

УДК 628.3:621.357

АНАЛИЗ И ОЦЕНКА СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА ГАЛЬВАНИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ



Ю. Д. СМЕРНОВ,
доцент, канд. техн. наук,
smirnov_yud@pers.spmi.ru



В. А. МАТВЕЕВА,
доцент, канд. техн. наук



Н. М. ЯКОВЛЕВ,
студент



З. Р. САКАБУТДИНОВА,
студент

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

В настоящее время в горном деле активно применяют оборудование, подлежащее специальной обработке в гальванических цехах, что повышает коррозионную стойкость, а также срок службы породоразрушающих инструментов. Гальваническая отрасль играет большую роль в обеспечении коррозионной стойкости деталей внутрискважинного оборудования, работающего в условиях контакта с коррозионно-активными жидкостями. Учитывая быстрые темпы развития производства, выдвигается все больше требований к контактным поверхностям, что максимально актуализирует одну из главных задач во многих отраслях промышленности — повышение износостойкости деталей [1, 2].

Актуальность исследований

Многие горнопромышленные предприятия имеют ремонтно-механические заводы, в состав которых входят гальванические цеха и участки для нанесения защитных антикоррозионных или износостойких покрытий на запасные детали горных машин [3]. Гальванические процессы также применяют на предприятиях, специализирующихся на изготовлении горнодобывающего, горнотранспортного, обогатительного и нефтегазового оборудования. Чаще всего ремонтно-механические заводы с гальваническим производством находятся на промышленной площадке горного предприятия, в состав которого они входят.

Проведены эксперименты по удалению тяжелых металлов из сточных вод гальванического производства предприятия при помощи отходов сельского хозяйства. В ходе проведенных в научном центре «Экосистема» Санкт-Петербургского горного университета экспериментов выявлен наиболее перспективный метод очистки с использованием сельскохозяйственных отходов, позволяющий удалить из сточных вод ионы Cr, Fe, Cu и Zn с эффективностью до 93, 89, 62 и 70 % соответственно.

Ключевые слова: горная промышленность, гальваническое производство, тяжелые металлы, экстракт лузги, экстракт стеблей сельскохозяйственных отходов, сточные воды, реагенты, сельскохозяйственные отходы

DOI: 10.17580/gzh.2023.09.08

Гальванические производства играют важную роль для горной промышленности, однако они оказывают негативное воздействие на окружающую среду. В ходе гальванических процессов образуются большие объемы отработанных электролитов с высокими концентрациями кислотных остатков и тяжелых металлов. Согласно исследованию [4], в мире производится от 740 до 1700 тыс. т в год металлических гальванических покрытий. Из них 25 тыс. т в год производится в России. В ходе деятельности гальванических производств в России за год образуется от 250 до 460 млн м³ технологических растворов, масса тяжелых металлов в которых составляет от 14 до 25 млн т. Из них от 2,2 до 4 тыс. т уносятся в сточные воды.

Примерами токсичных поллютантов, поступающих в водные объекты, являются тяжелые металлы [5, 6], которые, попадая в организм человека, обладают общетоксическим и кумулятивным действием (накапливаются в почках, печени, поджелудочной железе), а также аллергенным (Ni, Cr), тератогенным (Cd), канцерогенным (Ni, Cr, Zn) и мутагенным действием (Cd, Ni, Cr, Zn, Cu) [7]. В кислой водной среде металлы находятся в растворенной форме и могут мигрировать на большие расстояния [8]. Сброс гальванических стоков с высоким содержанием фосфатов и фторидов приводит к эвтрофикации водных объектов. Сточные воды с повышенной кислотностью со временем также разрушают канализационные сети, что может спровоцировать попадание загрязняющих веществ в почву, поверхностные и подземные воды. В результате возникают литохимические и гидрогеохимические ареалы и потоки загрязнения [9]. Тяжелые металлы накапливаются в донных отложениях водотоков [10], что негативно сказывается на жизнедеятельности бентоса. Металлы сравнительно быстро накапливаются в почве и крайне медленно из нее выводятся [11].

