



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.2

DOI: [http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346](https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346)



## Исследование двойного электрического слоя при сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли

© В.В. Ёлшин, Ю.Э. Голодков

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

**Резюме:** Цель – изучение механизма сорбции тиокарбамидных комплексов золота активированными углями путем исследования свойств возникающего двойного электрического слоя. Для исследования двойного электрического слоя сорбционной поверхности углей был принят полярокондуктометрический метод, основанный на одновременном использовании поляризационных зависимостей на постоянном токе и кондуктометрических измерений на переменном токе. Показано, что сорбция тиокарбамидных комплексов золота происходит более интенсивно при катодных значениях потенциалов сорбента, а в отрицательной области от 0,05 до 0,2 В зависит от величины адсорбции от потенциала имеет фактически линейный характер. Абсолютное значение сорбции тиокарбамида золота при отрицательном потенциале сорбента 0,2 В совпадает с максимальными значениями тока поляризации по постоянному току и проводимости по переменному току. Электрохимическая реакция восстановления тиокарбамидных соединений приводит к образованию нейтральных молекул тиокарбамида, поэтому, вероятно, наблюдается осаждение золота на поверхности углеродного сорбента в металлическом виде. Нейтрализация активных соединений в двойном электрическом слое создает условия к тому, что к отрицательно заряженной поверхности сорбента активизируется доступ положительно заряженных ионов золота. Для анодной области поляризации сорбента характерны максимальные значения сорбции ионов золота при положительном потенциале 0,2 В, при этом должна быть перезарядка поверхности сорбента, т.к. в этой же области потенциала наблюдается максимальная проводимость по переменному току. Такие условия должны приводить к разрушению плотной части двойного электрического слоя и, следовательно, созданию благоприятных условий для сорбции. На основе проведенных исследований установлено, что на сорбцию тиокарбамидных комплексов золота активированными углями существенное влияние оказывает потенциал сорбента. Использование полярокондуктометрического метода исследования двойного электрического слоя позволяет объяснить особенности сорбции указанного соединения на активированных углях.

**Ключевые слова:** сорбция, активированные угли, тиокарбамидные комплексы золота, двойной электрический слой

**Для цитирования:** Ёлшин В.В., Голодков Ю.Э. Исследование двойного электрического слоя при сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 6. С. 1337–1346. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346>

## Studying electric double layer under sorption of gold on activated carbons from thiocarbamide solutions

Viktor V. Elshin, Yuri E. Golodkov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the article is to research the mechanism of gold-thiocarbamide complex sorption by activated carbons by studying the properties of the resulting electric double layer. The study of the electric double layer of coal sorption surface is conducted using a polar conductometric method based on the simultaneous use of polarization dependences on direct current and conductometric measurements on alternating current. It is shown that the sorption of thiocarbamide complexes of gold occurs more intensively at the cathodic values of sorbent potentials. Dependence of the adsorption value on the potential is actually linear in the negative region from 0.05 to 0.2 V. The absolute value of gold-thiocarbamide sorption at the negative sorbent potential of 0.2 V coincides with the maximum values of the polarization current for direct current and conductivity for alternating current. The electrochemical reduction reaction of thiocarbamide compounds results in the formation of neutral thiocarbamide molecules, it might be the reason for gold deposition in a metallic form on the surface of the carbon sorbent. Neutralization of active compounds in the electric double layer creates conditions for the activation of positively charged gold ions directing to the negatively charged sorbent surface. The anodic region of sorbent polarization is characterized by the maximum values of gold ion sorption at the positive potential of

0.2 V. In this case the sorbent surface should be recharged, since in the same region of the potential the maximum AC conductivity is observed. Such conditions should lead to the destruction of the thick part of the electric double layer and, consequently, create favorable sorption conditions. The conducted studies allowed to derive a conclusion that the sorption of gold-thiocarbamide complexes by activated carbons is significantly influenced by the sorbent potential. The use of the polar conductometric method for studying the electric double layer makes it possible to explain the features of given compound sorption on activated carbons.

**Keywords:** sorption, activated carbons, gold-thiocarbamide complexes, electric double layer

**For citation:** Elshin VV, Golodkov YuE. Studying electric double layer under sorption of gold on activated carbons from thiocarbamide solutions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(6):1337–1346. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-6-1337-1346>

## ВВЕДЕНИЕ

Поиск альтернативных способов выщелачивания золота из различных минеральных продуктов [1], золото-сурьмяных руд [2], упорных медно-золотых руд [3], хвостов флотации руды [4, 5] с помощью тиокарбамидных растворов остается актуальным на протяжении ряда десятилетий. Авторы [6] разработали процесс биоокисления и двухступенчатого выщелачивания тиомочевиной для извлечения золота из тугоплавкого сульфида золото содержащих руд и концентров, что, по их мнению, является более экологичным и эффективным методом, чем цианирование. А в последнее время тиокарбамидное выщелачивание золота предлагается применять для переработки печатных плат отработанных мобильных телефонов [7, 8]. Вопросам сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли также посвящено много работ [9–11].

