

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

УДК 622.7-027.32. / .33; 622.7: 502.174

Баранов А.Н., Филиппова Е.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЗОЛОТА С ПРИМЕНЕНИЕМ ФОТОЭЛЕКТРОАКТИВИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ

**Аннотация.** Представлены результаты исследований растворения золота с применением метода фотоэлектроактивации. Инновационная предварительная фотоэлектрохимическая обработка раствора щелочи проводилась в электролизере, сверху устанавливалась УФ-лампа. Электрохимическая обработка раствора щелочи продолжалась 1–2 часа, УФ-облучение – 5–7 мин, а на следующем этапе вводились цианиды. Применение полученного активного раствора увеличило в жидкой фазе пульпы содержание метастабильных соединений серы, в том числе гидросульфидов, роданидов. Выявлена следующая зависимость: чем больше метастабильных соединений серы, тем больше высвобождается коллоидного золота, что объясняется способностью данных соединений образовывать с золотом комплексы.

При активационном доизвлечении получена следующая зависимость:  $S_{Au} = 0,0347 CCNS^- + 0,5972$ , при этом  $R^2 = 0,8631 = 0,9$ , что соответствует высокой точности. Чем ближе значение коэффициента корреляции к 1, тем больше коррелирует содержание роданидов с содержанием золота.

Полученные зависимости указывают на преимущество электрообработки перед стандартной схемой доизвлечения с применением цианид-ионов и раствора щелочи  $Ca(OH)_2$  без электрического воздействия и ультрафиолетового облучения. Выявлено, что уровень извлечения коллоидного золота непосредственно определяется способом проведения обработки. Установлено, что фотоэлектрохимическая обработка влияет на вещественно-структурные параметры матрицы сульфидных минералов, в частности изменяет элементный состав и кристалло-морфические параметры решетки, а электрообработка усиливает эффект, что сопровождается существенным увеличением концентрации роданидов и золота. Появление данных соединений и элементов в жидкой фазе указывает на возможную миграцию именно в этой форме.

**Ключевые слова:** золото, цианирование, кислород, электрохимия, ток, потенциал, дифрактограммы, окислительно-восстановительный потенциал

### Введение

Вовлечение руд со сложными горно-геологическими условиями залегания, минеральным составом, текстурными и структурными особенностями приводит к усложнению технологических схем добычи и переработки, особенно при наличии дисперсных форм редких и благородных металлов в сульфидно-арсенидной кристаллической решетке, сульфосолевых минеральных носителях.

Снижение содержания золота и мощности продуктивных песков на разрабатываемых в настоящее время россыпях также обуславливает необходимость извлечения упорного золота, в том числе капсулированного, дисперсного и химически связанного.

Важно установить источник появления золота, а также пути и формы его миграции и накопления. Существует несколько подходов к этому вопросу [1].

Основными проблемами извлечения коллоидного золота из отходов, в том числе пульпы и растворов, при использовании химических способов извлечения являются: недостаточное обеспечение доступа к частицам золота и сопутствующим элементам активного выщелачивающего раствора; выбор эффективной системы окислителей и комплексообразователей, воздействующих на первичные химические связи между атомами золота, сопутствующими элементами и ми-

нералообразующими атомами, формирующими с ними более устойчивые связи в сравнении с теми элементами, с которыми оно связано изначально в минеральной матрице; выбор подготовки пульпы; извлечение золота и перевод его в жидкую фазу независимо от форм его нахождения, а соответственно, различных условий его растворения и извлечения сорбентами при электрообработке. При утилизации отходов, содержащих коллоидное золото, большое практическое значение имеет выбор, подготовка ионообменного сорбента и необходимые параметры напряжения и силы тока.

Кроме того, к проблемам извлечения элементов из растворов можно отнести неправильный подбор лампы, излучающей технический ультрафиолет с определенными параметрами, позволяющими влиять на выход основных активных окислителей: озона, перекиси водорода, гидроксил-радикалов, причем ультрафиолет при определенной длине волны и времени экспозиции может как генерировать некоторые из них, так и разрушать.

### Теория, материалы и методы исследования, технические и технологические разработки

Использование комбинации процессов электролиза растворов электролитов в сочетании с облучением выделяющихся газов позволяет с высоким квантовым выходом генерировать непосредственно в жидкой среде комплекс высокоактивных окислителей в

составе: гидроксил-радикала, перекиси водорода и ее полимерных модификаций, а также высокорационных ион-радикальных комплексов, что, в свою очередь, благоприятно влияет на извлечение полезных компонентов [2].

Так, Секисовым А.Г., Пановым Ю.П. и др. предложен метод обнаружения химически связанного золота с использованием активного раствора. Этот активный раствор содержит хлорид-гипохлоритные соединения, синтезированные фотохимической обработкой хлоридно-гипохлоритного раствора. При определенном рН хлоридно-гипохлоритное соединение образует хлорноватую кислоту, которая в присутствии двухвалентного железа диссоциирует на гидроксильный радикал, способный проникать в решетку минерала-концентратора золота. Обеспечен прирост извлечения золота в жидкую фазу на 23% относительно контрольного значения [3].

