Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» https://resources.today
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2025, Том 12, № 3 / 2025, Vol. 12, Iss. 3 https://resources.today/issue-3-2025.html

URL статьи: https://resources.today/PDF/04EEOR325.pdf

DOI: 10.15862/04EEOR325 (https://doi.org/10.15862/04EEOR325)

1.5.15. Экология (биологические, химические, медицинские, технические, ветеринарные, сельскохозяйственные науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Тихонова, И. О. Утилизация отработанных катализаторов с соблюдением принципов наилучших доступных технологий / И. О. Тихонова, А. Ю. Санжаровский, А. И. Михрабов, А. С. Петров // Отходы и ресурсы. — 2025. — Т. 12. — № 3. — URL: https://resources.today/PDF/04EEOR325.pdf. DOI: 10.15862/04EEOR325.

For citation:
Tikhonova I.O., Sanzharovskiy A.Yu., Mikhrabov A.I., Petrov A.S. Recycling of used catalysts according to the Best Available Techniques. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2025;12(3): 04EEOR325. Available at: https://resources.today/PDF/04EEOR325.pdf. DOI: 10.15862/04EEOR325. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 669.054.8:656.13

Тихонова Ирина Олеговна
ФГАУ «Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», Москва, Россия
Главный научный сотрудник отдела водных ресурсов
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия
Доцент кафедры «Промышленной экологии»
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: iritimay@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7156-1660
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=51933
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55346990200

Санжаровский Александр Юрьевич
ФГАУ «Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», Москва, Россия
Старший научный сотрудник
Кандидат технических наук
E-mail: a.sanzharovskiy@eipc.center
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0245-2003
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=604230
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57211296613

Михрабов Александр Ильич
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия
Аспирант
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0122-7098

Петров Андрей Сергеевич
ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», Москва, Россия
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6523-9762

Утилизация отработанных катализаторов с соблюдением принципов наилучших доступных технологий

Аннотация. В последнее десятилетие одним из основных направлений использования металлов платиновой группы являются катализаторы — как в качестве нейтрализаторов выхлопных газов автомобилей, так и для синтеза в химической и нефтехимической промышленности. Отработанные катализаторы являются богатым антропогенным источником этих химических элементов. В работе представлены обзор используемых в настоящее время пиро- и гидрометаллургических методов извлечения металлов платиновой группы, а также инновационные решения для переработки использованных автомобильных катализаторов. Простота обработки отработанных катализаторов и их относительной простой химический состав (по сравнению с другими, например, электронными отходами) указывают на возможность применения метода биовыщелачивания для извлечения металлов платиновой группы непосредственно из отходов. Рассмотрены новые направления в биогидрометаллургии, основанные на возможности использования потенциала цианогенных микроорганизмов для извлечения благородных металлов. Подчеркивается роль внешних факторов при обосновании выбора технологии, позволяющего получать максимальное количество биомассы, продуцирующей искомый метаболит. Биовыщелачивание том оказывает менее негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с другими методами, как в части образования выбросов и сбросов, так и по степени утилизации отходов. Делается вывод о том, что ресурсно- и экологически эффективные методы при обработке отходов, содержащих рентабельно извлекаемые вторичные ресурсы, должны рассматриваться как приоритетно соответствующие принципам наилучших доступных технологий.

Ключевые слова: наилучшие доступные технологии; металлы платиновой группы; утилизация; пирометаллургия; гидрометаллургия; биовыщелачивание; цианогенные микроорганизмы

Введение

Металлы платиновой группы, далее именуемые МПГ (платина Pt, палладий Pd, родий Rh и иридий Ir, рутений Ru и осмий Os), широко применяются в промышленности, в большей степени как хорошие проводники тока в радиоэлектронных устройствах (используются в производстве интегральных микросхем, многослойных конденсаторов, печатных плат, жидкокристаллических дисплеев), а также как катализаторы многих химических реакций в автомобилестроении, химической и нефтехимической промышленности [1].

Данные о спросе и мировом индустриальном использовании платины, родия и палладия в 2022–2024 годах представлены в таблице 1.

