

УДК 546.26–162

Определение механизма концентрирования золота из растворов на углях марки БАУ-А под воздействием ультрафиолетового облучения

Т. В. СМОЛКИНА¹, А. С. БУЙНОВСКИЙ¹, П. Б. МОЛОКОВ¹, Л. М. ЛЕВЧЕНКО², Н. А. КОЛПАКОВА³

¹Северский технологический институт,
филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ,
проспект Коммунистический, 65, Томская обл., Северск 636036 (Россия)

E-mail: t-smolkina@mail.ru

²Институт неорганической химии им. А. В. Николаева Сибирского отделения РАН,
проспект Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск 630090 (Россия),

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
проспект Ленина, 30, Томск 634050 (Россия)

(Поступила 22.03.10; после доработки 03.03.11)

Аннотация

Методом ИК-Фурье спектроскопии исследован состав поверхностных функциональных групп березового активированного угля марки БАУ-А и изменение их качественного и количественного состава при сорбции золота из хлоридных растворов различного состава под действием ультрафиолетового облучения и без его применения. Показано, что под воздействием ультрафиолетового облучения количество гидроксильных групп на поверхности березового активированного угля возрастает, а это приводит к росту его сорбционной емкости по анионам $[\text{AuCl}_4]^-$. Методом EXAFS-спектроскопии обнаружено, что после сорбции из солянокислых растворов и под действием ультрафиолетового облучения и без него золото на поверхности образцов березового активированного угля находится в виде димеров Au_2Cl_6 . Механизм сорбции предполагает следующие стадии: ионный обмен поверхностных гидроксильных групп на комплексные ионы $[\text{AuCl}_4]^-$ и образование на поверхности угля димеров Au_2Cl_6 .

Ключевые слова: активированный уголь марки БАУ-А, кислородсодержащие поверхностные функциональные группы, ультрафиолетовое облучение, сорбция, тетрахлораурат-ион, ИК-Фурье спектроскопия

ВВЕДЕНИЕ

В литературе широко обсуждается механизм сорбции золота на активированных углях [1]. В случае сорбции комплексов $[\text{AuCl}_4]^-$ из солянокислых растворов на образцах березового активированного угля (БАУ-А) наиболее вероятным представляется механизм, согласно которому [2–4] происходит ионный обмен $[\text{AuCl}_4]^-$ с поверхностными функциональными группами (ПФГ) угля, образование комплексов за счет донорно-акцепторного взаимодействия делокализованных *p*-электронов углерода и вакантных *d*-орбиталей золота [5]

и дальнейшее восстановление до металла за счет электронодонорных свойств углерода. Согласно данным [3, 4], стадия ионного обмена тетрахлораурат-иона протекает только с ионами гидроксила, образующимися при функционировании кислородного газового электрода. При этом авторами работ этом не учитывалось наличие других кислородсодержащих ПФГ, уже присутствующих на поверхности активированного угля: фенольных (гидроксильных), карбонильных, карбоксильных, эфирных, энольных, лактонных, а также серо- и азотсодержащих групп [6, 7]. Однако специфическая сорбция комплексов $[\text{AuCl}_4]^-$

возможна также за счет ионного обмена с морфологическими кислородсодержащими ПФГ и комплексообразования с другими ПФГ, не содержащими кислород.

Проведенные ранее исследования показали, что под действием ультрафиолетового облучения (УФО) процесс сорбции золота из солянокислых растворов на угле марки БАУ-А протекает и быстрее, и полнее, чем без него [8, 9]. О механизме этого влияния высказаны лишь предположения, требующие доказательств. Ультрафиолетовое облучение может оказывать воздействие как на каждую из стадий сорбции золота на БАУ-А, так и на каждый из компонентов системы “углеродный сорбент – раствор”. Скорее всего, большая доля излучения должна поглощаться БАУ-А как абсолютно черным телом. В этой связи в первую очередь УФО должно действовать на сорбент, а не на раствор, как предполагалось ранее в работах [8, 9]. Следовательно, под действием УФО должны изменяться характеристики сорбента: возникать новые поверхностные группы, разрушаться или видоизменяться уже имеющиеся. Вследствие этого могут изменяться сорбционная емкость БАУ-А, его потенциал (и восстановительная способность), полярность поверхности сорбента и ряд других свойств.

