



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 544.653.2:547.1-32-304.2

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3664>

**Кинетические закономерности электрохимического окисления аниона метионина на платинированной платине**

**Е. В. Бобринская**✉, **А. В. Введенский**, **Е. Ю. Шереметова**, **А. И. Фролова**

Воронежский государственный университет,  
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

**Аннотация**

Целью данной работы являлось установление кинетических закономерностей процесса анодного окисления аниона метионина на платинированном платиновом электроде.

Экспериментальные данные получены с использованием методов циклической вольтамперометрии, кулонометрии, электрохимической импедансной спектроскопии и спектрофотометрии. Процесс электроокисления аниона метионина проводили на платинированном платиновом электроде в аэрированном и деаэрированном водном растворе при комнатной температуре. Результаты вольтамперометрических измерений корректировали на предельный ток восстановления кислорода и ток заряжения двойного электрического слоя.

Установлена область потенциалов электрохимической активности аниона метионина на Pt(Pt)-электроде, количество электронов, участвующих в анодном процессе, предложена его кинетическая схема. Основной продукт электроокисления метионина в щелочной среде на Pt(Pt) – анион метионинсульфоксида. Показано, что электроокисление аниона метионина на Pt(Pt) осуществляется из адсорбированного состояния и является необратимым.

**Ключевые слова:** аминокислота, метионин, платина, вольтамперометрия, электроокисление, анодный процесс

**Для цитирования:** Бобринская Е. В., Введенский А. В., Шереметова Е. Ю., Фролова А. И. Кинетические закономерности электрохимического окисления аниона метионина на платинированной платине. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 459–467. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3664>

**For citation:** Bobrinskaya E. V., Vvedenskii A. V., Sheremetova E. Yu., Frolova A. I. Kinetic regularities of electrochemical oxidation of the methionine anion on platinated platinum. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(4): 459–467. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3664>

✉ Бобринская Елена Валерьевна, [elena173.68@mail.ru](mailto:elena173.68@mail.ru)

© Бобринская Е. В., Введенский А. В., Шереметова Е. Ю., Фролова А. И., 2021.



## 1. Введение

На протяжении многих лет особое внимание уделяется методам извлечения платиновых металлов из рудообразующих минералов. В частности для этой цели широко используют биотехнологические методы, основанные на растворении платиноидов продуктами метаболизма гетеротрофных металлофильных микроорганизмов – аминокислотами и пептидами [1, 2]. Следует отметить, что аминокислоты являются перспективными растворителями в процессе микробиологического выщелачивания золотосодержащего сырья; не исключено, что, то же характерно и для платины. Последнее обуславливает необходимость более детального изучения процесса взаимодействия платины с белковыми остатками (в частности, с аминокислотами и короткими пептидами), а также выяснение принципиальной возможности использования веществ белковой природы в качестве растворителей платины. В частности известно, что некоторые аминокислоты влияют на анодное растворение платины, ускоряя или замедляя его, но, кроме того, в анодном процессе может окисляться и сама аминокислота. Соответственно важно учитывать не только непосредственно анодное поведение платины в щелочных растворах, но и детализировать процессы, происходящие с аминокислотой.

Как правило, при исследовании процессов электроокисления и адсорбции различных аминокислот на платиновом электроде прежде всего изучается роль двух функциональных групп:  $-\text{NH}_2$  и  $-\text{COOH}$  [3–12]. Меньше информации имеется об электрохимической и адсорбционной активности аминокислот, содержащих и другие функциональные группы, например,  $-\text{OH}$  или  $-\text{S}-\text{CH}$  [13–21]. С другой стороны, в работах [15, 19, 21] показано, что наличие  $-\text{S}-\text{CH}$  группы в молекуле метионина влияет на закономерности его адсорбционного поведения. Поскольку при электроокислении органических веществ существует корреляция между адсорбционными и кинетическими закономерностями электродных процессов, то целью данной работы является установление кинетических закономерностей процесса электроокисления метионина на Pt(Pt)-электроде в водно-щелочной среде.

## 2. Экспериментальная часть

Измерения проведены при комнатной температуре причем как в атмосфере аргона (х.ч.), так и в аэрированном водном растворе метода-

ми циклической вольтамперометрии с использованием компьютеризированного потенциостатического комплекса IPC-Compact; частотные спектры импеданса получали при помощи комплекса IPC Compact – FRA1.

Концентрацию метионина в щелочном растворе до и после анодного окисления определяли спектрофотометрически на спектрофотометре ЮНИКО 2800 при длинах волн 190–450 нм в кварцевых кюветах с толщиной оптического слоя 10 мм.