Катализаторы используются в большинстве химических процессов, как основного синтеза (производство серной и азотной кислоты, аммиака, метанола и ароматических соединений), так и нефтехимии в реакциях жидкостного каталитического крекинга (FCC), каталитического крекинга остатков нефти (RFCC), гидродесульфуризации (HDS) и иной гидроочистки, для снижения выбросов путем удаления оксидов азота NO, углерода CO и углеводородов в составе отходящих газов [2].

К примеру, в производстве азотной кислоты HNO_3 применяют современные каталитические системы для окисления аммиака, в том числе с использованием нанесённых сетчатых катализаторов с пониженным содержанием драгоценных металлов. Безвозвратные потери в агрегатах АК-72 составляют при использовании:

- катализатора платинового — 0,062–0,125 г/т моногидрата HNO_3;
- катализатора палладированного АПК-2 — 0,026–0,05 г/т моногидрата HNO_3.[1]

[1] ИТС 2-2022 Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1848&etkstructure_id=1872 (дата обращения 22.07.2025).

Таблица 1

Использование МПГ в мировой экономике в 2022–2024 годах, т

Отрасль промышленности	Платина Pt		
	2022	2023	2024
Добыча	163,1	180,7	178,0
Общая потребность, в т. ч.	207,8	242,3	244,8
— автомобилестроение	85,4	104,3	106,0
— химическая промышленность	21,7	20,2	19,6
Рециклинг	47,4	41,9	42,6
	Палладий Pd		
	2022	2023	2024
Добыча	185,5	205,2	206,9
Общая потребность, в т. ч.	308,3	322,5	314,0
— автомобилестроение	261,7	272,7	258,6
— химическая промышленность	18,8	16,8	17,0
Рециклинг	101,3	89,1	91,5
	Родий Rh		
	2022	2023	2024
Добыча	21,5	21,8	22,2
Общее потребление, в т. ч.	31.3	33.0	32.5
— автомобилестроение	29,3	30,4	28,9
— химическая промышленность	2,0	2,6	3,0
Рециклинг	10,5	9,0	9,1

Источник[2]

К наилучшим доступным технологиям (далее — НДТ) химических производств отнесены снижение разовых вложений в МПГ и сокращение безвозвратных потерь МПГ.

При производстве пропилена C_3H_6 методом дегидрирования пропана C_3H_8 используется платиновый катализатор, расход которого составляет 0,49 кг/т[3] пропилена, а при производстве капролактама используют катализатор на основе оксида алюминия Al_2O_3, содержащий платину и рений, расход которого составляет до 0,037 кг/т капролактама.

К НДТ относят увеличение полезного времени работы катализатора, для чего применяются следующие методов (вместе или по отдельности): обоснование и выбор оптимального катализатора; предотвращение дезактивации катализатора; контроль рабочих характеристик катализатора.

При переработке нефти изомеризацию фракции легких углеводородов проводят на алюмоплатиновых катализаторах. [4] Для используемых в этом процессе хлорированных (фторированных) алюмоплатиновых катализаторов характерно снижение активности по мере эксплуатации и относительно короткий срок службы (3–5 лет).

Синтез полипропилена проходит на катализаторе, который представляет собой оксид платины на носителе — оксиде алюминия, с расходом 0,013–0,022 кг/т полипропилена.[5]

[2] PGM market reports (англ.) https://matthey.com/products-and-markets/pgms-and-circularity/pgm-markets/pgm-market-reports (дата обращения 22.07.2025).

[3] ИТС 18-2023 Производство основных органических химических веществ. https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=2089&etkstructure_id=1872 (дата обращения 22.07.2025).

[4] ИТС 30-2021 Переработка нефти. https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1649&etkstructure_id=1872 (дата обращения 22.07.2025).

[5] ИТС 32-2022 Производство полимеров, в том числе биоразлагаемых. https://burondt.ru/NDT/NDTDocsDetail.php?UrlId=1859&etkstructure_id=1926 (дата обращения 22.07.2025).

Сектор транспортного машиностроения, где производятся каталитические нейтрализаторы для автомобилей, по-прежнему является лидером по спросу на МПГ (особенно Pt, Pd и Rh). Этот спрос можно объяснить растущим глобальным вниманием к экологическим нормам и переходом к более чистым транспортным технологиям.

