

УДК 543.552:661:887

ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ВИСМУТА(III) В ДИМЕТИЛСУЛЬФОКСИД- И ДИМЕТИЛФОРМАМИДСОДЕРЖАЩИХ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ

© 2024 г. А. В. Трубачев^{а, *}, Л. В. Трубачева^а

^а Удмуртский государственный университет
ул. Университетская, 1, Ижевск, 426034 Россия

* e-mail: trub_av@mail.ru

Поступила в редакцию 24.03.2023 г.

После доработки 10.07.2023 г.

Принята к публикации 14.07.2023 г.

Исследовано вольтамперометрическое поведение висмута (III) в ацетатно-перхлоратных диметилсульфоксид- и диметилформамидсодержащих растворах, установлены зависимости потенциалов электровосстановления и величин токов пиков висмута (III) от состава смешанного минерально-органического электролита, найдено, что электровосстановление висмута (III) протекает необратимо с участием трех электронов. Показано, что в данных условиях возможно образование комплексов висмута (III), включающих в состав координационной сферы молекулы диметилсульфоксида и диметилформамида. При этом в объеме раствора преобладают комплексные частицы, содержащие в координационной сфере центрального иона три молекулы растворителя, а на электроде разряжаются частицы, содержащие две молекулы ДМСО и одну молекулу ДМФА. Найдены области линейной зависимости тока пика висмута (III) от его концентрации в растворе. Оценены возможности применения ацетатно-перхлоратных диметилсульфоксид- и диметилформамидсодержащих электролитов для вольтамперометрического определения висмута в лекарственных препаратах.

Ключевые слова: вольтамперометрия, висмут, водно-органическая среда.

DOI: 10.31857/S0044450224010041, **EDN:** lexhaw

Изучению вольтамперометрического поведения висмута (III) и возможности его электроаналитического определения в различных средах и материалах посвящен ряд исследований. В работе [1] изучено вольтамперометрическое поведение висмута (III) в солянокислых растворах дибромпирогаллолсульфоталеина и предложена методика определения малых содержаний висмута, основанная на адсорбции и восстановлении комплекса, образующегося на поверхности модифицированного угольно-пастового электрода, с последующим анодным окислением Vi^0 до Vi^{3+} . Золотой электрод, химически модифицированный углеродными нанотрубками с поверхностно-связанным бифенилдиметандиолом, предложен для определения висмута в природных и высокосолёных водах [2].

Инверсионно-вольтамперометрическое определение висмута (III) в питьевой воде предложено проводить с использованием ртутного пленочного углесталлового электрода на фоне смеси хлорида аммония и соляной кислоты [3]. Метод инверсионной вольтамперометрии на угольно-сурьмяном пастовом электроде с солянокислым фоновым электролитом применен для определения висмута в речной воде [4].

Авторы работы [5] предложили вольтамперометрический способ определения висмута (III) в хозяйственно-бытовых и сточных водах, заключающийся в выделении гидрида висмута из солянокислого раствора путем добавления борогидрида натрия с последующим его электроокислением на графитовом электроде.

В работе [6] описан ионселективный электрод, обратимый к этилендиаминтетраацетат-висмутат(III)-аниону и разработана методика потенциометрического определения висмута (III) в антиацидных лекарственных препаратах. Для определения Bi(III) в фармацевтической смеси субсалицилата висмута предложена инверсионно-вольтамперометрическая методика с использованием ртутного пленочного электрода в фоновом электролите состава $0.2 \text{ M NaNO}_3 + 0.2 \text{ M HNO}_3$, при этом в сравнении с методом УФ-спектrophотометрии метод инверсионной вольтамперометрии оказался более предпочтительным [7].

Известно, что применение в вольтамперометрии смешанных минерально-органических электролитов с высокой сольватирующей способностью позволяет повысить точность и селективность определения металлокатионов в сложных по химическому составу объектах [8].

