

Извлечение, очистка и концентрирование палладия из новых сырьевых источников на основе отработавшего ядерного топлива

А. М. Сафиулина, к. х. н.^{1,2}, А. А. Семенов, к. х. н.¹, А. В. Лизунов, к. т. н.¹,
Н. Е. Борисова, к. х. н.³, Т. В. Макарова¹, Г. А. Шарадзе¹

УДК 542.61

Показана актуальность расширения сырьевой базы платиновых металлов за счет переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Проведен обзор перспективных методов извлечения, очистки и концентрирования платиноидов. Обоснованы необходимость поиска новых экстракционных реагентов и усовершенствование ранее предложенных технологических схем получения остро-дефицитного палладия и других благородных металлов из ОЯТ.

Ключевые слова: благородные металлы, платиновые металлы, платиноиды, палладий, родий, рутений, платина, осмий, иридий, сырьевые источники, отработанное ядерное топливо, ОЯТ, экстракция, экстрагенты

Благородные металлы (БМ), к которым, помимо золота и серебра, относят шесть металлов платиновой группы, с каждым годом находят все более широкие сферы применения и поэтому требуется увеличение объемов их добычи. Производство благородных металлов является одной из важнейших отраслей металлургии. Возрастающий спрос на платиновые металлы вступает в острое противоречие с их дефицитностью и вынуждает искать новые сырьевые источники.

Уровень цен на золото, платину и палладий значительно влияет на объемы собственных продаж и состояние смежных товарных и фондовых рынков [1, 2]. Долгосрочная динамика цен на благородные металлы зависит в основном от внешних факторов: темпов мировой инфляции, политических решений (эмбарго, политическая изоляция

стран – продуцентов драгоценных металлов), финансовых и энергетических кризисов, появлений новых областей использования металлов. Рынки предложения благородных металлов не в состоянии быстро реагировать на изменение спроса. Введение новых мощностей по добыче затягивается на годы, а консервация замыкающих производств зачастую откладывается на долгое время из-за кредитных обязательств по обслуживанию дорогостоящего горного производства. Вследствие этого рынки драгоценных металлов являются неэластичными, а бизнес-циклы всплесков и падений цен на них очень продолжительны. При этом на рынках драгоценных металлов ежегодно происходит реализация товарных продуктов на сумму от 48 до 65 млрд долл. США и уровень цен из года в год растет [3–5].

Родий, рутений, иридий и осмий относятся к так называемым внебиржевым редким металлам. Они являются попутными компонентами при добыче платины и палладия, поэтому объемы их производства зависят от динамики рынка основных металлов. В результате внешних факторов, в частности изменения структуры потребления и появления новых областей применения, цены на эти металлы

¹ АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара», 123060, г. Москва, ул. Рогова, 5а.

² amsafiulina@bochvar.ru.

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1.

значительно меняются. Так, рост цен на родий, самый дорогой из платиноидов, связан с повышением спроса на него в производстве автомобильных каталитических конверторов. Востребованность рутения обусловлена тем, что он заменяет более дорогой родий в автокатализаторах, а также используется при производстве жестких компьютерных дисков. Иридий, мировое потребление которого составляет 2–2,5 т в год, в основном применяется в качестве катализатора при производстве уксусной кислоты и по своей стоимости стоит на втором месте после родия. В связи с очень малым спросом и объемом продаж осмия на мировом рынке (не более 0,5 т в год) цена на него почти на порядок ниже цены иридия, а его собственный рынок практически отсутствует [2].

Мировой спрос на платину и палладий постоянно растет и за последние годы их производство почти удвоилось [6, 7]. Сегодня из-за острой дефицитности палладия его стоимость превышает золото. Интерес к палладию связан с увеличением технической потребности в нем, сейчас это один из финансовых активов, быстрее всего растущих в цене. Ограниченные природные запасы, низкое содержание в рудах платиноидов принуждают к поиску новых путей их получения, таких как переработка различных видов наиболее богатого вторичного сырья.

Важным источником драгоценных металлов платиновой группы, который имеет большое коммерческое значение, является отработанное ядерное топливо (ОЯТ) [8, 9]. Если в топливе реакторов типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) накапливается до килограмма палладия на одну тонну ОЯТ, то его содержание в ОЯТ реакторов на быстрых нейтронах может достигать 5 кг на тонну [10, 11]. Извлечение палладия из ОЯТ на сегодня является наиболее перспективным вариантом освоения этого типа сырья платиновых металлов. К сожалению, в состав палладия, выделяемого из ОЯТ, входит от 14 до 16% бета-радиоактивного 107-го изотопа с периодом полураспада $6,5 \cdot 10^6$ лет [12]. После удаления изотопа ^{107}Pd из ОЯТ, весь остальной палладий может быть использован так же, как и добываемый из природных сырьевых источников. Из-за отсутствия летучих соединений у палладия единственным технически реализуемым способом разделения его изотопов на сегодня является электромагнитная сепарация [12]. При этом слаборадиоактивный ^{107}Pd может применяться как основа катализатора в радиохимических производствах атомной отрасли.