Потенциодинамические  $I, E$ -кривые получены в стеклянной трёх электродной ячейке с неразделенными катодным и анодным пространствами. Предварительно установлено, что разделение пространств рабочего и вспомогательного электродов практически не влияет на результаты измерения, однако уменьшает быстродействие потенциостатического комплекса. Рабочий электрод – платина в виде сетки, на которую электролитически наносили платиновую чернь. Вспомогательный электрод – гладкая платиновая сетка. Потенциал рабочего электрода измеряли относительно насыщенного хлоридсеребряного электрода сравнения.

Перед опытом рабочий электрод в течение трех минут обрабатывали концентрированной азотной кислотой, многократно промывали бидистиллированной водой, а затем фоновым 0.1 М раствором NaOH.

Растворы метионина ( $5 \cdot 10^{-3} \div 0.1$  М) готовили по навеске кристаллической аминокислоты (препарат фирмы «Merck») в фоновом растворе гидроксида натрия (х.ч.) на бидистиллированной воде. Учитывали, что введение аминокислоты в фоновый раствор сопровождается изменением его кислотности из-за протекания реакций протонирования / депротонирования, меняющих соотношение между основными ионными формами аминокислоты [22].

Для удаления возможных электроактивных примесей перед каждым измерением рабочий электрод обрабатывали концентрированной азотной кислотой (х.ч.), затем многократно промывали дистиллированной и ополаскивали бидистиллированной водой, а после того подвергали потенциостатической анодно-катодной активации в фоновом растворе, изменяя потенциал активации от +1.0 до –1.0 В, получая по 50 циклов активации.

Основными экспериментально измеряемыми величинами в методе линейной вольтамперометрии являются потенциал максимума  $E_{\text{max}}$

вольтамперометрической  $I, E(t)$ -кривой, а также величина фарадеевского тока в максимуме  $I_{\max}$ . Результаты вольтамперометрических измерений корректировали как на предельный ток восстановления кислорода, так и на ток заряжения двойного электрического слоя  $I_{dl} = C_{dl}v$ , где  $v$  — скорость сканирования потенциала. Значение ёмкости  $C_{dl}$  рабочего электрода оценивали методом электрохимической импедансной спектроскопии.

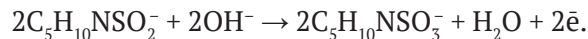
### 3. Результаты и их обсуждение

Для определения области потенциалов электрохимической активности аниона метионина ( $\text{Met}^-$ ) на Pt(Pt)-электроде получены циклические вольтамперограммы как в фоновом растворе, так и в присутствии  $\text{Met}^-$  как в аэрированном, так и деаэрированном растворах (рис. 1).

В отсутствие аминокислоты на Pt-электроде можно выделить три характерные области. В водородной области ( $-1.20 - -0.50$  В) происходят процессы образования и ионизации адсорбированного атомарного водорода. За областью потенциалов от  $-0.50$  до  $-0.20$  В, в которой регистрируются лишь токи заряжения двойного слоя и восстановления молекулярного кислорода, имеется область адсорбции кислорода, начинающаяся при  $E > -0.20$  В. Процессы с участием атомарного кислорода характеризуются заметной необратимостью: десорбция кислорода (при обратном ходе кривой) происходит при потенциалах, соответствующих на анодной ветви вольтамперограммы заряджению двойного слоя. Интенсивное выделение молекулярного кислорода на Pt-электроде начинается при  $E > 0.6$  В.

Введение добавки метионина приводит к заметному росту тока на анодной ветви циклограммы и появлению максимума при потенциале  $0.60$  В – для аэрированного и  $0.70$  В – для деаэрированного раствора, что, по всей видимости, обусловлено электроокислением аминокислоты. Стоит отметить, что сам факт изменения потенциала максимума электроокисления при изменении концентрации растворенного кислорода свидетельствует на качественном уровне об участии кислород содержащих частиц в анодном процессе.

Для подтверждения факта электроокисления метионина в области потенциалов анодных максимумов, а также определения количества электронов, участвующих в данном процессе, проведены кулонометрические измерения с последующим спектрофотометрическим определением концентрации  $\text{Met}^-$  в растворе. Установлено, что анодные максимумы действительно отвечают процессу электроокисления  $\text{Met}^-$ , причем в анодной реакции принимает участие два электрона (в расчете на выход по току близкий к 100 %). Учитывая результаты кулонометрии, брутто-процесс электроокисления можно представить следующим образом:



При этом основным продуктом электроокисления является анион метионинсульфоксида.

