

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗ АЛКАЛОИДОВ В ФОРМАТЕ «ЭЛЕКТРОННЫЙ ЯЗЫК»

Е.М. Петренко
В.А. Семенова

lp-2002@mail.ru
valentann@yandex.ru

ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложен метод мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии для выявления и идентификации макроколичества алкалоидов в исследуемой пробе. В отличие от существующих мультисенсорных систем, в которых применяется множество индикаторных электродов, в предложенном методе линейка сенсоров формируется на поверхности единичной планарной трехэлектродной системы при введении в состав фонового электролита ряда ионов переходных металлов, образующих комплексы с токсичными веществами пробы. Влияние каждого органического вещества на электрохимическое поведение мультисенсорной тест-системы различно, поэтому существует возможность использования в качестве тест-системы раствора электролита, в состав которого входит набор катионов различных металлов. Преимущество разработанного метода — получение достоверных результатов при малой трудоемкости и высокой оперативности проведения анализа. С учетом специфики подлежащих обнаружению веществ проведена оптимизация состава электрохимической тест-системы, выявлены информативные параметры, характеризующие наличие алкалоидов в исследуемой пробе. Успешное применение предложенного метода в аналитических исследованиях обусловило его реализацию в формате «электронный язык». На основании результатов проведенных исследований предложен метод анализа, который с высокой достоверностью дает возможность обнаружить и идентифицировать алкалоиды как в лабораторных, так и во внелабораторных условиях

Ключевые слова

Инверсионная вольтамперометрия, идентификация, мультисенсоры, электрохимическая тест-система

Поступила 30.03.2022

Принята 12.05.2022

© Автор(ы), 2022

Введение. Экспресс-обнаружение и идентификация алкалоидов — важная составная часть комплекса мероприятий по борьбе с незаконным оборотом наркотических средств и психотропных веществ. Их выявление и изъятие из оборота требует использования специальных технических средств, обеспечивающих объективность, оправданность и полноту реализации мер пресечения и воздействия, применяемых правоохранительными органами к лицам, у которых изымаются несанкционированные образцы алкалоидов.

В настоящее время для идентификации и сравнительного анализа алкалоидов в основном используют капельный химический анализ [1], тонкослойную хроматографию [2], масс-спектроскопию [3, 4]. Эти методы имеют недостатки, основными из которых являются многостадийность, высокий процент ложноположительных реакций, громоздкость оборудования, малая степень мобильности, большая масса исследуемого образца, сложность стадии пробоподготовки, требования высокой квалификации исполнителя.

В связи с этим весьма актуальна разработка метода, обеспечивающего возможность обнаружения и идентификации алкалоидов с высокой достоверностью при проведении экспресс-анализа в формате «электронный язык» [5, 6].

Метод инверсионной вольтамперометрии наиболее информативен из электрохимических методов анализа [7–11]. Метод широко используют при анализе неорганических веществ, в частности тяжелых металлов. Однако реализация этого метода требует тщательной пробоподготовки, заключающейся в удалении из анализируемой пробы органических веществ, которые существенно влияют на вид аналитических вольтамперограмм. Эта способность изменять поведение электрохимической системы, содержащей катионы различных металлов, использована здесь для анализа алкалоидов.

В существующих электрохимических устройствах типа «электронный язык» в качестве линейки сенсоров применяют набор электродов с различными аналитическими характеристиками (мультиэлектродные системы) [12–14]. При этом достаточно трудно добиться воспроизводимости характеристик каждого электрода, что в конечном счете отрицательно влияет на разрешающую способность и достоверность идентификации. Поэтому в качестве линейки сенсоров, свободной от указанного недостатка, предложено использовать содержащиеся в составе фонового электролита катионы металлов с частично заполненными *d*-орбиталями, которые обладают способностью образовывать комплексные соединения с алкалоидами и таким образом формируют мультисенсорную тест-систему. Эти металлы хорошо

определяются методом инверсионной вольтамперометрии, что позволяет идентифицировать различные алкалоиды на основании анализа характерных изменений вольтамперных кривых, происходящих в результате введения различных алкалоидов в исходную тест-систему. Требуемая информация получается на единичном электроде, что исключает трудности с воспроизведением электрохимических характеристик сенсоров и необходимости использовать набор из нескольких индикаторных электродов, от числа которых зависит число информативных параметров.

