

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-9-28-33

ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОТОЧНО-ИНЖЕКЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИОНОВ РТУТИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОДА НА ОСНОВЕ ДИАНТИПИРИЛПРОПИЛМЕТАНА¹

© Сарижат Джабраиловна Татаева, Арсен Шамсудинович Рамазанов, Курбан Эдуардович Магомедов, Руслан Зейналович Зейналов

Дагестанский государственный университет, г. Махачкала, Россия; e-mail: anchemist@yandex.ru

Статья поступила 5 декабря 2017 г.

Показана возможность использования диантипирилпропилметана (ДАППМ) в качестве электродноактивного компонента мембраны ртутьселективного электрода (Hg-СЭ). В целях выяснения механизма функционирования мембраны изучены равновесия в системе «мембрана – раствор» в зависимости от кислотности среды и количества ионофора. ДАППМ при pH 0 – 1,5 находится в катионной форме, а ионы ртути в 0,1 М HCl — в виде трихлормеркуриат-иона. Образованный в этих условиях ионный ассоциат $\text{HDAAPP}^+ [\text{HgCl}_3]^-$ наиболее стабилен при pH 1 и pCl 1, и мембрана откликается только на трихлормеркурат-ионы. Оптимизирован состав мембраны, на основе которого создан Hg-СЭ (в % масс.): ПВХ — 32,32; *o*-нитрофенилоктиловый эфир — 64,63; ДАППМ — 3,05 (концентрация ДАППМ — 100 ммоль/л). Установлены следующие электрохимические характеристики Hg-СЭ: линейный диапазон — $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ моль/л, крутизна электродной функции — 50 мВ/дек., рабочий диапазон pH — 0 – 1,5, время отклика — 15 – 20 с, предел обнаружения — $6,3 \cdot 10^{-5}$ моль/л. Способом бионных потенциалов определены потенциометрические коэффициенты селективности Hg-СЭ относительно некоторых анионов и катионов. Предлагаемый электрод использован в качестве детектора в проточно-инжекционном определении ртути в сточной воде и креме «Achromin». Найдены оптимальные условия работы проточно-инжекционной системы, которые обеспечивают стабильность базовой линии, а также максимальные чувствительность и производительность анализа. Правильность результатов определения ртути подтверждена методом «введено – найдено».

Ключевые слова: ионометрия; потенциал; мембрана; электродноактивный компонент; ртуть; отклик; селективность; электрод; проточно-инжекционный анализ; определение.

POTENTIOMETRIC FLOW-INJECTION DETERMINATION OF MERCURY IONS USING DIANTIPYRILPROPYLMETHAN BASED ELECTRODE

© Sarijat D. Tataeva, Arsen Sh. Ramazanov, Kurban E. Magomedov, Ruslan Z. Zeynalov

Dagestan State University, Makhachkala, Russia; e-mail: anchemist@yandex.ru

Submitted December 5, 2017.

The possibility of using diantipyrylpropylmethane (DAPPМ) as an electrode-active membrane component of the mercury-selective electrode (Hg-SE) is shown. To clarify the mechanism of membrane functioning we studied the equilibrium in the “membrane-solution” system as a function of the medium acidity and amount of the ionophore. The potentiometric selectivity coefficients of Hg-SE are determined with respect to some anions and cations by the method of bionic potentials. DAPPМ at pH 0 – 1.5 is in the cation form, and mercury ions in 0.1 M HCl — in the form of a trichloromercurium ion. The ion associate $\text{DAPPМ}^+ [\text{HgCl}_3]^-$ formed under these conditions is the most stable at pH 1 and pCl 1, and the membrane responds only to trichloromercurate ions. A mercury-selective electrode with an optimized membrane composition (in wt. %) contains: PVC — 32.32; *o*-NPOE — 64.63; DAPPМ — 3.05 (DAPPМ concentration 100 mM). The electrochemical characteristics are determined: the linear range (1×10^{-4} – 1×10^{-2} M) and slope of the electrode function (50 mV/dec). The operating range (pH 0 – 1.5), detection limit (6.3×10^{-5} M), and the response time (15 – 20 sec) are determined. For optimal

¹ Работа выполнена на базе научно-образовательного центра «Химия и химическая технология» с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Аналитическая спектроскопия» в рамках Гос. задания 4.5789.2017/ИТР и при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (программа «УМНИК»).

operation of the flow-injection system, a selection of the carrier stream has been made, which affects the stability of the line, the sensitivity and the performance of the analysis. The proposed electrode is used as a detector in the flow-injection determination of mercury in sewage water and "Achromin" cream. Optimum operation conditions of the flow-injection system which ensure the stability of the baseline, as well as the maximum sensitivity and performance of the analysis, are found. The correctness of the results of the determination of mercury is confirmed in spike tests.