Для выявления природы кинетических ограничений процесса электроокисления необходимы диагностические критерии, позволяющие идентифицировать природу лимитирующей стадии электрохимической реакции, осложненной

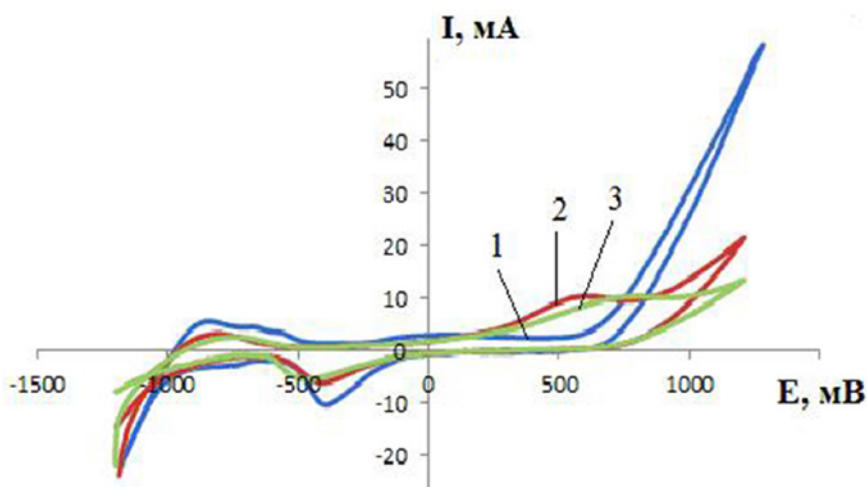


Рис. 1. Циклические вольтамперограммы, полученные на Pt-электроде при  $v = 0.005$  В/с в водном растворе  $0.1$  М NaOH (1) и  $0.1$  М NaOH +  $0.01$  М метионина без деаэрации (2) и после деаэрации раствора (3)

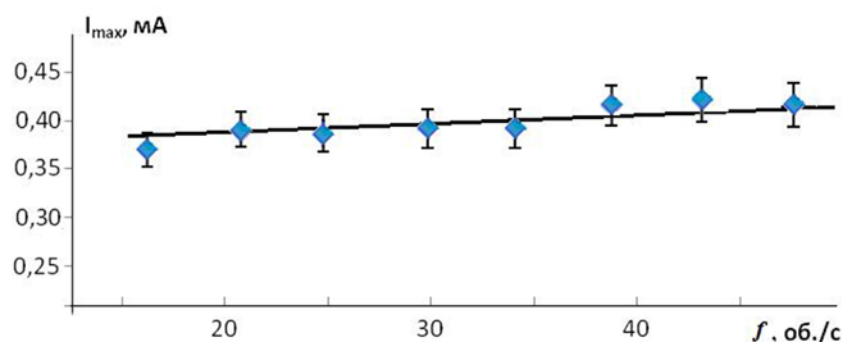
адсорбцией реагента или продукта(ов), а также установить обратимость процесса. В качестве таких критериев в методе линейной вольтамперометрии обычно используют ток  $I_{\max}$  в максимуме анодной ветви  $I, E(t)$ -зависимости и соответствующий ему потенциал  $E_{\max}$ ; оба параметра зависят от концентрации аминокислоты, pH фонового раствора и скорости сканирования потенциала.

Анализ опытных данных показывает, что с увеличением скорости сканирования потенциала значение тока на обеих ветвях вольтамперограммы растет. При этом потенциал анодного максимума заметно облагораживается, причем как в условиях деаэрации, так и в аэрированном растворе. Наблюдаемое на кривых обратного хода уменьшение высоты пика десорбции кислорода, а также смещение в анодную сторону потенциалов катодных максимумов, связано, по всей видимости, с адсорбцией аминокислоты и (или) продуктов её окисления на электроде. Увеличение концентрации аниона метионина приводит к аналогичному результату. В то же время

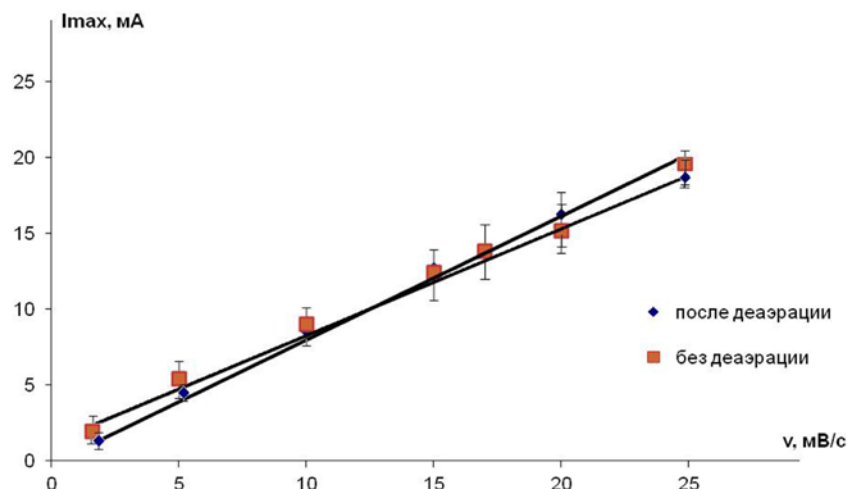
значение тока в пике и его положение практически инвариантны к изменению скорости вращения платинового дискового электрода (рис. 2).