Обработка газовых выбросов ультрафиолетовым излучением электрического разряда в определенном диапазоне длин волн применялась Иваницким М.С., Грига А.Д. для очистки газовых выбросов от полициклических ароматических углеводородов, включая бенз(а)пирен. Облучение проводилось в присутствии озона и воды в виде жидкости или пара при определенной температуре газовых выбросов. Высокая скорость химических реакций наблюдалась при большой влажности газов в промышленных выбросах. Увеличение числа полициклических ароматических углеводородов, поглощающих ультрафиолетовое излучение, и интенсивности поглощения каждым полициклическим ароматическим углеводородом приводят к росту скоростей реакций окисления. Рассеивание ультрафиолетового излучения на мелкодисперсных частицах водяных паров улучшало распределение излучения по сечению газотока. Предлагаемый способ позволил повысить степень очистки газовых выбросов от токсичных полициклических ароматических углеводородов и снизить кислотную коррозию газотока установки [4].

Учеными Иркутского национального исследовательского технического университета в соответствии с техническим заданием также проводились исследования по бенз(а)пирену, в частности отбирались пробы снежного покрова с 06.03.2020 по 9.03.2020 года преимущественно в санитарно-защитной зоне БрАЗа, зоне промышленных выбросов иных предприятий Центрального района и на селитебной территории Братска. Концентрация бенз(а)пирена определялась в Лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред на приборе Флюорат -02 по Методике выполнения измерений массовой доли бенз(а)пирена методом ВЭЖХ с использованием анализатора жидкости ФЛЮОРАТ®-02 в качестве флуориметрического детектора. Значительное количество неорганизованных выбросов содержит бенз(а)пирен, который выделяется из пека, в связи с этим проанализировано технологическое сырье, анодная масса, каменноугольный и нефтяной пек. Для снижения вы-

бросов бенз(а)пирена необходимо снижать испарение бенз(а)пирена с поверхности анода, что достигается снижением температуры поверхности, например путем нанесения укрывных материалов (запирающих) слоев.

Известно, что ультрафиолетовая обработка позволяет разложить бензапирен до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Специалистами проведены исследования по разложению бензапирена в пеке. Для этого использовалась Бактерицидная ультрафиолетовая лампа ВКТ-195 38 Вт с пультом (настольная) озоновая переменного тока. Каменноугольный пек в виде тонкодисперсного порошка обрабатывали с помощью ультрафиолетовой лампы UV Lamp Manual в течение 2, 6, 15 мин. Получили снижение концентрации бензапирена на 60%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что обработка ультрафиолетом каменноугольного пека позволяет снизить содержание бензапирена.

Исследование реagentного воздействия на сценментированную минеральную массу, моделирующую рудный массив, проводилось Рассказовой А.В., Секисовым А.Г., Галимьяновым А.А. Предварительная обработка модельного материала различными активными reagentными комплексами привела к предокислению содержащейся меди, что повысило эффективность процессов ее последующего выщелачивания. Максимально достигнутый прирост выхода меди в продуктивный раствор относительно контрольного значения составил 83%. Для предокисления меди применялся электроактивированный раствор гидрокарбоната натрия и перекиси водорода, смесь гидроксида натрия и перекиси водорода, гипохлорит натрия, а также дистиллированная вода. В качестве комплексобразователя для выщелачивания меди использовался reagent «Золотая цикада» (Jin Chan) - стандартный и активированный. Установлено, что активация раствора бикарбоната натрия с применением его электрохимической обработки, перед вводом в него комплексобразователя, позволила более эффективно извлекать медь из подготовленного обработкой модельного материала [5].

Такие исследования указывают на актуальность интенсификации выщелачивания благородных металлов с применением фотоэлектрохимической обработки reagentов, однако такая технология до конца не разработана.

Эффективность использования физико-химических геотехнологий во многом зависит от характера и интенсивности взаимодействия окислителей и комплексобразователей с инкапсулированными и химически связанными формами нахождения металла. Соответственно, активность окислителей должна быть достаточной для обеспечения химических трансформаций кристаллических решеток концентрирующих металл минералов [2].

Одним из наиболее эффективных путей повышения активности окислителей, в частности кислорода, является воздействие на них электромагнитным излу-

чением в ультрафиолетовом диапазоне длин его волн (182–252 нм). При этом двухатомарный кислород переходит в атомарную аллотропную форму или озон, обладающие более высоким окислительно-восстановительным потенциалом, чем исходная, двухатомарная форма кислорода. Для каждой фотохимической реакции существует граница частоты света, ниже которой она не реализуется:

$$\nu > \nu_0 = \frac{E_c}{h}, \quad (1)$$

где  $\nu$ ,  $\nu_0$  – требуемая и граничная частота;  $h$  – постоянная Планка;  $E_c$  – энергия, необходимая для разрушения или образования межатомной связи.

Такое излучение в силу высокой энергии его квантов при поглощении его электронными оболочками атомов (молекул) раствора и растворенных компонентов переводит их в возбужденное состояние. Молекулярные кислород и/или хлор могут продуцироваться у анода электролизом, водород – у катода [2].