К параметрам, которые характеризуют строение двойного электрического слоя (ДЭС), относятся емкость и положение точки нулевого заряда, поэтому анализ из влияния на формирование ДЭС, в частности при сорбции благородных металлов активными углями, важен с позиции понимания механизма процесса.

Сложившиеся современные представления об электрохимической природе процесса адсорбции электролитов на активированных углях лежат в основе термодинамической теории [12]. Было показано, что во многих случаях такое представление двойного электрического слоя имеет ряд преимуществ пе-

ред теорией Штерна<sup>1</sup> и позволяет полнее раскрывать экспериментальные данные. Поэтому рассмотрение строения границы двойного электрического слоя должно основываться, прежде всего, на этой теории.

При равновесном протекании процесса подаваемое к электроду количество электричества ( $Q - Q_0$ ) расходуется на изменение заряда двойного электрического слоя ( $q - q_0$ ) и поверхностной концентрации адсорбированного газа  $i$  ( $F_{Ai} - F_{Ai}^0$ ), определяется по формуле (1):

$$\Delta Q = Q - Q_0 = (q - q_0) + (F_{Ai} - F_{Ai}^0). \quad (1)$$

Применимость такого соотношения для описания состояния поверхности электрода на границе с электролитом была экспериментально подтверждена на примере активированных углей [13].

Для случая адсорбции кислорода уравнение Гиббса имеет следующий вид<sup>2</sup>:

$$\Delta G = -\Gamma_o \cdot \partial \mu_o - \Gamma_o^- \cdot \partial \mu_o^-,$$

где  $\Gamma_o$  и  $\Gamma_o^-$  – величины адсорбции атомов и ионов кислорода Гиббса, а  $\mu_o$  и  $\mu_o^-$  – их химические потенциалы.

Из выражения (1), учитывая, что

$$\partial F_r = -\frac{\partial \mu_o}{F},$$

получим

<sup>1</sup>Антропов Л.И. Теоретическая электрохимия. М.: Высш. шк., 1969. 512 с.

<sup>2</sup>Дамаскин Б.Б., Петрий О.А. Введение в электрохимическую кинетику. М.: Высш. шк.. 1983. 400 с.

$$\partial G = -Q \cdot \partial F_r - \frac{q}{F} \cdot \partial \mu_o^-.$$

Величина  $\left( \frac{\partial Q}{\partial F_r} \right) \cdot \mu_o^-$  представляет собой общую поляризационную емкость электрода ( $C_{\text{пол}}$ ), а величина  $\left( \frac{\partial q}{\partial F_r} \right) \cdot \mu_o^-$  – емкость двойного электрического слоя ( $C_{\partial.c}$ ). Значение  $C_{\text{пол}}$  может быть определено по наклону кривой заряжения. Поскольку

$$C_{\partial.c} = \frac{C_{\text{пол}} \cdot F}{2,3RT} \cdot \left( \frac{\partial F_r}{\partial pH} \right)_Q,$$

то можно рассчитать значение  $C_{\partial.c}$ , зная величину  $\left( \frac{\partial F_r}{\partial pH} \right)_Q$ , называемую изоэлектрическим сдвигом потенциала. Она может быть найдена экспериментально, если использовать раствор с другой величиной pH.

Для практических целей при измерении емкости двойного электрического слоя, принимая в первом приближении его в виде конденсатора, часто прибегают к соотношению:

$$U = R \cdot I + \frac{1}{C_{\partial.c}} \int I \cdot \partial t,$$

где  $U$  – напряжение цепи;  $I$  – сила тока;  $R$  – сопротивление цепи;  $C_{\partial.c}$  – емкость двойного слоя исследуемого электрода;  $t$  – время.

Таким образом, предполагая, что процесс сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли основывается на электрохимической природе адсорбционных сил, исследование электрохимических взаимодействий на границе раздела твердой и жидкой фазы на поверхности сорбента представляется вполне актуальным и перспективным научным направлением.

Цель исследования заключается в изучении механизма сорбции золота на активированные угли из тиокарбамидных растворов

путем исследования свойств возникающего двойного электрического слоя.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования двойного электрического слоя был предложен полярокондуктометрический (ПК) метод, который основан на одновременном использовании поляризационных зависимостей на постоянном токе и кондуктометрических измерений на переменном токе. Разработке данной методики исследований, включая аппаратурное оснащение, посвящен ряд авторских работ [14, 15].

Структурная схема установки, реализующая ПК-метод измерения параметров двойного слоя, приведена на рис. 1.