Для первичного выделения палладия могут быть использованы методы электрохимического

восстановления на катоде, причем в непрерывном режиме на компактной аппаратуре. При использовании катода с высокоразвитой поверхностью из углеродных нетканых материалов возможно большое накопление палладия – до 8–10 г металла на 1 г катода, при этом сохраняется высокая полнота извлечения палладия из раствора (до 99,9%). При однократном электрохимическом выделении палладия можно достичь коэффициентов очистки до 105 от большинства продуктов деления [4, 5], которые не восстанавливаются на катоде.

В отличие от природных руд, ОЯТ является возобновляемым ресурсом, при переработке которого образуются дополнительные объемы технически важных металлов. Действительно, при использовании рациональной технологии переработки ОЯТ удалось бы выделить ценные элементы, однако таких технологий ни в России, ни за рубежом сегодня не существует. Поэтому решение проблемы переработки ОЯТ и обращения с техногенными радиоактивными отходами с целью выделения из них драгоценных и других редких металлов является актуальной и перспективной научной и инженерной задачей.

Наиболее распространенный технологический прием в схеме переработки ОЯТ – экстракция, которая позволяет выделить из технологических растворов и сконцентрировать в определенной форме ионы благородных металлов [8]. Экстрагенты для этой цели должны отличаться высокой селективностью, а также стойкостью к гидролизу и радиолузу в жестких технологических условиях для возможности их рециклинга и многократного использования.

Палладий в растворах различных кислот образует анионные комплексы, наиболее сильные – с лигандами, имеющими «донорные» атомы N и S [13]. Подобное поведение свойственно всему ряду благородных металлов. Исходя из этого предположения, был разработан ряд экстрагентов. Ранее для выделения БМ из соляно- и азотнокислых растворов успешно использовали серосодержащие органические экстрагенты (сульфоксиды) [14–18], азотсодержащие экстрагенты (алкиламины [20, 25], оксимы [18, 19]), также азот- и серосодержащие органические лиганды (тиобензанилиды и производные 2-тиопиколинамида [21], производные тиомочевина [22]).

На основе растворов сульфидов нефти в триэтилбензоле авторы [16, 17] разработали способ селективного извлечения и концентрирования золота и палладия из сложных хлоридных и нитратно-нитритных водных растворов. Предложенный метод заключается в двух экстракционных циклах,

направленных на селективное концентрирование палладия из нитратно-нитритного раствора и его глубокую очистку в хлоридной системе.

Экстракция палладия алкиламинами и четвертичными аммониевыми основаниями (ЧАО) эффективна при низком содержании азотной кислоты в водных растворах, также в обоих случаях с ростом концентрации HNO_3 экстракционная способность алкиламинов и ЧАО по отношению к палладию уменьшается. Поскольку в промышленных масштабах используют ароматические разбавители, такие как толуол или бензол, то применение этих лигандов для выделения благородных металлов из растворов переработки ОЯТ затруднительно из-за влияния радиоллиза на разбавитель [20, 25].

Опубликовано несколько работ по извлечению палладия из азотнокислых растворов с применением оксимов [18, 19]. Эти лиганды известны своим хелатирующим взаимодействием с ионом металла при экстракции. Коэффициент распределения палладия равен двум при экстракции раствором оксима альфа-бензоина в ароматических разбавителях из 2 моль/л азотнокислого раствора. Низкая селективность по отношению к палладию, а также использование ароматических разбавителей серьезно затрудняют применение этих соединений для экстракции БМ из растворов ПУРЭКС-процесса (технология извлечения ценных компонентов из отработавшего ядерного топлива).

В литературе имеются работы по извлечению палладия из рафинатов ПУРЭКС-процесса [23–25]. Для извлечения БМ использовали фосфорилсодержащие лиганды, как монодентатные (трибутилфосфат [26–28], триоктилфосфиноксид [29]), так и бидентатные (карбомоилметилфосфиноксид [30]).

Для извлечения палладия используют 100% трибутилфосфат (ТБФ), однако эффективная экстракция в этом случае возможна только в области от 0,1 до 1,0 моль/л HNO_3 с коэффициентами распределения 0,6–1,0. С ростом концентрации азотной кислоты в водной фазе экстракционная эффективность резко снижается, так что при 4 моль/л азотной кислоты палладий не извлекается. При высоких концентрациях ТБФ наряду с палладием наблюдается совместная экстракция других ионов металлов. Кроме того, гидродинамические характеристики 100% ТБФ накладывают ограничения на использование обычных установок для жидкостной экстракции [26–28].

Экстракционная способность триалкилфосфиноксида (ФОР) по отношению к различным металлам значительно выше по сравнению с ТБФ [36]. Поэтому следовало бы ожидать более эффективного

извлечения палладия из рафинатов ПУРЭКС-процесса. Отметим, что эффективность ФОР в бензоле при извлечении нитрата Pd(II) из растворов от 0,2 до 4,0 моль/л HNO_3 значительно выше по сравнению с ТБФ. Однако экстракция палладия сильно подавляется с ростом концентрации азотной кислоты и, следовательно, экстрагенты группы ФОР могут применяться только в области низких концентраций HNO_3 [29].