В результате фотохимических процессов в ходе облучения водно-газовой эмульсии образуются атомарный кислород и/или озон, атомарный хлор, а в смеси водно-кислородной и водно-водородной эмульсий при слиянии пузырьков продуцируется перекись водорода и гидроксил-радикал. Теоретически и экспериментально обоснована возможность выщелачивания меди, молибдена и дисперсных форм золота как из бедных руд и отходов основного горного производства, так и из флотоконцентратов с использованием специальных водно-газовых эмульсий, полученных путем фотоэлектрохимической обработки водных растворов соответствующего исходного состава. В эмульсии могут быть получены и более сложные активные соединения, в частности:  $C_2O_2^{+*}$ ,  $C_2O_4^{+*}$ ,  $HCIO^*$ ,  $ClO^*$  [2].

Если фотохимические реакции с участием кислорода или хлора происходят в газовой среде, то значительная часть образуемых атомарных форм рекомбинирует (например,  $O_2^* = 2O$ ,  $O + O_2 = O_3$ ,  $O_3 = O_2 + O$ ,  $O + O = O_2$ ,  $2Cl^* = Cl_2$ ). В том случае, если облучение УФ-светом этих газов осуществляется в объеме мелких пузырьков, находящихся в воде, то большая часть их активных радикальных и ион-радикальных форм успевает диффундировать в окружающую их пленочную воду и вследствие реакций гидратации сформировать такие активные соединения, как соединения  $H_2O_2^*$ ,  $HCIO^*$  [6].

Цепные фотохимические реакции, приводят к образованию активных промежуточных продуктов, таких как гидроксил-радикал  $OH^*(O_2^* = 2O, O + H_2 = OH^* + H^*)$ .

Лавровым А.Ю. выполнялись эксперименты по комбинированной фотоэлектрохимической и электрохимической обработке модельных растворов для оценки степени влияния синергетического эффекта на

изменение их основных выходных параметров – ОВП (Eh) и pH [6].

Как видно из приведенных графиков (рис. 1), комбинация электрохимических и фотохимических процессов, в сравнении с простым электрохимическим синтезом гипохлорита натрия, позволяет существенно изменить основные физико-химические параметры выщелачивающих растворов (повысить ОВП, что позволяет интенсифицировать процессы выщелачивания) [6].

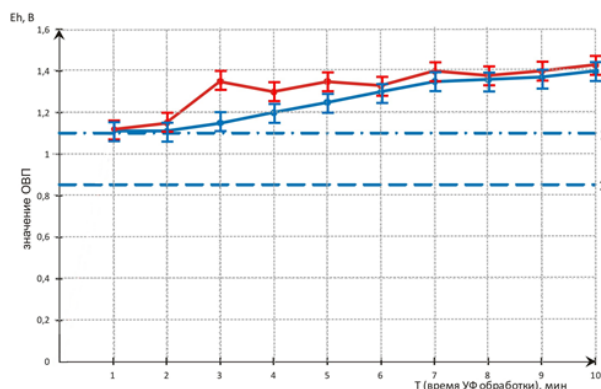


Рис. 1. График зависимости ОВП от времени обработки раствора:

- 1 – гипохлоритная схема (pH = 7.8) электролиз р-ра NaCl (30 г/л) 1 час  $C_{Cl_a} = 1,35$  г/л,  $E_{Au} = 35-45\%$ ;
- 2 – гипохлоритно-солянокислотная (подкисление HCl до pH = 3)  $C_{Cl_a} = 1,08$  г/л,  $E_{Au} = 65-78\%$ ;
- 3 – гипохлоритно-солянокислотная с УФ-облучением  $E_{Au} = 75-83\%$

Таким образом, в наибольшей мере интенсифицирующее воздействие УФ-лучей может быть проявлено в сочетании с электрохимической обработкой пульпы и/или растворов. Фотохимическое воздействие ультрафиолетового излучения на компоненты геотехнологической среды может обеспечивать синтез активных радикалов только в тонком слое жидкой фазы пульпы или растворов, активировать поверхность минеральных частиц в поверхностном слое пульпы, в то время как использование фотохимических и электрохимических процессов в комплексе обеспечивает процесс генерации активных радикалов в объеме коалесцирующих пузырьков исходных газовых компонентов и интенсивный массообмен в объеме обрабатываемой жидкости за счет «флотационного эффекта» – всплывания пузырьков и связанной с ними пленочной воды. Кроме того, важен синергетический эффект совмещенного воздействия высокоэнергетичных квантов ультрафиолетового излучения и обменных процессов в приэлектродных зонах, приводящий к образованию в пленочной воде на границе раздела жидкой и газовой фаз активных радикалов и ион-радикалов [2].