В целях снижения негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека предприятия оборудуют

гальванические цеха системами очистки сточных вод [12]. В основном для осаждения тяжелых металлов используют химические (реагентные) методы очистки [13]. Для удаления образовавшегося осадка могут быть использованы механические методы очистки (отстаивание или фильтрация) [14]. Если после реагентной очистки образуются нерастворимые соединения коллоидной степени дисперсности, то для их удаления применяют физико-химические методы очистки (коагуляцию, флокуляцию) [15]. Существуют способы, позволяющие извлечь ионы тяжелых металлов без необходимости их осаждения. К ним относятся методы сорбционной очистки или ионного обмена. В работе [16] предлагается использовать вермикулит для сорбционной очистки сточных вод горно-обогатительных комбинатов. Для очистки гальванических стоков также могут применять электрохимические методы, к примеру электрокоагуляцию.

Среди перечисленных способов очистки сточных вод наиболее распространенным является реагентный способ, заключающийся в переводе ионов тяжелых металлов в нерастворимый осадок, который затем подлежит отделению и обезвреживанию. В некоторых работах исследуется возможность применения осадков сточных вод в качестве удобрений для малопригодных земель [17, 18], но такие удобрения требуют дополнительной проверки на токсичность.

Постановка задачи

Недостатком применения реагентного метода очистки является необходимость использования опасных для человека и окружающей среды химических веществ. Наиболее распространенными реагентами, применяемыми в системах нейтрализации сточных вод гальванических производств, являются: биосульфит натрия, гашеная известь, едкий натр, серная кислота [19]. Данные вещества раздражают дыхательные пути, глаза и кожу, что приводит к различным заболеваниям. Процесс подачи реагентов в систему очистных сооружений вручную не только опасен для здоровья операторов, но и неэффективен из-за отсутствия точной дозировки. На сегодняшний день необходимо внедрять системы автоматизации, учета и контроля, которые позволят вести безопасную и надежную эксплуатацию оборудования [20, 21].

Одним из способов решения проблемы химической опасности реагентов является их замена на менее опасные аналоги. Так, в работах [22, 23] предложено применять сапонитовую глину для очистки сточных вод от ионов меди. В работе [24] авторы предлагают использовать оливковые косточки для очистки сточных вод от ионов меди, никеля и хрома. Известен способ очистки сточных вод от ионов хрома с применением листового опада дерева манго [25]. Предлагается для удаления ионов Си, Ni, Zn и Cd из водных растворов использовать кожуру апельсинов, лимонов и бананов [26]. В одной из работ предложено использовать биоуголь, полученный из куриного помета [27]. Рассмотрено применение

Таблица 1. Количество отходов на конец 2021 г. [31] (составлена авторами)

Код Федерального классификационного каталога отходов	Вид отходов	Наличие отходов на конец года, т
11000000000	Отходы сельского хозяйства	3512,5
11112014495	Зерноотходы других зерновых культур (стебли льна)	192
30116132495	Лузга гречихи	837
11112011495	Зерноотходы гречихи (стебли гречихи)	81

отходов металлообработки для очистки сточных вод от молибдена [28]. В других исследованиях [29, 30] предложено применять методы фиторемедиации для поглощения тяжелых металлов.

В современных условиях выбор продукта для очистки сточных вод должен быть ориентирован на недорогое, доступное сырье. Согласно отчету 2-ТП-отходы (табл. 1) [31], на конец года среди отходов в большом количестве остаются сельскохозяйственные отходы (стебли гречихи, льна), лузга гречихи. В работе [32] предлагается использование в качестве реагента лузги гречихи.

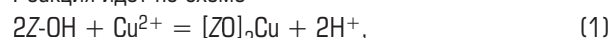
Целью работы является проверка возможности использования сельскохозяйственных отходов в очистке сточных вод гальванических производств, а также определение оптимальных соотношений сточных вод и экстрактов.

Проведение эксперимента

Для выбора наиболее рационального способа очистки сточных вод при помощи отходов предложено провести несколько опытов, применяя отходы сельского хозяйства (лузгу, стебли сельскохозяйственных отходов льна, гречихи).

Экстракты, полученные из побочных продуктов сельского хозяйства (лузги, стеблей гречихи, льна), могут осаждают тяжелые металлы ввиду свойств органической матрицы [33].

Реакция идет по схеме



где Z – матрица полифлавоноида.