Цель работы — разработка метода электрохимического мультисенсорного экспресс-анализа алкалоидов в формате «электронный язык», заключающегося в использовании электрохимической мультисенсорной тест-системы в виде раствора. Раствор содержит набор ионов металлов, обладающих способностью образовывать комплексные соединения с органическими веществами, которые также могут адсорбироваться на поверхности индикаторного электрода, тем самым изменяя его электрохимическую активность.

Методика эксперимента. Для обнаружения и идентификации алкалоидов формировали тест-системы, в которых использовали растворы следующих солей: нитраты ртути, цинка, кадмия, свинца, галлия, кобальта. В ячейку заливали 12 мл 0,05 М раствора KCl, добавляли ионы Hg^{2+} до концентрации 10^{-4} М и ионы металлов Zn^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Co^{3+} . Концентрация металлов $5 \cdot 10^{-5}$ М.

Реальные пробы, в которых требуется определять алкалоиды, обычно содержат примеси различных веществ, к присутствию которых чувствительны электродные реакции. В связи с этим проведены исследования, результаты которых показали возможность выделения алкалоидов из пробы путем экстракции хлороформом, что позволяет отделить вещества, мешающие получению достоверных результатов.

Исследования выполняли на планарных электродах (ООО «Колор-Электроникс»), представляющих собой трехэлектродную схему (рис. 1). Электроды — это структура, в которой на одной плоскости (полиэфирная пленочная подложка) сформированы рабочий (индикаторный) и вспомогательный электроды, а также электрод сравнения. Рабочий и вспомогательный электроды изготовлены из углеродной пасты, а электрод сравнения — из пасты Ag/AgCl. Размеры $10 \times 28 \times 0,35$ мм. Таким образом получается компактная, легко сменяемая электродная система одноразового применения, при этом подготовку поверхности индикаторного электрода проводить не требуется. Измерения проводились в два этапа.

Этап 1. Осаждение металлов тест-системы с последующим растворением и регистрацией соответствующих значений тока растворения.

Этап 2. Проведение тех же операций, но при добавлении алкалоидов в раствор. Введение в раствор алкалоидов заметно влияет на ток растворения металлов тест-системы. По изменению значений этого тока можно судить о наличии в растворе того или иного алкалоида.

Исследования проводили на объектах, в качестве которых выбраны папаверина гидрохлорид, атропина сульфат.

Важный критерий выбора фонового электролита — степень влияния алкалоидов на пики тока растворения металлов тест-системы. Исследованы растворы, в которых в качестве индикаторов присутствия алкалоидов использовали различные сочетания катионов цинка, кадмия, свинца и кобальта. Следует отметить, что потенциалы растворения этих металлов заметно отличаются друг от друга.

Результаты экспериментов по изучению влияния атропина и папаверина на пики тока растворения металлов в фоновых электролитах (0,1 М K_2SO_4 ; 0,5 М KCl ; 0,05 М KCl ; 0,1 М HCl) показали, что наибольшее влияние алкалоидов на ток растворения металлов наблюдается при 0,05 М KCl . Концентрация алкалоидов $2 \cdot 10^{-2}$ г/л.

В процессе комплексообразования важную роль играет концентрация ионов водорода. Алкалоиды представляют собой основания, следовательно, легко протонируются [15]. В связи с этим концентрация свободного алкалоида, способного образовывать комплексы с металлами, будет зависеть от pH. Для нахождения оптимального pH фонового электролита, при котором влияние алкалоидов максимально, проведены эксперименты при pH = 1–8. Так, в кислом растворе (pH = 1) эффекты влияния алкалоидов отсутствуют, поскольку металлы с алкалоидами не образуют комплексов. При pH = 3,5–5 эффект влияния папаверина максимален. При pH > 6 папаверин не влиял на токи растворения металлов, так как в щелочных растворах ионы металлов гидролизуются. На основании проведенных исследований в качестве фонового раствора выбран 0,05 М KCl с pH = 5.