Барановым А.Н., Богидасевым С.А на стадии электрохимической обработки 20%-го раствора NaOH

с использованием промышленного фильтр-пресного электролизера получены следующие оптимальные условия обработки в лабораторных условиях: сила тока  $I = 0,5 \text{ A}$ ; плотность тока  $J = 500 \text{ A/m}^2$ ; напряжение  $U = 12 \text{ V}$ ; объем электролизера  $V = 100 \text{ мл}$ ; объемная плотность тока  $j = 5 \text{ A/мл}$  [7, 8].

Фотохимические, фотоэлектрохимические и фотокаталитические процессы, протекающие в растворах и фазах рудных пульп, в систематизированном виде представлены в табл. 1 [6].

Существует пять основных теорий цианидного процесса, в которых в качестве сопутствующих или промежуточных соединений рассматривается воз-

можность образования перекиси водорода и молекулярного водорода. Причем в теории цианирования Дж. Бодландера перекись водорода является окислителем золота. В то же время во многих случаях добавление перекиси водорода в цианидный раствор может вследствие окисления цианидов (с переводом их в цианаты) ухудшить кинетику выщелачивания золота и снизить его общее извлечение из руды [2].

Была разработана модель цианидного выщелачивания золота водно-газовыми эмульсиями, содержащими активные гидроксил-радикалы и перекись водорода, которая представлена на рис. 2.

Таблица 1

Модель фотоэлектрохимических процессов в растворах и пульпах

Жидкая фаза	Твердая фаза	Газовая фаза	Процессы на границах раздела фаз
$\begin{aligned} & \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{h\nu} \text{H}\cdot + \text{OH}\cdot \\ & \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{h\nu} \text{H}^+ + \text{OH}^- \\ & \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{h\nu} \text{H}_2\text{O}^* \\ & \text{H}_2\text{O}^* + \text{O}\cdot \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 \\ & \text{H}_2\text{O}_2 \xrightarrow{2\text{OH}\cdot} 2\text{OH}\cdot \\ & \text{Fe}^{2+} \xrightarrow{h\nu} \text{Fe}^{3+} \\ & \text{(в присутствии Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}) \\ & \text{HClO} \xrightarrow{h\nu} \text{HCl} + \text{O}\cdot \\ & \text{HClO} \xrightarrow{h\nu} \text{Cl}\cdot + \text{OH}\cdot \\ & \text{Fe}^{2+} \text{H}_2\text{O}_2 \xrightarrow{h\nu} \text{Fe}^{3+} + 2\text{OH}\cdot \\ & \text{HCO}_3^- \rightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}^- \\ & \text{OH}^- \xrightarrow{e^-} \text{OH}^0 \xrightarrow{h\nu} \text{OH}\cdot \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \text{Men Sm} \xrightarrow{h\nu} \\ & \text{Men Sm}(e^-, e^+) \\ & \\ & \text{Men Sm} \xrightarrow{2e^-} \\ & \text{nMe}^{2+} + \text{mS}^0 \\ & \\ & \text{Men Sm} \xrightarrow{2e^+} \\ & \text{nMe}^0 + \text{mS}^{2-} \\ & \\ & \text{Au}_2(\text{HS})_2\text{S}^{2-} + \\ & + (\text{O}_2\text{C} - \text{CO}_2)^+ * \\ & * \text{O}^-(\text{H}^+\text{H}^-) + \\ & + \text{NaCN} \end{aligned}$	$\begin{aligned} & \text{O}_2 \xrightarrow{h\nu} 2\text{O}\cdot \\ & \text{O}_2 + \text{O} \rightarrow \text{O}_3 \\ & \text{O}_3 \xrightarrow{h\nu} \text{O}\cdot + \text{O}_2 \\ & \text{H}_2 + \text{O}\cdot \rightarrow \text{H}\cdot + \text{OH}\cdot \\ & \text{Cl}_2 \xrightarrow{h\nu} 2\text{Cl}\cdot \\ & \text{H}_2 + \text{Cl}\cdot \rightarrow \text{H}\cdot + \text{HCl} \\ & \text{H}\cdot + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{HCl} + \text{Cl}\cdot \\ & \text{H}_2\text{O} + \text{HCl} + \text{O}\cdot \rightarrow \\ & \text{HClO}\cdot\text{H}_2\text{O} \\ & \\ & \text{CO}_2 + \text{CO}_2 \xrightarrow{h\nu} \\ & \xrightarrow{h\nu} \text{CO}_2\text{CO}_2^+ + e^- \\ & \\ & \text{O}_2 \xrightarrow{h\nu} 2\text{O}\cdot^- \end{aligned}$	$\begin{aligned} & 2\text{OH}^0 \xrightarrow{e^+} \text{O}_2 \uparrow + 2\text{H}^+ \\ & 2\text{H}_3\text{O}^+ \xrightarrow{e^-} \text{H}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O} \\ & \text{OH}^0 \xrightarrow{h\nu} \text{OH}\cdot \\ & \\ & \text{nOHMe}^{2+} \text{mOH}^+\text{H}^- \\ & \\ & (\text{O}_2\text{C} - \text{CO}_2)^+ * \text{O}^-(\text{H}^+\text{H}^-) \end{aligned}$