Keywords: ionometry; potential; membrane; electrode-active component; mercury; response; selectivity; electrode; flow-injection analysis; determination.

В последнее десятилетие сужаются области применения ртути, ее сплавов и соединений, а контроль ее содержания в различных реальных объектах ужесточается. Это приводит к увеличению числа объектов, с которыми приходится иметь дело аналитикам при разработке новых чувствительных физических и физико-химических методов определения ртути. Ртуть — типичный представитель кумулятивных ядов [1, 2], ее воздействие даже в небольших количествах может вызывать серьезные проблемы со здоровьем, поэтому необходимы высокочувствительные методики, позволяющие определять ртуть на уровне ПДК. Актуальной задачей является поиск чувствительных и селективных электродноактивных веществ (ЭАВ) и создание на их основе Hg-СЭ [3]. Для ионометрии представляют интерес различные липофильные аналитические реагенты, применяемые как для экстракции [4], так и для прямого фотометрического определения различных элементов.

Для анализа медико-биологических образцов по большому набору параметров при малых объемах самого образца применяют клинические анализаторы — полностью автоматизированные устройства, в которых с помощью системы насосов анализируемая проба прокачивается через проточную ячейку, снабженную набором ИСЭ. Такая схема позволяет резко сократить объем образца и, вместе с тем, получить сведения о концентрации целого набора ионов [5].

Цель работы — использование диантипирилпропилметана в качестве ЭАВ мембраны Hg-СЭ для проточно-инжекционного определения ртути (II) в водах и отбеливающем креме.

Оборудование и реактивы. В качестве ионофора использовали диантипирилпропилметан (1,1-бис-(1,2-дигидро-1,5-диметил-2-фенил-3Н-пиразол-3-он-4-ил)бутан); для изготовления пленочной мембраны основой и склеивающим материалом служил поливинилхлорид (ПВХ) высокой плотности; пластификатор мембраны — *о*-нитрофенилоктиловый эфир (*о*-НФОЭ), (Selectophore grade, Fluka, Швейцария); летучие растворители мембранных компонентов — тетрагидрофуран (ТГФ) и циклогексанон (ЦГ) хч (Вектон, Россия).

Измерения потенциала в статических условиях проводили с помощью высокоточной компью-

теризованной 8-канальной потенциометрической станции «Экотест-120» (Измерительная техника, Россия) с применением двухключевого хлорид-серебряного электрода сравнения ЭСр-10101 (внутренняя часть электрода заполнена 3,5 М раствором KCl, внешняя — насыщенным раствором KNO₃). Измерения в потоке проводили с помощью высокоскоростной компьютеризованной станции EMF6 (Lawson Labs Inc., США). Для изготовления ИСЭ использовали поливинилхлоридные трубки размером 12 × 90 мм с пластифицированными ПВХ-мембранами на основе ДАППМ. В качестве внутреннего электрода сравнения использовали серебряную проволоку, покрытую слоем хлорида серебра в соответствии с методикой [6]. Для задания точных объемов мембранных композиций применяли одноканальные дозаторы переменного объема Блэк (Термо Фишер Сайентифик, Россия). Спектры регистрировали при помощи двухлучевого спектрофотометра Specord 210 Plus (Analytik Jena AG, Германия).

Программное обеспечение. Для измерения потенциала ИСЭ с помощью потенциометрической станции EMF6 использовали приложение LL_USB_Graphics.exe (Lawson Labs Inc., США) версии 6.23.17. Для построения графиков и расчетов в хроматографировании использовали OriginPro 2016 (32-bit) b9.3.226 (OriginLab Corp., США) и Wolfram Mathematica 11.2 (Wolfram Research Inc., США).