На основе проведенных исследований был составлен план эксперимента, включающий четыре этапа:

- приготовление экстрактов из рассматриваемых отходов;
- добавление полученных экстрактов к пробам сточных вод;
- выдержка проб с экстрактами в течение 24 ч;
- анализ очищенных проб на содержание тяжелых металлов.

Экстракт из стеблей гречихи и льна готовили следующим образом:



Рис. 1. Этапы приготовления экстракта из стеблей сельскохозяйственных отходов (составлен авторами)

- было отмерено 50 г стеблей сельскохозяйственных отходов (рис. 1, а);
- стебли измельчали при помощи блендера;
- к измельченным стеблям добавляли 500 см³ дистиллированной воды, нагретой на песчаной бане до температуры 90 °С;

- смесь настаивали в течение 60 мин (см. рис. 1, б);
- экстракт отфильтровывали от твердых примесей при помощи фильтровальной бумаги «Синяя лента» (см. рис. 1, в).

Экстракт из лузги гречихи готовили следующим образом: отмеряли лузгу гречихи массой 75 г (рис. 2, а), далее ее промывали под напором воды при температуре не менее 40 °С, затем кипятили в дистиллированной воде в течение 20 мин. После кипячения сливали воду, затем заливали лузгу новой порцией дистиллированной воды, нагретой до 90 °С, и настаивали в течение 60 мин (см. рис. 2, б).

Готовили также экстракты смешанного состава в разных соотношениях (стебли льна и лузга гречихи, стебли и лузга гречихи).

Добавление экстрактов к пробам

Пробы сточных вод были отобраны из гальванического цеха предприятия приборостроения на горном производстве Северо-Западного региона РФ. В табл. 2 представлен исходный состав сточных вод, а также допустимая концентрация тяжелых металлов.

После приготовления экстракты добавляли к пробам сточных вод в разных соотношениях. В течение 24 ч в пробах наблюдалось появление осадка, который в дальнейшем отфильтровывали, а воду анализировали на содержание



Рис. 2. Этапы приготовления экстракта из лузги гречихи (составлен авторами)

металлов при помощи атомно-эмиссионного спектрометра ICPE-9000. Результаты анализа сведены в табл. 3.

Обработка результатов эксперимента

Эффективность очистки (%) металлов была определена по формуле (2) на примере хрома:

$$\eta = 100(C_{\phi} - C)/C_{\phi} = 100(0,26 - 0,0025)/0,26 = 99,04, \quad (2)$$

где C_{ϕ} и C – фактическая концентрация до очистки и после очистки от хрома, мг/дм³ соответственно.

Аналогичный расчет был выполнен для остальных загрязняющих веществ. Полученные данные сведены в табл. 4.

Способ очистки сточных вод с использованием экстракта из стеблей льна не оправдал себя, так как после очистки в пробах наблюдалось превышение концентрации цинка,

Таблица 2. Состав проб загрязненных сточных вод, мг/дм³ (составлена авторами)

Показатель	Cr	Cu	Fe	Ni	Zn
C_{ϕ}	0,260±0,034	0,420±0,055	1,9 (более 1)	0,96±0,12	0,300±0,051
C	0,2	0,04	1,1	0,08	0,1

Таблица 3. Результаты анализа сточных вод после очистки (составлена авторами)