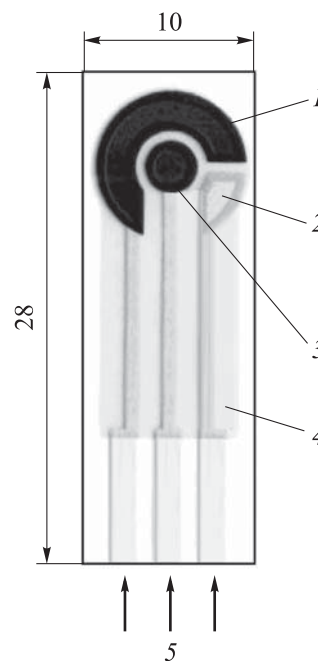


Рис. 1. Схема планарного электрода:

1 — вспомогательный электрод; 2 — электрод сравнения; 3 — индикаторный электрод; 4 — изолятор; 5 — контакты

Для определения оптимальных условий также необходимо определить влияние концентрации металлов тест-системы на ток их растворения в присутствии алкалоидов. Влияние папаверина и атропина на ток растворения кадмия, свинца, кобальта, катионы которых составляют электрохимическую тест-систему, в зависимости от их концентрации приведены в табл. 1. При изучении влияния алкалоидов удобно иметь в растворе одинаковые концентрации металлов, поэтому исследования каждого металла проводили при одних и тех же значениях концентрации.

Таблица 1

**Влияние папаверина (числитель) и атропина (знаменатель)
на ток растворения (изменение пиков тока, %) металлов
электрохимической тест-системы в зависимости от их концентрации**

Концентрация металла, г/л	Кадмий	Свинец	Кобальт
$5 \cdot 10^{-6}$	-96/-13	-64/-36	0
$1 \cdot 10^{-5}$	-88/-0	-35/-4	
$5 \cdot 10^{-5}$	-56/-19	-15/0	-100/-25
$1 \cdot 10^{-4}$	-5/0	-4/-6	-100/-7

Согласно полученным результатам, для кадмия и свинца с уменьшением их концентрации влияние алкалоидов возрастает, в то же время для кобальта максимальное влияние наблюдается при его наибольшей концентрации ($1 \cdot 10^{-4}$ М), поэтому взято компромиссное значение концентрации $5 \cdot 10^{-5}$ М.

Различные методы химического анализа имеют разную воспроизводимость. Судить о воспроизводимости результатов можно по относительному стандартному отклонению (%) — коэффициенту вариации W . Чем коэффициент выше, тем хуже воспроизводимость и тем больше разброс результатов повторных измерений. Для экспресс-анализа допустимые значения $W = 10 \dots 30$ %. Все эксперименты проводили 3 раза, затем рассчитывали коэффициент вариации ($W = 6$ %).

Результаты и их обсуждение. Влияние атропина и папаверина на пики тока растворения металлов в выбранном фоновом растворе показано на рис. 2. Согласно приведенным зависимостям, рассмотренные вещества влияют на ток растворения металлов электрохимической тест-системы, причем характер инверсионной вольтамперограммы каждого из них индивидуален.

Определено влияние концентрации папаверина на пики тока растворения металлов. Концентрация папаверина изменяется в пределах

$0,1 \cdot 10^{-3} \dots 0,2 \cdot 10^{-2}$ г/л. Полученные результаты приведены в табл. 2. Максимальный эффект влияния папаверина на ток растворения металлов достигается при концентрации более $1 \cdot 10^{-2}$ г/л.