Изготовление мембраны на основе ДАППМ осуществляли, как описано в работе [6]. Для расчета толщины мембран при точной молярной концентрации ЭАВ применяли итеративное уравнение, приведенное в работе [7]. ИСЭ для проточно-инжекционного анализа готовили используя ДАППМ в качестве ионофора аналогично описанию [8] за исключением системы твердого контакта.

Мембранные композиции для изготовления ИСЭ готовили варьируя массовые доли ПВХ, ДАППМ и *о*-НФОЭ, массовая доля сухого вещества в композициях составляла 13 – 14 % масс., остальное — ТГФ. Мембранную композицию встряхивали на механическом устройстве в течение часа до гомогенного состояния. После удаления пузырьков воздуха для изготовления мас-

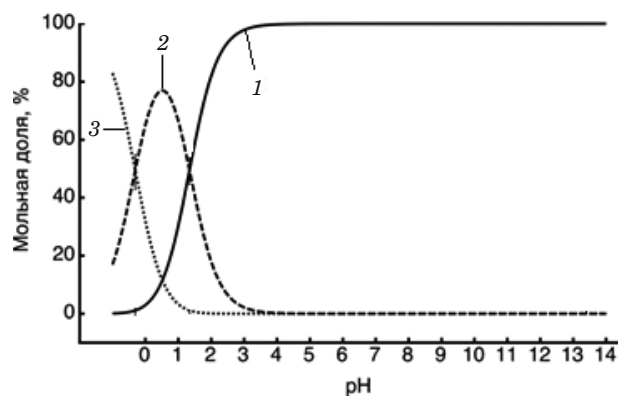


Рис. 1. Зависимость мольной доли различных форм диантипирилпропилметана от pH: 1 — ДАППМ; 2 — НДАППМ⁺; 3 — H₂ДАППМ²⁺

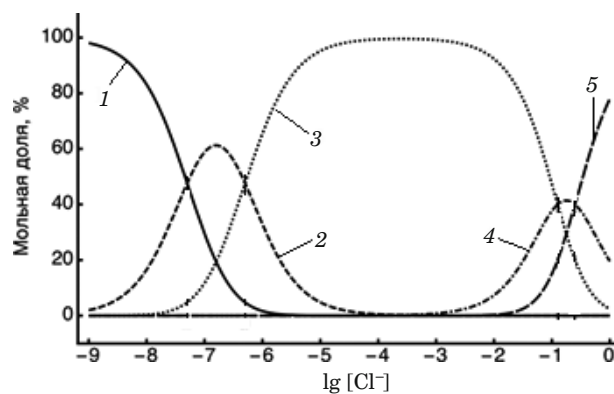


Рис. 2. Зависимость мольной доли хлоридных комплексов ртути (II) от концентрации хлорид-ионов: 1 — Hg²⁺; 2 — HgCl⁺; 3 — HgCl₂; 4 — [HgCl₃]⁻; 5 — [HgCl₄]²⁻

тер-мембран вливали 3 мл соответствующей мембранной композиции в стеклянные кольца диаметром 30 мм, помещенные на гладкую стеклянную пластину, и оставляли до полного испарения ТГФ. Во избежание образования неровностей мембраны из-за быстрого испарения ТГФ кольца накрывали фторопластовыми пластинами. Мембрану диаметром 12 мм вырезали и приклеивали 13 %-ным (по массе) раствором ПВХ в ЦГ к торцам поливинилхлоридной трубки. Электроды заполняли различными электролитами, содержащими 0,01 моль/л Hg (II).

Проточная потенциометрическая ячейка для анализа малых объемов жидких образцов представляла собой отрезок поливинилхлоридной трубки, которая содержит ионофор и мембранный пластификатор (*o*-НФОЭ), внесенные путем диффузионного допирования в стенки трубки, предварительно обработанной летучим растворителем для удаления нативного пластификатора и набухания. Эта допированная мембрана является сенсорной зоной для потенциометрического определения ионов в жидком образце, а участки катетера соединяли с непластифицированными ПВХ-трубками клеем на основе раствора ПВХ в ЦГ.