Полученный результат означает, что максимум анодного тока на  $I, E(t)$ -зависимости не связан с жидкофазной диффузией реагентов или продуктов, а скорее всего, отражает особенности их адсорбционного накопления на электроде, что можно подтвердить, анализируя диагностические критерии метода линейной вольтамперометрии [23–25].

Ток и потенциал анодного максимума зависят от скорости сканирования потенциала ( $v$ ), концентрации аниона метионина и величины pH, как в предварительно деаэрированном, так и в растворе, равновесном с атмосферой. Установлено, что зависимости  $I_{\max} = f(v)$  линейны и после поправки на ток восстановления кислорода и ток заряжения двойного электрического слоя экстраполируются в начало координат (рис. 3). Данный факт, а также близость к единице тангенса угла наклона этой зависимости, свидетель-



**Рис. 2.** Зависимость максимума тока электроокисления в растворе 0.10 М NaOH + 0.03 М Met<sup>-</sup> от числа оборотов вращающегося дискового Pt-электрода;  $v = 0.10$  В/с



**Рис. 3.** Влияние скорости сканирования потенциала на величину анодного максимума тока в 0.10 М растворе NaOH, содержащем 0.01 М Met<sup>-</sup>

ствует о том, что процесс электроокисления метионина лимитируется стадией переноса заряда и является необратимым. При этом в электрохимической реакции принимают участие именно адсорбированные частицы.

Можно полагать, что двухэлектронный брутто-процесс электроокисления метионина является стадийным. Учитывая, что зависимости  $E_{\max} - \lg v$  и  $E_{\max} - \lg I_{\max}$  линейны (рис. 4), а значение параметра  $d \lg I_{\max} / d \lg v$  равно  $0.21 \pm 0.052$  (без деаэрации раствора) и  $0.12 \pm 0.014$  (после деаэрации), то лимитирующей стадией анодной реакции электроокисления метионина является скорее всего стадия отрыва первого электрона. Отметим, что если в качестве лимитирующей принять стадию перехода второго электрона, то наклон соответствующей зависимости был бы существенно меньше. Кроме того, на амплитуду

тока на вольтамперограмме оказывают влияние как концентрация аниона метионина, так и концентрация  $\text{OH}^-$  - ионов. С ростом концентрации аниона метионина амплитуда анодного максимума тока растет (рис. 5), а потенциал максимума становится более положительным.

При этом величина параметра  $\frac{d \lg I_{\max}}{d \lg C_{\text{Met}^-}} < 1$

и составляет 0.22 (после деаэрации) и 0.27 (без деаэрации). Последнее означает, что в процессе электроокисления принимают участие именно адсорбированные частицы, как то и предполагалось выше. Еще одним подтверждением этого факта являются вольтамперограммы, полученные в фоновом электролите после отмывки рабочего электрода. Адсорбционное накопление анионов метионина проводили при потенциа-