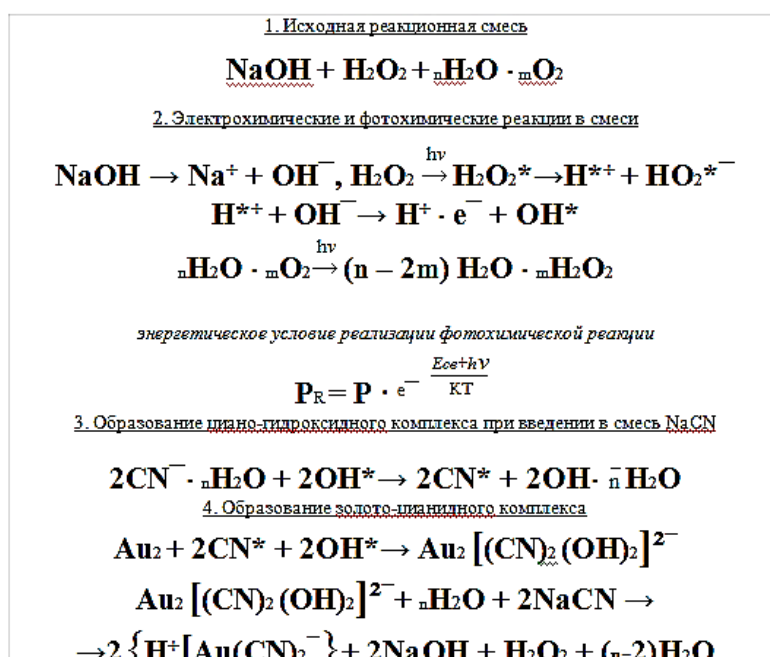


Рис. 2. Модель цианирования золота фотоэлектроактивированными растворами



Исходная реакционная смесь представляет собой водный раствор гидроксида натрия и/или калия. В ходе электрохимической обработки гидроксил-ионы, разряжаясь на аноде, продуцируют метастабильную перекись водорода, при облучении которой непосредственно в растворе образуются гидроксид-радикалы. Эти же активные окислители образуются и при УФ-облучении коагелирующихся пузырьков электролизных газов водорода и кислорода [6].

При введении в такую смесь цианида натрия образующийся при его диссоциации в растворе  $\text{CN}^-$ -анион окисляется гидратированным гидроксил-радикалом и переходит в форму активного  $\text{CN}^\bullet$ -радикала (см. рис. 1, ступень 3 на схеме), который интенсивно реагирует с золотом. Если же вводить полученную водно-газовую эмульсию в раствор цианида натрия, то окисление  $\text{CN}^-$ -анионов может привести к образованию  $\text{CN}_2$  и, соответственно, потере его реакционной способности [2].

На первой (предварительной) стадии электрохимической или фотоэлектрохимической обработки пульпы или растворов реагентов осуществляется электросинтез или фотоэлектросинтез вторичных реагентов, в первую очередь таких, как  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{OH}^\bullet$ ,  $\text{HCl}$  и других активных соединений кислорода, водорода и хлора. Активные гидратированные окислители и комплексообразователи первой стадии обработки синтезируются при малом значении напряжения на электродах (в интервале 5–20 В) [6].

Нами проводились исследования на хвостах Дарасунской ЗИФ. Для определения состава фазовых кристаллических соединений выполнен качественный, полуколичественный фазовый анализ: 1) исходных твердых проб хвостов Дарасунской ЗИФ; 2) обработанных хвостов без применения инновационной схемы фотоэлектрохимической обработки; 3) хвостов, обработанных с применением инновационной схемы фотоэлектрохимической обработки.

Анализ проб проводился на дифрактометре XRD-7000. Для регистрации дифрагированного излучения использовалась детектирующая система на основе запоминающего экрана MAR 345 на линии BM 01 А Швейцарско-Норвежской лаборатории Европейского центра ESRF. Рентгеновское излучение, сфокусированное на образце, дифрагируется образцом. Изменение интенсивности дифрагированного рентгеновского излучения измеряется, регистрируется и графически отображается. Рентгеновское излучение, попавшее на экран, запоминается веществом экрана и может быть считано путем сканирования экрана специальным устройством. Результат представляется как дифрактограмма образца.

Анализ положения пиков дифрактограммы и их интенсивностей позволяет установить, что исходная проба содержит в своем составе: оксид кремния (25,17% –  $\text{SiO}_2$ ), альбит (59,38% –  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ), борнит (2,66% –  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), халькопирит (1,51% –  $\text{CuFeS}_2$ ), арсенипирит (6,88% –  $\text{FeAsS}$ ), оксид железа (4,4% –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

После применения стандартной схемы без фотоэлектрохимической обработки количественный состав этого образца характеризуется следующим соотношением: оксид кремния (24,10% –  $\text{SiO}_2$ ), альбит (52,74% –  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ), борнит (8,70% –  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), халькопирит (6,77% –  $\text{CuFeS}_2$ ), арсенипирит (5,45% –  $\text{FeAsS}$ ), оксид железа (2,24% –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