Информация о количестве отходов катализаторов, содержащих МПГ, и образовавшихся в Российской Федерации за 2024 год, представлена в таблице 2.

Таблица 2

Образование отходов катализаторов, содержащих МПГ, за 2024 год

Код ФККО	Вид	Масса, т
4 41 001 02 49 4	катализатор на основе оксида алюминия с содержанием платины до 0,3 %, рения до 0,3 % отработанный	105,779
4 41 001 03 49 3	катализатор на основе оксида алюминия, содержащий платину, отработанный	11,459
4 41 001 04 49 3	катализатор на основе оксида алюминия активного, содержащий палладий, отработанный	3,708

Источник[6]

Обычно катализаторы представляют собой керамический или металлический носитель, на который нанесены МПГ, причем для повышения каталитической активности должна быть обеспечена значительная площадь поверхности, что обеспечивает оптимальный контакт с газовой фазой [3].

Отработанные катализаторы признаются вторичными ресурсами для извлечения значительного количества драгоценных металлов (Pt, Pd, Rh). Возможность извлечения МПГ имеет первостепенное значение с точки зрения сохранения природных ресурсов и одновременного сокращения количества отходов, размещаемых на полигонах, способствует переходу к экономике замкнутого цикла.

Основная часть

Классические методы переработки отработанных катализаторов

В научной литературе имеется значительное количество публикаций, посвященных методам переработки отработанных автомобильных катализаторов, описывающих как пирометаллургические, так и гидрометаллургические процессы, а также гибридные технологии, предназначенные для разделения драгоценных металлов [4–7]. Некоторые из этих методов применяются в промышленности уже много лет, в то время как другие остаются ограничены рамками лабораторных установок (табл. 3).

Для извлечения драгоценных металлов из отработанных катализаторов используется металлургия [8]. Однако ни одно технологическое решение не является универсальным для всех типов отработанных катализаторов. Разные способы экстракции имеют свои недостатки: пирометаллургические методы требуют специального оборудования и высоких температур, что делает их не только дорогими, но и энергоемкими; использование гидрометаллургических методов требует обезвреживания образующихся токсичных растворов.

Дальнейшее разделение металлов, полученных в результате пирометаллургической или первичной гидрометаллургической обработки, приводит к дополнительной стадии сложных, а значит дорогостоящих гидрометаллургических операций, таких как ионный обмен или жидкостная экстракция (табл. 3).

[6] Росприроднадзор https://rpn.gov.ru/open-service/analytic-data/statistic-reports/production-consumption-waste/ (дата обращения 22.07.2025).

Таблица 3

Гидрометаллургические и пирометаллургические процессы, используемые для извлечения МПГ из отработанных катализаторов

Гидрометаллургические процессы	Пирометаллургические процессы
Кислотное растворение в царской водке с образованием комплексов МПГ (например, $PtCl_{2-6}$, $PdCl_{2-4}$ и $RhCl_{3-6}$). Затем соли, содержащие МПГ, селективно осаждают из раствора. Последний этап — очистка Pt, Pd, Rh.	Плавка катализаторов при высокой температуре с добавками Cu, Fe, Pb. Шлак, полученный из металлической фазы, отделяется из-за разницы в плотностях. Полученный сплав подвергается гидрометаллургической обработке, после чего проходит разделение отдельных МПГ.
Цианидная экстракция — под давлением и при температуре около 120–180°C. Метод позволяет извлечь 96 % Pt, 97,8 % Pd и 92 % Rh из отработанных автомобильных катализаторов.	Плавка катализаторов в электропечи с добавками оксида меди, кокса, известняка, оксида железа и кремния. После плавки получают сплав меди с платиной и шлак. Сплав перерабатывают в окислительной печи, где Cu окисляется, а Pt (которая не реагирует с кислородом) отделяется. Полученный продукт содержит 75 % Pt и поступает на рафинирование.
Хлорирование — процесс селективного преобразования МПГ в летучие хлоридные соединения в условиях высокой температуры (> 1 200°C) с последующей конденсацией в более холодной зоне.	
Ионная либо жидкостная экстракция.	