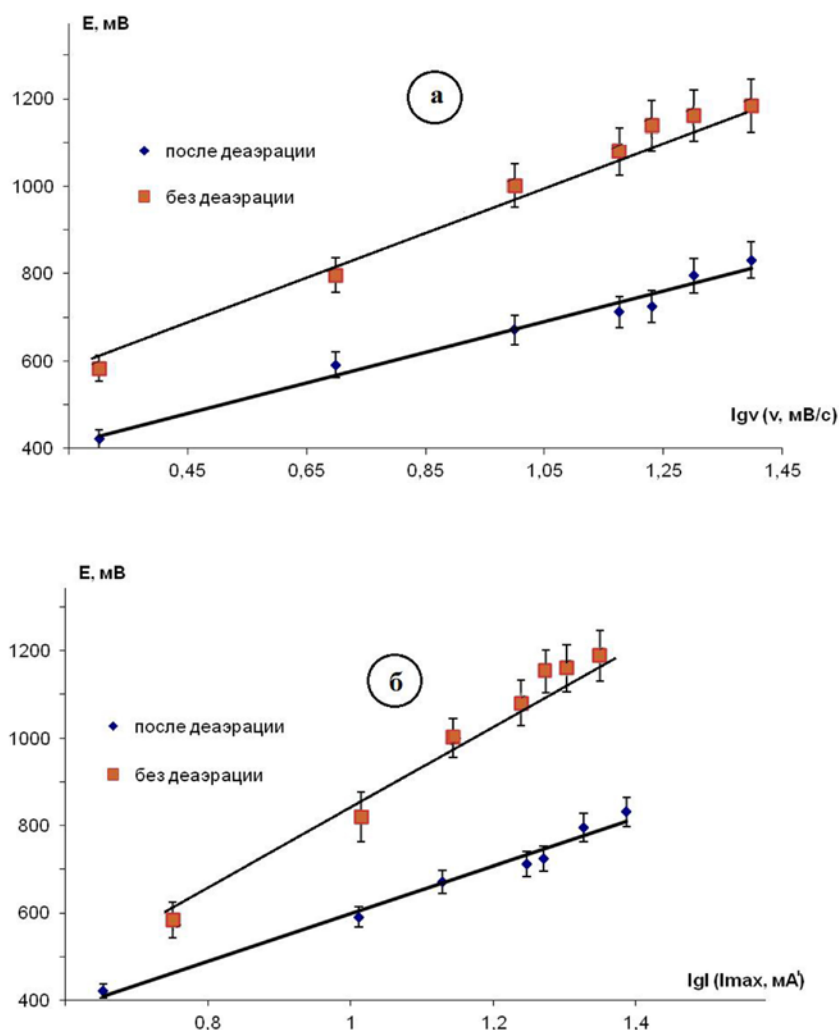


Рис. 4. Влияние скорости сканирования потенциала (а) и логарифма анодного тока в максимуме (б) на положение пика электроокисления в растворах, содержащих 0.10 М NaOH+ 0.01 М Met<sup>-</sup>

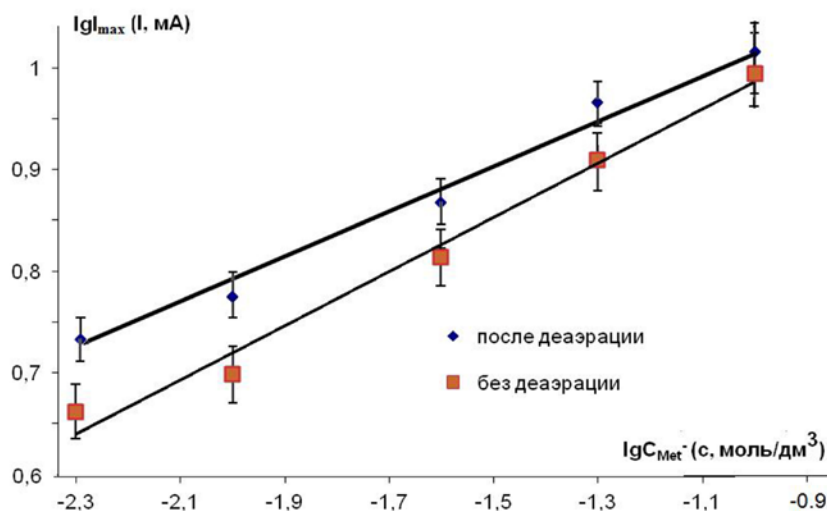


Рис. 5. Влияние концентрации анионов Met<sup>-</sup> на ток максимума процесса электроокисления при  $v = 0.10$  В/с

лах 0.00; 0.20 и  $-0.25$  В в течение 10 минут. Полученные анодные вольтамперограммы в растворе 0.1 М NaOH до адсорбционного накопления аминокислоты (1) и после отмывки электрода (2–4) представлены на рис. 6.

На вольтамперограммах, полученных в растворе фонового электролита после отмывки электрода, по-прежнему регистрируются максимумы электроокисления аминокислоты. Это свидетельствует о том, что электроокисление Met<sup>-</sup> на Pt-электроде осуществляется именно из адсорбированного состояния и представляет собой т. н. «поверхностную» электрохимическую

реакцию. Кроме того, адсорбция метионина на платине, скорее всего, является необратимой.

Поскольку в процессе электроокисления анионов метионина принимают участие и гидроксильные ионы, получены данные о влиянии их концентрации (при постоянной концентрации Met<sup>-</sup>) на скорость анодного процесса. Увеличение pH приводит к росту амплитуды максимума электроокисления и смещению его потенциала в катодном направлении вне зависимости от степени аэрации рабочего раствора (рис. 7).