Принцип действия ПК-метода основан на следующем: рабочие электроды (РЭ) РЭ<sub>1</sub> и РЭ<sub>2</sub>, изготовленные из исследуемого сорбента (ИПИ-Т) [16, 17], одинакового размера (1x2 мм) подключаются к источникам постоянного и переменного напряжения (ИППН) через согласующий трансформатор Тр. ИППН задает потенциал РЭ<sub>1</sub> и РЭ<sub>2</sub> относительно вспомогательного электрода (ВЭ) через среднюю точку выходной обмотки согласующего трансформатора Тр. Так как рабочие электроды выполнены из одного и того же материала и имеют примерно одинаковые размеры, то по постоянному току они будут иметь один и тот же потенциал и, следовательно, одинаковое строение двойного слоя у поверхности рабочих электродов. По переменному току – это разные электроды, так как подключены к концам выходной обмотки согласующего трансформатора. Таким образом, поляризация постоянным током, задавая потенциал рабочим электродом, формирует двойной слой на них, а поляризация переменным током позволяет судить о строении двойного слоя, так как при прочих равных условиях (материал электродов, их потенциал, состав раствора и его температура) величина переменного тока будет зависеть от строения двойного слоя на рабочих электродах. При изменении потенциала рабочих электродов меняется строение двойного слоя и, естественно, величина переменного тока между рабочими электродами.

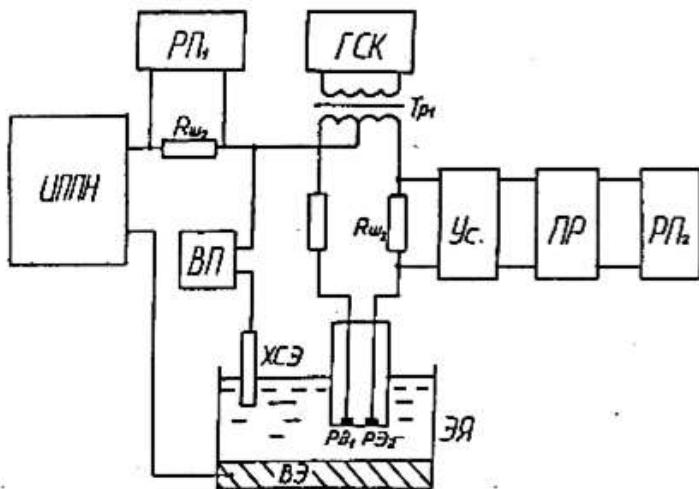


Рис. 1. Структурная схема полярокондуктометрической установки: ИПН – источник постоянного поляризующего напряжения; ГСК – генератор синусоидального напряжения; РП<sub>1</sub> – регистрирующий прибор для записи поляризационной зависимости (в координатах  $\tilde{I}$  –  $\phi_{пост.тока}$ ); РП<sub>2</sub> – регистрирующий прибор для записи кондуктограммы (в координатах  $\tilde{I}$  –  $\phi_{пост.тока}$ ); Тр<sub>1</sub> – согласующий трансформатор; Rш<sub>1,2</sub> – калибранные сопротивления; Ус – усилитель переменного тока; Пр – преобразователь сигнала,  $\tilde{I}$ ; ВП – высокоомный вольтметр для измерения потенциала рабочих электродов по постоянному току; ХСЭ – хлор-серебряный электрод сравнения; РЭ<sub>1</sub> и РЭ<sub>2</sub> – рабочие электроды из исследуемого активированного угля; ВЭ – вспомогательный электрод из импрегнированного графита; ЭЯ – электролитическая ячейка

Fig. 1. Structural diagram of a polar conductometric setup: ИПН – source of constant polarizing voltage;

ГСК – sinusoidal voltage generator; РП<sub>1</sub> – device recording polarization dependence (in  $\tilde{I}$  –  $\phi_{dc}$  current coordinates); РП<sub>2</sub> – device recording a conductogram (in  $\tilde{I}$  –  $\phi_{dc}$  current coordinates); Тр<sub>1</sub> – matching transformer; Rш<sub>1,2</sub> – calibrated resistances; Ус – AC amplifier; Пр – signal converter,  $\tilde{I}$ ; ВП – high-resistance voltmeter for measuring the potential of working electrodes for direct current; ХСЭ – silver chloride reference electrode; РЭ<sub>1</sub> and РЭ<sub>2</sub> – working electrodes from the activated carbon under investigation; ВЭ – auxiliary electrode made of impregnated graphite; ЭЯ – electrolytic cell

Постоянный ток поляризации, протекая по калиброванному сопротивлению Rш<sub>1</sub>, создает на нем падение напряжения, которое фиксируется регистрирующим прибором РП<sub>1</sub>. Переменный ток, протекая по сопротивлению Rш<sub>2</sub>, создает на нем падение напряжения, которое усиливается усилителем, преобразуется преобразователем и регистрируется прибором РП<sub>2</sub>.