Источник [9]

Как видно из таблицы 3, технология вторичной переработки катализаторов состоит из сложных технологических стадий, на которых решаются следующие задачи:

- подготовка и гомогенизация носителя;
- концентрирование МПГ пиро- или гидрометаллургическими методами;
- рафинирование (аффинаж) концентрата МПГ — растворение и удаление примесей, разделение между МПГ, очистка МПГ с получением губчатого металла или порошка.

Выполнение последней обеспечивает высокий уровень чистоты металла, однако аффинаж остается дорогим и сложным.

В пирометаллургических методах измельченные катализаторы плавят с добавлением другого металла, с которым МПГ образуют сплавы, в то время как остатки керамического носителя МПГ собираются в шлаке. Затем сплав отделяется от шлака и подвергается рафинированию и разделению драгоценных металлов.

В гидрометаллургических процессах МПГ, присутствующие в отработанных катализаторах, растворяют в агрессивных водных растворах, содержащих сильные окислители: хлор Cl_2, перекись водорода H_2O_2, хлораты, броматы, нитраты, хлорную кислоту $HClO_4$, и т. н. «царскую водку» (смесь концентрированных азотной HNO_3 (65–68 % масс.) и соляной HCl (32–35 % масс.) кислот). Следует отметить, что гидрометаллургические процессы могут приводить к образованию значительных объёмов жидких отходов, которые могут представлять существенную опасность для окружающей среды.

Использование микроорганизмов для извлечения драгоценных металлов из отходов

В настоящее время ведутся активные работы по принятию научным и бизнес-сообществом инновационных стратегий в области обработки отходов, с акцентом на рециклинг

МПГ при сохранении строгих экологических стандартов. Особое внимание уделяется разработкам в области биогидрометаллургии, использующих потенциал цианогенных микроорганизмов для биовыщелачивания МПГ из отходов.

Исследования возможности использования микроорганизмов для извлечения металлов из природного или вторичного сырья относятся к середине 1950-х годов. Изначально такие методы применялись для промышленного извлечения золота из мышьяксодержащих пиритных руд, выщелачивания меди из низкосортного сырья, обработки оксидных урановых руд и восстановления соединений серы до элементарной серы.

Биовыщелачивание основано на использовании природной способности микроорганизмов переводить металлы из твердой формы (твердой матрицы) в растворенную. Помимо применения ацидофильных микроорганизмов, играющих основную роль в биогидрометаллургических методах и облегчающих процесс растворения металлов в кислой среде, также описан процесс биологического выделения металлов в щелочной среде с использованием цианогенных бактерий. В присутствии цианида большинство металлов (кроме лантаноидов и актиноидов) образуют цианидные комплексы, которые обладают хорошей растворимостью в воде и высокой химической стабильностью. В течение многих лет цианиды используются в коммерческих целях для и извлечения драгоценных металлов из руд, концентратов или вторичного сырья.

В биотехнологии используются микроорганизмы, способные образовывать синильную кислоту (HCN), например, бактерии *Chromobacterium violaceum*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aeruginosa*, или грибы — *Marasmius oreades, Clitocybe Sp., Polysporus Sp*. [10]. И хотя метаболизм с образованием цианидов известен уже много лет, знания о его механизме у различных видов микроорганизмов и потенциальной возможности использования в технологических процессах до сих пор являются неполными.

Цианид образуется как вторичный метаболит. Предполагается, что его образование позволяет микроорганизму получить преимущество в окружающей среде, подавляя активность конкурирующих микроорганизмов. Обычно цианид образуется во время роста, но только в течение короткого периода. Сдвиг химического равновесия в сторону образования цианида достигается за счет внесения подходящей питательной среды, например, аминокислоты глицина, который образуется на предшествующей стадии биологического синтеза.

Эффективность образования цианидов металлов в присутствии HCN различается для разных видов микроорганизмов. Биовыщелачивание — сложный процесс, определяемый многими факторами. Параметрами, влияющими на кинетику процесса и метаболическую активность микроорганизмов, являются, в частности: тип питательной среды, концентрация растворенного кислорода, кислотность pH, температура, плотность обрабатываемой пульпы, качественный и количественный состав отходов, гранулометрические характеристики материала, количество микроорганизмов и время химического взаимодействия.