Цель работы – выяснение механизма сорбции золота из солянокислых растворов на БАУ-А, а также влияния УФО на этот механизм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для определения состава ПФГ использовался метод ИК-Фурье спектроскопии.

ИК-Фурье спектры получены в Научно-аналитическом центре ТПУ (Томск) на ИК-Фурье спектрометре Nicolet-5700 в режиме пропускания в диапазоне $4400\text{--}390\text{ см}^{-1}$. Образцы для анализа готовили путем прессования с КВг. Спектры образцов БАУ-А также сняты в ИНХ СО РАН (Новосибирск) на ИК-Фурье-спектрометре IFS-85 Bruker в диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$ в режимах пропускания и поглощения.

В качестве объектов исследования использовались образцы активированного угля марки БАУ-А, контактировавшие в течение заданного времени (5–20 мин) с растворами 1 М HCl, солянокислыми модельными раство-

рами золота (100 мг/дм^3) и технологическими растворами золота под воздействием УФО и без него. Далее образцы угля отфильтровывали и высушивали при комнатной температуре. Технологические растворы представляли собой растворы выщелачивания золота из концентрата смесью серной кислоты, хлорида натрия (в количестве, достаточном для образования тетрахлораурат-иона) и диоксида марганца. Концентрация золота в них составляла 80 мг/дм^3 , остаточная концентрация серной кислоты – 2 М. В качестве источника УФО использовали ртутную лампу низкого давления ДРБ-20. Также исследовали образец БАУ-А, облученный УФ-лампой высокого давления ДРЛ-250 Вт в сухом виде на воздухе в течение 20 мин.

Выводы о наличии или отсутствии той или иной функциональной группы на поверхности сделаны на основании результатов исследования серий образцов, в которых варьирование условий обработки материалов закономерно отражалось в динамике ИК-Фурье-спектров. Интерпретацию полученных спектров проводили по данным [10–16].

Химическую форму золота, сорбированного на поверхности образца БАУ-А, определяли методом EXAFS-спектроскопии по методике, изложенной в работе [17], на EXAFS-установке в ИК СО РАН (Новосибирск).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1–3 приведены спектры исходного (необработанного) образца активированного угля марки БАУ-А, в которых идентифицированы кислородсодержащие группы:

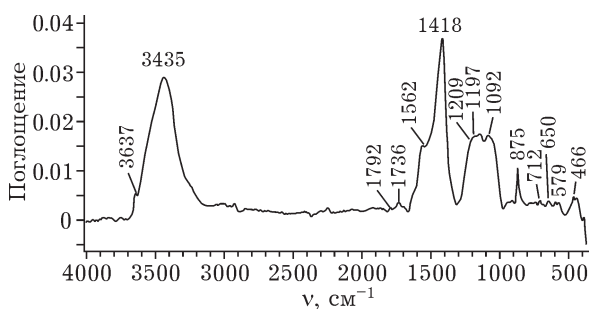


Рис. 1. Спектр поглощения для образца БАУ-А, полученный в режиме поглощения на ИК-Фурье спектрометре IFS-85 Bruker.