Экстракционная способность карбомоилметилфосфиноксида (КМФО) в полярном растворителе N-нитробензотрифторид (F3) по отношению к палладию в азотнокислых растворах зависит от кислотности. В условиях низкой концентрации HNO_3 коэффициенты распределения палладия около двух, а с дальнейшим ростом кислотности в водном растворе эффективность экстракции палладия снижается. Кроме того, необходимо отметить отсутствие селективности при экстракционном выделении палладия из растворов, имитирующих рафинаты ПУРЭКС-процесса [30].

Наряду с нейтральными фосфорилсодержащими моно- и бидентатными экстрагентами для извлечения металлов платиновой группы из азотнокислых растворов имитаторов ОЯТ использовали производные диамидов (малонамиды [31], дигликольамиды [32], диоксодиамиды [33]). Согласно результатам, приведенным в работах [25–27], можно сделать вывод, что диамиды различного строения обладают невысокой экстракционной способностью по отношению группе платиновых элементов в азотнокислых средах. В случае применения соединений этого класса требуются дополнительные стадии очистки палладия от примесей раствора переработки ОЯТ.

Наряду с описанными выше лигандами в изучении экстракции металлов платиновой группы активно использовали циклические и ациклические эфиры [35]. В качестве яркого представителя полиэфирных ациклических лигандов выступают поданды. Поданды – это цепочечные реагенты с некоторым количеством донорных атомов, расположенных вдоль цепи с интервалами. Для экстракции благородных металлов использовали сульфидный поданд, содержащий шесть донорных атомов серы [36, 37]. Эффективность извлечения палладия растворами поданда в 1,2-дихлорэтаноле или метилизобутилкетоне [36, 37] практически не зависит от концентрации HCl в интервале 0,1–4 моль/л, от концентрации HClO_4 в диапазоне 0,1–1 моль/л и в 0,25–3,5 моль/л HNO_3 . При этом степень извлечения ионов Pd(II) из азотнокислых сред значительно ниже, чем из растворов HCl и HClO_4 .

К числу наиболее распространенных подандов относятся фосфорилсодержащие [38–39]. Эффективность экстракции платиновых металлов и золота фосфорилсодержащими подандами определяется возможностью возникновения псевдомакроцикла с ионом гидроксония, а также его достаточной гидрофобностью как условием перехода в органическую фазу образующегося по гидратно-сольватному механизму ионного ассоциата. На степень извлечения палладия, платины и золота существенное влияние оказывает строение экстрагента. Так, извлечение палладия из 3,5 моль/л HCl и платины из 4 моль/л HCl подандами, имеющими в своем составе пять донорных центров (пентадентатные фосфорилсодержащие поданды), максимально. Поданды являются эффективными реагентами для экстракции ионов платиновых металлов, однако они не проявляют высокой избирательности по отношению к определенным платиноидам, поэтому проблему селективного извлечения и разделения близких по свойствам платиновых металлов данные реагенты решить не могут.

Краун-эфиры относятся к числу наиболее доступных макроциклических лигандов. Исследования по экстракции Pd(II), Pt(IV) Ir(IV) показали [41], что коэффициенты распределения платиновых металлов в основном малы. Дибензо-18-краун-6 (D18K6) использовали для извлечения следовых количеств Pd(II) из растворов $H_2[PtCl_6]$ и $RhCl_3$ (из солянокислых и тиоцианатных сред) [41]. При контакте палладий-содержащих галогенидных растворов с раствором D18K6 в хлороформе образуется мелко-дисперсная третья фаза, которая при добавлении в экстракционную систему ацетонитрила, ацетофенона или других полярных растворителей легко растворяется в органической фазе.

Каликсарены – одни из ярких представителей циклических полиэфирных соединений. В качестве эффективных экстрагентов палладия из азотнокислых сред были использованы каликсарены с донорной фосфорильной группой, прикрепленной к жесткой платформе. Коэффициент распределения при экстракции Pd(II) 0,01 моль/л раствором одного из каликсаренов в н-нитробензотрифториде составил 3 при 0,1 моль/л HNO_3 и 0,17 при 3 моль/л HNO_3 [42, 43]. Показано, что эффективность извлечения Pd(II) каликс[4]аренами в полярном разбавителе (N-нитробензотрифторид) из 0,3 моль/л раствора HNO_3 снижается в зависимости от типа заместителя у атома фосфора в ряду: бутил-пропил > этил > метил. Однако такое поведение не характерно для соответствующих монодентатных соединений. Для выяснения причины этого эффекта

изучали влияние структуры каликсарена на его распределение между органической и водной фазами. Процент уноса органического реагента зависит от строения заместителя при атоме фосфора, природы разбавителя и концентрации азотной кислоты в водной фазе и варьируется от 80 до 5%. Вследствие высокого процента уноса каликс[4]аренов в водную фазу при экстракции, сложности их синтеза и неселективного комплексобразования с палладием применение их для рафинирования благородных металлов из растворов переработки ОЯТ представляется нецелесообразным.

Судя по совокупности доступных литературных данных, наибольшую перспективу в качестве экстрагентов для выделения палладия из растворов переработки ОЯТ представляют собой тиодигликольамиды [44, 45]. Это родственные к диамидам соединения, однако, они помимо азота содержат также атомы серы, сродство которой к палладию очень велико. Используя растворы N, N, N', N'-тетра(2-этилгексил)тиодигликольамида в додекане, удалось достичь практически полного извлечения палладия (коэффициент разделения более 10^5) из растворов, имитирующих рафинаты ПУРЭКС-процесса.