Среди бактерий, продуцирующих HCN, *C. violaceum* оказалась наиболее эффективной для биорастворения золота из различных материалов благодаря своей метаболической активности образования цианидов [11]. Считается, что процесс образования комплексных соединений металлов с использованием цианогенных бактерий, таких как *C. violaceum*, происходит по косвенному механизму в два этапа. На первом этапе глицин превращается в HCN (выщелачивающее вещество) соответствующими ферментами под действием метаболизма фермента HCN-синтазы, на втором этапе в результате реакции цианид-ионов с золотомедным субстратом образуются водорастворимые комплексы [12].

Ранние исследования по применению цианогенных микроорганизмов для извлечения драгоценных металлов из отходов были сосредоточены в первую очередь на биовыщелачивании золота.

Широкие исследования биовыщелачивания МПГ из отходов пока находятся на начальной стадии с тенденцией их увеличения в последние годы как отдельного направления, так и в рамках извлечения основных металлов, например, биогидрометаллургия применяется для выделения металлов из золошлаков и пыли [13; 14], осадков сточных вод [15], литиевых батарей [16], отработанных катализаторов [17; 18]. Простота предварительной обработки отхода (измельчение) и простой состав (по сравнению с электронным ломом) указывают на применимость биовыщелачивания для извлечения МПГ непосредственно из отходов (табл. 4).

Таблица 4

МПГ, выщелачиваемые из отходов с помощью цианогенных бактерий

Род микроорганизмов	Отходы	Металл и его извлекаемая доля, мас. %	Источник
C. violaceum	Электронный лом в целом	Au — 14,9	[19]
C. violaceum, *P. fluorescens,* *P. plecoglossicida*	Электронный лом в целом, отработанные катализаторы	Ag — 5 Au — 65,5 Pt — 0,2	[10]
P. fluorescens, *B. megaterium*	Отработанные катализаторы	Pt — 58 Pd — 65 Rh — 97	[20]
C. violaceum	Отработанные катализаторы	Pt — 76 Pd — 81 Rh — 100	[21]
C. violaceum	Печатные платы	Au — 10,8 Cu — 11,4	[22]
C. violaceum	Печатные платы	Au — 11 Cu — 11,4	[11]

Указанные микроорганизмы обеспечивают миграцию драгоценных металлов из твердого состояния в раствор в виде цианидных комплексов. Возможность мобилизации металлов в виде цианидных комплексов из твердых материалов (что является одним из видов микробной мобилизации металлов) была названа «биоцианированием» [12; 19].

Оценка эффективности

Простота предварительной обработки исходных отходов (измельчение) и относительной простой состав (по сравнению с другими отходами, например, электронными отходами) указывают на возможность применения метода биовыщелачивания для извлечения МПГ непосредственно из отходов. Разработка технологии извлечения МПГ из полиметаллических материалов с использованием цианогенных бактерий нуждается в дополнительных исследованиях. Для обоснованного выбора варианта технологии, позволяющего получать максимальное количество биомассы, продуцирующей искомый метаболит, необходимо изучить влияние внешних факторов (pH, температура, размножение культуры бактерий) и различных типов стандартных сред на скорость культивирования бактерий.

Ряд параметров, влияющих на динамику экстракции МПГ из твердой фазы с образованием цианидрастворимых комплексов (в присутствии бактерий), требуют проверки, например, концентрация микроорганизмов, содержание растворенного кислорода, pH, плотность пульпы, наличие примесей.

Необходимы дальнейшие исследования цианогенных микроорганизмов, в частности, в области:

- оптимизации биологического образования HCN, а также присутствия и стабильности цианидных комплексов МПГ и связанных с ними металлов;

- анализа физико-химических факторов, влияющих на кинетику растворения драгоценных металлов, и пассивирующих биологическое выщелачивание явлений;
- сравнения эффективности специфических штаммов бактерий в биологических методах извлечения драгоценных металлов.

Полученная информация позволит оценить эффективность процесса биологического выщелачивания МПГ из вторичного сырья с участием цианогенных бактерий и определить области и способы применения технологии.

Заключение

Помимо широко используемых для переработки МПГ-содержащих отходов пиро- и гидрометаллургических методов, начинают развиваться иные методы извлечения ценных компонентов.