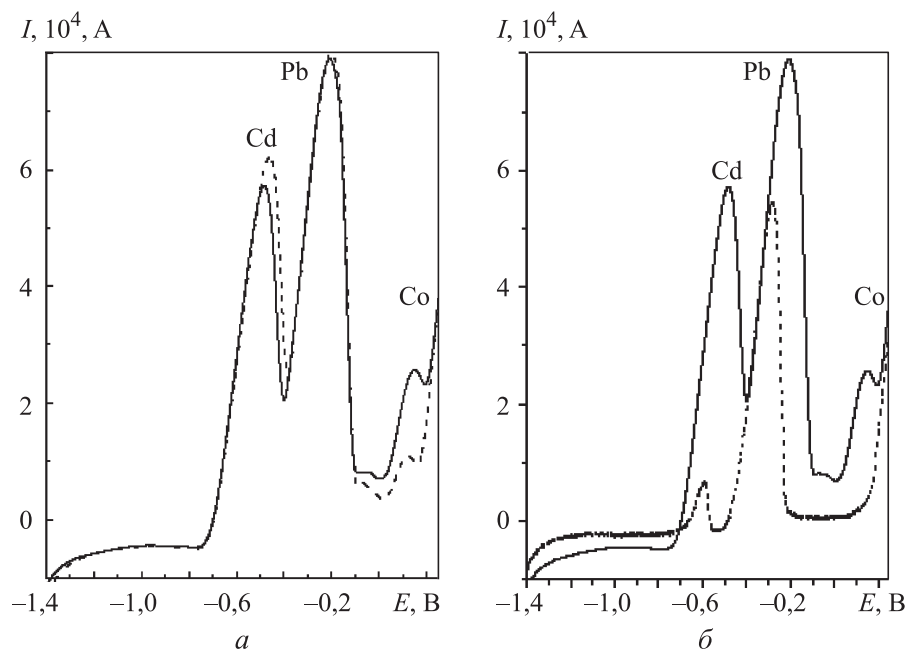


Рис. 2. Влияние алкалоидов на пики тока растворения металлов электрохимической тест-системы в 0,05 М КСl:

a — при отсутствии (сплошная) и наличии (штриховая) атропина;
б — при отсутствии (сплошная) и наличии (штриховая) папаверина

Таблица 2

Влияние концентрации папаверина на пики тока растворения металлов

Концентрация металла, г/л	Цинк	Кадмий	Свинец	Кобальт
$1 \cdot 10^{-3}$	0	-6,5	-7,4	-100
$5 \cdot 10^{-3}$		-24	-13	
$1 \cdot 10^{-2}$	-100	-75	-30	
$2 \cdot 10^{-2}$		-80	-31	

В качестве одного из методов повышения достоверности идентификации алкалоидов рассмотрено увеличение числа металлов в электрохимической тест-системе, на ток растворения которых могут влиять тестируемые наркотические вещества. Рассмотрена возможность введения в электрохимическую тест-систему таллия, висмута и галлия, концентрация которых составляла $5 \cdot 10^{-5}$ М.

При введении ионов таллия (рис. 3, а) в фоновый электролит наблюдается четко выраженный пик тока в интервале потенциала $-0,9 \dots -0,65$ В. При введении папаверина изменение пика тока растворения таллия незначительно. Таким образом, введение в фоновый раствор ионов таллия не позволяет расширить информацию по определению и идентификации алкалоидов.

Влияние папаверина на пик тока растворения висмута показано на рис. 3, б. Растворение электроосажденного висмута на электроде происходит в интервале потенциала $-0,2 \dots -0,1$ В. При введении папаверина его влияние на пик тока растворения висмута очень мало и им можно пренебречь. В связи с этим висмут нецелесообразно использовать при формировании электрохимической тест-системы, предназначенной для идентификации наркотических средств.

При введении галлия в фоновый электролит наблюдаются два пика (рис. 3, в), потенциалы которых равны $-0,85$ и $-0,75$ В. При добавлении папаверина в раствор пики тока растворения галлия уменьшаются на 100 %, что свидетельствует о возможности использования галлия для идентификации алкалоидов в электрохимической тест-системе.

Инверсионные вольтамперограммы электрохимической тест-системы, содержащей ионы цинка, кадмия свинца и кобальта, в присутствии галлия без папаверина и с его добавлением приведены на рис. 4.

При добавлении ионов галлия в электрохимическую тест-систему пики токов растворения составляющих ее металлов изменились. Галлий обладает способностью образовывать сплавы с металлами, растворенными в ртути. Следовательно, введение галлия в раствор может изменить природу электроосажденных металлов, что приведет к изменению кинетики адсорбции алкалоидов на электроде и повлияет на ток растворения металлов. При дальнейшем добавлении в раствор папаверина концентрацией $2 \cdot 10^{-2}$ г/л пики тока растворения металлов электрохимической тест-системы уменьшаются: цинк и кобальт на 100 %, свинец на 50 %, кадмий на 80 %. Влияние алкалоидов на ток растворения галлия имеет явно выраженный характер. В связи с этим возможно проводить оценку наличия алкалоидов при добавлении в электрохимическую тест-систему ионов галлия.