Компоненты экстракта	V _{экстракта} /V _{пробы}	Фактическая концентрация после очистки, мг/дм ³				
		Cr	Cu	Fe	Ni	Zn
Стебли гречихи	5/20	0,020±0,003	1,00±0,13	0,290±0,032	0,690±0,089	0,150±0,026
	3/20	0,0270±0,0035	0,800±0,104	0,350±0,039	0,730±0,095	0,350±0,059
	0,3/20	0,0730±0,0095	0,360±0,047	0,880±0,097	0,810±0,105	0,680±0,116
	0,1/20	0,089±0,012	0,350±0,046	0,980±0,108	0,860±0,112	0,800±0,136
Лузга гречихи	5/20	0,0025±0,0005	0,267±0,035	0,058±0,006	0,410±0,053	0,054±0,009
	1/20	0,0075±0,0016	0,284±0,037	0,09±0,01	0,54±0,07	0,063±0,011
	0,3/20	0,019±0,004	0,31±0,04	0,231±0,025	0,650±0,084	0,130±0,022
	0,1/20	0,0280±0,0036	0,314±0,041	0,48±0,05	0,72±0,09	0,140±0,024
Стебли гречихи (25 %), лузга (75 %)	0,3/20	0,120±0,016	0,260±0,034	0,70±0,08	0,88±0,11	0,23±0,04
	3/20	0,040±0,005	0,170±0,022	0,300±0,033	0,790±0,103	0,140±0,024
	5/20	0,0025±0,0005	0,130±0,017	0,058±0,006	0,750±0,098	0,064±0,011
Стебли гречихи (50 %), лузга (50 %)	0,3/20	0,170±0,022	0,29±0,04	1	0,84±0,11	0,380±0,065
	3/20	0,08±0,01	0,271±0,037	0,80±0,09	0,740±0,096	0,49±0,08
	5/20	0,050±0,006	0,24±0,03	0,35±0,04	0,680±0,088	0,370±0,063
Стебли гречихи (75 %), лузга (25 %)	0,3/20	0,190±0,025	0,23±0,03	1,30	0,830±0,108	0,80±0,14
	3/20	0,130±0,017	0,77±0,10	0,87±0,09	0,790±0,102	1,2±0,2
	5/20	0,08±0,01	0,98±0,13	0,68±0,08	0,740±0,096	1,30±0,22
Стебли льна (100 %)	1/20	0,22±0,03	0,37±0,05	1,30	0,44±0,06	0,330±0,056
	3/20	0,180±0,023	0,36±0,05	1,20	0,400±0,052	0,320±0,054
	5/20	0,16±0,02	0,41±0,05	1,10	0,36±0,05	0,31±0,05
	12/20	0,130±0,017	0,430±0,056	1,20	0,31±0,04	0,34±0,06
Стебли льна (75 %), лузга (25 %)	1/20	0,22±0,03	0,410±0,053	1,40	0,420±0,055	0,42±0,07
	3/20	0,192±0,025	0,470±0,061	1,30	0,39±0,05	0,34±0,06
	5/20	0,190±0,025	0,330±0,043	1,10	0,37±0,05	0,28±0,05
Стебли льна (25 %), лузга (75 %)	1/20	0,140±0,018	0,430±0,056	1,20	0,54±0,07	0,320±0,054
	3/20	0,08±0,01	0,40±0,05	0,90±0,09	0,46±0,06	0,280±0,047
	5/20	0,060±0,008	0,24±0,03	0,60±0,07	0,430±0,056	0,31±0,05
Стебли льна (50 %), лузга (50 %)	1/20	0,250±0,033	0,71±0,09	1,30	0,44±0,06	0,35±0,06
	3/20	0,200±0,026	0,50±0,07	1,30	0,38±0,05	0,33±0,06
	5/20	0,191±0,025	0,46±0,06	1,30	0,36±0,05	0,29±0,05

а концентрации железа, хрома и меди уменьшались в пределах погрешности. Можно сделать вывод, что способ очистки от тяжелых металлов с помощью экстракта льна по данной методике неэффективен. Смеси экстрактов стеблей льна и лузги гречихи также не дали требуемого результата. Согласно полученным данным (см. табл. 3), наиболее подходящим способом очистки сточных вод является очистка с помощью лузги гречихи. Степень очистки от Cr, Cu, Fe, Ni, Zn составила 99, 36, 97, 57 и 82 % соответственно. Смесь лузги и стеблей эффективна в составе 75 и 25 % соответственно (степень очистки от Cr, Cu, Fe, Ni, Zn составляет 93, 69, 89, 22 и 70 %), в других случаях наблюдается превышение концентраций тяжелых металлов (цинка и меди).

При сбросе сточных вод в канализацию также нормируется химическое потребление кислорода (ХПК). При помощи лабораторного спектрометра DR-5000 был измерен показатель ХПК в пробах, содержащих наибольшее количество экстракта. Согласно результатам анализа, ХПК не превышает нормативно-допустимую концентрацию в случае очистки сточных вод при помощи лузги. Полученные данные сведены в **табл. 5**.