После применения инновационной схемы с фотоэлектрохимической обработкой количественный состав образца пробы изменился: оксид кремния (23,59% –  $\text{SiO}_2$ ), альбит (56,35% –  $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ ), борнит (9,84% –  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), халькопирит (1,08% –  $\text{CuFeS}_2$ ), арсенипирит (6,41% –  $\text{FeAsS}$ ), оксид железа (2,72% –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Результаты свидетельствуют о том, что в твердом веществе после применения новой инновационной схемы обработки снижается содержание золото(сера)содержащих соединений, можно судить по суммарному снижению борнита, халькопирита и арсенипирита на 17%. Объясняется доокислением минеральных частиц в ходе использования инновационной обработки, в результате золото и сопутствующие поллютанты (сера, мышьяк) переходят в раствор. Перевод элементов в ионную форму позволяет доизвлекать их с применением предлагаемой автором технологии утилизации.

В хвостах обогащения Дарасунской ЗИФ обнаруживается дисперсное золото. Причем такое золото не извлекается методом сорбционного выщелачивания простым или «накислороженным» цианидным раствором и обычной подготовкой ионообменного сорбента. Низкие (1,1–1,3 г/т) содержания золота в хвостах обогащения руд этого месторождения исключают применение для их переработки известные гидрорудно-металлургические методы – биоокисления, автоклавов, обжига [9].

Извлечение дисперсного золота из таких соединений может быть осуществимо с разработкой новых методов доизвлечения в несколько этапов, включающих предварительное концентрирование и окисление перед довыщелачиванием из отходов горнодобывающего производства [9].

Нами предложена инновационная схема фотоэлектрохимической обработки, представленная на рис. 3. Данная схема выполняется по следующей методике. Разработана технологическая схема выполняемых работ по электросорбционному извлечению растворенных элементов, в том числе загрязнителей (As, S, Cu и др.), которые в случае проникновения в экосистему способны оказывать влияние на окружающую природную среду. Для контрольного доизвлечения использовалась стандартная схема с применением цианид-ионов и раствора щелочи, в частности  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , для поддержания постоянной реакции среды (pH). Параллельно проводилась вторая серия экспериментов, при осуществлении которых применялась инновационная предварительная фотоэлектрохимическая обработка раствора щелочи в электролизере, сверху устанавливалась УФ-лампа. Электрохимическая об-

работка раствора щелочи продолжалась 1–2 часа, УФ-облучение – 5–7 мин, а на следующем этапе вводились цианиды. Применение полученного активного раствора увеличило в жидкой фазе пульпы содержание метастабильных соединений серы, в том числе гидросульфидов, роданидов. Выявлена следующая за-

висимость: чем больше метастабильных соединений серы, тем больше высвобождается коллоидного золота, что объясняется способностью данных соединений образовывать с золотом комплексы.

Зависимости содержания золота от присутствующих роданидов приведены на рис. 4.