ИПН способен изменять потенциалы рабочих электродов в пределах от +2 до -2 В как в стационарном, так и в динамическом режимах в диапазоне скоростей 0,1–1,0 В/мин.

Генератор синусоидальных колебаний обеспечивает питание рабочих электродов переменным током в пределах 5–50 мВ в диапазоне частот от 20 Гц до 20 кГц.

РЭ<sub>1</sub> и РЭ<sub>2</sub> из активного угля ИПИ-Т готовили следующим образом: относительно

крупные образцы сорбента обрабатывали до размеров 3×3 мм (2 шт); один из торцов электродов омеднялся и к нему припаивали вывод; электроды вставляли в торцевую часть корпуса на расстоянии 3–4 мм друг от друга и заливали эпоксидной смолой таким образом, чтобы из эпоксидной заливки выступала только плоскость электродов.

Электролитическая ячейка была выполнена из стекла объемом 250 мл. В донную часть стакана помещали вспомогательный электрод (ВЭ) размером 16–20 см<sup>2</sup> из импрегнированного графита, залитого до верхней торцевой плоскости эпоксидной смолой для изоляции вывода. Ячейку термостатировали.

Полярокондуктометр настраивали на следующие параметры:

– диапазон поляризации рабочих электродов постоянным током в катодную и анодную области поляризации от -1 до +1 В;

- частота переменного тока 1000 Гц;
- амплитуда переменного тока на рабочих электродах 50 мВ;
- скорость развертки поляризующего напряжения 0,2 В/мин;
- температура растворов 20°С.

После настройки полярокондуктометр включали в работу и снимали пять последовательных полярокондуктометрических кривых по данным регистрирующих приборов (РП) РП<sub>1</sub> и РП<sub>2</sub>. Далее строили графики зависимостей постоянного и переменного токов от потенциала рабочих электродов. Кроме этого, на данные графики наносили зависимость сорбции соответствующих ионов благородных металлов от потенциала поляризации. Такое совмещение графиков позволяет, по мнению авторов, прояснить зависимость сорбции благородных металлов из того или иного солевого раствора от условий формирования двойного электрического слоя и реакций, протекающих на поверхности рабочих электродах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования сорбции ионов золота из тиокарбамидных растворов применяли следующий состав растворов: концентрация тиомочевины – 7%; концентрация золота  $[Au(Thio)_2]^+$  – 100 мг/дм<sup>3</sup>; pH = 1.

Результаты исследований приведены на рис. 2.

Кривая 5 представляет процесс сорбции ионов золота в тиокарбамидном растворе на электродах из активированного угля в зависимости от потенциала этого электрода. Данный график указывает на большую чувствительность сорбции ионов золота к потенциальному электрода. Так, в районе потенциала от -0,2 до -0,25 В можно отметить первый пик сорбции (увеличение сорбции на 50% по отношению к минимуму сорбции). Второй пик увеличения сорбции ионов золота наблюдается в районе потенциала +0,2 ÷ +0,25 В (увеличение на 25% от минимума). Сравнивая кривую сорбции золота с поляризацион-

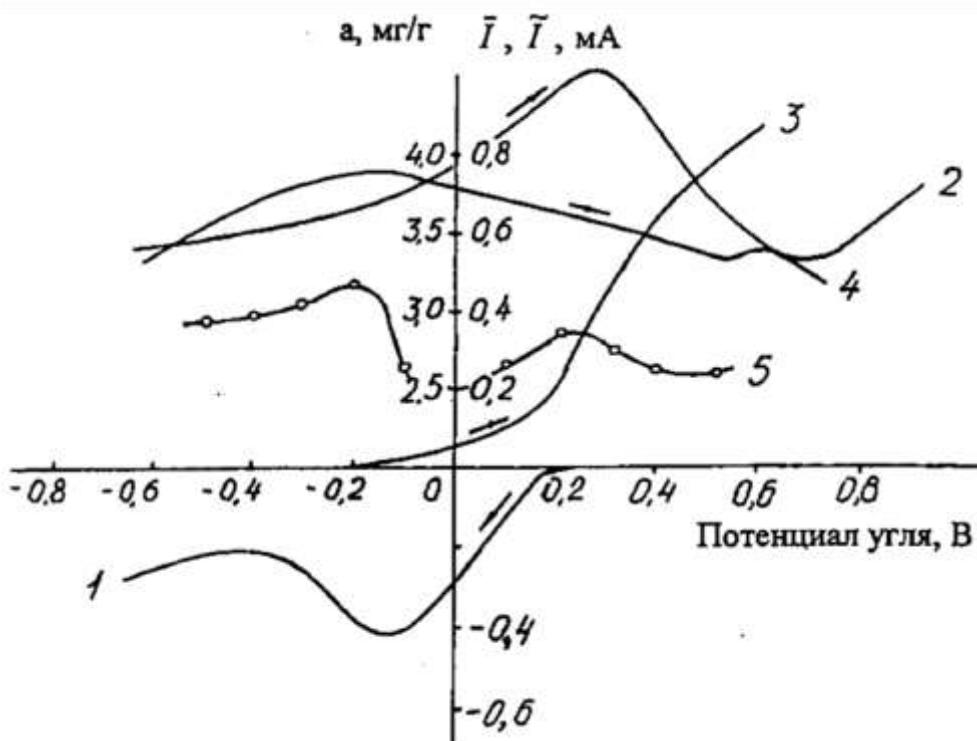
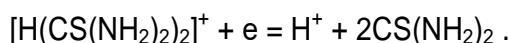
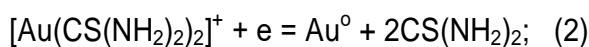