Рассмотрен алгоритм определения возможности расширения использования металлов, по которым можно проводить идентификацию алкалоидов. Подобный алгоритм может быть взят за основу и при рассмотрении других металлов.

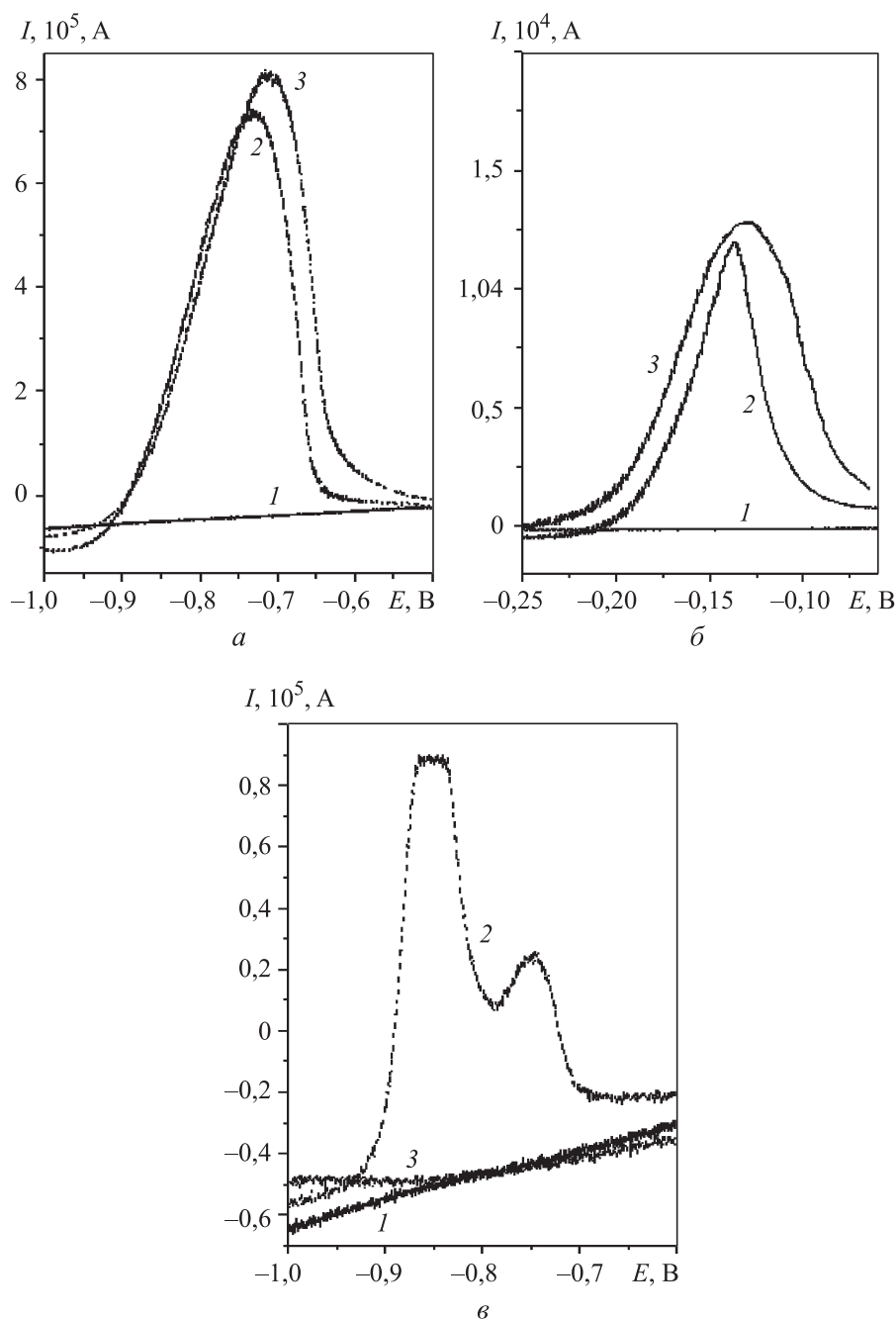


Рис. 3. Влияние папаверина на пики тока растворения металлов:

а — таллия (1 — $C_{\text{KCl}} = 0,05 \text{ M} + C_{\text{Hg}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ M}$ (фоновый электролит); 2 — фоновый электролит + Tl ($C = 5 \cdot 10^{-5} \text{ M}$); 3 — фоновый электролит + Tl + папаверин ($C = 2 \cdot 10^{-2} \text{ г/л}$));
б — висмута (1 — $C_{\text{KCl}} = 0,05 \text{ M} + C_{\text{Hg}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ M}$ (фоновый электролит); 2 — фоновый электролит + Bi ($C = 5 \cdot 10^{-5} \text{ M}$); 3 — фоновый электролит + Bi + папаверин ($C = 2 \cdot 10^{-2} \text{ г/л}$));
в — галлия (1 — $C_{\text{KCl}} = 0,05 \text{ M} + C_{\text{Hg}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ M}$ (фоновый электролит); 2 — фоновый электролит + Ga ($C = 5 \cdot 10^{-5} \text{ M}$); 3 — фоновый электролит + Ga + папаверин ($C = 2 \cdot 10^{-2} \text{ г/л}$))

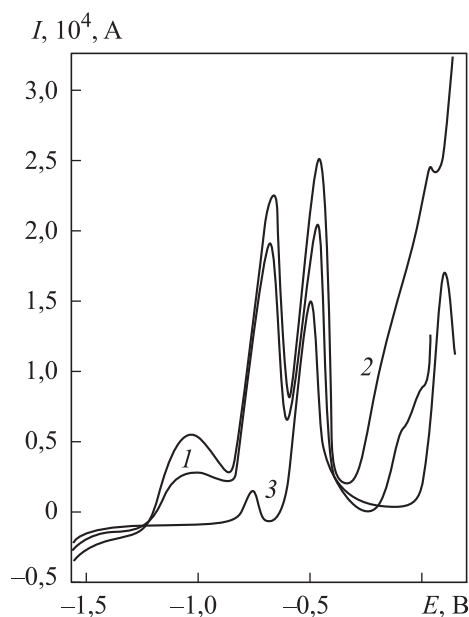


Рис. 4. Инверсионные вольтамперограммы электрохимической тест-системы в присутствии галлия без папаверина и с его добавлением:

1 — тест-система; 2 — тест-система + Ga ($C = 5 \cdot 10^{-5}$ M);
3 — тест-система + Ga + папаверин ($C = 2 \cdot 10^{-2}$ г/л)

Заключение. Результаты исследования показали, что каждое органическое вещество по-разному влияет на электрохимическое поведение мультисенсорной тест-системы.

На основании результатов исследований разработана экспресс-методика обнаружения и идентификации алкалоидов по их влиянию на ток растворения электроосажденных металлов в режиме инверсионной вольтамперометрии в формате «электронный язык».

Разработанный метод позволяет получать достоверные результаты при малой трудоемкости и высокой оперативности проведения анализа в лабораторных и внелабораторных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Симонов Е.А., Макаров В.Г. Использование методов капельного анализа для обнаружения наркотических средств во внелабораторных условиях. В кн.: Криминалистика: 21 век. М., ЭКЦ МВД РФ, 2001, с. 3.
- [2] Chai X.-S., Dong C., Deng Y. In situ determination of bacterial growth by multiple headspace extraction gas chromatography. *Anal. Chem.*, 2008, vol. 80, no. 20, pp. 7820–7825. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac801537x>