Наиболее оптимальным для очистки сточных вод будет соотношение объемов экстракта и пробы 0,25 (5/20). При добавлении меньшего количества экстракта наблюдается превышение нормативных концентраций Cu, Ni и Zn. При добавлении большего количества экстракта существенное увеличение

Таблица 4. Эффективность очистки для каждого элемента (составлена авторами)

Отходы	$V_{\text{экстракта}}/V_{\text{пробы}}$	Эффективность очистки, %				
		Cr	Cu	Fe	Ni	Zn
Лузга гречихи	5/20	99,04	36,43	96,95	57,29	82,00
	1/20	97,12	32,43	95,26	39,75	79,00
	0,3/20	92,77	26,19	87,84	32,29	56,67
	0,1/20	89,23	25,13	74,74	25,00	54,67
Стебли сельскохозяйственных отходов (25 %), лузга (75 %)	0,3/20	55,56	38,09	63,16	8,69	23,33
	3/20	85,19	59,52	84,21	17,39	53,33
	5/20	92,59	69,05	89,47	21,74	70

эффективности очистки не наблюдается. При этом в любом случае концентрации Cu и Ni будут превышать нормативные значения, поэтому данный способ применим при наличии систем доочистки сточных вод.

Полное осаждение металлов, судя по образованию осадка, происходит за 3 ч. На производстве для ускорения процесса применяют специальные флокулянты. К наиболее эффективным относятся полимерные флокулянты, например полиакриламид. Его применение позволит уменьшить время очистки рассмотренных объемов сточных вод до 30 мин, а также сократить количество осадка [34].

Способ очистки сточных вод от тяжелых металлов при помощи экстракта можно применять при первичной очистке кислотно-щелочных стоков в реакторе обезвреживания.

После осаждения тяжелых металлов образуется шлам с преимущественным содержанием органики. Одним из способов его утилизации может являться прокаливание в муфельной печи при температуре не менее 700 °С; при реализации данного процесса выжигается органика и происходит переход металлов в труднорастворимую форму. После прокаливания

Таблица 5. Результаты определения ХПК (составлена авторами)

Способ очистки	$V_{\text{экстракта}}/V_{\text{пробы}}$	ХПК, мгО ₂ /дм ³
Стебли гречихи	5/20	1009
Лузга гречихи	5/20	130


шлам можно направить на размол и рассев в шаровую мельницу, затем использовать в качестве пигмента [27].

В некоторых работах рассматривается использование органических шламов в качестве удобрений [35].

Выводы

В ходе работ было установлено, что среди рассмотренных отходов сельского хозяйства для очистки сточных вод гальванических производств наиболее перспективна лузга гречихи, а также смесь из лузги и стеблей сельскохозяйственных отходов (стеблей гречихи) в пропорции 75 и 25 % соответственно. Данный метод позволяет очистить сточные воды от ионов Cr, Fe, Cu, Zn с эффективностью до 93, 69, 89 и 70 %. Экстракты лузги и стеблей гречихи представляют меньшую опасность для человека и окружающей среды, чем щелочь, которую в настоящее время применяют чаще. Однако эффективность очистки сточных вод рассмотренными отходами не обеспечивает полного соответствия нормативам, поэтому данный метод применим в качестве одной из стадий обработки сточных вод с последующей доочисткой.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 9, pp. 55–60
DOI: 10.17580/gzh.2023.09.08

Modern wastewater treatment technologies in galvanic production: Analysis and evaluation

Information about authors

Yu. D. Smirnov¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, smirnov_yud@pers.spmi.ru

V. A. Matveeva¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

N. M. Yakovlev¹, Student

E. R. Sakhabutdinova¹, Student

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Galvanic production plays a significant role in many industries, including mining, and at the same time is a strong environmental pollutant, mainly due to the formation of large volumes of wastewater with high concentrations of heavy metals. Currently, electroplating shops are equipped with treatment facilities, in which, in most cases, a chemical method is used to remove heavy metals from wastewater. This method is harmful to human health due to the use of chemically active reagents, and is expensive because of their high cost and high consumption. In modern conditions, the choice of a product for wastewater treatment should be focused on inexpensive and affordable raw materials; therefore, in the course of this work, the experiments were carried out to remove heavy metals from wastewater of galvanic production using agricultural waste. Sedimentation with the help of husks and stalks of agricultural waste occurs due to polyflavonoids. The essence of the experiments was to prepare extracts from the above wastes and add them in various proportions to wastewater samples from the electroplating shop. After a while, a precipitate formed, which

was filtered out, and the water was sent for the analysis of the residual content of heavy metals. In the course of the experiments carried out at the Ecosystem Research Center of the Mining University, the most promising method of purification using agricultural waste was identified, which made it possible to remove Cr, Fe, Cu and Zn ions from wastewater at an efficiency of up to 93%, 89%, 69% and 70% respectively.