В данной работе изучено вольтамперометрическое поведение висмута (III) в присутствии диметилсульфоксида (ДМСО) и диметилформамида (ДМФА) на ацетатно-перхлоратном фоне. Предложено использовать данные минерально-органические электролиты в качестве сред для определения содержания висмута в лекарственных препаратах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Вольтамперограммы исследуемых растворов висмута (III) регистрировали на полярографе универсальном ПУ-1 в режиме линейной развертки поляризующего напряжения, задавая скорости сканирования поляризующего напряжения от 0.1 до 1.0 В/с в области катодных потенциалов от -0.05 до -0.50 В.

Все исследования проводили в трехэлектродной термостатируемой ячейке, используя в качестве рабочего электрода ртутный капаящий электрод с периодом капания 14 с, а также стационарный ртутный пленочный электрод на серебряной подложке для оценки возможности его аналитического применения в изучаемых условиях.

В качестве электрода сравнения использовали насыщенный каломельный электрод (нас. к. э.), который соединяли с испытуемым раствором с помощью электролитического мостика, заполненного раствором фона-электролита, и сосуда с насыщенным раствором хлорида калия.

Растворы в ячейке деаэрировали аргоном в течение 5 мин, после чего регистрировали

вольтамперограммы, поддерживая постоянную температуру $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$. Рабочие растворы висмута (III) готовили растворением точной навески металлического висмута в 1 М хлорной кислоты при нагревании, а электролиты для регистрации вольтамперограмм — смешением в мерной колбе емкостью 25 мл соответствующих аликвот раствора металла, ДМСО, ДМФА и 1 М раствора ацетата натрия, доводя объем до метки дистиллированной водой. Все реактивы, используемые в работе, имели квалификацию х.ч.

Функциональные параметры электровосстановления висмута (III) рассчитывали в соответствии с известными уравнениями для изучения вольтамперометрического поведения металлокатионов в растворах электролитов:

— уравнения катодного тока для случаев обратимого и необратимого электровосстановления деполяризатора [9, 10]:

$$I_{\text{обр.}} = 2.72 \times 10^5 n^{3/2} D^{1/2} \nu^{1/2} c A,$$

$$I_{\text{необр.}} = 3.01 \times 10^5 n^{3/2} \alpha^{1/2} D^{1/2} \nu^{1/2} c A,$$

— уравнения равновесного потенциала и тока обмена [11, 12]:

$$E_{\text{равн.}}(\alpha + \beta) = \alpha E_{\text{к}} + \beta E_{\text{а}} - 2.3 \frac{RT}{nF} \lg \frac{a'}{a''} + 2.3 \frac{RT}{nF} \lg \frac{i_{\text{к}}}{i_{\text{а}}},$$

$$\lg i_0 = \alpha \lg i_{\text{а}} + \beta \lg i_{\text{к}} - (\alpha \lg a'' + \beta \lg a') - \frac{nF}{RT} \cdot \frac{\alpha \beta}{2.3} \Delta E_{\text{ак}};$$

— уравнения для определения состава комплексных частиц, преобладающих в объеме раствора и разряжающихся на электроде [13]:

$$\Delta E_{\text{равн.}} / \Delta \lg c_L = -p_1 2.3 \frac{RT}{nF},$$

$$\Delta \lg i_0 / \Delta \lg c_L = p_2 - \beta p_1.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Электровосстановление висмута (III) в водных растворах минеральных кислот (H_2SO_4 , HNO_3 , HCl) проходит в области потенциалов, близких к 0 В, что вносит погрешности в результаты измерений из-за возможного окисления материала рабочего электрода. В растворах солей органических кислот (уксусной, винной, лимонной) электровосстановление висмута (III) возможно в области потенциалов от -0.20 до -0.29 В (нас. к. э.).

Установлено, что устойчивый максимум катодного тока висмута (III) формируется в хлорнокислых водных растворах ацетата натрия, в связи с чем для дальнейших исследований в качестве фонового электролита выбрали ацетатно-перхлоратный раствор.