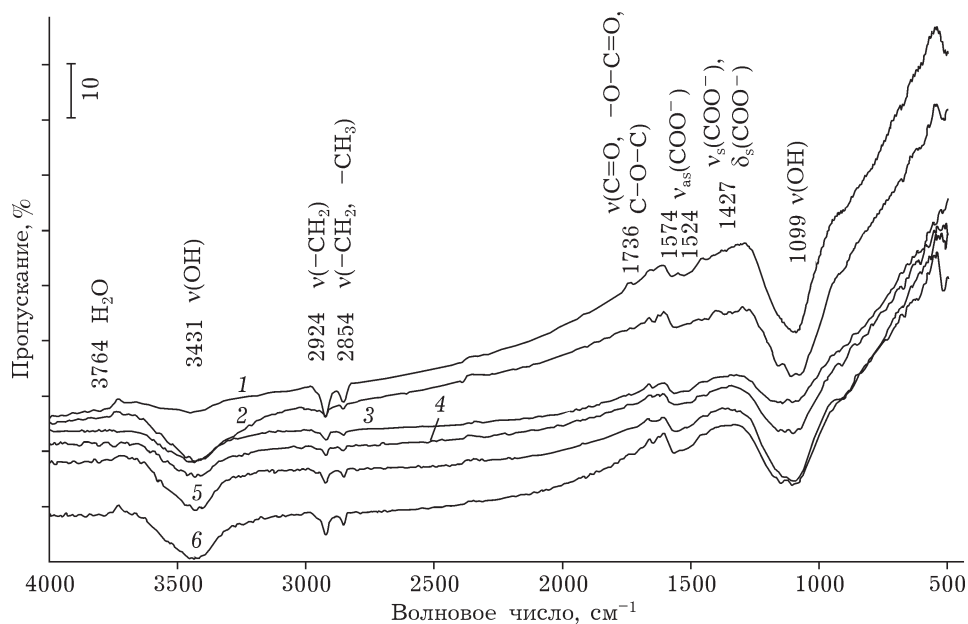


Рис. 2. Спектры пропускания исходного образца марки БАУ-А, подвергнутого ультрафиолетовому облучению (УФО) в сухом виде, и образца БАУ, находившегося в контакте с р-ром 1 М НСl под воздействием УФО и без него: 1 – исходный, 2 – подвергнутый УФО в сухом виде, 3, 4 – без УФО в течение 10 и 20 мин соответственно, 5, 6 – с УФО в течение 10 и 20 мин соответственно.

ОН-группы в гидроксилах, карбоксилах и фенолах (широкая полоса в области $3435\text{--}3446\text{ см}^{-1}$); вторичные спиртовые группы ($1092\text{--}1099\text{ см}^{-1}$). В меньшей степени в спектрах пропускания выражены полосы колебаний, характерные для карбоксильной группы. Более отчетливо их удалось наблюдать только в спектре, полученном на ИК-Фурье спектрометре IFS-85 Bruker в режиме поглощения (см. рис. 1). Для их расшифровки использована процедура растяжки слабых сигналов. Установлено, что полосы 1562 см^{-1} в спектрах поглощения (см. рис. 1) и $1574, 1524\text{ см}^{-1}$ в спектрах пропускания (см. рис. 2, 3) соответствуют асимметричным валентным колебаниям ионизированной карбоксильной группы COO^- ; полосы 1417 см^{-1} в спектре поглощения (см. рис. 1) и 1427 см^{-1} в спектре пропускания (см. рис. 2, 3) – симметричным колебаниям группы COO^- . Линия 1736 см^{-1} в спектрах поглощения и пропускания (см. рис. 1–3) может быть отнесена к колебаниям связи $\text{C}=\text{O}$ в группе COOH [11] либо к колебаниям лактонных групп $\nu(\text{C}-\text{O}-\text{C})$ и $\nu(-\text{O}-\text{C}=\text{O})$ [16]. Присутствие лактонных групп на поверхности исходного БАУ-А подтверждается также наличием полос 1209 ($\delta\text{O}-\text{C}-\text{O}$) и 875 см^{-1} ($\text{O}-\text{C}=\text{O}$) в спектрах поглощения. Также были определены адсорбированная

вода (3637 см^{-1} в спектре поглощения и 3764 см^{-1} в спектре пропускания) и алифатические группы: $-\text{CH}_2$ (2924 см^{-1}), $-\text{CH}_2$, $-\text{CH}_3$ (2854 см^{-1}) [10, 13]. Азот- и серосодержащие ПФГ методом ИК-Фурье спектроскопии не обнаружены. Таким образом, если при сорбции золота имеется взаимодействие по типу ионного обмена или комплексообразования, то оно должно протекать с кислородсодержащими ПФГ или с матрицей угля.

На рис. 2–4 приведены ИК-спектры образцов БАУ-А (исходных и насыщенных золотом) при контакте с раствором НСl под действием УФО и без него. Сопоставление ИК-спектров показало, что в спектрах образцов обработанного БАУ-А присутствуют все основные полосы (с незначительными сдвигами), наблюдаемые в спектре исходного БАУ-А. На основании полученных данных установлены некоторые закономерности изменения состава и количества ФПГ в зависимости от условий обработки образцов БАУ-А.