Выводы

Как видим, в условиях острого дефицита палладия на мировом рынке, отработавшее ядерное топливо представляется перспективным сырьевым источником по отношению к этому платиноиду, поэтому следует ожидать вовлечения ОЯТ в схему производства палладия и других благородных металлов для нужд народного хозяйства. При этом жидкостная экстракция по совокупности своих характеристик наиболее перспективна для переработки ОЯТ с целью извлечения палладия. Наиболее перспективными соединениями для этого представляются тиодигликольамиды. Поэтому необходимо интенсифицировать исследования, направленные на получение новых соединений из этого класса, и на изучение их экстракционных свойств по отношению к палладию. Тем не менее, следует продолжить изучение соединений других классов, которые потенциально могут стать новыми высокоселективными, химически- и радиационно-стойкими экстракционными реагентами, а также совершенствовать ранее предложенные технологические схемы для более эффективного извлечения, очистки и концентрирования одного из наиболее важных металлов платиновой группы.

Литература

- Боярко Г. Ю. *Благородные металлы. Применение, цены, спрос и предложение, запасы в недрах и прогноз развития рынка*. М.: Геонформ-марк; 2001. 80 с.
- Боярко Г. Ю. Динамика цен на драгоценные металлы. *Известия Томского политехнического университета*. 2005;308(2):160–166.
- Информационное агентство «metaltorg.ru». Текущие цены (spot) на мировых рынках. <https://www.metaltorg.ru/courses/precious> [Дата обращения 11.10.2021].
- Ведомости. Золото и палладий резко подорожали в июне <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/07/08/806017-zoloto-i-palladii> [Дата обращения 11.10.2021].
- mdf.ru. ЦБ-РФ курсы драгметаллов. <http://mdf.ru/centrobank/preciousmetals/?left=3&right=-1&from=06.05.2019&till> [Дата обращения 11.10.2021].
- Меретуков М. А., Орлов А. М. *Металлургия благородных металлов (зарубежный опыт)*. М.: Металлургия, 1990. 416 с.
- Красцветмет. Инфо-центр. Состоялось очередное заседание совета директоров ОАО «Красцветмет» под председательством министра экономики края Егора Васильева <https://www.krastsvetmet.ru/info-centre/news/sostoyalos-ocherednoe-zasedanie-soveta-direktorov-oao-krastsvetmet-pod-predsedatelstvom-ministra-eko/> [Дата обращения 11.10.2021].
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Feasibility of Separation and Utilization of Ruthenium, Rhodium and Palladium from High Level Wastes, Technical Reports Series No. 308, IAEA, Vienna (1989).
- Беляев А. В. Химико-технологические проблемы платиновых металлов при переработке отработанного ядерного топлива. *Журнал структурной химии*. 2003;44(1):39–47.
- Похитонов Ю. А., Романовский В. Н. Палладий в отработанном топливе АЭС. Есть ли перспективы выделения и использования? *Радиохимия*. 2000;47(1):3–14. (Pokhitonov Y. A., Romanovskii V. N. Palladium in Irradiated Fuel. Are There Any Prospects for Recovery and Application? *Radiochemistry*. 2005;47(1):1–13).
- Похитонов Ю. А., Романовский В. Н. Методы выделения палладия из облученного топлива и перспективы его использования для иммобилизации долгоживущих радионуклидов. Труды Радиового института им. В. Г. Хлопина. Санкт-Петербург, Т. XVII, 2014, с. 5–55.
- Галль Н. Р., Галль Л. Н., Бердников А. С., Семенов А. А., Лизунов А. В., Сафиулина А. М. Перспективы электромагнитного метода разделения изотопов и возможные пути его модернизации. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы*. 2019;97(1):65–77.
- Золотов Ю. А., Варшал Г. М., Иванов В. М. *Аналитическая химия металлов платиновой группы*. М.: КомКнига, 2005. 592 с.
- Никитин Ю. Е., Муринов Ю. И., Розен А. М. Химия экстракции сульфоксидами. *Успехи химии*. 1976;45(12):2233–2252.
- Карманников В. П. Способ очистки родия и иридия. Патент РФ № 2156819. Оpubл. 27.09.2000.
- Торгов В. Г., Татарчук В. В., Ренард Э. В., Дружинина И. А., Корда Т. М., Татарчук А. Н. Обоснование выбора экстракционной системы на основе сульфидов нефти для извлечения осколочного палладия. *Атом. энергия*. 1994;76(6):478–485.
- Торгов В. Г., Татарчук В. В., Дружинина И. А., Корда Т. М., Ренард Э. В. Поведение благородных металлов при экстракционном извлечении и аффинаже осколочного палладия. *Атом. энергия*. 1996;80(4):267–273.
- Петрова А. М., Багрова Е. Г., Касиков А. Г. Способ извлечения палладия из кислого медьсодержащего раствора. Патент РФ № 2654818. Оpubл. 22.05.2018.
- Dakshinamoorthy A., Dhami P. S., Naik P. W., Dudwadkar S. K., Munshi S. K., Dey P. K., Venugopal V. Separation of palladium from high level liquid waste of PUREX origin by solvent extraction and precipitation methods using oximes. *Desalination*. 2008;232(1–3):26–36.
- Mezhov E. A., Kulikov I. A., Teterin E. G. Study of Extraction of Palladium from Nitric Acid Solutions with Nitrogen-Containing Compounds, as Applied to Recovery of Fission Palladium from Spent Nuclear Fuel of Nuclear Power Plants: 2. Effect of Radiation on Palladium Recovery and Condition of Extraction Systems. *Radiochemistry*. 2002;44(2):141–145.
- Шкиль А. Н. Экстракция благородных металлов тиобензанилидом и N-замещенными 2-тиопиколинамидами и ее аналитическое применение // Диссертация ... канд. хим. наук. 02.00.02. Москва. 1984. 253 с.
- Потапов В. В. Экстракция палладия и платины из солянокислых растворов S, N- и S, O-содержащими органическими соединениями // Диссертация ... канд. хим. наук. 02.00.04. Уфа. 2000. 155 с.
- Ruhela R., Sindh A. K., Tomar B. S., Hubli R. C. Separation of palladium from high level liquid waste – A review. *RSC Adv*. 2014;(4):24344–24350.
- Томский технологический университет. Служба новостей. Ученые ТПУ предлагают извлекать палладий, родий и рутений из отработанного ядерного топлива. <https://news.tpu.ru/news/2017/11/11/27895/> [Дата обращения 11.10.2021].
- Mezhov E. A., Kuchmunov V. A., Druzhnikov V. V. Study of extraction of palladium from nitric acid solutions with nitrogen containing compounds, as applied to recovery to fission palladium from spent nuclear fuel of nuclear power plants. Extraction and back washing conditions. *Radiochemistry*. 2002;44(2):135–140.
- Lunichkina K. P., Renard E. V., Shevchenko V. B. Extraction of palladium by tributyl-phosphate from nitrate and perchlorate solutions. *Zh. Neorg. Khim.* 1974;19(1):205–209.
- Zaitsev B. N., In'voka E. N. Palladium distribution in the Pd(NO₃)₂-NaNO₃-HNO₃-TBP-decane system. *Radiochemistry*. 1981;23(6):817–820.
- Shmidt V. S., Shorokhov N. A. Chemistry of palladium in extraction processes of NPP spent fuel reprocessing. *Atom. Energ.* 1988;64(2):103–110.
- Shmidt V. S., Shorokov N. A., Novikova S. S., Teterin E. G., Penteleeva A. N. Extraction of palladium(II) nitrate from nitric acid solutions by tri-n-butyl- and triisooamylphosphine oxides. *Radiochemistry*. 1983;25(2):202–207.
- Zaitsev B. N., Kvasnitskii I. B., Korolev V. A., Babain V. A., Pokhitonov Y. A. Recovery of Pd from Spent Fuel: 3. Recovery of Pd from Nitric Acid Solutions Using Carbamoyl Phosphine Oxides. *Radiochemistry*. 2005;47(4):374–377.
- Courson O., Lebrun M., Malmbeck R., Pagliosa G., Romer K., Satmark B., Glatz J. P. Partitioning of minor actinides from HLLW using the DIAMEX process. Pt. 1. Demonstration of extraction performances and hydraulic behaviour of the solvent in a continuous process. *Radiochim. Acta*. 2000;88(12):857–863.
- Zhu Z.-X., Sasaki Y., Suzuki H., Suzuki S., Kimura T. Cumulative study on solvent extraction of elements by N, N, N', N'-tetraoctyl-3-oxapentanediamide (TODGA) from nitric acid into n-dodecane. *Anal. Chim. Acta*. 2004;527:163–168.
- Sasaki Y., Morita Y., Kitatsuji Y., Kimura T. Extraction Behavior of Actinides and Metal Ions by the Promising Extractant, N, N, N', N'-Tetraoctyl-3,6-dioxaoctanediamide (DOODA). *Solvent Extr. Ion Exch.* 2010;28: PP. 335–349.
- Rozen A. M., Krupnov B. V. Dependence of the extraction ability of organic compounds on their structure. *Russian Chemical Reviews*. 1996;65(11):973–1000.
- Волчкова Е. В., Буслаева Т. М., Мишихина Е. А., Громов С. П. Экстракция благородных металлов макроциклическими соединениями. Моск. гос. ун-т тонких хим. технологий им. М. В. Ломоносова. М.: Издательство МИТХТ, 2013. 114 с.
- Lachowicz E., Czapiuk M. Liquid-liquid extraction of palladium and gold by the sulphide podand 1,12-di-2-thienyl-2,5,8,11-tetrathiadodecane. *Talanta*. 1990;37(10):1011–1015.
- Lachowicz E., Krajewski A. Liquid-liquid extraction of metal ions by the sulphide podand 1,12-di-2-thienyl-2,5,8,11-tetrathiadodecane. *Analyt. Chim. Acta*. 1986;188:239–245.