- [3] Коган В.Т., Антонов А.С., Лебедев Д.С. и др. Прямое масс-спектрометрическое определение метана и его летучих гомологов в воде. *ЖТФ*, 2013, т. 83, № 3, с. 132–139.
- [4] Экман Р., Зильберинг Е., Вестман-Бринкмальм Э. и др. Масс-спектрометрия. М., Техносфера, 2013.
- [5] Луковцев В.П., Доронин А.Н., Луковцева Н.В. и др. Идентификация алкалоидов методом инверсионной вольтамперометрии. *Электрохимия*, 2009, т. 45, № 7, с. 869–872.
- [6] Будников Г.К. Определение следовых количеств веществ как проблема современной аналитической химии. *Соросовский образовательный журнал*, 2000, т. 6, № 3, с. 45–51.
- [7] Доронин А.Н., Колесниченко И.И., Тихонова С.В. и др. Влияние папаверина на электроосаждение кадмия на стеклоуглеродном электроде, модифицированном ртутью. *Электрохимия*, 2012, т. 48, № 9, с. 1031–1034.
- [8] Колесниченко И.И., Ключев А.Л., Ганшин В.М. и др. Экспресс-скрининг биологических объектов методом мультисенсорной инверсионной вольтамперометрии с распознаванием образов. *Физикохимия поверхности и защита материалов*, 2014, т. 50, № 4, с. 440–444. DOI: <https://doi.org/10.7868/S004418561404007X>
- [9] Singh S. Sensors — an effective approach for the detection of explosives. *J. Hazard. Mater.*, 2007, vol. 144, iss. 1-2, pp. 15–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.018>
- [10] Ганшин В.М., Фесенко А.В., Чебышев А.В. От обонятельных моделей к «электронному носу». Новые возможности параллельной аналитики. *Специальная техника*, 1999, № 1-2, с. 2–11.
- [11] Власов Ю.Г., Легин А.В., Рудницкая А.М. Электронный язык — система химических сенсоров для анализа водных сред. *Российский химический журнал*, 2008, т. 52, № 2, с. 101–112.
- [12] Vlasov Yu.G., Ermolenko Yu.E., Legin A.V., et al. Chemical sensors and their systems. *J. Anal. Chem.*, 2010, vol. 65, no. 9, pp. 880–898. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061934810090029>
- [13] Raman B., Meier D.C., Evju J.K., et al. Designing and optimizing microsensor arrays for recognizing chemical hazards in complex environments. *Sens. Actuators B Chem.*, 2009, vol. 137, iss. 2, pp. 617–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.11.053>
- [14] Feng L., Musto C.J., Kemling J.W., et al. A colorimetric sensor array for identification of toxic gases below permissible exposure limits. *Chem. Commun.*, 2010, vol. 46, iss. 12, pp. 2037–2039. DOI: <https://doi.org/10.1039/B926848K>
- [15] Шлефер Г.Л. Комплексообразование в растворах. М., Л., Химия, 1964.

Петренко Елена Михайловна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ОИВТ РАН (Российская Федерация, Москва, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).

Семенова Валентина Анатольевна — научный сотрудник ОИВТ РАН (Российская Федерация, Москва, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Петренко Е.М., Семенова В.А. Электрохимический мультисенсорный экспресс-анализ алкалоидов в формате «электронный язык». *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 6 (105), с. 144–156.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-6-144-156>

**ALKALOIDS ELECTROCHEMICAL MULTISENSOR
EXPRESS ANALYSIS IN THE ELECTRONIC TONGUE FORMAT**

E.M. Petrenko

lp-2002@mail.ru

V.A. Semenova

valentann@yandex.ru

**Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation**

Abstract

The paper presents a method of multisensor inversion voltammetry to detect and identify the alkaloids macro quantity in a test sample. In contrast to the existing multisensor systems using a set of indicating electrodes, the proposed method envisages a line of sensors formed on the surface of a single planar three-electrode system at introducing in the background electrolyte a number of transition metal ions and forming complexes with the sample toxic substances of the sample. Effect of each organic substance on the electrochemical behavior of the multisensor test system is different; therefore, it becomes possible to use the electrolyte solution containing a set of cations of various metals as the test system. The developed method advantage lies in obtaining reliable results with low labor intensity and in high efficiency of the analysis. Taking into account specifics of the substances under identification, composition of the electrochemical test system was optimized, and information parameters characterizing the alkaloids presence in the test sample were identified. Successful application of the proposed method in analytical

Keywords

*Inversion voltammetry,
identification, multisensors,
electrochemical test system*

studies leads to its implementation in the electronic tongue format. Based on the results of the research conducted, a method of analysis is proposed that with high reliability makes it possible to detect and identify alkaloids both in the laboratory and in the out-of-laboratory conditions