Во-первых, при контакте БАУ-А с растворами НСl величина пика 3430 см^{-1} , соответствующего ОН-группам в гидроксилах, карбоксилах и фенолах [11], возрастает со временем. При этом в образцах, облученных УФО, эти пики выражены сильнее по сравнению

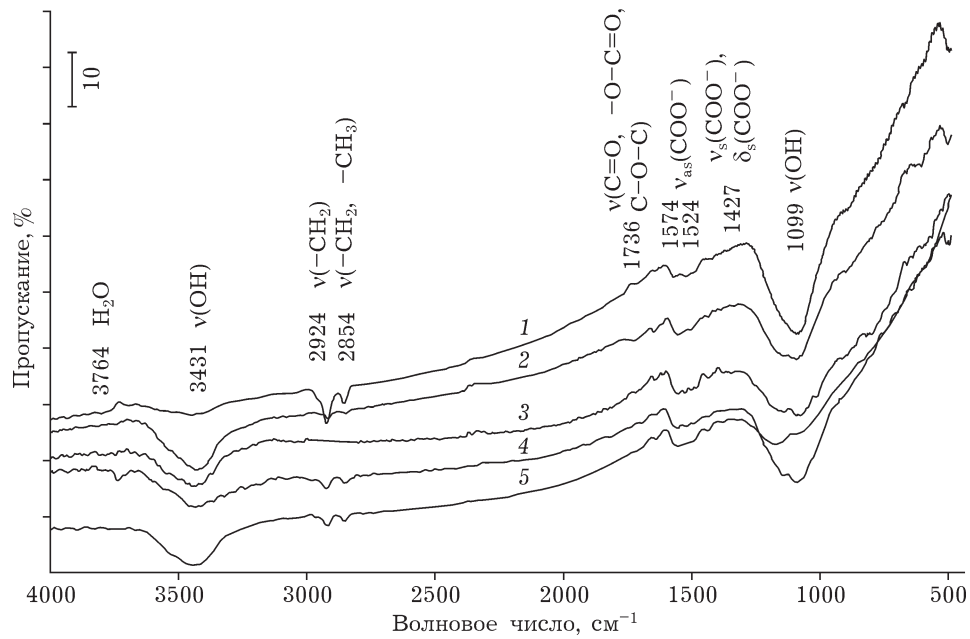


Рис. 3. Спектры пропускания образца марки БАУ-А, находившегося в контакте с модельными солянокислыми растворами золота (100 мг/дм^3): 1 – исходный, 2, 3 – продолжительность контакта 5 мин, без УФО и под действием УФО соответственно, 4, 5 – продолжительность контакта 10 мин, без УФО и под его действием соответственно.