38. Туранов А. Н., Баулин В. Е., Солотнов А. Ф., Цветков В. Е. Экстракция галогенидных комплексов палладия(II) фосфорилсодержащими поддандами. *Журн. неорг. химии*. 1995;40(5):866–871.
39. Туранов А. Н., Баулин В. Е., Харитонов А. В., Цветков В. Е. Экстракция платины из солянокислых растворов фосфорилсодержащими поддандами. *Журн. неорг. химии*. 1994;39(8):1394–1399.
40. Туранов А. Н., Карандашев В. К., Баулин В. Е., Цветков В. Е. Экстракция следовых количеств золота из солянокислых растворов фосфорилсодержащими поддандами. *Журн. неорг. химии*. 1995;40(11):1926–1930.
41. Якшин В. В., Вилкова О. М., Тананаев И. Г., Мясоедов Б. Ф. Селективная экстракция платины, иридия и палладия макроциклическими эндорецепторами из солянокислых растворов. *Росс. хим. журн.* 2010;54(3):56–60.
42. Smirnov I. V., Karavan M. D., Efremova T. I., Babain V. A., Miroshnichenko S. I., Cherenok S. A., Kal'chenko V. I. Extraction of Am, Eu, Tc, and Pd from nitric acid solutions with phosphorylated calixarenes. *Radiochemistry*. 2007;49(2):482–492.
43. Smirnov I. V., Karavan M. D., Babain V. A., Kvasnitskii I., Stoyanov E., Miroshnichenko S. I. Effect of alkyl substituents on extraction properties and solubility of calix[4]arene dialkylphosphine oxides. *Radiochim. Acta*. 2007;95(2):97–102.
44. Ruhela R., Sharma J. N., Tomar B. S., Panja S., Tripathi S. C., Hubli R. C., Suri A. K. N, N', N'-Tetra(2-ethylhexyl)thiodiglycolamide T(2EH)TDGA: A novel ligand for the extraction of palladium from high level liquid waste (HLLW). *Radiochim. Acta*. 2010;98:209–214.
45. Ruhela R., Sharma J. N., Tomar B. S., Adya V. C., Seshagiri T. K., Hubli R. C., Suri A. K. Stability studies of N, N', N'-tetra-(2-ethylhexyl) dithiodiglycolamide (DTDGA). *Radiochim. Acta*. 2013;101:169–174.

References

1. Boyarko G. Yu. Blagorodnye metally. Noble metals. *Application, prices, supply and demand, subsurface reserves and market development forecast*. Moscow.: Geonformmark publ. 2001. 80 p. (in Russ.).
2. Boyarko G. Yu. Dynamics of prices for precious metals. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2005;308(2):160–166. (in Russ.).
3. Information agency "metaltorg.ru". Current prices (spot) on world markets/URL: <https://www.metaltorg.ru/courses/precious> [Accessed 11.10.2021].
4. Vedomosti. Gold and palladium rose sharply in June. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2019/07/08/806017-zoloto-i-palladii> [Accessed 11.10.2021].
5. mdf.ru. Central Bank-RF courses for precious metals. URL: <http://mfd.ru/centrobank/preciousmetals/?left3&right-1&from06.05.2019&till> [Accessed 11.10.2021].
6. Meretukov M. A., Orlov A. M. *Metallurgy of precious metals (foreign experience)*. M.: Metallurgy publ, 1990. 416 p.
7. Krastsvetmet. Info center. A regular meeting of the Board of Directors of OJSC Krastsvetmet was held under the chairmanship of the Minister of Economy of the Territory Yegor Vasiliev. URL: <https://www.krastsvetmet.ru/info-centre/news/sostoyalos-ocherednoe-zasedanie-soveta-direktorov-oao-krastsvetmet-podpredsedatelstvom-ministra-eko/> [Accessed 11.10.2021].
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Feasibility of Separation and Utilization of Ruthenium, Rhodium and Palladium from High Level Wastes, Technical Reports Series No. 308, IAEA, Vienna (1989).
9. Belyaev A. V. Chemical and technological problems of platinum metals in the reprocessing of spent nuclear fuel. *Zhurnal strukturnoy khimii – Journal of Structural Chemistry*. 2003;44(1):39–47. (in Russ.).



ПЕТЕРБУРГСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЯРМАРКА

В РАМКАХ ВЫСТАВКИ ПРОЙДЕТ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС



26–28 АПРЕЛЯ
2022

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
Петербургское шоссе, 64

ВЕДУЩЕЕ ПРОМЫШЛЕННОЕ МЕРОПРИЯТИЕ СЕВЕРО-ЗАПАДА

+7 965 772 7759 | a.ilina@restec.ru | ptfair.ru

10. Pokhitonov Y. A., Romanovskii V. N. Palladium in Irradiated Fuel. Are There Any Prospects for Recovery and Application? *Radiochemistry*. 2005;47(1):1–13.
11. Pokhitonov Yu. A., Romanovsky V. N. Methods for separating palladium from irradiated fuel and prospects for its use for immobilization of long-lived radionuclides. *Proceedings of the V.I. V.G. Khlopin. St. Petersburg, V. XVII, 2014, pp. 5–55.*
12. Gall N. R., Gall L. N., Berdnikov A. S., Semenov A. A., Lizunov A. V., Safiulina A. M. Prospects for the electromagnetic method of isotope separation and possible ways of its modernization. *Questions of atomic science and technology. Series: Materials Science and New Materials*. 2019;97(1):65–77. (in Russ.).
13. Zolotov Yu. A., Varshal G. M., Ivanov V. M. *Analytical chemistry of platinum group metals*. M.: KomKniga publ, 2005. 592p. (in Russ.).
14. Nikitin Yu. E., Murinov Yu. I., Rosen A. M. Extraction chemistry with sulfoxides. *Uspekhi khimii – Advances in chemistry*. 1976;45(12):2233–2252. (in Russ.).
15. Karmannikov V. P. Method for purifying rhodium and iridium. RF patent No. 2156819. Publ. September 27, 2000.)
16. Torgov V. G., Tatarchuk V. V., Renard E. V., Druzhinina I. A., Korda T. M., Tatarchuk A. N. Justification of the choice of an extraction system based on oil sulphides for the extraction of debris palladium. *Atom. energiya – Atom. energy*. 1994;76(6):478–485. (in Russ.).
17. Torgov V. G., Tatarchuk V. V., Druzhinina I. A., Korda T. M., Renard E. V. Behavior of noble metals during extraction extraction and refining of debris palladium. *Atom. energiya – Atom. energy*. 1996;80(4):267–273. (in Russ.).
18. Petrova A. M., Bagrova E. G., Kasikov A. G. Method for extracting palladium from acidic copper-containing solution. RF patent No. 2654818. Publ. 05.22.2018.
19. Dakshinamoorthy A., Dhami P. S., Naik P. W., Dudwadkar S. K., Munshi S. A., Dey P. K., Venugopal V. Separation of palladium from high level liquid waste of PUREX origin by solvent extraction and precipitation methods using oximes. *Desalination*. 2008;232(1–3):26–36.
20. Mezhev E. A., Kulikov I. A., Teterin E. G. Study of Extraction of Palladium from Nitric Acid Solutions with Nitrogen-Containing Compounds, as Applied to Recovery of Fission Palladium from Spent Nuclear Fuel of Nuclear Power Plants: 2. Effect of Radiation on Palladium Recovery and Condition of Extraction Systems. *Radiochemistry*. 2002;44(2):141–145.
21. Shkil A. N. Extraction of noble metals with thiobenzanilide and N-substituted 2-thiopicolinamides and its analytical application // Dissertation ... candidate of chemical sciences. 02.00.02. Moscow. 1984. 253 p. (in Russ.).
22. Potapov V. V. Extraction of palladium and platinum from hydrochloric acid solutions of S, N- and S, O-containing organic compounds // Dissertation ... candidate of chemical sciences. 02.00.04. Ufa. 2000. 155 p. (in Russ.).
23. Ruhela R., Sindh A. K., Tomar B. S., Hubli R. C. Separation of palladium from high level liquid waste – A review. *RSC Adv*. 2014;(4):24344–24350.
24. Tomsk Technological University. News Service. TPU scientists propose to extract palladium, rhodium and ruthenium from spent nuclear fuel. URL: <https://news.tpu.ru/news/2017/11/11/27895/> [Accessed 11.10.2021].
25. Mezhev E. A., Kuchmunov V. A., Druzhnikov V. V. Study of extraction of palladium from nitric acid solutions with nitrogen containing compounds, as applied to recovery to fission palladium from spent nuclear fuel of nuclear power plants. Extraction and back washing conditions. *Radiochemistry*. 2002;44(2):135–140.
26. Lunichkina K. P., Renard E. V., Shevchenko V. B. Extraction of palladium by tributyl-phosphate from nitrate and perchlorate solutions. *Zh. Neorg. Khim. – Journal of Inorganic Chemistry*. 1974;19(1):205–209. (in Russ.).
