

УДК 544.7

Манохина Е.В., студент ХТб-221

Пилин.М.О., старший преподаватель кафедры ТПОВН

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.
Горбачева

Manokhina E.V., student of HTb-221 group, Pilin. M.O. Senior Lecturer
at the department of PPTOS

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССОВ СОРБЕНТОВ ДЛЯ
ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЦВЕТНЫХ И ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ ОТ-
ХОДОВ УГЛЯ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ, СЕЛЕКТИВНОСТЬ И ПЕР-
СПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ.**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CLASSES OF SORBENTS FOR
EXTRACTION OF NON-FERROUS AND PRECIOUS METALS FROM
COAL WASTE. EFFICIENCY, SELECTIVITY AND APPLICATION
PROSPECTS.**

Растущий спрос на цветные и драгоценные металлы в электронике, катализе и экологически чистых технологиях на фоне истощения легкодоступных рудных месторождений определяет актуальность разработки эффективных методов их извлечения из искусственных источников, часто представляющих собой разбавленные многокомпонентные растворы. Также, важно учесть, что в отходах угледобычи содержание цветных и драгоценных металлов иногда достигает 14%. [1] Среди существующих методов сорбция занимает лидирующие позиции благодаря своей высокой эффективности, возможности регенерации сорбента и низкому энергопотреблению. Однако классические ионообменные смолы часто обладают недостаточной селективностью, что побуждает к поиску и созданию новых материалов с желаемыми свойствами.

Цель: Классификация сорбентов по типу функциональных групп и механизму взаимодействия с ионами металлов разных групп; сравнительный анализ селективности и емкости различных классов материалов.

Ионный обмен - обыкновенное замещение ионов в растворе на ионы в структуре сорбента. Эффективность определяется зарядом и радиусом иона. Такие реакции протекают в водных растворах электролитов (кислот, оснований, солей) без изменения степеней окисления образующих их соединений.

Хелатирование (комплексообразование) - образование координационных связей между ионом металла (акцептором) и атомами-донорами (O, N, S) полидентатного лиганда. Образуются циклические структуры (хелаты), которые повышают селективность, регулируют скорость установления сорбционного равновесия и создают многофункциональные материалы с широким вариативным рядом сорбционных свойств. [2]

Восстановительная сорбция, которая по своей природе характерна для благородных металлов, которые осаждаются на поверхности сорбента в элементарном виде.

Особое место в прогнозировании селективности занимает теория жестких и мягких кислот и оснований (ЖМКО) [3] Суть этой теории в том, что ионы металлов, делятся на жесткие кислоты (соединения Fe^{3+} , Cr^{3+}), мягкие (соединения Au^+ , Ag^+ , Pd^{2+}) и пограничные (соединения Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}). Жесткие кислоты предпочитают связываться с жесткими основаниями (доноры O, COO^-), а мягкие кислоты образуют связи с мягкими основаниями (доноры S, N, CN^-). Это ключевой принцип при разработке селективных сорбентов.

Рассмотрим характеристики основных сорбционных материалов, которые можно использовать в качестве продуктов для улавливания цветных и драгоценных металлов и проведем их сравнительный анализ:

1. Неорганические сорбенты (цеолиты, глины)

Данный вид сорбентов имеет ионообменный механизм действия. Он обладает низкой селективностью, которая определяется размером пор и плотностью заряда матрицы. Их главным недостатком является отсутствие специфических функциональных групп, что ограничивает применение для селективного извлечения. [4]

2. Синтетические полимерные сорбенты

Работа этих сорбентов также основана на ионообмене. Их селективность умеренная. Сульфокатиониты проявляют более высокую степень избирательности к многозарядным катионам. Что касается анионитов, то они показывают хорошую эффективность в отношении извлечения хлоридных комплексов драгоценных металлов, однако не обладают достаточной селективностью и сорбируют и другие анионные формы. Главный недостаток –

это отсутствие хелатного эффекта, который, непосредственно, приводит к низкой селективности в сложных растворах.

3. Хелатные сорбенты.

Являются основой селективности. [5] Этот класс наиболее перспективен с теоретической точки зрения. К ним относятся:

Сорбенты на основе азот- и кислородсодержащих лигандов (иминодиуксусная кислота - IDA, 8-гидроксихинолин). Сорбенты с О- и N-содержащими лигандами эффективно извлекают жёсткие и пограничные кислоты (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+}), в то время как для концентрирования мягких кислот (Au^+ , Ag^+ , Pd^{2+} , Pt^{2+}) наиболее эффективны серосодержащие лиганды (тиомочевина, дитизол), обеспечивающие взаимодействие с атомами серы. Классическим примером являются тиомочевинные группы ($-\text{NH-CS-NH}_2$), которые восстанавливают и связывают золото из цианидных или хлоридных растворов, при этом, практически не взаимодействуя с ионами щелочноземельных металлов. Их главный недостаток - низкая устойчивость тиосоединений к окислению, что требует поиска более стабильных серосодержащих лигандов.