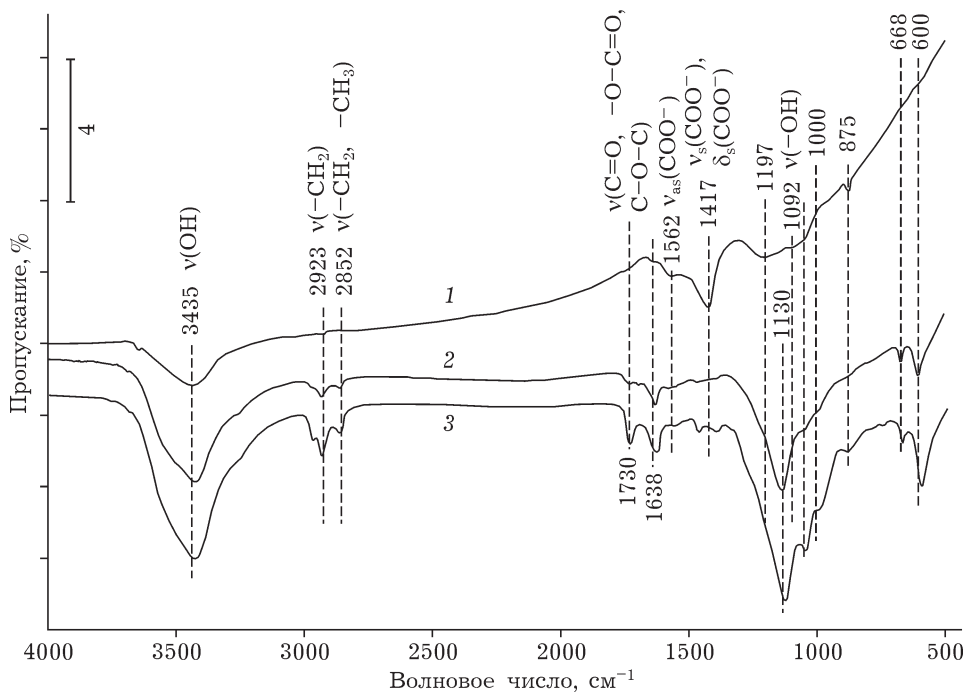


Рис. 4. Спектры пропускания образцов марки БАУ-А, находившихся в контакте с технологическими растворами выщелачивания золота: 1 – исходный, 2, 3 – продолжительность контакта 10 мин, без УФО и под его действием соответственно.

с образцами, не подвергнутыми УФО (см. рис. 2). Эти изменения свидетельствуют о том, что при контакте с водными растворами соляной кислоты на поверхности БАУ-А появляются новые ОН-группы, причем УФО интенсифицирует этот процесс.

При сорбции золота из модельных солянокислых растворов без воздействия УФО величина пика, соответствующего колебаниям гидроксильных групп, несколько снижается со временем (см. рис. 3), что может быть трактовано как результат продолжающегося ионного обмена поверхностных ОН-групп на анионы $[\text{AuCl}_4]^-$. При сорбции золота под действием УФО величина пика остается одинаковой в течение 5 и 10 мин. Эти данные не противоречат сведениям, полученным авторами [1, 22], о том, что при сорбции из модельных солянокислых растворов золота в таких концентрациях (100 мг/дм^3) оно полностью сорбируется в течение первых 5–10 мин. Кроме того, дальнейшее увеличение числа поверхностных групп невозможно, так как поверхность образца БАУ-А к этому моменту уже закрыта сорбированным золотом. При сорбции золота из технологических растворов (см. рис. 4) пик 3435 см^{-1} ($\nu(-\text{OH})$) увеличивается примерно в три раза без воздействия УФО и в 3,5 раза – под действием УФО. По-видимому, это свидетельствует об окислении поверхности БАУ-А в присутствии перманганат-иона в сернокислой среде.

При облучении образца БАУ-А в сухом виде также происходят значительные изменения: пик 3431 см^{-1} ($\nu(-\text{OH})$) увеличивается в 4,7 раза по сравнению с исходным (см. рис. 2). Этот факт может быть объяснен тем, что под действием УФО происходит дополнительное образование поверхностных функциональных кислородсодержащих групп.

Во-вторых, в полученных ИК-спектрах наиболее интенсивны полосы валентных колебаний групп OH^- , $\text{C}-\text{OH}$ и $\text{C}-\text{OX}$. По данным [11], группа пиков 1050 , 1100 и 1150 см^{-1} характеризует первичные, вторичные и третичные спиртовые группы $-\text{OH}$ соответственно. Образец исходного БАУ-А имеет только сильный пик 1100 см^{-1} , который соответствует вторичным группам $-\text{OH}$. При УФО сухого образца БАУ-А этот пик расщепляется на три пика (1000 , 1100 и 1130 см^{-1}), имеющих большую

интенсивность. В других образцах наблюдается пик 1100 см^{-1} (вторичный) с меньшей интенсивностью по сравнению с исходным образцом. Вероятно, под воздействием УФО возможно отщепление группы $-\text{CH}_3$ и превращение вторичного спирта в первичный (см. рис. 2–4).

В-третьих, во всех образцах обнаружены пики, соответствующие колебаниям алифатических групп: 2924 см^{-1} (валентные симметричные и ассиметричные колебания группы $-\text{CH}_2$) и 2854 см^{-1} ($\nu(-\text{CH}_2, -\text{CH}_3)$). Эти пики отчетливо заметны в спектре исходного образца БАУ-А и уменьшаются при его контакте с хлоридными растворами: в 3 раза – без УФО и в 1,5 раза – под действием УФО. Интересно отметить, что после контакта БАУ-А с раствором HCl в течение 20 мин под действием УФО глубина пика приняла исходное значение. Очевидно, что при контакте образца БАУ-А с солянокислыми растворами количество алифатических групп уменьшается, а воздействие УФО на систему БАУ-А– HCl – H_2O либо замедляет этот процесс, либо приводит к образованию новых алифатических групп. При облучении сухого образца БАУ-А пики, соответствующие колебаниям алифатических групп, также снижаются в 3 раза, что может свидетельствовать о разрушении этих групп под действием УФО. При контакте образца БАУ-А с технологическими растворами выщелачивания золота глубина пиков, соответствующих колебаниям групп $-\text{CH}_2$, $-\text{CH}_3$, увеличивается (см. рис. 4). При этом для образцов, подвергнутых УФО, этот эффект в 2–4 раза заметнее по сравнению с образцами без воздействия УФО. По-видимому, в сернокислой среде и при наличии окислителя MnO_2 протекают процессы, отличные от процессов в хлоридной среде. Присутствие окислителя приводит к окислению поверхности углеродного сорбента, способствуя возникновению новых ПФГ, что подтверждается исследованиями авторов [18].