27. Zaitsev B. N., In'voka E. N. Palladium distribution in the $\text{Pd}(\text{NO}_3)_2\text{-NaNO}_3\text{-HNO}_3\text{-TBP-decane}$ system. *Radiochemistry*. 1981;23(6):817–820.
28. Shmidt V. S., Shorokhov N. A. Chemistry of palladium in extraction processes of NPP spent fuel reprocessing. *Atom. Energ.* 1988;64(2):103–110.
29. Shmidt V. S., Shorokov N. A., Novikova S. S., Teterin E. G., Pen-teleeva A. N. Extraction of palladium(II) nitrate from nitric acid solutions by tri-n-butyl- and triisooamylphosphine oxides. *Radiochemistry*. 1983;25(2):202–207.
30. Zaitsev B. N., Kvasnitskii I. B., Korolev V. A., Babain V. A., Pokhitonov Y. A. Recovery of Pd from Spent Fuel: 3. Recovery of Pd from Nitric Acid Solutions Using Carbamoyl Phosphine Oxides. *Radiochemistry*. 2005;47(4):374–377.
31. Courson O., Lebrun M., Malmbeck R., Pagliosa G., Romer K., Satmark B., Glatz J. P. Partitioning of minor actinides from HLLW using the DIAMEX process. Pt. 1. Demonstration of extraction performances and hydraulic behaviour of the solvent in a continuous process. *Radiochim. Acta*. 2000;88(12): PP. 857–863.
32. Zhu Z.-X., Sasaki Y., Suzuki H., Suzuki S., Kimura T. Cumulative study on solvent extraction of elements by N, N, N', N'-tetraoctyl-3-oxapentanediamide (TODGA) from nitric acid into n-dodecane. *Anal. Chim. Acta*. 2004;527:163–168.
33. Sasaki Y., Morita Y., Kitatsuji Y., Kimura T. Extraction Behavior of Actinides and Metal Ions by the Promising Extractant, N, N, N', N'-Tetraoctyl-3,6-dioxaoctanediamide (DOODA). *Solvent Extr. Ion Exch.* 2010;28: PP. 335–349.
34. Rozen A. M., Krupnov B. V. Dependence of the extraction ability of organic compounds on their structure. *Russian Chemical Reviews*. 1996;65(11):973–1000.
35. Volchkova E. V., Buslaeva T. M., Mishchikhina E. A., Gro-mov S. P. *Extraction of noble metals by macrocyclic compounds*. Moscow state University of Fine Chem. technologies to them. M. V. Lomonosov. – M.: Publishing house of MITHT. 2013. 114 p.
36. Lachowicz E., Czapiuk M. Liquid-liquid extraction of palladium and gold by the sulphide podand 1,12-di-2-thienyl-2,5,8,11-tetrathiadodecane. *Talanta*. 1990;37(10):1011–1015.
37. Lachowicz E., Krajewski A. Liquid-liquid extraction of metal ions by the sulphide podand 1,12-di-2-thienyl-2,5,8,11-tetrathiadodecane. *Analyt. Chim. Acta*. 1986;188:239–245.
38. Turanov A. N., Baulin V. E., Solotnov A. F., Tsvetkov V. E. Extraction of palladium (II) halide complexes with phosphoryl-containing podands. *Zhurn. Neorg. Khimii – Journal. Inorg. Chemistry*. 1995;40(5):866–871. (in Russ.).
39. Turanov A. N., Baulin V. E., Kharitonov A. V., Tsvetkov E. N. Extraction of platinum from hydrochloric acid solutions by phosphoryl-containing podands. *Zhurn. Neorg. Khimii – Journal. Inorg. Chemistry*. 1994;39(8):1394–1399. (in Russ.).
40. Turanov A. N., Karandashev V. K., Baulin V. E., Tsvetkov E. N. Extraction of trace amounts of gold from hydrochloric acid solutions with phosphoryl-containing podands. *Zhurn. Neorg. Khimii. – Journal. Inorg. Chemistry*. 1995; 40 (11): 1926–1930. (in Russ.).
41. Yakshin V. V., Vil'kova O. M., Tananaev I. G., Myasoedov B. F. Selective extraction of platinum, iridium and palladium by macrocyclic endoreceptors from hydrochloric acid solutions. *Russ. Chem. Zhurn. – Russian chemical journal*. 2010;54(3):56–60. (in Russ.).
42. Smirnov I. V., Karavan M. D., Efremova T. I., Babain V. A., Miroshnichenko S. I., Cherenok S. A., Kal'chenko V. I. Extraction of Am, Eu, Tc, and Pd from nitric acid solutions with phosphorylated calixarenes. *Radiochemistry*. 2007;49(2):482–492.
43. Smirnov I. V., Karavan M. D., Babain V. A., Kvasnitskii I., Stoyanov E., Miroshnichenko S. I. Effect of alkyl substituents on extraction properties and solubility of calix[4]arene dialkylphosphine oxides. *Radiochim. Acta*. 2007;95(2):97–102.
44. Ruhela R., Sharma J. N., Tomar B. S., Panja S., Tripathi S. C., Hubli R. C., Suri A. K. N, N, N', N'-Tetra(2-ethylhexyl)thiodiglycolamide T(2EH)TDGA: A novel ligand for the extraction of palladium from high level liquid waste (HLLW). *Radiochim. Acta*. 2010;98:209–214.
45. Ruhela R., Sharma J. N., Tomar B. S., Adya V. C., Seshagiri T. K., Hubli R. C., Suri A. K. Stability studies of N, N, N', N'-tetra(2-ethylhexyl) dithiodiglycolamide (DTDGA). *Radiochim. Acta*. 2013;101:169–174.