Измерения потенциала и pH проводили при постоянной температуре (25 ± 1 °C). Потенциал регистрировали, когда его дрейф составлял не более 3 мВ/мин. Время с момента погружения электрода в исследуемый раствор до установления потенциала, составляющего 90 % от равновесного значения, определяли как время отклика электрода.

В качестве объектов исследования были выбраны сточная вода (г. Махачкала) и фармацевтический препарат Achromin.

Ионофор выбирали исходя из значений липофильности некоторых азот- и серосодержащих органических реагентов: с увеличением липо-

фильности расширяется нернстовская область электродной функции, увеличивается срок жизни Hg-СЭ и уменьшается выход в раствор ЭАВ [9].

Липофильность ДАППМ ($\log P$), рассчитанная с использованием программы ACD/Chem-Sketch, составила $2,3 \pm 0,4$, а время жизни предлагаемого электрода — 6 месяцев. Для диантипирилпропилметана (ДАППМ) это значение ниже — $1,8 \pm 0,3$. Серосодержащий реагент тионалид характеризуется более высоким значением липофильности — $2,8 \pm 0,3$, но меньшей селективностью в связи с катионным механизмом работы ИСЭ.

Изучены диаграммы зависимости мольной доли ионных форм ртути и ДАППМ от кислотности раствора (рис. 1), а также влияние концентрации хлорид-ионов на мольную долю хлоридных комплексов ртути (рис. 2), что позволило найти оптимальные аналитические формы ДАППМ и хлоридных комплексов ртути (II).

Рабочий диапазон pH составил 0 – 1,5, повышение pH приводит к депротонизации ионофора и его переходу в нейтральную форму, не откликающуюся на основной ион (см. рис. 1). Из рис. 2 видно, что при децимолярной концентрации хлорид-ионов доминирует ионная форма [HgCl₃]⁻.

Подтвержден факт образования ионного ассоциата ионофора ДАППМ и хлоридного комплекса [HgCl₃]⁻ состава НДАППМ⁺ [HgCl₃]⁻ (1:1) (рис. 3).

Спектры поглощения ионного ассоциата гипсохромно сдвинуты относительно спектра [HgCl₃]⁻ и батохромно — относительно спектра ДАППМ со значительным увеличением интенсивности поглощения.

Изучение зависимости электродных характеристик мембран от количества ЭАВ и вида фонового электролита выявило, что в случае мембраны с концентрацией ДАППМ 50 ммоль/л

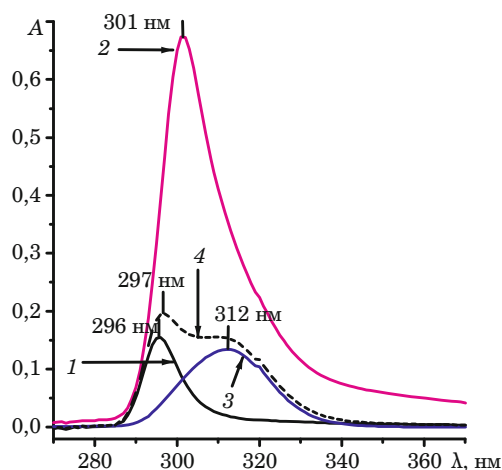


Рис. 3. Спектры поглощения: 1 — диантипирилпропилметана; 2 — НДАППМ⁺ [HgCl₃]⁻; 3 — [HgCl₃]⁻; 4 — рассчитанный из сумм ДАППМ и [HgCl₃]⁻

и добавлением 0,5 М раствора KCl во внутреннюю полость Hg-СЭ они имели высокие погрешности в анализе и не воспроизводились. При увеличении концентрации ЭАВ в мембране до 100 ммоль/л и введении во внутреннюю полость Hg-СЭ 0,1 М HCl получили более воспроизводимые результаты (рис. 4).

На основе мембраны, содержащей 100 ммоль/л ДАППМ, сконструирован Hg-СЭ со следующими электрохимическими характеристиками: крутизна электродной функции — 50 мВ/дек., ее нернстовская область — $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ моль/л, предел обнаружения ртути в стационарном режиме — $6,3 \cdot 10^{-5}$ моль/л (см. рис. 4).