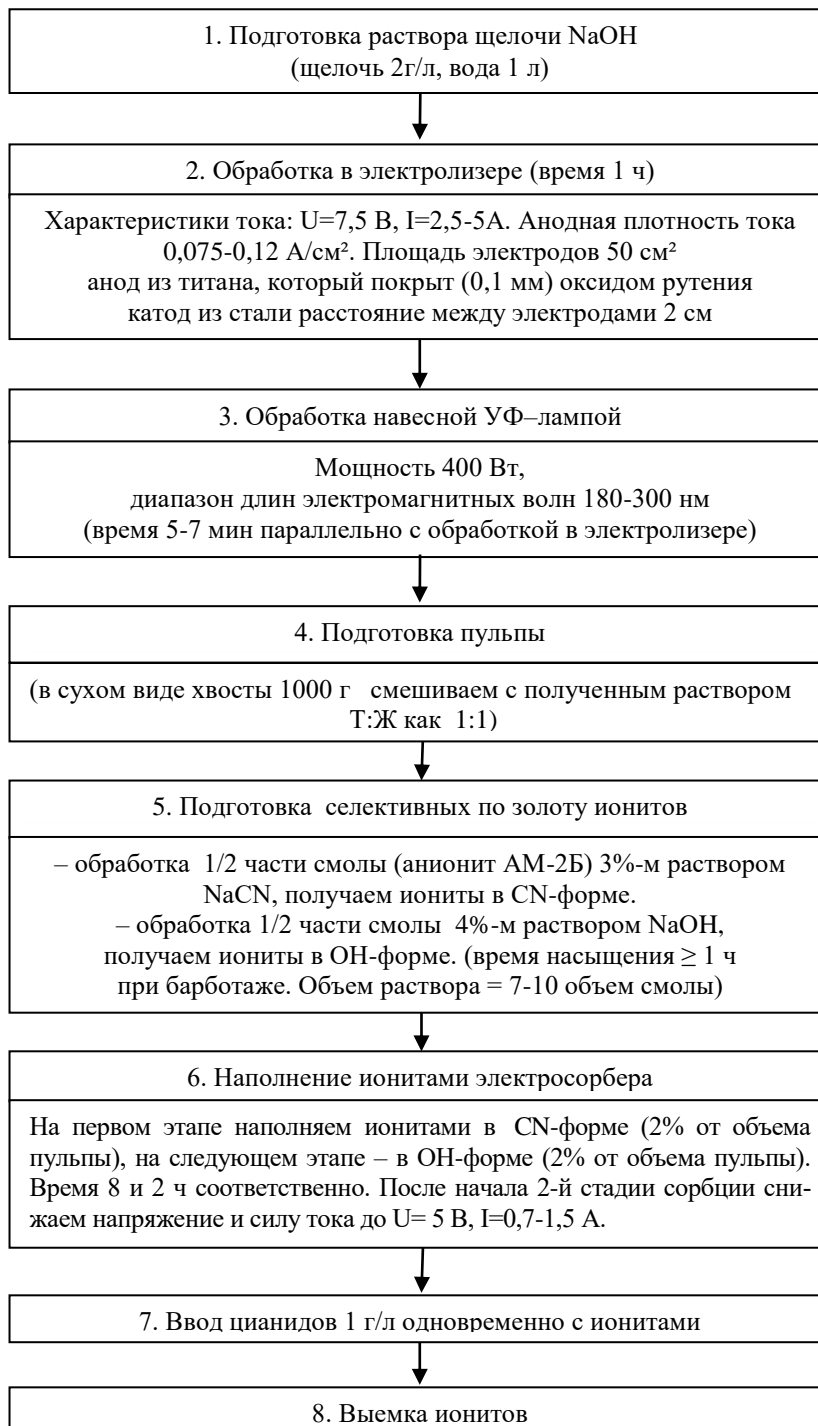


Рис. 3. Инновационная схема фотоэлектрохимической обработки хвостов Дарасунской ЗИФ

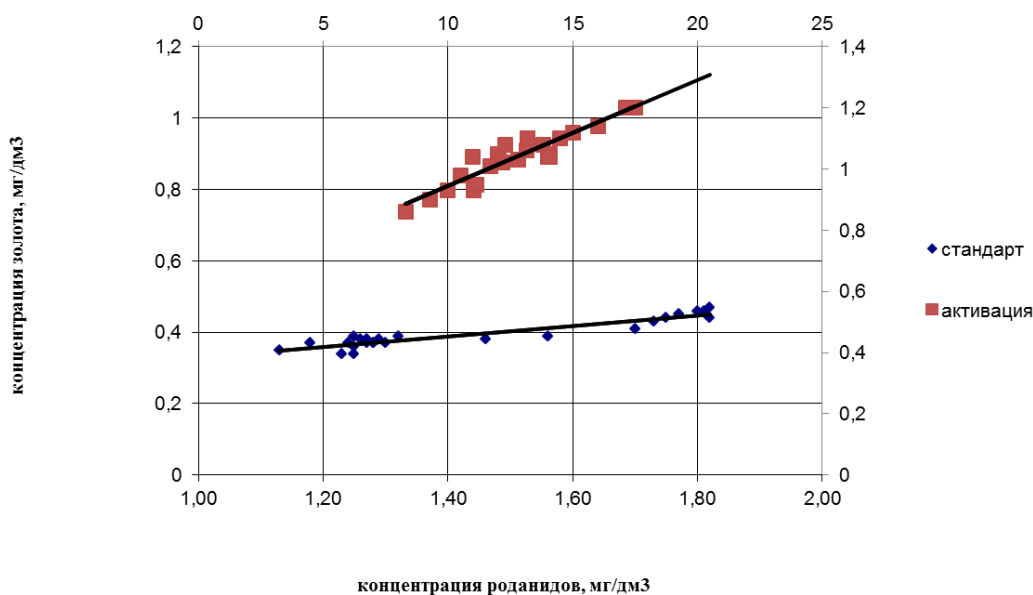


Рис. 4. Зависимости содержания золота от содержания роданидов при стандартном (нижняя линия) и активационном (верхняя линия) доизвлечении

При активационном доизвлечении получена следующая зависимость:  $C_{Au} = 0,0347 C_{CN} + 0,5972$ , при этом  $R^2 = 0,8631 = 0,9$ , что соответствует высокой точности. Чем ближе значение коэффициента корреляции к 1, тем больше коррелирует содержание роданидов с содержанием золота [10].

Полученные зависимости указывают на преимущество электрообработки перед стандартной схемой доизвлечения с применением цианид-ионов и раствора щелочи  $Ca(OH)_2$  без электрического воздействия и ультрафиолетового облучения. Выявлено, что уровень извлечения коллоидного золота непосредственно определяется способом проведения обработки. Установлено, что фотоэлектрохимическая обработка влияет на вещественно-структурные параметры матрицы сульфидных минералов, в частности изменяет элементный состав и кристалло-морфические параметры решетки, а электрообработка усиливает эффект, что сопровождается существенным увеличением концентрации роданидов и золота. Появление данных соединений и элементов в жидкой фазе указывает на возможную миграцию именно в этой форме [10].