Статья поступила в редакцию 10.10.2021

Принята к публикации 9.11.2021



РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ RUSSIAN HEALTH CARE WEEK

Ежегодно входит в план научно-практических мероприятий Министерства здравоохранения РФ



6–10 декабря 2021



За здоровую жизнь

XI Международный форум по профилактике
неинфекционных заболеваний и формированию
здорового образа жизни



Здравоохранение

30-я юбилейная международная выставка
«Медицинская техника, изделия медицинского
назначения и расходные материалы»



Здоровый образ жизни

14-я международная выставка «Средства реабилитации
и профилактики, эстетическая медицина, фармацевтика
и товары для здорового образа жизни»

6–9 декабря 2021



MedTravelExpo

Санатории. Курорты. Медицинские центры

4-я международная выставка медицинских
и оздоровительных услуг, технологий оздоровления
и лечения в России и за рубежом



www.zdravo-expo.ru

Реклама

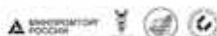


Организаторы:

- Государственная Дума ФС РФ
- Министерство здравоохранения РФ
- АО «ЭКСПОЦЕНТР»

При поддержке:

- Совета Федерации ФС РФ
 - Министерства промышленности и торговли РФ
 - Федерального агентства по туризму (Ростуризм)
- Под патронатом ТПП РФ



 **ЭКСПОЦЕНТР**

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

12+