol.* 2017. V. 35. N 5–6. P. 519–533. DOI: 10.1177/0263617417700420.
111. **Kadouche S., Lounici H., Benaoumeur K., Drouiche N., Hadioui M., Sharrock P.** // *J. Polym. Environ.* 2012. V. 20. N 3. P. 848–857. DOI: 10.1007/s10924-012-0440-7.
112. **Liu C., Liu J., Guo P., Peng J., Zhang L., Li Y.** // *Can. J. Chem. Eng.* 2022. V. 100. N S1. DOI: 10.1002/cjce.24122.
113. **Li J., Fan J., Ali S., Lan G., Tang H., Han W., Liu H., Li B., Li Y.** // *Chinese J. Catal.* 2019. V. 40. N 2. P. 141–146. DOI: 10.1016/S1872-2067(19)63271-7.
114. **Станицин В.** // *Химия и жизнь.* 1981. Вып. 5. С. 42–49.
115. **Liu C., Liu C., Peng J., Zhang L., Wang S., Ma A.** // *Chinese J. Chem. Eng.* 2018. V. 26. N 2. P. 364–372. DOI: 10.1016/j.cjche.2017.07.002.
116. **Xu X., He H., Zhao J., Wang B., Gu S., Li X.** // *Chinese J. Chem. Eng.* 2017. V. 25. N 9. P. 1217–1221. DOI: 10.1016/j.cjche.2016.12.003.
90. **Nhien H.T., Nguyen G.T.** // *Appl. Environ. Res.* 2019. P. 73–83. DOI: 10.35762/AER.2019.41.2.7.
91. **Pizarro J., Vergara P.M., Rodríguez J.A., Valenzuela A.M.** // *J. Hazard. Mater.* 2010. V. 181. N 1–3. P. 747–754. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.05.076.
92. **Darricau L., Elghali A., Martel P., Benzaazoua M.** // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. N 5. P. 2298. DOI: 10.3390/app11052298.
93. **Koshovskiy T.S., Sanin A.Y., Puzanova T.A., Tkachenko O.V.** // *Water Sect. Russ. Probl. Technol. Manag.* 2019. N 5. P. 49–62. DOI: 10.35567/1999-4508-2019-5-4.
94. **Wu J., Lu J., Zhang C., Zhang Y., Lin Y., Xu J.** // *Hum. Ecol. Risk Assess. An Int. J.* 2020. V. 26. N 8. P. 2011–2026. DOI: 10.1080/10807039.2019.1634466.
95. **Kong P., Cheng X., Sun R., Chen L.** // *Water.* 2018. V. 10. N 1. P. 73. DOI: 10.3390/w10010073.
96. **Gribovskiy E.Y., Nohrin D., Davydova N.** // *Agrar. Bull.* 2018. V. 176. N 9. P. 4–10. DOI: 10.32417/article_5be27bf3a75196.11741678.
97. **Rush E.A., Koroleva G.P.** // *System Alalysis. Modeling. Transport. Energy. Construction.* 2011. N 2. P. 185–189 (in Russian). DOI: 10.35567/1999-4508-2019-5-4.
98. **Tedeeva I.R., Kubalova L.M.** // *Sovremen. Naukoemk. Tekhnol.* 2014. N 7–2. P. 92–92 (in Russian).
99. **Skugoreva S.G., Ashikhmina T.Ya., Fokina A.I., Lyalina E.I.** // *Teoret. Probl. Ekolog.* 2016. V. 1. N 1. P. 4–13 (in Russian).
100. **Milne D.** // *Am. J. Clin. Nutr.* 1998. N 67(5). P. 1041S–5S. DOI: 10.1093/ajcn/67.5.1041S.
101. **Filatova E.G., Dudarev V.I., Nikolaenko R.A.** // *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64. N 7. P. 54–60. DOI: 10.6060/ivkkt.20216407.6392.
102. **Hankins N.P., Lu N., Hilal N.** // *Sep. Purif. Technol.* 2006. V. 51. N 1. P. 48–56. DOI: 10.1016/j.seppur.2005.12.022.
103. **Singha B., Das S.K.** // *Colloids Surf. B Biointerfaces.* 2013. V. 107. P. 97–106. DOI: 10.1016/j.colsurfb.2013.01.060.
104. **Witek-Krowiak A., Szafran R.G., Modelski S.** // *Desalination.* 2011. V. 265. N 1–3. P. 126–134. DOI: 10.1016/j.desal.2010.07.042.
105. **Li Q., Zhai J., Zhang W., Wang M., Zhou J.** // *J. Hazard. Mater.* 2007. V. 141. N 1. P. 163–167. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.109.
106. **Qin L., Feng L., Li C., Fan Z., Zhang G., Shen C., Meng Q.** // *J. Clean. Prod.* 2019. V. 228. P. 112–123. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.04.249.
107. **Wang Z., Yang Q., Zhao X., Wei G.** // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. N 22. P. 4754. DOI: 10.3390/app9224754.