В-четвертых, исследовано поведение линий, относящихся к колебаниям карбоксильной группы и ее составляющих. Пики 1427 и 1574 см^{-1} в спектре пропускания (симметричные и ассиметричные колебания ионизированной группы COO^-) практически не изменяются при контакте сухого образца БАУ-А с солянокислыми растворами и его облучении и не-

сколько увеличиваются при его контакте с технологическими растворами выщелачивания золота.

Другие линии, характерные для карбоксильной группы, удалось обнаружить в спектрах, полученных на спектрометре IFS-85 Bruker. Линия в области 1730–1736 см^{-1} соответствует колебаниям лактонных групп $\nu(\text{C}-\text{O}-\text{C})$ и $\nu(-\text{O}-\text{C}=\text{O})$ (либо $\nu(\text{C}-\text{OH})$), которые практически не выражены в исходном образце БАУ-А и образцах, контактировавших с HCl. Однако эти колебания становятся заметными в образцах, контактировавших с технологическими растворами золота, причем под действием УФО этот эффект более выражен. По данным [19, 20], пик 1722 см^{-1} $\nu(\text{C}=\text{O})$ появлялся после окисления углеродного сорбента НУМС. Этот же пик наблюдается и в спектрах образца БАУ-А, контактировавшего с технологическим раствором выщелачивания золота без УФО и (более заметный) – под действием УФО (см. рис. 4). В спектрах образца БАУ-А, контактировавшего с HCl под действием УФО и без него, этот пик практически незаметен (см. рис. 2, пик 1730 см^{-1}). Пик 1197 см^{-1} может быть отнесен к колебаниям C–OH, либо $\nu(\text{C}-\text{OH})$, либо $\nu(\text{C}-\text{O}-\text{C})$. По сравнению с исходным образцом этот пик значительно возрастает при контакте образца БАУ-А с технологическими растворами: в 4 раза – без воздействия УФО, в 7 раз – под действием УФО (см. рис. 4).

Таким образом, на изменение количества ПФГ значительное влияние оказывает не только воздействие УФО, но и состав контактирующего раствора:

1. В серноокислых растворах, содержащих окислитель, протекают процессы окисления

БАУ-А: наблюдается образование кислородсодержащих групп C=O, C–OH, C–O–C, O–C=O, C–O–H, причем под воздействием УФО этот процесс протекает гораздо интенсивнее. Кроме того, наблюдается образование спиртовых и гидроксильных групп, увеличивается количество карбоксильных групп.

2. В солянокислой среде количество карбоксильных, карбонильных, лактонных и спиртовых групп уменьшается, особенно это явление заметно под воздействием УФО. Это может быть обусловлено либо отрывом этих групп от поверхности БАУ-А, либо их превращением в другие ПФГ. Увеличивается лишь количество гидроксильных групп, причем под воздействием УФО этот процесс протекает более интенсивно. Образование OH-групп, вероятно, происходит в результате протекания следующих процессов: взаимодействие сорбированного (или растворенного) кислорода с молекулами воды (в процессе действия кислородного газового электрода); разложение воды под воздействием УФО [21]; окисление алифатических групп.

Возможно, воздействие УФО способствует отрыву ПФГ от поверхности БАУ-А, а на образовавшихся таким образом активных центрах протекают процессы, зависящие от состава водного раствора. В частности, разложение молекул воды и восстановление кислорода с образованием новых гидроксильных ПФГ в солянокислой среде или процессы окисления с образованием кислородсодержащих ПФГ (карбонильных, карбоксильных, лактонных) в окислительной среде H_2SO_4 в присутствии MnO_2 .