Значение параметра  $\frac{d \lg I_{max}}{d \lg C_{OH^-}}$  отлично от нуля,

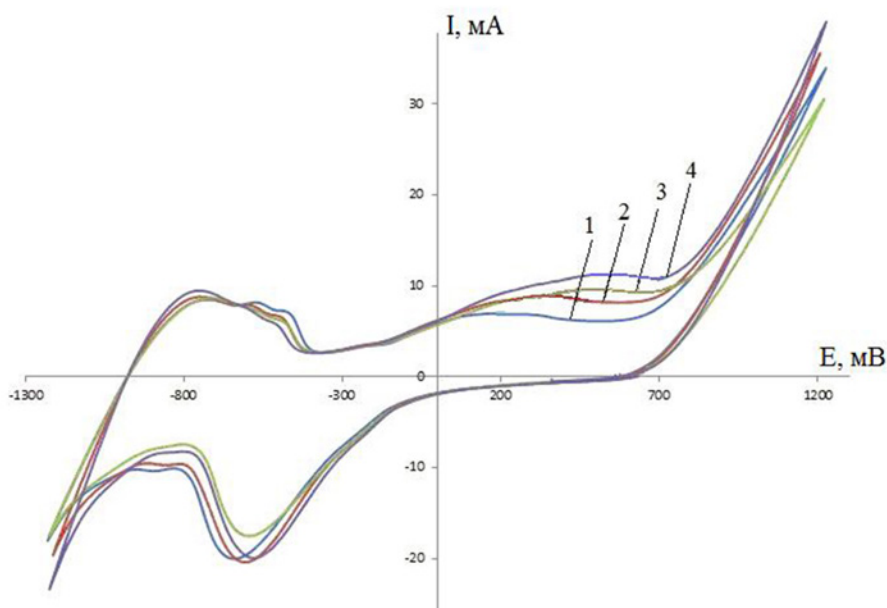
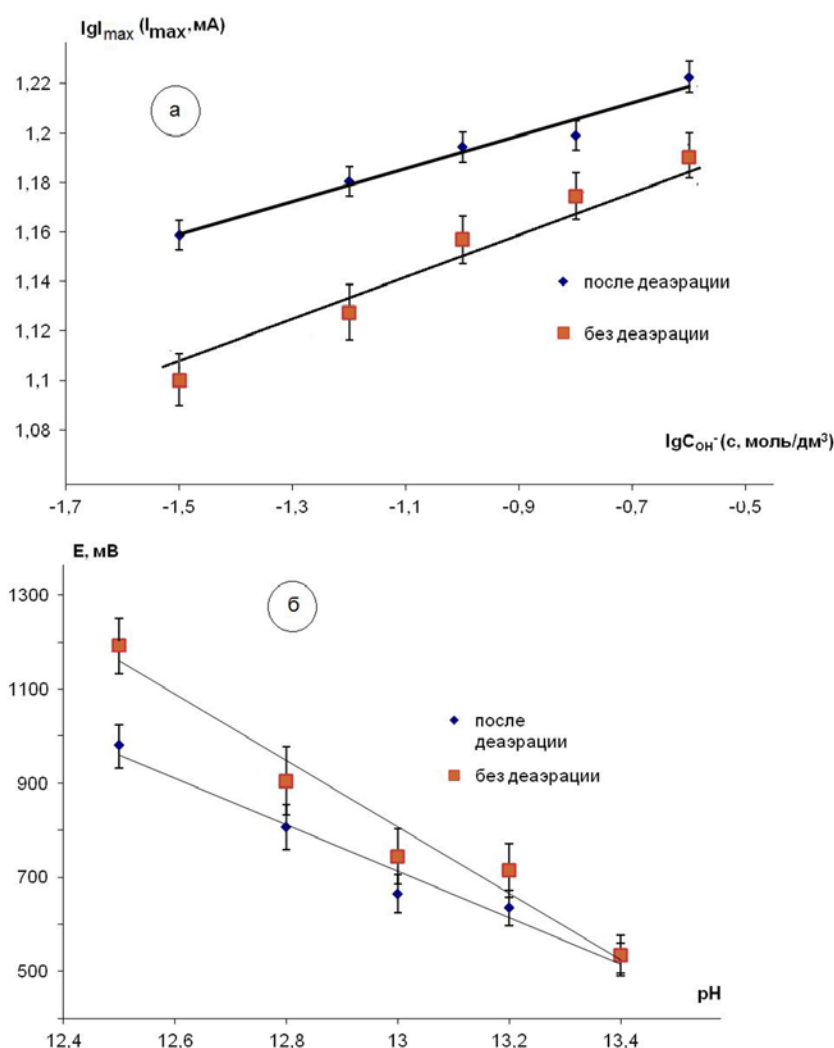