108. **Demcak S., Balintova M., Demcakova M., Zinicovscaia I., Yushin N., Frontasyeva M.V.** // *Nov. Biotechnol. Chim.* 2019. V. 18. N 1. P. 66–71. DOI: 10.2478/nbec-2019-0009.
109. **Dignos E.C., Gabejan K.E., Olegario-Sanchez E.M., Mendoza H.D.** // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. V. 478. P. 012030. DOI: 10.1088/1757-899X/478/1/012030.
110. **Halas P., Kolodyńska D., Plaza A., Geçer M., Hubicki Z.** // *Adsorpt. Sci. Technol.* 2017. V. 35. N 5–6. P. 519–533. DOI: 10.1177/0263617417700420.
111. **Kadouche S., Lounici H., Benaoumeur K., Drouiche N., Hadioui M., Sharrock P.** // *J. Polym. Environ.* 2012. V. 20. N 3. P. 848–857. DOI: 10.1007/s10924-012-0440-7.
112. **Liu C., Liu J., Guo P., Peng J., Zhang L., Li Y.** // *Can. J. Chem. Eng.* 2022. V. 100. N S1. DOI: 10.1002/cjce.24122.
113. **Li J., Fan J., Ali S., Lan G., Tang H., Han W., Liu H., Li B., Li Y.** // *Chinese J. Catal.* 2019. V. 40. N 2. P. 141–146. DOI: 10.1016/S1872-2067(19)63271-7.
114. **Станицин В.** // *Химия и жизнь.* 1981. N 5. P. 42–49 (in Russian).

117. Gac W., Zawadzki W., Slowik G., Sienkiewicz A., Kierys A. // *Micropor. Mesopor. Mater.* 2018. V. 272. P. 79–91. DOI: 10.1016/j.micromeso.2018.06.022.
118. Hernández Mejía C., Vogt C., Weckhuysen B.M., de Jong K.P. // *Catal. Today.* 2020. V. 343. P. 56–62. DOI: 10.1016/j.cattod.2018.11.036.
119. Klarner M., Bieger S., Drechsler M., Kempe R. // *Zeitschrift Anorg. Allg. Chemie.* 2021. V. 647. N 22. P. 2157–2161. DOI: 10.1002/zaac.202100124.
120. Hongloi N., Prapainainar P., Seubsai A., Sudsakorn K., Prapainainar C. // *Energy.* 2019. 182. P. 306–320. DOI: 10.1016/j.energy.2019.06.020.
121. Sayas S., Vivó N., Da Costa-Serra J.F., Chica A. // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2021. V. 46. N 33. P. 17472–17480. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.235.
122. Slowik G., Greluk M., Rotko M., Machocki A. // *Mater. Chem. Phys.* 2021. V. 258. P. 123970. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123970.
123. Gao X., Feng W., Xu Y., Jiang Y., Huang C., Yi Y., Guo A., Qiu X., Chen W. // *Nanoscale Res. Lett.* 2020. V. 15. N 1. P. 23. DOI: 10.1186/s11671-019-3218-1.
124. Quan F., Zhong D., Song H., Jia F., Zhang L. // *J. Mater. Chem. A.* 2015. V. 3. N 32. P. 16409–16413. DOI: 10.1039/C5TA04102C.
125. Fujita S., Yamanishi Y., Arai M. // *J. Catal.* 2013. V. 297. P. 137–141. DOI: 10.1016/j.jcat.2012.10.001.
126. Niedźwiedz M.J., Demirci G., Kantor-Malujdy N., Sobolewski P., El Fray M. // *Eur. Polym. J.* 2022. V. 170. P. 111168. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111168.
127. Mashima K., Nishii Y., Nagae H. // *Chem. Rec.* 2020. V. 20. N 4. P. 332–343. DOI: 10.1002/tcr.201900044.
128. Wu X. // *Chem. – An Asian J.* 2012. V. 7. N 11. P. 2502–2509. DOI: 10.1002/asia.201200596.
129. Zhang N., Li R., Zhang G., Dong L., Zhang D., Wang G., Li T. // *ACS Omega.* 2020. V. 5. N 21. P. 11987–11997. DOI: 10.1021/acsomega.9b04417.
130. Mistry H., Varela A.S., Bonifacio C.S., Zegkinoglou I., Sinev I., Choi Y.-W., Kisslinger K., Stach E.A., Yang J.C., Strasser P., Cuenya B.R. // *Nat. Commun.* 2016. V. 7. N 1. P. 12123. DOI: 10.1038/ncomms12123.
131. Dattila F., García-Muelas R., López N. // *ACS Energy Lett.* 2020. V. 5. N 10. P. 3176–3184. DOI: 10.1021/acsenerylett.0c01777.
132. Zhang J., Chen J. // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2017. V. 5. N 7. P. 5982–5993. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b00778.