4. Природные модифицированные биосорбенты.

Механизм данных сорбентов основан на комплексообразовании, ионообмене и физической адсорбции. Преобладающий механизм зависит от состава сырья и вида модификации. Материалами для их создания являются отходы агропромышленного комплекса (шелуха злаков, скорлупа орехов, косточки плодов), продукты переработки древесины (опилки, кора), хитин/хитозан из панцирей ракообразных. Согласно теории твердых и мягких кислот и оснований, эти группы, являясь жесткими основаниями, определяют высокую степень присоединения биосорбентов к "пограничным" и "жестким" катионам, таким как Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} . Их основными недостатками является нестабильная сорбционная емкость, невысокая механическая прочность. [6]

Научная новизна заключается в теоретическом обосновании целесообразности использования модифицированных биосорбентов в качестве стабильной и эффективной альтернативы дорогостоящим синтетическим хелатным смолам и нестабильным соединениям для извлечения цветных металлов. В качестве перспективного направления предлагается целенаправленная модификация лигноцеллюлозных матриц (например, шелухи кедрового ореха) методами щелочной обработки и импрегнации неорганическими фазами для создания стабильных гибридных сорбентов с управляемой селективностью.

Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать следующие выводы:

Выбор оптимального материала для создания сорбента определяется металлом, который нужно извлечь, составом раствора и экономическими факторами:

1. Для высокоселективного извлечения драгоценных металлов (Au, Pt) из технологических растворов наиболее эффективны специализированные хелатные смолы, несмотря на их высокую стоимость и проблемы стабильности.

2. Для очистки сточных вод от ионов цветных металлов (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}) наиболее перспективными и экономически целесообразными являются модифицированные природные биосорбенты. Они сочетают достаточную эффективность с низкой стоимостью и экологичностью. Процесс их использования и практического применения представляет большую ценность для науки.

3. Наиболее сбалансированными свойствами и потенциалом на будущее обладают гибридные органо-неорганические сорбенты.

Таким образом, развитие сорбционных технологий – это создание гибридных материалов и целенаправленной модификации доступных природных сорбентов для решения конкретных технологических задач.

Список литературы:

1. Салихов В. А. Перспективы извлечения ценных цветных и редких металлов из золошлаковых отвалов энергетических предприятий Кемеровской области // Вестник Томского государственного университета. – 2009. – № 327. – С. 163–168.

2. Дашевский В. Г., Баранов А. П., Кабачник М. И. Пространственные аспекты образования хелатных комплексов металлов // Успехи химии. – 1983. – Т. 52, № 2. – С. 268–293.

3. Химическая энциклопедия : в 5 т. / гл. ред. И. Л. Кнунянц. – Москва : Большая Российская энциклопедия, 1992. – Т. 2 : Даффа–Меди. – 671 с.

4. ZEOLITE AND CLAY RAW: EXPERIMENTAL MODELING OF BIOGEOSORBENTS // Cyberleninka : [сайт]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zeolite-and-clay-raw-experimental-modeling-of-biogeosorbents> (дата обращения: 27.10.2025). – Текст : электронный.

5. Менжерес Л. Т., Рябцев А. Д., Мамылова Е. В. Селективный сорбент для извлечения лития из хлоридных высокоминерализованных рассолов //

Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307, № 7. – С. 76–80.

6. Осокин В. М., Сомин В. А. Исследования по получению новых сорбентов из растительного сырья для очистки воды // Ползуновский вестник. – 2013. – № 1. – С. 280–282.

References:

1. Salikhov V. A. Prospects of extraction of valuable non-ferrous and rare metals from ash and slag heaps of energy enterprises of the Kemerovo region // Bulletin of Tomsk State University. – 2009. – No. 327. – pp. 163-168.

2. Dashevsky V. G., Baranov A. P., Kabachnik M. I. Spatial aspects of the formation of chelate complexes of metals // Successes of Chemistry. - 1983. – Vol. 52, No. 2. – pp. 268-293.

3. Chemical encyclopedia : in 5 volumes / chief editor I. L. Knunyants. – Moscow : Great Russian Encyclopedia, 1992. – Vol. 2 : Duffa–Copper. - 671 p –

4. ZEOLITE AND CLAY RAW: EXPERIMENTAL MODELING OF BIOGEOSORBENTS // Cyberleninka : [website]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zeolite-and-clay-raw-experimental-modeling-of-biogeosorbents> (date of request: 10/27/2025). – Text : electronic.

5. Menjeres L. T., Ryabtsev A.D., Mamylova E. V. Selective solvent for lithium extraction from highly mineralized chloride brines // Izvestiya Tomsk Polytechnic University. - 2004. – Vol. 307, No. 7. – pp. 76-80.

6. Osokin V. M., Somin V. A. Research on the production of new sorbents from plant raw materials for water purification // Polzunovsky Bulletin, 2013, No. 1, pp. 280-282.