Рис. 6. Циклические вольтамперограммы полученные на Pt-электроде при  $v = 0.01$  В/с в водном растворе 0.1 М NaOH до (1) и после адсорбционного накопления и отмывки электрода: (2) – 0.00 В; (3) –  $-0.25$  В; (4) – 0.20 В



**Рис. 7.** Влияние значения pH раствора, содержащего 0.01 М Met<sup>-</sup> метионина, на ток (а) и потенциал максимума (б) процесса электроокисления при  $v = 0.10$  В/с

но заметно меньше единицы, и составляет в обоих случаях  $0.10 \pm 0.03$  (рис. 7а), а значит в анодном процессе участвуют именно адсорбированные OH<sup>-</sup> ионы.

Наконец, т. к. кинетический параметр  $\frac{d \lg I_{\max}}{d \lg C_{\text{Met}^-}} > 0$ , а с ростом pH потенциал анодного максимума смещается в область отрицательных значений, то можно полагать, что доминирующей адсорбированной формой является Red-форма, а значит анион метионина проявляет большую поверхностную активность на платине, чем продукты его электроокисления.

#### 4. Выводы

Анион метионина проявляет заметную электрохимическую активность на Pt(Pt)-электроде. В анодном процессе электроокисления, по дан-

ным кулонометрического анализа с последующим спектрофотометрическим определением содержания метионина в растворе, участвует два электрона. Наиболее вероятный продукт электроокисления – метионинсульфоксид. Результаты линейной вольтамперометрии указывают, что вне зависимости от степени аэрации рабочего раствора, лимитирующей стадией процесса электроокисления метионина является перенос заряда. Процесс электроокисления метионина кинетически необратим и протекает с участием адсорбированных ионов Met<sup>-</sup> и OH<sup>-</sup>. Доминирующей адсорбционной формой в реакции электроокисления является Red-форма, т. е. анионы метионина.

#### Заявленный вклад авторов

Введенский А. В. – научное руководство, концепция исследования, развитие методологии,

итоговые выводы. Бобринская Е. В. – проведение исследования, написание статьи, редактирование текста. Шереметова Е. Ю., Фролова А. И. – проведение исследования.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### Список литературы

1. Аренс В. И., Черняк А. С. Химия и микробиология в сфере горного дела. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2006;8: 304–313. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=9496289>

2. Туманова Е. А., Ложкин В. И., Чебыкин Е. П., Королев С. А., Сафонов А. Ю. Электрохимическое растворение платины в присутствии некоторых аминокислот. *Электрохимия*. 1999;35(12): 1499–1501.

3. Huerta F., Morallón E., Quijada C., Vázquez J. L., Berlouis L. E. A. Potential modulated reflectance study of the electrooxidation of simple amino acids on Pt (111) in acidic media. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2000;489(1-2): 92–95. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(00\)00202-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(00)00202-3)

4. Huerta F., Morallon E., Cases F., Rodes A., Vázquez J. L., Aldaz A. Electrochemical behaviour of amino acids on Pt (h,k,l). A voltammetric and in situ FTIR study. Part. 2. Serine and alanine on Pt (111). *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 1997;431(2): 269–275. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(97\)00212-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(97)00212-X)

5. Marangoni D. G., Wylie I. G. N., Roscoe S. G. Surface electrochemistry of the oxidation reactions of a - and b - alanine at a platinum electrode. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics*. 1991;25(2): 269–277. [https://doi.org/10.1016/0302-4598\(91\)87008-5](https://doi.org/10.1016/0302-4598(91)87008-5)

6. Horányi G., Rizmayer E. M. Study of the adsorption of glycine on platinized platinum electrodes by tracer methods. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. 1975;64(1): 15–19. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(75\)80275-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(75)80275-0)

7. Ogura K., Kobayashi, M., Nakayama, M., Miho M. Electrochemical and in situ FTIR studies on the adsorption and oxidation of glycine and lysine in alkaline medium. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 1998;449(1-2): 101–109. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(98\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(98)00015-1)

8. Xiao, Sun S.-G., Yao J.-L., Wu Q.-H., Tian Z.-Q. Surface-enhanced Raman spectroscopic studies of dissociative adsorption of amino acids on platinum and gold electrodes in alkaline solutions. *Langmuir*.

2002;18(16): 6274–6249. <https://doi.org/10.1021/la025817f>

9. Введенский А. В., Бобринская Е. В., Кращенко Т. Г., Витнова О. А., Кулешова Н. Е. Кинетика анодного окисления анионов моно- и дикарбоновых аминокислот на Pt. *Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Химия. Биология. Фармация*. 2013;2: 19–25. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20400913>

10. Кращенко Т. Г., Введенский А. В., Бобринская Е. В., Кулешова Н. Е. Кинетика электрохимического окисления аниона глицина на золоте. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2014;16(1): 42–49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21490889>

11. Туманова Е. А., Сафронов А. Ю. Адсорбция некоторых аминокислот и дипептидов на платиновом электроде. *Электрохимия*. 1998;34(2): 170–176.