133. Sato A.G., Volanti D.P., de Freitas I.C., Longo E., Bueno J.M. // *Catal. Commun.* 2012. V. 26. P. 122–126. DOI: 10.1016/j.catcom.2012.05.008.
134. Mierczynski P., Mosinska M., Maniukiewicz W., Nowosielska M., Czyłkowska A., Szyrkowska M.I. // *React. Kinet. Mech. Catal.* 2019. V. 127. N 2. P. 857–874. DOI: 10.1007/s11144-019-01609-6.
115. Liu C., Liu C., Peng J., Zhang L., Wang S., Ma A. // *Chinese J. Chem. Eng.* 2018. V. 26. N 2. P. 364–372. DOI: 10.1016/j.cjche.2017.07.002.
116. Xu X., He H., Zhao J., Wang B., Gu S., Li X. // *Chinese J. Chem. Eng.* 2017. V. 25. N 9. P. 1217–1221. DOI: 10.1016/j.cjche.2016.12.003.
117. Gac W., Zawadzki W., Slowik G., Sienkiewicz A., Kierys A. // *Micropor. Mesopor. Mater.* 2018. V. 272. P. 79–91. DOI: 10.1016/j.micromeso.2018.06.022.
118. Hernández Mejía C., Vogt C., Weckhuysen B.M., de Jong K.P. // *Catal. Today.* 2020. V. 343. P. 56–62. DOI: 10.1016/j.cattod.2018.11.036.
119. Klarner M., Bieger S., Drechsler M., Kempe R. // *Zeitschrift Anorg. Allg. Chemie.* 2021. V. 647. N 22. P. 2157–2161. DOI: 10.1002/zaac.202100124.
120. Hongloi N., Prapainainar P., Seubsai A., Sudsakorn K., Prapainainar C. // *Energy.* 2019. 182. P. 306–320. DOI: 10.1016/j.energy.2019.06.020.
121. Sayas S., Vivó N., Da Costa-Serra J.F., Chica A. // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2021. V. 46. N 33. P. 17472–17480. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.235.
122. Slowik G., Greluk M., Rotko M., Machocki A. // *Mater. Chem. Phys.* 2021. V. 258. P. 123970. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2020.123970.
123. Gao X., Feng W., Xu Y., Jiang Y., Huang C., Yi Y., Guo A., Qiu X., Chen W. // *Nanoscale Res. Lett.* 2020. V. 15. N 1. P. 23. DOI: 10.1186/s11671-019-3218-1.
124. Quan F., Zhong D., Song H., Jia F., Zhang L. // *J. Mater. Chem. A.* 2015. V. 3. N 32. P. 16409–16413. DOI: 10.1039/C5TA04102C.
125. Fujita S., Yamanishi Y., Arai M. // *J. Catal.* 2013. V. 297. P. 137–141. DOI: 10.1016/j.jcat.2012.10.001.
126. Niedźwiedz M.J., Demirci G., Kantor-Malujdy N., Sobolewski P., El Fray M. // *Eur. Polym. J.* 2022. V. 170. P. 111168. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111168.
127. Mashima K., Nishii Y., Nagae H. // *Chem. Rec.* 2020. V. 20. N 4. P. 332–343. DOI: 10.1002/tcr.201900044.
128. Wu X. // *Chem. – An Asian J.* 2012. V. 7. N 11. P. 2502–2509. DOI: 10.1002/asia.201200596.
129. Zhang N., Li R., Zhang G., Dong L., Zhang D., Wang G., Li T. // *ACS Omega.* 2020. V. 5. N 21. P. 11987–11997. DOI: 10.1021/acsomega.9b04417.
130. Mistry H., Varela A.S., Bonifacio C.S., Zegkinoglou I., Sinev I., Choi Y.-W., Kisslinger K., Stach E.A., Yang J.C., Strasser P., Cuenya B.R. // *Nat. Commun.* 2016. V. 7. N 1. P. 12123. DOI: 10.1038/ncomms12123.
131. Dattila F., García-Muelas R., López N. // *ACS Energy Lett.* 2020. V. 5. N 10. P. 3176–3184. DOI: 10.1021/acsenerylett.0c01777.
132. Zhang J., Chen J. // *ACS Sustain. Chem. Eng.* 2017. V. 5. N 7. P. 5982–5993. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b00778.
133. Sato A.G., Volanti D.P., de Freitas I.C., Longo E., Bueno J.M. // *Catal. Commun.* 2012. V. 26. P. 122–126. DOI: 10.1016/j.catcom.2012.05.008.
134. Mierczynski P., Mosinska M., Maniukiewicz W., Nowosielska M., Czyłkowska A., Szyrkowska M.I. // *React. Kinet. Mech. Catal.* 2019. V. 127. N 2. P. 857–874. DOI: 10.1007/s11144-019-01609-6.

Поступила в редакцию (Received) 02.05.2023
Принята к опубликованию (Accepted) 14.06.2023