Вольтамперометрическое поведение ионов металлов в смешанных минерально-органических электролитах с высокой сольватирующей способностью зависит как от физико-химических свойств данных сред, так и от содержания в них органических растворителей. При этом одним из определяющих факторов является образование в растворе комплексов металлов, включающих в состав координационной сферы молекулы данных растворителей [14].

Найдено, что с увеличением концентрации как ДМСО, так и ДМФА в ацетатно-перхлоратном растворе висмута (III) происходит сдвиг потенциала его электровосстановления в область более отрицательных значений, что свидетельствует о протекании комплексообразования висмута (III) с ДМСО и ДМФА. В табл. 1 и 2 приведены вольтамперометрические характеристики висмута (III) в диметилсульфоксид- и диметилформамидсодержащих

ацетатно-перхлоратных электролитах с различной концентрацией ДМСО и ДМФА.

Сравнение экспериментальных значений тока катодного пика висмута (III) с вычисленными по уравнению Делакэ [10] при $n = 3$ (число электронов, принимающих участие в электродной реакции) свидетельствует о протекании необратимого электровосстановления висмута (III) с участием трех электронов в ацетатно-перхлоратных диметилсульфоксид- и диметилформамидсодержащих электролитах в широком диапазоне концентраций органических растворителей при различных скоростях сканирования потенциала.

В качестве примера на рис. 1 приведена катодная вольтамперограмма висмута (III) при $v = 0.2$ В/с в электролите, содержащем 6 моль/л ДМСО. Данная скорость сканирования потенциала является оптимальной для аналитических целей, так как при этом формируется наиболее четкий катодный пик тока висмута (III) без сглаживания максимума в приемлемом интервале времени его формирования.

Следует отметить, что увеличение содержания ДМСО в смешанном электролите по сравнению с увеличением содержания ДМФА приводит

Таблица 1. Вольтамперометрические характеристики Bi(III) в ацетатно-перхлоратных диметилсульфоксидсодержащих электролитах ($c_{\text{Bi}} = 5 \times 10^{-4}$ М, 0.1 М NaAc, pH 2)

$c_{\text{ДМСО}}, \text{М}$	$v, \text{В/с}$	$-E_{\text{к}}, \text{В}$	$-E_{\text{а}}, \text{В}$	$i_{\text{к}} \times 10^3_{(\text{эксп.})}, \text{А/см}^2$	$i_{\text{а}} \times 10^3_{(\text{эксп.})}, \text{А/см}^2$	$i_{\text{к}} \times 10^3_{(\text{расч.})}, \text{А/см}^2$
2.0	0.1	0.21	0.11	1.47	0.82	1.45
	0.2	0.21	0.12	1.66	1.13	1.64
	0.5	0.22	0.13	2.37	1.27	2.35
	1.0	0.23	0.14	3.22	1.43	3.18
3.0	0.1	0.22	0.12	1.79	1.04	1.76
	0.2	0.23	0.13	2.35	1.19	2.31
	0.5	0.23	0.14	2.97	1.41	2.98
	1.0	0.24	0.15	3.39	1.52	3.32
4.0	0.1	0.23	0.13	1.83	1.15	1.77
	0.2	0.23	0.14	2.89	1.39	2.86
	0.5	0.24	0.15	3.32	1.51	3.18
	1.0	0.25	0.16	4.08	1.69	3.97
5.0	0.1	0.23	0.14	2.54	1.10	2.53
	0.2	0.24	0.15	3.02	1.49	3.08
	0.5	0.24	0.15	3.61	1.66	3.58
	1.0	0.25	0.16	4.37	1.82	4.41
6.0	0.1	0.24	0.15	2.81	1.12	2.79
	0.2	0.24	0.16	3.37	1.54	3.41
	0.5	0.25	0.16	4.07	1.85	4.12
	1.0	0.26	0.17	4.96	2.22	4.88