12. Баканина Ю. Н., Жукова Е. А., Абдуллин И. Ф. Турова Е. Н., Будников Г. К. Вольтамперометрия некоторых аминокислот на электродах из платины, золота, меди и никеля. *Журнал общей химии*. 2000;70(6): 897–901.

13. Huerta F., Morallón E., Vázquez J. L., Aldaz A. Electrochemical behaviour of amino acids on Pt(hkl). A voltammetric and in situ FTIR study: Part IV. Serine and alanine on Pt(100) and Pt(110). *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 1999;475(1): 38–45. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(99\)00337-X](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(99)00337-X)

14. Kong D.-W., Zhu T.-W., Zeng D.-M., Zhen C.-H., Chen S.-P. In-situ FTIR spectroscopic studies of adsorption and oxidation of L-serine on Pt electrodes in neutral solutions. *Chemical Journal of Chinese Universities*. 2009;30(10): 2040–2044. Режим доступа: <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/EN/Y2009/V30/I10/2040>

15. Reynaud J. A., Malfoy B., Canesson P. Electrochemical investigations of amino acids at solid electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. 1980;114(2): 195–211. [https://doi.org/10.1016/S0022-0728\(80\)80447-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(80)80447-5)

16. Horányi G. A direct and indirect radiotracer study of the adsorption of serine at a platinized platinum electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. 1991;304(1-2): 211–217. [https://doi.org/10.1016/0022-0728\(91\)85503-h](https://doi.org/10.1016/0022-0728(91)85503-h)

17. Мещеряков В. В., Попова С. С., Распопова Г. А., Боброва В. А. Электрохимическое поведение аминокислот на Pt- электроде. *Актуальные проблемы электрохимической технологии: Сб. ст. молодых ученых*. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т; 2000. с. 244–249.

18. Gu Y.-J., Sun S.-G., Chen S.-P., Zhen C.-H., Zhou Z.-Y. Adsorption of Serine on Pt single-crystal



electrodes in sulfuric acid solutions. *Langmuir*. 2003;23(19): 9823–9830. <https://doi.org/10.1021/la034758i>

19. Попова С. С., Окишева Н. А., Рябухова Т. О. Адсорбционно-электрохимическое поведение аминокислот на графитированном медном Cu(C)-электроде. *Вестник технологического университета*. 2016;19(9): 155–157. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25948195>

20. Шайдарова Л. Г., Зиганшина С. А., Будников Г. К. Электрокаталитическое окисление цистеина и цистина на угольно-пастовом электроде, модифицированном оксидом рутения (IV). *Журнал аналитической химии*. 2003;58(6): 640–645. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17278092>

21. Reynaud J. A., Malfoy B., Canesson P. Electrochemical investigations of amino acids at solid electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. 1980;114(2): 195–211. [https://doi.org/10.1016/s0022-0728\(80\)80447-5](https://doi.org/10.1016/s0022-0728(80)80447-5)

22. Тюкавкина Н. А., Бауков Ю. И. *Биоорганическая химия: учебник для вузов*. М.: Дрофа; 2005. 542 с.

23. Галюс В. *Теоретические основы электрохимического анализа*. М.: Мир; 1974. 552 с.

24. Bard A. J., Faulkner L. R. *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. New York: John Wiley & Sons; 2001. 833 p.

25. Laviron E. The use of polarography and cyclic voltammetry for the study of redox systems with adsorption of the reactants. Heterogeneous vs. surface path. *J. Electroanal. Chem.* 1995;382(1-2): 111–127.

### Информация об авторах

*Введенский Александр Викторович*, д. х. н., профессор, профессор кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail [alvved@chem.vsu.ru](mailto:alvved@chem.vsu.ru). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2210-5543>.

*Бобринская Елена Валерьевна*, к. х. н., доцент кафедры физической химии, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация; e-mail: [elena173.68@mail.ru](mailto:elena173.68@mail.ru). ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7123-4224>.

*Шереметова Елена Юрьевна*, магистрант 2 года обучения, химический факультет, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация.

*Фролова Ангелина Игоревна*, специалист, 5 курс, химический факультет, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация.

Поступила в редакцию 20.04.2021; одобрена после рецензирования 19.05.2021; принята к публикации 15.09.2021; опубликована онлайн 25.12.2021.