Способом бионных потенциалов определены потенциометрические коэффициенты селективности Hg-СЭ к [HgCl₃]⁻ относительно некоторых анионов (lgK).

Исходя из динамики отклика потенциала, анионы различных солей по селективности можно расположить в ряд: [HgCl₃]⁻ > Br⁻ (-0,1) > I⁻ (-0,5) > ClO₄⁻ (-1,4) ≈ IO₄⁻ (-1,4) > SO₄²⁻ (-1,6) > NO₃⁻ (-1,7) > H₂PO₄⁻ (-1,9) > SCN⁻ (-2). Изучали возможность применения Hg-СЭ для определения ртути в статических условиях на фоне различных концентраций галогенид-ионов. Выявлено, что мембрана с оптимизированным составом чувствительна к трихлормеркурат-иону в узком диапазоне концентраций и в присутствии бромидов и йодидов. Анионы Br⁻, I⁻ при выбранных условиях образуют устойчивые двухзарядные анионные комплексы [HgBr₄]²⁻, [HgI₄]²⁻, и крутизна электродной функции не соответствует теоретическому значению.

Hg-СЭ с мембраной на основе ионного ассоциата ДАППМ и хлоридного комплекса ртути (II) совместно с электродом сравнения использовали в качестве детектора в проточно-инжекци-

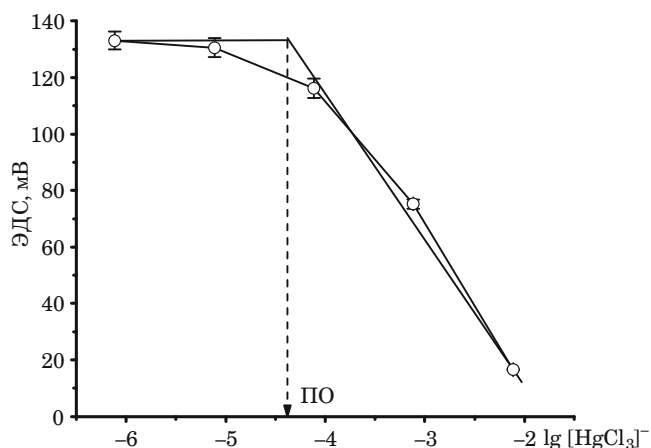


Рис. 4. Зависимость потенциала Hg-СЭ от концентрации трихлормеркурат-иона

онном анализе. Схема проточной потенциометрической ячейки представлена на рис. 5.

Последовательное соединение трех Hg-СЭ привело к аддитивности аналитического сигнала, повышению чувствительности и снижению предела обнаружения.

Из нескольких исследованных вариантов лучшим в качестве потока оказался 0,1 М раствор HCl. Скорость потока варьировали в пределах от 1,0 до 3,5 мл/мин, объем пробы — от 100 мкл до 100 мл.

При оптимальной скорости потока децимолярного раствора HCl, равной 3,5 мл/мин, зарегистрированы хроматограммы 100 мл стандартных растворов Hg(NO₃)₂ с концентрациями 1, 5, 25 и 50 мкг/л (рис. 6).

Для контроля правильности расчетов сравнивали хроматограмму исследуемого раствора с хроматограммой стандартного раствора с близкой концентрацией ртути. При этом стандартное отклонение воспроизводимости для исследуемых растворов составляет $n \cdot 10^{-2}$ – $n \cdot 10^{-1}$ мкг/л.

Для оценки потенциометрической селективности Hg-СЭ в поток последовательно вводили по 200 мкл 0,001 М растворов солей некоторых металлов. Отклик Hg-СЭ значительно ослабевает при инжестировании следующих катионов, образующих хлоридные комплексы: Zn (II) > Cd (II) > Fe (III) > Pb (II).

Пики, соответствующие Cu (II), Ag (I), Pb (II), размыты, и время возвращения потенциала электрода к уровню базовой линии составляло 25 – 30 мин. Увеличение концентрации Ag (I), Pb (II) в дозируемой пробе до 0,01 моль/л приводило к образованию осадка, загрязняющего коммуникацию мембраны Hg-СЭ.