ТАБЛИЦА 1

Результаты исследований образцов БАУ-А с сорбированным золотом методом EXAFS

Условия сорбции	Массовая доля золота в образце, %	Тип связи	Состав координационных сфер	
			Количество атомов в трех ближайших сферах	Расстояние до центрального атома, нм
3 ч, УФО	0.4	Au–Cl	0.5 Au	2.788
			2.9 Cl	2.925
			2.0 Au	4.100
3 ч, без УФО	0.4	Au–Cl	0.2 Au	2.723
			2.5 Cl	2.298
			1.2 Au	4.134

Состав соединений золота, сорбированных на поверхности образца БАУ-А под воздействием УФО и без него, определяли методом EXAFS-спектроскопии. Условия получения образцов и результаты анализа приведены в табл. 1. Определен состав трех ближайших координационных сфер центрального атома (Au) и расстояния между ним и окружающими его лигандами хлора.

Сопоставляя полученные результаты с данными о строении соединений золота [22], сделан вывод о том, что в образцах, на которые сорбция золота из его хлоридных растворов проводилась в течение 3 ч, как под воздействием УФО, так и без него, золото находится преимущественно в виде димеров Au_2Cl_6 . Металлические формы, на наличие которых указывала бы выявленная связь Au–Au и значительное количество атомов золота в ближайшей координационной сфере (порядка 10), не обнаружены. Эти результаты отвергают ранее высказанное нами предположение [8, 9] о том, что под воздействием УФО интенсифицируется стадия восстановления сорбированных комплексов до металла. Однако следует заметить, что данный метод позволяет определять достаточно высокие концентрации веществ (порядка 0.1 мас. %). Следовательно, тот факт, что металлическая форма золота не определена методом EXAFS-спектроскопии, нельзя однозначно трактовать как отсутствие восстановленного золота на образце БАУ-А. Вполне вероятно (и данные авторов [2, 3] подтверждают нашу гипотезу), что золото в пробе присутствует, но его количества недостаточно для определения методом EXAFS-спектроскопии. Таким образом, продолжительность сорбции (3 ч) оказалась достаточной для полного извлечения золота из раствора, но не достаточна для его полного восстановления до металлического состояния. С другой стороны, вероятен обратный процесс образования хлоридных комплексов, и такие случаи описаны для палладия [23]. По нашим данным, при продолжительности сорбции 20–120 мин только 5–15 % золота можно легко десорбировать с поверхности угля слабыми растворами соляной кислоты. Таким образом, на формы нахождения золота на поверхности БАУ-А, как показали данные EXAFS, влияет не УФО, а продолжительность концентрирования.

Таким образом, сорбция золота на поверхности БАУ-А протекает по меньшей мере в две стадии – ионный обмен и образование димеров. Кинетика этих процессов нуждается в дальнейшем изучении. Очевидно, что стадия восстановления золота поверхностью БАУ-А самая продолжительная (лимитирующая), а УФО, по-видимому, увеличивает скорость первой стадии – сорбции благородных металлов на углеродные материалы.

ВЫВОДЫ

Показано, что сорбция золота из солянокислых растворов на поверхности БАУ-А протекает, по-видимому, в две стадии – ионный обмен поверхностных гидроксильных групп на комплексные ионы $[AuCl_4]^-$ и образование на поверхности угля димеров Au_2Cl_6 .

Доказано, что УФО оказывает влияние на процесс сорбции золота из его солянокислых растворов, как с окислителем, так и без него, и ускоряет его первую стадию – ионный обмен.

Показано, что под воздействием УФО увеличивается количество гидроксильных групп, что увеличивает сорбционную емкость по анионам $AuCl_4^-$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 09-03-99035 р_офи).