Биогидрометаллургия направлена на использование потенциала цианогенных микроорганизмов при биологическом выщелачивании драгоценных металлов, при этом оказывает менее негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с другими методами, как в части образования выбросов и сбросов, так и по степени утилизации отходов.

Ресурсно- и экологически эффективные методы при внедрении новых технологий утилизации промышленных отходов должны рассматриваться как приоритетно соответствующие принципам НДТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grilli M.L., Slobozeanu A.E., Larosa C., Paneva D., Yakoumis I., Cherkezova-Zheleva Z. Platinum Group Metals: Green Recovery from Spent Auto-Catalysts and Reuse in New Catalysts — A review // Crystals, 2023, No 13(4), P. 550. https://doi.org/10.3390/cryst13040550.
2. Xu B., Chen Y., Zhou Y., Zhang B., Liu G., Li Q., Yang Y., Jiang T. A Review of Recovery of Palladium from the Spent Automobile Catalysts // Metals, 2022. No 12, P 533. https://doi.org/10.3390/met12040533.
3. Murray A.J., Zhu J., Wood J., Macaskie L.E. A novel biorefinery: Biorecovery of precious metals from spent automotive catalyst leachates into new catalysts effective in metal reduction and in the hydrogenation of 2-pentyne // Minerals Engineering, 2017. Vol. 113, P. 102–108, https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.08.011.
4. Ding Y., Zheng H., Li J., Zhang S., Liu B., Ekberg C., Jian Z. Recovery of Platinum from Spent Petroleum Catalysts: Optimization Using Response Surface Methodology // Metals, 2019. Vol. 9(3), P. 354. https://doi.org/10.3390/met9030354.
5. Yakoumis I., Panou M., Moschovi A.M., Panias D. Recovery of platinum group metals from spent automotive catalysts: A review // Cleaner Engineering and Technology, 2021.Vol. 3, P. 100112, https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100112.
6. Méndez A., Nogueira C.A., Paiva A.P. Recovery of Platinum from a Spent Automotive Catalyst through Chloride Leaching and Solvent Extraction // Recycling, 2021, Vol. 6(2). P. 27. https://doi.org/10.3390/recycling6020027.

7. Dong H., Zhang C., Zhao J., Wu Y., Dong Z., Li Q. Pt and Al Recovery from a Spent Pt/Al_2O_3 Catalyst via an Integrated Soda Roasting-Alkaline Leaching-Carbonization Process // Metals. 2023. Is. 13(12), P. 1944. https://doi.org/10.3390/met13121944.

8. Trinh H.B., Lee J.Ch. Suh Y.J., Lee J.: A review on the recycling processes of spent auto-catalysts: Towards the development of sustainable metallurgy // Waste Management, 2020. Vol. 114, P. 148–165 https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.06.030.

9. Willner J., Fornalczyk A., Gajda B., Sobianowska-Turek A. A new approach to the problems of recycling spent catalytic converters // Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2024. No 1, P. 40–46.

10. Santhiya D., Ting Y.P. Bioleaching of spent refinery processing catalyst using Aspergillus niger with high-yield oxalic acid // J. Biotechnol, 2004. No 116(2), P. 171. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.10.011.

11. Tran Ch.D., Lee J.-Ch., Pandey B.D., Jeong J., Yoo K., Huynh T.H. Bacterial cyanide generation in the presence of metal ions (Na^+, Mg^{2+}, Fe^{2+}, Pb^{2+}) and gold bioleaching from waste PCBs // J. Chem. Eng. Japan, 2011. No 44, P. 692. https://doi.org/10.1252/jcej.10we232.

12. Brandl, H., Faramarzi, M.A., Applying microbe-metal-interactions for the biotechnological treatment of mineral waste // China Particuol., 2006, P. 93–97. https://doi.org/10.1016/S1672-2515(07)60244-9.

13. Bosshard P., Bachofen R., Brandl H., Metal leaching of fly ash from municipal waste incineration by Aspergillus niger // Environ. Sci. Technol., 1996. No 30(10), P. 3066. https://doi.org/10.1021/es960151v.