#### Заключение

В работе доказано, что наиболее эффективным методом повышения извлечения полезных компонентов из отходов является комбинация процессов электролиза растворов электролитов в сочетании с электромагнитным излучением в жестком ультрафиолетовом диапазоне – фотоэлектрохимический способ. Извлечение дисперсного золота может быть осуществимо с разработкой нового метода доизвлечения в несколько этапов – включающих предварительное концентрирование и окисление перед довыщелачиванием из отходов горнодобывающего производства.

#### Список источников

1. Филиппова Е.В. Применение ионообменной электросорбции для извлечения коллоидного золота // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т.15. № 1. С. 15-19.
2. Лавров А.Ю. Повышение эффективности освоения рудных месторождений на основе использования инновационных геотехнологий с фотоэлектрохимической активацией компонентов технологических систем // Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. № 2. С. 31-37.
3. Sekisov A.G., Panov Yu.P., Bryukhovetskiy O.S. Ras-skazova A.V. Promising Geotechnologies for gold placer mining in eastern Transbaikalia // Eurasian mining. 2022. № 2. С. 34-37.
4. Пат. 2541320 С1 РФ. Способ очистки газовых выбросов от полициклических ароматических углеводородов, в том числе бенз(а)пирена / М.С. Ивановичий, А.Д. Грига; патентообладатель Национальный исследовательский университет «МЭИ». № 2013156247/04, заявл. 18.12.2013; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 9
5. Рассказова А.В., Секисов А.Г., Галимьянов А.А. Выщелачивание меди с применением комбинированной взрывной и реагентной подготовки рудного массива // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 6. С. 166-175.
6. Лавров А.Ю. Повышение эффективности освоения рудных месторождений на основе использования инновационных геотехнологий с фотоэлектрохимической активацией компонентов технологических систем // Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. № 2 (92). С. 31-37.

7. А.с. 1244122 СССР, МКИ В 03 Д 1/00. Способ получения флотореагента-собирающего / Баранов А.Н., Богйдаев С.А., Леонов С.Б.; опублик. 15.07.86. Бюл. № 26.
8. Сидоров Д.С., Баранов А.Н. Интенсификация выщелачивания цветных металлов с применением электрохимической обработки щелочи // Перспективы развития технологии переработки углеводородных минеральных ресурсов: материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2020. С.51-53.
9. Филиппова Е.В. Разработка и апробация новой экологозащитной геотехнологии на золоторудном предприятии Забайкальского края // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. № 7. С. 172–182.
10. Щадов И.М., Филиппова Е.В. Перспективы применения новой экологозащитной технологии при переработке золотосодержащих техногенных образований // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 12. С. 24-27.

### Сведения об авторах

**Баранов Анатолий Никитич** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии цветных металлов, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Иркутск, Россия. E-mail: a\_baraniow@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5336-6522>

**Филиппова Елена Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отдела оценок, лицензирования и инспекций объектов ядерного топливного цикла Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, Москва. E-mail: filena78@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0872-314X>

---

### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

---

### STUDY OF GOLD RECOVERY USING PHOTOELECTROACTIVATED SOLUTIONS

**Baranov Anatoly N.** – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Metallurgy of Non-ferrous Metals, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. E-mail: a\_baraniow@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5336-6522>

**Filippova Elena V.** – Candidate of Sciences (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Assessments, Licensing and Inspections of Nuclear Fuel Cycle Facilities, Federal Service for Environmental, Industrial and Nuclear Supervision, Moscow. E-mail: filena78@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0872-314X>

**Abstract.** The results of studies of gold dissolution using the photoelectroactivation method are presented. The innovative photoelectrochemical pre-treatment of the alkali solution was carried out in an electrolyzer with a UV lamp installed on top. Electrochemical treatment of the alkali solution lasted 1... 2 hours, UV irradiation – 5... 7 minutes, and at the next stage, cyanides were injected. The use of the obtained active solution increased the content of metastable sulfur compounds in the liquid phase of the pulp, including hydrosulfides and rhodanides. The following dependence was revealed: the more metastable sulfur compounds, the more colloidal gold is released, which is explained by the ability of these compounds to form complexes with gold. The following dependency was obtained during activation retribution:  $CAu = 0.0347 CCNS^- + 0.5972$ , while  $R^2 = 0.8631 = 0.9$ , which corresponds to high accuracy. The obtained dependencies indicate the advantage of electrical treatment over the standard scheme of additional recovery using cyanide ions and  $Ca(OH)_2$  alkali solution without electrical exposure and ultraviolet irradiation. It is revealed that the level of colloidal gold recovery is directly determined by the method of processing.

**Keywords:** gold, cyanidation, oxygen, electrochemistry, current, potential, photochemical treatment, redox potential

---

Ссылка на статью:

Баранов А.Н., Филиппова Е.В. Исследование извлечения золота с применением фотоэлектроактивированных растворов // Теория и технология металлургического производства. 2024. №2(49). С. 4-11.

Baranov A.N., Filippova E.V. Study of gold recovery using photoelectroactivated solutions. *Teoria i tehnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2024, vol. 49, no. 2, pp. 4-11.