Рис. 2. Потенциодинамические кривые изменения постоянного (1, 3) и переменного (2, 4) токов и зависимость сорбции ионов  $[Au(Thio)_2]^+$  (5) от потенциала активированного угля (стрелки на кривых указывают направление изменения потенциала)

Fig. 2. Potentiodynamic curves of constant (1, 3) and alternating (2, 4) current variation and the dependence of ion sorption  $[Au(Thio)_2]^+$  (5) on the potential of active carbon (arrows on the curves indicate the direction of potential change)

ными кривыми (кривые 1 и 3) и с кривыми проводимости по переменному току (кривые 2 и 4), можно отметить следующие закономерности: поляризационная кривая 1 показывает, что по мере сдвига от потенциала рабочих электродов +0,2 В в катодную область имеют место процессы восстановления. С потенциала рабочих электродов -0,15 В начинаются диффузионные ограничения тока восстановления, то есть устанавливается предельный ток, который сохраняется вплоть до потенциала -0,8 В. Это говорит о том, что в кислых растворах тиомочевины ( $\text{pH} \leq 1$ ) имеется значительное количество катионных комплексов  $[\text{H}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)_2]^+$  (учитывая величину предельного тока), которые при восстановлении обеспечивают протекание тока рабочих электродов в катодной области потенциалов. С учетом того, что определяющим состав раствора являются соединения тиокарбамида, реакцию восстановления [18–20] на рабочих электродах можно записать в следующем виде (2):

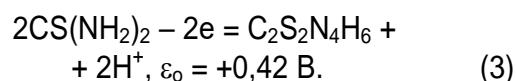


Стандартный потенциал реакции (2) равен +0,38 В, что хорошо согласуется с потенциалом восстановления ионов золота (см. рис. 2, кривую 1) в катодной области потенциалов (+0,18 В относительно электрода сравнения – хлорсеребряного электрода, наполненного насыщенным раствором KCl (НХСЭ)).

В приэлектродном слое рабочих электродов в результате реакции растет концентрация нейтральных молекул тиокарбамида, что должно отразиться на строении двойного слоя и на сорбционных свойствах угля. Действительно, если рассмотреть график изменения переменного тока (кривая 2) в цепи рабочих электродов, который характеризует проводимость границы электрод-электролит, то можно увидеть, что в области предельного тока поляризации (кривая 1) наблюдается пик проводимости, совпадающий с пиком сорбции (см. кривую 5) и пиком предельного тока (см. кривую 1) поляризационной кривой.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что пик сорбции ионов золота в катодной области поляризации сорбента в границах потенциалов -0,1 ÷ -0,25 В относительно НХСЭ обусловлен принудительной перестройкой жидкостной обкладки двойного слоя за счет электрохимической реакции восстановления иона тиокарбамида, что приводит к появлению дополнительной движущей силы сорбции ионов золота через новый двойной слой на поверхность сорбента.

Поляризация рабочих электродов в анодную область потенциала показывает на поляризационной кривой значительный рост тока (см. кривую 3) без установления его предельного значения вплоть до потенциала +0,8 В. Такое поведение поляризационного тока можно объяснить окислением на поверхности рабочих электродов основной составляющей раствора, а именно – молекул тиокарбамида по уравнению (3):



Особенностью реакции (3) на кривой поляризации является большое перенапряжение. Начало реакции окисления приходится на потенциал -0,22 В с незначительным ростом тока окисления – вплоть до потенциала +0,2 В, после чего отмечается значительный его рост в результате интенсивного образования дисульфида, являющегося продуктом окисления тиокарбамида. В этой области потенциалов разряд других ионов или молекул, в частности при разложении воды, маловероятен, так как среда имеет достаточно кислый характер ( $\text{pH} = 1$ ).