Keywords: mining industry, galvanic production, heavy metals, husk extract, agricultural waste stem extract, wastewater, reagents, agricultural waste.

References

- Stepanov S. N., Larionova T. A., Stepanov S. S. Study of aluminum influence on the adhesion of stainless steel in flame spraying. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 245. pp. 591–598. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.11
- Cheban A. Yu. Engineering of complex structure apatite deposits and excavating-sorting equipment for its implementation. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 238. pp. 399–404. DOI: 10.31897/pmi.2019.4.399
- Milyuts V. G., Tsukanov V. V., Pryakhin E. I., Nikitina L. B. Development of manufacturing technology for high-strength hull steel reducing production cycle and providing high-quality sheets. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. pp. 536–543. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.536
- Vinokurov E. G., Burukhina T. F., Guseva T. V. Electroplating industry in Russia: Assessment approach, improvement tasks of resource and environmental effectiveness. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. No. 7. pp. 2–6.
- Pashkevich M. A., Bech J., Matveeva V. A., Alekseenko A. V. Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 241. pp. 125–130. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.125
- Kharko P. A. Usability of ion exchange resin for removal of copper, zinc, iron, aluminum and manganese ions from water. *Science and Innovation in Technological Universities: Proceedings of the 13th All-Russian Forum for Students, Post-Graduates and Young Scientists*. Saint-Petersburg: Politekh-Press, 2019. pp. 95–97.
- Khlebnikova T. D., Khamidullina I. V. Prospects of development of biochemical clearing of industrial sewage from sulphates and heavy metal ions. *Bashkirskiy khimicheskij zhurnal*. 2012. Vol. 19, No. 2. pp. 147–155.
- Nureev R. R., Pashkevich M. A., Kharko P. A. Assessment of the impact of copper ore processing waste on surface and groundwater. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*. 2022. Vol. 12, No. 4. pp. 169–179. DOI: 10.46698/VNC.2022.37.95.013
- Lytaeva T. A., Isakov A. E. Environmental impact of the stored dust-like zinc and iron containing wastes. *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18, No. 3. P. 37–42. DOI: 10.12911/22998993/69355
- Kuznetsov V. S., Petrov D. S. Assessing the environmental condition of minor rivers in urban areas. *Journal of Ecological Engineering*. 2017. Vol. 18, No. 6. pp. 110–114. DOI: 10.12911/22998993/76221
- Kachor O. L., Sarapulova G. I., Bogdanov A. V. Investigation of the possibility of immobilization of mobile forms of arsenic in technogenic soils. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. pp. 596–602.
- Akhmadullina F. Yu., Balyмова E. S., Zakirov R. K. New organizational principles of combined treatment of the electroplating industry wastewater. *Tsvetnye Metally*. 2019. No. 10. pp. 85–91.
- Vertinsky A. P. Modern wastewater treatment methods: Application and perspectives. *Innovatsii i investitsii*. 2019. No. 1. pp. 175–182.
- Zhdanova A. V., Ilarionov S. A. The purification of galvanic drains from the pollution caused by heavy metals. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser.: Khimiya*. 2012. No. 1(5). pp. 54–60.
- Vertinsky A. P. Physical and chemical methods of wastewater treatment: problems, current state and possible ways of improvement. *Innovatsii i investitsii*. 2019. No. 11. pp. 257–261.
- Matveeva V. A., Chukaeva M. A., Sverchkov I. P. Low-cost sorption technologies for large-tonnage wastewater treatment in mining industries. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1384. 012028. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012028
- Petrova T. A., Rudzish E. Utilization of sewage sludge as an ameliorant for reclamation of technogenically disturbed lands. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. pp. 767–776. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.16
- Smirnov Yu. D., Suchkova M. V. Beneficial use of sewage sludge incineration ash in the national economy. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2019. No. 3(79). pp. 16–25.