Увеличение скорости потока до 3,5 мл/мин приводило к снижению чувствительности Hg-СЭ к Cd (II), Pb (II), Ni (II), Fe (III) и повышению

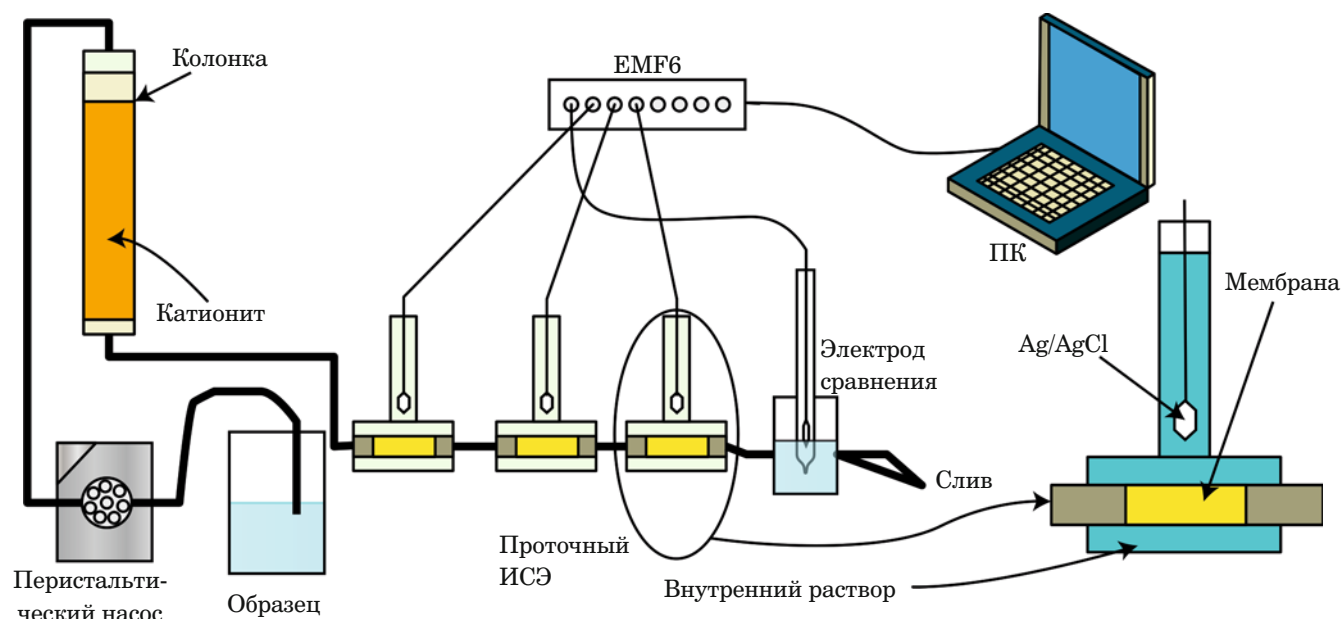


Рис. 5. Схема проточно-инжекционной установки с Hg-СЭ

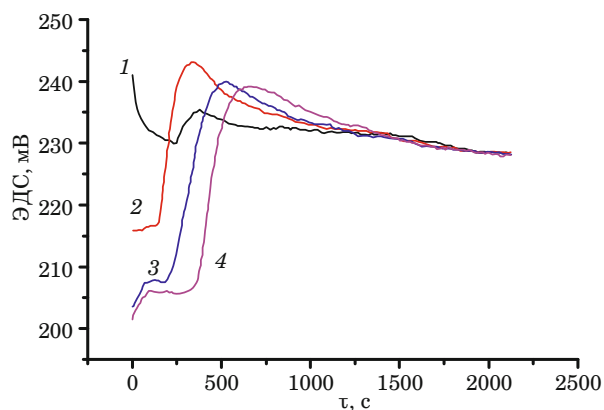


Рис. 6. Хроматограммы стандартных растворов Hg (II) различных концентраций (мкг/л): 1 — 1,0; 2 — 5,0; 3 — 25,0; 4 — 50,0

чувствительности и селективности к Hg (II). Предел обнаружения ртути (II) при непосредственном введении пробы в оптимальном режиме составлял $6,3 \cdot 10^{-5}$ моль/л, этого недостаточно для определения ртути в большинстве объектов окружающей среды. В целях снижения предела обнаружения проводили сорбционное концентрирование Hg (II) в ионообменнике КУ-2х8 (размер частиц — 0,25 – 0,5 мм) с элюированием 0,1 М HCl.