Изменение величины переменного тока между рабочими электродами с ростом потенциала в анодную область имеет также ряд особенностей (см. кривую 4). С началом роста постоянного тока проводимость границы электрод-электролит также возрастает. Рост проводимости продолжается до потенциала +0,3 В, после чего начинает резко уменьшаться. Такое поведение проводимости границы электрод-электролит можно объяснить тем, что с началом реакции окисления тиокарбамида двойной слой у поверх-

ности углеродного сорбента начинает перестраиваться. В границах двойного слоя нейтральные молекулы тиокарбамида заменяются на анионы, причем с учетом знака заряда аниона можно предположить, что до потенциала +0,3 В (относительно НХСЭ) заряд поверхности сорбента отрицателен. При потенциале +0,3 В заряд поверхности угольного сорбента, предположительно, переходит через нулевую точку, а затем приобретает положительную величину. В этой ситуации по мере роста потенциала рабочих электродов положительно заряженные ионы тиокарбамида вначале втягиваются в пределы двойного слоя, что обеспечивает увеличение проводимости по переменному току, а после прохождения точки нулевого заряда (+0,3 В относительно НХСЭ), наоборот, начинают выдавливаться за пределы двойного слоя, что ведет к снижению проводимости по переменному току.

Рассматривая характер сорбции тиокарбамида золота в анодной области поляризации сорбента, можно указать следующие особенности:

- при равном нулю потенциале относительно НХСЭ наблюдается минимум сорбции;
- с ростом потенциала сорбента от 0,0 до +0,2 В отмечается рост сорбции ионов золота, достигая максимума в диапазоне +0,2 ÷ +0,3 В;
- после потенциала +0,3 В начинается резкий спад сорбционной активности;
- величина пика сорбции в анодной области поляризации сорбента меньше пика сорбции в его катодной области.

Особенности сорбции тиокарбамидных комплексов золота в анодной области потенциалов с учетом изменения постоянного и переменного токов рабочих электродов можно объяснить следующим образом:

- при потенциале сорбента около ±0,0 В ток окисления молекул тиокарбамида очень мал, следовательно, продуктов окисления немного, что, вероятно, не способствует росту сорбции;
- с ростом тока окисления в двойном слое увеличивается количество продуктов окисления, а так как поверхность сорбента имеет отрицательный заряд ( $\varphi_{ct} = -0,3$  В), что подтверждает рост проводимости по перемен-

ному току, то создаются условия для роста сорбции ионов  $[Au(CS(NH_2)_2)_2]^+$ ;

– в области потенциалов сорбента +0,25 ÷ +0,3 В рост постоянного тока продолжается, следовательно, накапливаются и продукты реакции окисления, но ввиду перезарядки поверхности сорбента (проводимость по переменному току начинает падать) условия сорбции ионов  $[Au(CS(NH_2)_2)_2]^+$  ухудшаются вследствие выдавливания положительно заряженных ионов от поверхности сорбента.

Таким образом, пик сорбции ионов  $[Au(Thio)_2]^+$  в анодной области потенциалов сорбента приходится на диапазон +0,2 ÷ +0,3 В.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены результаты исследования влияния потенциала сорбента на сорбцию тиокарбамида золота в растворах тиомочевины. Использование полярокондуктометрического метода исследования двойного электрического слоя позволяет объяснить особенности сорбции указанных комплексов на активированных углях и наметить пути интенсификации процесса в практических условиях.

Показано, что сорбция  $[Au(Thio)_2]^+$  происходит более интенсивно при катодных значениях потенциалов сорбента, а в отрицательной области от 0,05 до 0,2 В зависимость величины адсорбции от потенциала имеет фактически линейный характер. Наибольшие значения сорбции тиокарбамида золота наблюдаются при отрицательном потенциале 0,2 В. При этом значении потенциала имеют максимальные значения предельный ток поляризации по постоянному току и проводимость по переменному току. Поэтому электрохимическая реакция восстановления тиокарбамидных соединений способствует нейтрализации молекул тиокарбамида и приводит к вероятному осаждению золота на поверхности углеродного сорбента в металлическом виде. Нейтрализация активных соединений в двойном электрическом слое создает условия к тому, что к отрицательно заряженной поверхности сорбента активизируется доступ положительно заряженных ионов золота и, как следствие, приводит к росту

массопереноса целевых компонентов. Для анодной области поляризации сорбента характерны максимальные значения сорбции ионов золота при положительном потенциале 0,2 В, при этом должна быть перезарядка поверхности сорбента, т.к. в этой же области потенциала наблюдается максимальная проводимость по переменному току. Такие условия должны приводить к разрушению плотной части двойного электрического слоя и, следовательно, созданию благоприятных

условий для сорбции.

Полученные результаты исследования электрохимической природы сорбции золота из тиокарбамидных растворов на активированные угли раскрывают практические возможности интенсификации технологии сорбционного извлечения благородных металлов с помощью поляризационных воздействий на поверхность сорбента, поддерживая максимальные значения адсорбции тиокарбамида золота на протяжении всего процесса.