14. Brombacher Ch., Bachofen R., Brandl H. Development of a laboratory-scale leaching plant for metal extraction from fly ash by Thiobacillus strains // Appl. Environ. Microbiol., 1998. No 64(4), P. 1237–1241.

15. Pathak A., Dastidar M.G., Sreekrishnan T.R., Bioleaching of heavy metals from sewage sludge by indigenous iron-oxidizing microorganisms using ammonium ferrous sulfate and ferrous sulphate as energy sources: A comparative study // J. Hazard. Mater., 2009. No 171(1-3), P. 273. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.139.

16. Debaraj M., Dong J.K., Ralph D.E., Jong-Gwan Ahn, Young-Ha Rhee. Bioleaching of metals from spent lithium-ion secondary batteries using Acidithiobacillus ferrooxidans // Waste Manage., 2008. No 28(2), P. 333 https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.010.

17. Willner J., Fornalczyk A. Extraction of metals from electronic waste by bacterial leaching // Environ. Prot. Eng., 2013. No 39(1), P. 197–208 https://doi.org/10.5277/EPE130115.

18. Faramarzi M.A., Stagars M., Pensini E., Krebs W., Brandl H. Metal solubilization from metal-containing solid materials by cyanogenic Chromobacterium violaceum // J. Biotechnol., 2004. No 113, P. 321 https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.03.031.

19. Brandl H, Lehmann S, Faramarzi Ma, Martinelli D. Biomobilization of silver, gold, and platinum from solid waste materials by HCN-forming microorganisms // Hydrometallurgy, 2008. No 94, P. 14. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.05.016.

20. Salman K., Yen-Peng T., Bioleaching of platinum, palladium, and rhodium from spent automotive catalyst using bacterial cyanogenesis // Bioresource Technology Reports, 2022. No 18, Art. 101069. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101069.

21. Salman K., Yen-Peng T. A novel sequential pretreatment coupled with statistically optimized bioleaching for highly effective biorecovery of platinum group metals from spent catalyst waste // Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023. No 11(5), Art. 110987. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110987.

22. Tran Ch. D., Lee J-Ch, Pandey B.D., Yoo K., Jeong J. Bioleaching of gold and copper from waste mobile phone PCBs by using a cyanogenic bacterium // Miner. Eng., 2011. No 24, P. 1219. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.009.

Tikhonova Irina Olegovna
Research Institute «Environmental Industrial Policy Center», Moscow, Russia
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia
E-mail: iritimay@gmail.com
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7156-1660
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=51933
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55346990200

Sanzharovskiy Alexander Yuryevich
Research Institute «Environmental Industrial Policy Center», Moscow, Russia
E-mail: a.sanzharovskiy@eipc.center
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0245-2003
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=604230
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57211296613

Mikhrabov Aleksandr Ilyich
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia
ORCID: https://orcid.org/0009-0003-0122-7098

Petrov Andrey Sergeevich
Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia
ORCID: https://orcid.org/0009-0005-6523-9762

Recycling of used catalysts according to the Best Available Techniques

Abstract. In the last decade, one of the main uses of platinum group metals has been catalysts — both as car exhaust gas converters and for synthesis in the chemical and petrochemical industries. Spent catalysts are a rich anthropogenic source of these chemical elements. The paper presents an overview of current pyro- and hydrometallurgical methods for platinum group metal recovery, as well as innovative solutions for recycling used automotive catalysts. The ease of handling of spent catalysts and their relatively simple chemical composition (compared to others such as electronic waste) point to the possibility of applying bioscience to extract platinum group metals directly from waste. New directions in bio-hydrometallurgy, based on possibilities of utilization of potential of cyanogenic micro-organisms for extraction of precious metals are considered. The role of external factors is emphasized in justifying the choice of a technology that allows to obtain the maximum amount of biomass producing the required metabolite. Bio-leaching has a lower environmental impact than other methods, both in terms of emissions and discharges and the degree of waste disposal. It is concluded that resource- and environmentally sound practices in the treatment of wastes containing economically recoverable secondary resources should be prioritized according to Best Available Techniques.

Keywords: Best Available Techniques; platinum metals; recycling; pyrometallurgy; hydrometallurgy; bioleaching; cyanogenic micro-organisms