Received 30.03.2022

Accepted 12.05.2022

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Simonov E.A., Makarov V.G. Ispolzovanie metodov kapelnogo analiza dlya obnaruzheniya narkoticheskikh sredstv vo vnelaboratornykh usloviyakh. V kn.: Kriminallistika: 21 vek [Use of drip analysis methods for the detection of narcotic drugs in out-of-laboratory conditions. In: Criminalistics: 21st century]. Moscow, EKTs MVD RF Publ., 2001, p. 3 (in Russ.).
- [2] Chai X.-S., Dong C., Deng Y. In situ determination of bacterial growth by multiple headspace extraction gas chromatography. *Anal. Chem.*, 2008, vol. 80, no. 20, pp. 7820–7825. DOI: <https://doi.org/10.1021/ac801537x>
- [3] Kogan V.T., Antonov A.S., Lebedev D.S., et al. Direct mass-spectrometric measurement of methane and its volatile homologues in water. *Tech. Phys.*, 2013, vol. 58, no. 3, pp. 439–446. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784213030146>
- [4] Ekman R., Silberring J., Westman-Brinkmalm A.M., et al. Mass spectrometry. Wiley, 2008.
- [5] Lukovtsev V.P., Doronin A.N., Lukovtseva N.V., et al. Identification of alkaloids using the stripping voltammetry method. *Russ. J. Electrochem.*, 2009, vol. 45, no. 7, pp. 810–812. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1023193509070167>
- [6] Budnikov G.K. Determination of substances trace amounts as a problem of modern analytical chemistry. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal*, 2000, vol. 6, no. 3, pp. 45–51 (in Russ.).
- [7] Doronin A.N., Kolesnichenko I.I., Tikhonova S.V., et al. The effect of papaverine on cadmium electrodeposition on glassy carbon electrode modified with mercury. *Russ. J. Electrochem.*, 2012, vol. 48, no. 9, pp. 941–943. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1023193512080034>
- [8] Kolesnichenko I.I., Klyuev A.L., Ganshin V.M., et al. Express screening of biological objects using multisensory inversion voltammetry with pattern recognition. *Prot. Met. Phys. Chem. Surf.*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 543–547. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2070205114040078>
- [9] Singh S. Sensors — an effective approach for the detection of explosives. *J. Hazard. Mater.*, 2007, vol. 144, iss. 1-2, pp. 15–28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.018>
- [10] Ganshin V.M., Fesenko A.V., Chebyshev A.V. From olfactory models to the “electronic nose”. New features of parallel analytics. *Spetsialnaya tekhnika*, 1999, no. 1-2, pp. 2–11 (in Russ.).

- [11] Vlasov Yu.G., Legin A.V., Rudnitskaya A.M. Electronic tongue: chemical sensor systems for analysis of aquatic media. *Russ. J. Gen. Chem.*, 2008, vol. 78, no. 12, pp. 2532–2544. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070363208120335>
- [12] Vlasov Yu.G., Ermolenko Yu.E., Legin A.V., et al. Chemical sensors and their systems. *J. Anal. Chem.*, 2010, vol. 65, no. 9, pp. 880–898. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1061934810090029>
- [13] Raman B., Meier D.C., Evju J.K., et al. Designing and optimizing microsensor arrays for recognizing chemical hazards in complex environments. *Sens. Actuators B Chem.*, 2009, vol. 137, iss. 2, pp. 617–629. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2008.11.053>
- [14] Feng L., Musto C.J., Kemling J.W., et al. A colorimetric sensor array for identification of toxic gases below permissible exposure limits. *Chem. Commun.*, 2010, vol. 46, iss. 12, pp. 2037–2039. DOI: <https://doi.org/10.1039/B926848K>
- [15] Shlefer G.L. *Kompleksoobrazovanie v rastvorakh [Complexation in solutions]*. Moscow, Leningrad, Khimiya Publ., 1964.

Petrenko E.M. — Cand. Sc. (Eng.), Leading Researcher, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Semenova V.A. — Researcher, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Petrenko E.M., Semenova V.A. Alkaloids electrochemical multisensor express analysis in the electronic tongue format. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 6 (105), pp. 144–156 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-6-144-156>