### Список литературы

1. Barbosa-Filho O., Monhemius A.J. Thermochemistry of thiocyanate systems for leaching gold and silver ores // Precious Metals – 89: Proceedings of the Intern. Symposium «The Minerals, Metals and Materials Society» (Las-Vegas, 27 February – 2 March 1989). Warrendale, 1989. P. 307–339.
2. Reuter M.A. Gold Hydrometallurgy: theory and practice // Gold Bulletin Great Britain. 1999. No. 1. P. 36.
3. Джунушалиева Т.Ш., Борбиеva Д.Б. Тиокарбамидное выщелачивание золота из упорных медно-золотых руд месторождения Долпран (КР) // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Рazzакова. 2015. № 3. С. 240–243.
4. Зинченко З.А., Тюмин И.А. Исследования по извлечению золота из хвостов флотации руды нижних горизонтов Джиджикруского месторождения тиомочевиной // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. № 10. С. 796–800.
5. Самихов Ш.Р., Зинченко З.А., Бобомуродов О.М. Изучение условий и разработка технологии тиомочевинного выщелачивания золота и серебра из руды месторождения Чоре // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2013. Т. 56. № 4. С. 318–324.
6. Yujie Guo, Xue Guo, Haiyan Wu. A novel bio-oxidation and two-step thiourea leaching method applied to a refractory gold concentrate // Hydrometallurgy. 2017. Vol. 171. № 4. P. 213–221.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.05.023>
7. Li Jing-ying, Xu Xiu-li, Liu Wen-quan. Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones // Waste Management. 2012. Vol. 32. Issue 6. P. 1209–1212.
8. Manju G., Birendra B.A., Hidetaka K., Shafiq A. Recovery of gold and silver from spent mobile phones by means of acidothiourea leaching followed by adsorption using biosorbent prepared from persimmon tannin // Hydrometallurgy. 2013. Vol. 133. P. 84–93.
9. Zhang Hongguang, Ritchie I.M., La Brooy S. The adsorption of gold thiourea complex onto activated carbon // Hydrometallurgy. 2004. Vol. 72. No. 3-4. P. 291–301.  
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00182-8](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00182-8)
10. Войлошников Г.И., Войлошникова Н.С, Григорьева И.И, Бывальцев А.В. Сорбция золота активными углями из нецианистых растворителей и десорбция золота из насыщенного угля // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 7. С. 138–143.
11. Ларионов В.Р., Федосеев С.М. Сорбция золота из тиомочевинных растворов // Обогащение руд. 2003. № 6. С. 10–12.
12. Таракевич М.Р. Электрохимия углеродных материалов. М.: Наука. 1984. 253 с.
13. Пономаренко Е.А., Фрумкин А.Н., Бурштейн Р.Х. Хемосорбция кислорода и адсорбция электролитов на активированном угле // Доклады АН СССР. 1963. Т. 149. № 5. С. 1123–1126.
14. Ёлшин В.В., Голодков Ю.Э., Богидаев С.А. Электрохимические исследования механизма сорбции золота и серебра активными углями // Цветные металлы. 2005. № 4. С. 32–35.
15. Ёлшин В.В., Голодков Ю.Э., Тюрин Н.Г. Электрохимические взаимодействия при сорбции комплексных соединений золота и серебра активными углями // Цветные металлы. 1994. № 3. С. 25–27.
16. Дударев В.И., Ёлшин В.В., Озnobихин Л.М. Получение и исследование углеродных сорбентов с развитой пористой структурой // Журнал прикладной химии. 1999. Т. 72. Вып. 2. С. 319–321.
17. Помазкина О.И., Филатова Е.Г., Дударев В.И., Дударева О.В. Сорбция ионов железа(II) углеродными сорбентами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 2. С. 156–158.
18. Бобоев И.Р., Сельницын Р.С., Холиков Т.А., Шарипов Б.К. Технология извлечения золота тиомочевин-

ным выщелачиванием из лежальных отвалов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2020. № 2. С. 4–13.  
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-4-13>

19. Барченков В. В. Опыт тиокарбамидного выщелачивания золотосодержащего концентрата // Золотодобыча [Электронный ресурс]. URL:

<https://zolotodb.ru/article/12345> (22.08.2020).

20. Радомская В.И., Радомский С.М., Павлова Л.М. Условия применения технологий тиокарбамидного выщелачивания золота и серебра // Георесурсы. 2013. № 5(55). С. 22–27. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.55.5.6>