Предварительное концентрирование в $1 \cdot 10^3$ способствовало повышению избирательности определения Hg (II). Присутствующие в объектах ионы Cd (II), Fe (III), Pb (II), Zn (II), Cu (II) мешающего действия не оказывают.

Определение ртути в отбеливающем креме «Achromin». Для ускорения разложения пробы крема использовали систему микроволновой пробоподготовки TOPwave (Analytik Jena AG,

Германия) со специальными герметичными фторопластовыми сосудами (автоклавами) с керамическим кожухом CX100 (Analytik Jena AG, Германия).

К навеске крема массой 2,8 – 3,0 г, взятой с точностью 0,0002 г (в 8 сосудов вносили навески массой примерно по 0,3 г), добавляли 56 мл концентрированной азотной кислоты и 8 мл пероксида водорода (по 7 и 1 мл соответственно в сосуд) для разложения пробы. Объединенный раствор из 8 сосудов переносили в колбу на 100 мл и доводили его объем до метки водой. Раствор, содержащий навеску, пропускали через ионообменную колонку со скоростью 5 – 10 мл/мин, затем подавали 0,1 М HCl со скоростью 3,5 мл/мин и регистрировали значение ЭДС во времени. Полученные хроматограммы обрабатывали с помощью программного обеспечения OriginPro с использованием следующих опций:

- удаление шумов;
- применение бегущего среднего для сглаживания данных;
- перевод ЭДС в концентрацию по функции, описывающей работу ИСЭ;
- нахождение и вычитание базовой линии;
- сравнение результата со стандартным раствором по высоте пика.

Определение ртути в сточной воде. Исследуемый образец воды объемом 1 л подкисляли азотной кислотой до pH 1 и добавляли нитрат серебра для удаления хлорид-ионов (до уровня менее 10^{-4} моль/л), отфильтровывали от осадка хлорида серебра и пропускали через ионообменную колонку со скоростью 50 мл/мин, затем элюиро-

Результаты определения Hg (II) в сточной воде и креме «Achromin» после предварительного концентрирования ($n = 3$; $P = 0,95$)

Объект	Введено, мкг	Найдено, мкг/л	S_r
Сточная вода	0	$3,0 \pm 0,5$	0,18
	10	$13,9 \pm 0,9$	0,06
	20	$22,8 \pm 0,5$	0,02
	40	$43,6 \pm 0,7$	0,02
Крем «Achromin»	0	$0,35 \pm 0,04$	0,12
	10	$10,9 \pm 0,4$	0,04
	20	$21,1 \pm 0,4$	0,02

вали 0,1 М HCl. Количество Hg (II) в пробах рассчитывали по высоте пика.

Соответствующие результаты определения ртути методом «введено – найдено» представлены в таблице.

Таким образом, показана возможность использования ДАППМ в качестве ионофора мембраны Hg-СЭ. Изучены равновесия в системе «мембрана – раствор»: подтверждено образование ионного ассоциата НДАППМ + $[HgCl_3]^-$, который наиболее стабилен при pH 1 и pCl 1, при этих условиях электрод откликается на ионы $[HgCl_3]^-$.

Сконструирован ртутьселективный электрод с оптимизированным составом мембраны (в % масс.): ПВХ — 32,32; о-НФОЭ — 64,63; ДАПМ — 3,05 (100 моль/л). Определены электрохимические характеристики Hg-СЭ: линейный диапазон — $1 \cdot 10^{-4}$ – $1 \cdot 10^{-2}$ моль/л, крутизна электродной функции — 50 мВ/дек., рабочий диапазон pH — 0 – 1,5, предел обнаружения — $6,3 \cdot 10^{-5}$ моль/л, время отклика — 15 – 20 с.

Предложенный Hg-СЭ электрод использован в качестве детектора в проточно-инжекционном определении ртути в сточной воде и отбеливателем креме «Achromin». Правильность результатов определения ртути подтверждена методом «введено – найдено».