- Kapustin Yu. I., Zvereva O. V., Averina Yu. M., Kalyakina G. E. Economic calculation of the reagent method for treating sewage waters of galvanic production. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2018. Vol. 32, No. 8(204). pp. 63–64.
- Ugolnikov A. V., Makarov N. V. Application of automation systems for monitoring and energy efficiency accounting indicators of mining enterprises compressor facility operation. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. pp. 245–248. DOI: 10.31897/pmi.2019.2.245
- Martirosyan A. V., Ilyushin Yu. V., Afanaseva O. V. Development of a distributed mathematical model and control system for reducing pollution risk in mineral water aquifer systems. *Water*. 2022. Vol. 14, Iss. 2. 151. DOI: 10.3390/w14020151
- Zubkova O. S. Application of saponite clay in removal of copper ions from wastewater. *Rational Use of Natural Resources and Processing of Manmade Materials: Basic Problems of Science, Material Science, Chemistry and Biotechnology. International Conference Proceedings*. Belgorod, 2022. pp. 163–167.
- Pashkevich M. A., Alekseenko A. V. Reutilization prospects of diamond clay tailings at the Lomonosov Mine, Northwestern Russia. *Minerals*. 2020. Vol. 10, Iss. 6. 517. DOI: 10.3390/min10060517
- Martín-Lara M. A., Blázquez G., Trujillo M. C., Pérez A., Calero M. New treatment of real electroplating wastewater containing heavy metal ions by adsorption onto olive stone. *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 81. pp. 120–129.
- Rumpa Saha, Bidyut Saha. Removal of hexavalent chromium from contaminated water by adsorption using mango leaves (*Mangifera indica*). *Desalination and Water Treatment*. 2013. Vol. 52, No. 10-12. pp. 1928–1936.
- Munusamy Thirumavalavan, Yi-Ling Lai, Ling-Chu Lin, Jiunn-Fwu Lee. Cellulose-based native and surface modified fruit peels for the adsorption of heavy metal ions from aqueous solution: Langmuir adsorption isotherms. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2010. Vol. 55, No. 3. pp. 1186–1192.
- Cheremisina O., Litvinova T., Sergeev V., Ponomareva M., Mashukova J. Application of the Organic Waste-Based Sorbent for the Purification of Aqueous Solutions. *Water*. 2021. Vol. 13, Iss. 21. 3101. DOI: 10.3390/w13213101
- Chukaeva M. A., Povarov V. G., Sverchkov I. P. Iron-containing metalworking wastes as a chemisorbent for wastewater treatment from molybdenum ions. *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2020. Vol. 75, No. 1. pp. 36–42. DOI: 10.3103/S0027131420010058
- Petrov D. S. Evaluation of the possibility to use the aquatic vegetation for wastewater treatment from biogenic compounds. *High Technologies and Innovations in Science and the National Security of Russia: Urgent Questions. Conference Proceedings*. Saint-Petersburg: GNI "Natsrazvitie", 2019. Vol. 1. pp. 32–37.
- Korotaeva A. E., Pashkevich M. A., Petrov D. S. Phytoremediation of water ecosystems from heavy metals by higher aquatic vegetation. *Biodiagnostics of Natural and Natural-Manmade Systems: Proceedings of XX All-Russian Conference with International Participation*. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyi universitet, 2022. pp. 106–109.
- Information of formation, treatment, recycling, deactivation and disposal of industry and consumption waste: 2-TP report (waste). Available at: <https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/> (accessed: 02.02.2023).
- Kiseleva N. V. Reagent-assisted removal of heavy metal ions from galvanic production wastewater using buckwheat shell extract: Theses of Dissertation of Candidate of Engineering Sciences. Kazan, 1999. 17 p.
- Stepanova S. V., Prokopenko T. A., Shaykhiev I. G. Applicability of plant refuse in reagent-assistant removal of heavy metals from wastewater. *Zhurnal ekologii i promyshlennoy bezopasnosti*. 2010. No. 3(47). pp. 81–83.
- Kurenkov V. F., Khartan Kh.-G., Lobanov F. I. Water treatment stimulation with polyacrylamide flocculants. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2008. No. 5. pp. 28–49.
- Pashkevich M. A., Petrova T. A., Rudzish E. Lignin sludge application for forest land reclamation: feasibility assessment. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 106–112. DOI: 10.31897/pmi.2019.1.106