### References

1. Barbosa-Filho O, Monhemius AJ. Thermochemistry of thiocyanate systems for leaching gold and silver ores. In: *Precious Metals – 89: Proceedings of the Intern. Symposium “The Minerals, Metals and Materials Society”*. 27 February – 2 March 1989, Las-Vegas. Warrendale; 1989, p. 307–339.
2. Reuter MA. Gold hydrometallurgy: theory and practice. *Gold Bulletin Great Britain*. 1999;36.
3. Djunushalieva TCh, Borbivea DB. The thiocarbamide gold extraction from the refractory copper-gold ores of the Dolplan (KR). *Izvestiya Kyrgyzskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni I. Razzakova = KSTU NEWS*. 2015;36:240–243. (In Russ.)
4. Zinchenko ZA, Tyumin IA. Researches of gold extraction from flotation tailings of Djijicrut deposit narrow level by thiourea. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*. 2013;56(10):796–800. (In Russ.)
5. Samikhov ShR, Zinchenko ZA, Bobomurodov OM. Study of the leaching technology conditions gold and silver by thiourea from ores of Chore deposit. *Doklady Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan = Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*. 2013;56(4):318–324. (In Russ.)
6. Yujie Guo, Xue Guo, Haiyan Wu. A novel bio-oxidation and two-step thiourea leaching method applied to a refractory gold concentrate. *Hydrometallurgy*. 2017;171(4):213–221. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.05.023>
7. Li Jing-ying, Xu Xiu-li, Liu Wen-quan. Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones. *Waste Management*. 2012;32(6):1209–1212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.01.026>
8. Manju G, Birendra BA, Hidetaka K, Shafiq A. Recovery of gold and silver from spent mobile phones by means of acidothiourea leaching followed by adsorption using biosorbent prepared from persimmon tannin. *Hydrometallurgy*. 2013;133:84–93.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.12.003>
9. Zhang Hongguang, Ritchie IM, La Brooy S. The adsorption of gold thiourea complex onto activated carbon. *Hydrometallurgy*. 2004;72(3-4):291–301.  
[https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00182-8](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00182-8)
10. Voiloshnikov GI, Voiloshnikova NS, Grigorieva II, Byvaltsev AV. Sorption of gold by activated carbons from noncyanic solvents and desorption of gold from saturated coal. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceeding of Irkutsk State Technical University*. 2010;7:138–143. (In Russ.)
11. Larionov VR, Fedoseev SM. Sorption of gold from thiourea solutions. *Obogashchenie rud*. 2003;6:10–12. (In Russ.)
12. Tarasevich MR. Electrochemistry of carbon materials. Moscow: Nauka; 1984, 253 p. (In Russ.)
13. Ponomarenko EA, Frumkin AN, Burshtein RKh. Chemisorption of oxygen and adsorption of electrolytes on activated charcoal. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1963;149(5):1123–1126. (In Russ.)
14. Elshin VV, Golodkov YuE, Bogidaev SA. Electrochemical studies of the sorption mechanism of gold and silver by active carbons. *Tsvetnye Metally*. 2005;4:32–35. (In Russ.)
15. Elshin VV, Golodkov YuE, Tyurin NG. Electrochemical interactions under the sorption of complex compounds of gold and silver by active carbons. *Tsvetnye Metally*. 1994;3:25–27. (In Russ.)
16. Dudarev VI, Elshin VV, Oznobikhin JIM. Preparation and study of carbon sorbents with a developed porous structure. *Zhurnal Prikladnoi Khimii = Journal of Applied Chemistry*. 1999;72(2):319–321. (In Russ.)
17. Pomazkina Ol, Filatova EG, Dudarev VI, Dudareva OV. Sorption of iron (II) ions by carbon sorbents. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceeding of Irkutsk State Technical University*. 2011;2:156–158. (In Russ.)
18. Boboev IR, Selnitsin RS, Kholikov TA, Sharipov BK. Technology of gold extraction from mature tailings by thiourea leaching. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy*. 2020;(2):4–13. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-2-4-13>
19. Barchenkov VV. Experience of thiocarbamide leaching of gold-bearing concentrate. Zolotodobycha. Available from: <https://zolotodb.ru/article/12345> [Accessed 22nd August 2020]. (In Russ.)
20. Radomskaya VI, Radomskii SM, Pavlova LM. Terms of technologies application of thiourea leaching of gold and silver. *Georesursy*. 2013;5(55):22–27. (In Russ.) <http://dx.doi.org/10.18599/grs.55.5.6>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ёлшин Виктор Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой автоматизации и управления,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
e-mail: dean\_zvf@istu.edu

**Голодков Юрий Эдуардович,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры автоматизации и управления,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия;  
✉ e-mail: yrg27@mail.ru

**Заявленный вклад авторов**  
Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Конфликт интересов**  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**  
Статья поступила в редакцию 10.11.2020; одобрена после рецензирования 30.11.2020; принята к публикации 21.12.2020.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Viktor V. Elshin,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Automation and Management,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
e-mail: dean\_zvf@istu.edu

**Yuri E. Golodkov,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Automation  
and Management,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia;  
✉ e-mail: yrg27@mail.ru

**Contribution of the authors**  
The authors contributed equally to this article.

**Conflict of interests**  
The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Information about the article**  
The article was submitted 10.11.2020; approved after reviewing 30.11.2020; accepted for publication 21.12.2020.