ЛИТЕРАТУРА

1. Гладышев В. П., Левицкая С. А., Филиппова Л. М. Аналитическая химия ртути. — М.: Наука, 1974. — 231 с.
2. Zaikov G. E., Weisfeld L. I., Lisitsyn E. M., Bekuzarova S. A. (Eds.) Heavy metals and other pollutants in the environment: biological aspects — Waretown, NJ, USA: Apple Academic Press, 2017. — 438 p.

3. Li X.-Q., Liang H.-Q., Cao Z., et al. Simple and rapid mercury ion selective electrode based on 1-undecanethiol assembled Au substrate and its recognition mechanism / Mater. Sci. Eng. C. 2017. Vol. 72. P. 26 – 33.
4. Дегтев М. И., Попова О. Н., Юминова А. А. Фазовые равновесия и константы распределения ионов металлов в системах диантипирилалкан – органическая кислота – хлороводородная кислота – вода / Журн. физ. химии. 2014. Т. 88. № 7 – 8. С. 1239 – 1242.
5. Булатов А. В., Москвин А. Л., Москвин Л. Н. и др. Автоматизация и миниатюризация химического анализа на принципах проточных методов (обзор) / Научное приборостроение. 2015. Т. 25. № 2. С. 3 – 26.
6. Татаева С. Д., Рамазанов А. Ш., Магомедов К. Э., Горячая В. С. Потенциометрический сенсор, обратимый по ионам цинка, меди и кадмия, на основе пластифицированного 1-(2-пирилазо)-2-нафтола / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 8. С. 16 – 19.
7. Татаева С. Д., Магомедова В. С., Магомедов К. Э. Определение ионов свинца с помощью электрода на основе диантипирилметана / Журн. аналит. химии. 2016. Т. 71. № 11. С. 1172 – 1176.
8. Пат. 2537094 Российская Федерация. Проточная мультисенсорная потенциометрическая ячейка для анализа малых объемов жидких образцов / Михельсон К. Н., Муратова И. С. — № 2013120898/28; заявл. 06.05.2013; опубл. 27.12.2014, Бюл. № 36.
9. Mikhelson K. N. Ion-Selective Electrodes. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. — 169 p.

REFERENCES

1. Gladyshev V. P., Levitskaya S. A., Filippova L. M. Analytical chemistry of mercury. — Moscow: Nauka, 1974. — 231 p. [in Russian].
2. Zaikov G. E., Weisfeld L. I., Lisitsyn E. M., Bekuzarova S. A. (Eds.) Heavy metals and other pollutants in the environment: biological aspects — Waretown, NJ, USA: Apple Academic Press, 2017. — 438 p.
3. Li X.-Q., Liang H.-Q., Cao Z., et al. Simple and rapid mercury ion selective electrode based on 1-undecanethiol assembled Au substrate and its recognition mechanism / Mater. Sci. Eng. C. 2017. Vol. 72. P. 26 – 33.
4. Degtev M. I., Popova O. N., Yuminova A. A. Phase equilibria and distribution constants of metal ions in diantipyryl alkane-organic acid-hydrochloric acid-water systems / Rus. J. Phys. Chem. A. 2014. Vol. 88. N 8. P. 1419 – 1422.
5. Bulatov A. V., Moskvina A. L., Moskvina L. N., et al. Automation and miniaturization of chemical analysis on the principles of flow methods (review) / Nauch. Priborostr. 2015. Vol. 25. N 2. P. 3 – 26 [in Russian].
6. Tataeva S. D., Ramazanov A. Sh., Magomedov K. E., Goryachaya V. S. Potentiometric sensor reversible in zinc, copper, and cadmium ions based on plasticized 1-(2-pyridylazo)-2-naphthol / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 8. P. 16 – 19 [in Russian].
7. Tataeva S. D., Magomedova V. S., Magomedov K. E. Determination of lead ions using an diantipyrylmethane-based electrode / J. Anal. Chem. 2016. Vol. 71. N 11. P. 1115 – 1119.
8. RF Pat. 2537094. Flowing multi-sensor potentiometric cell for analysis of small volumes of liquid samples / Mikhelson K. N., Muratova I. S. N 2013120898/28; publ. 27.12.2014.
9. Mikhelson K. N. Ion-Selective Electrodes. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. — 169 p.