Авторы благодарят директора НАЦ ТПУ В. А. Тарбокова и его специалиста Н. И. Радишевскую за проведение анализа образцов, а также выражают признательность сотрудникам ИК СО РАН (Новосибирск) Д. И. Кочубею и Б. Н. Новгородову и сотруднице ИНХ СО РАН Л. А. Шелудяковой за проведение анализов и расшифровку экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Буйновский А. С., Ковыркина Т. В., Агеева Л. Д., Колпакова Н. А. Концентрирование золота и металлов платиновой группы на углеродных сорбентах. Северск: Изд. СГТИ, 2005.
- 2 Тарасенко Ю. А., Резник Г. В., Багреев А. А., Лысенко А. А. // ЖФХ. 1993. Т. 67, № 11. С. 2333–2335.
- 3 Тарасенко Ю. А., Багреев А. А., Яценко В. В. // Там же. С. 2328–2332.
- 4 Тарасенко Ю. А., Антонов С. П., Багреев А. А., Марданенко В. К., Резник Г. В. // Укр. хим. журн. 1991. Т. 57, № 4. С. 386–389.
- 5 Стрелко В. В., Тарасенко Ю. А., Лавриненко-Омецинская Е. Д., Багреев А. А. // Там же. № 10. С. 1065–1069.
- 6 Тихонова Л. П., Тарковская И. А., Росоха С. В., Сварковская И. П., Кулик Н. В., Коровин Ю. Ф., Комаров

- В. П., Кадочников В. А. // ЖПХ. 1998. Т. 71, № 10. С. 1632–1638.
- 7 Тарковская И. А., Тихонова Л. П., Томашевская А. Н., Гоба В. Е., Антонова Л. С., Сварковская И. П. // ЖФХ. 1996. Т. 70, № 8. С. 1463–1467.
- 8 Агеева Л. Д., Колпакова Н. А., Ковыркина Т. В. // ЖАХ. 2001. № 2. С. 157–160.
- 9 Буйновский А. С., Агеева Л. Д., Ковыркина Т. В., Колпакова Н. А. Совместное определение в рудах и концентратах золота, серебра и металлов платиновой группы рентгенофлуоресцентным методом. Северск: Изд. СГИ, 2003. 99 с.
- 10 Иванов В. П. Метод оценки химического разрушения углей и прогнозирование их физико-механических свойств на основе ИК-спектроскопии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новокузнецк, 2006.
- 11 Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв. М.: Изд-во МГУ, 1974. 177 с.
- 12 Киселев А. В., Лыгин В. И. Инфракрасные спектры поверхностных соединений и адсорбированных веществ. М.: Наука, 1972. 460 с.
- 13 Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. М.: Изд-во иностр. лит., 1963. 590 с.
- 14 Шамрицкая И. П., Мирошникова З. П., Камбарова Р. Ф., Мелешко В. П. Теория и практика сорбционных процессов. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1972. Вып. 7. С. 38–42.
- 15 Ласкорин Б. Н., Федорова Л. А., Логвиненко И. А., Ступин Н. П. // Синтез и свойства ионообменных материалов. М.: Наука, 1968. С. 146–151.
- 16 Aguilar C., Garcia R., Soto-Garrido G., Arriagada R. // Appl. Catal. B: Environ. 2003. Vol. 46. P. 229–237.
- 17 Кочубей Д. И. EXAFS-спектроскопия катализаторов. Новосибирск: Наука, 1992.
- 18 Левченко Л. М., Митькин В. Н., Мухин В. В., Оглезнева И. М., Мазалов Л. Н. // Сб. тр. II Междунар. семинара “Углеродные сорбенты”. Кемерово, 2000. С. 22.
- 19 Левченко Л. М., Митькин В. Н., Оглезнева И. М., Шавинский Б. М., Галицкий А. А., Керженцева В. Е. // Хим. уст. разв. 2004. Т. 12, № 6. С. 709–723.
- 20 Головизина Т. С., Левченко Л. М., Митькин В. Н., Шелудякова Л. А., Керженцева В. Е. // Неорган. материалы. 2010. Т. 46, № 5. С. 1–7.
- 21 Агеева Л. Д. Сорбционное концентрирование платины, палладия и золота активированным углем с целью определения рентгено-флуоресцентным методом в минеральном сырье: дис. ... канд. хим. наук. Северск, 2001.
- 22 Некрасов Б. В. Основы общей химии. Т. 2. М.: Химия, 1973.
- 23 Стрелко В. В., Дударенко В. В., Тарасенко Ю. А., Сенкевич А. И., Немошкаленко А. И. // Укр. хим. журн. 1986. Т. 52, № 11. С. 1157.