Таблица 2. Вольтамперометрические характеристики Bi(III) в ацетатно-перхлоратных диметилформамидсодержащих электролитах ($c_{\text{Bi}} = 5 \times 10^{-4}$ М, 0.1 М NaAc, pH 2)

$c_{\text{ДМФА}}, \text{М}$	$\nu, \text{В/с}$	$-E_{\text{к}}, \text{В}$	$-E_{\text{а}}, \text{В}$	$i_{\text{к}} \times 10^3 \text{ (эксп.)}, \text{А/см}^2$	$i_{\text{а}} \times 10^3 \text{ (эксп.)}, \text{А/см}^2$	$i_{\text{к}} \times 10^3 \text{ (расч.)}, \text{А/см}^2$
2.0	0.1	0.20	0.10	1.37	0.34	1.41
	0.2	0.21	0.11	1.55	0.59	1.54
	0.5	0.21	0.11	2.16	0.87	2.17
	1.0	0.22	0.12	2.92	1.23	2.94
3.0	0.1	0.21	0.11	1.49	0.55	1.46
	0.2	0.22	0.12	2.03	0.64	2.01
	0.5	0.22	0.13	2.74	1.01	2.71
	1.0	0.23	0.13	3.02	1.12	3.04
4.0	0.1	0.22	0.13	1.82	0.62	1.79
	0.2	0.22	0.13	2.37	0.83	2.40
	0.5	0.23	0.14	2.89	1.12	2.83
	1.0	0.23	0.14	3.31	1.49	3.29
5.0	0.1	0.22	0.12	2.14	1.02	2.11
	0.2	0.23	0.13	2.76	1.29	2.78
	0.5	0.23	0.13	3.01	1.46	2.98
	1.0	0.24	0.14	3.72	1.72	3.75
6.0	0.1	0.23	0.13	2.57	1.04	2.58
	0.2	0.24	0.14	3.04	1.34	2.98
	0.5	0.24	0.14	3.56	1.45	3.53
	1.0	0.25	0.15	3.98	2.02	3.97

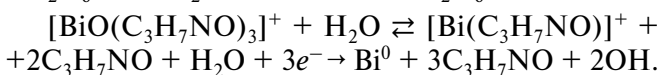
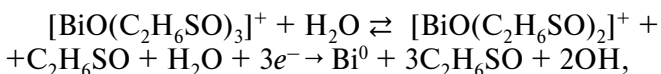
к большему сдвигу катодного потенциала висмута (III) в область более отрицательных значений, при этом изменение максимальных значений плотности катодного тока деполяризатора в обоих случаях практически одинаково. Увеличение концентрации ДМСО и ДМФА в растворе ведет также к росту значений токов пиков висмута (III), причем в случае ДМСО этот рост более выражен.

Для оценки состава комплексных частиц висмута (III), преобладающих в растворе (с количеством координированных молекул растворителя p_1) и разряжающихся на электроде (с количеством координированных молекул растворителя p_2) рассчитали значения равновесных потенциалов $E_{\text{равн.}}$ и токов обмена i_0 висмута в смешанных минерально-органических электролитах с различными концентрациями ДМСО/ДМФА. В табл. 3 приведены результаты расчетов.

Из данных табл. 3 следует, что в объеме раствора преобладают комплексные частицы висмута (III), включающие в состав координационной сферы центрального иона металла три молекулы растворителя, а электрохимически активная форма содержит в координационной сфере две

молекулы растворителя в случае ДМСО и одну молекулу растворителя в случае ДМФА.

На основании полученных экспериментальных и расчетных данных, учитывая, что висмут (III) присутствует в водных перхлоратных растворах в виде оксокациона висмута BiO^+ [15], уравнения электрохимических реакций с участием висмута (III) в изучаемых водно-органических растворах можно представить в следующем виде:



Из приведенных уравнений следует, что формирование электроаналитического сигнала висмута (III) в ацетатно-перхлоратных диметилсульфоксидсодержащих растворах определяется восстановлением на электроде диметилсульфоксидного комплекса висмута состава $\text{Bi} : \text{ДМСО} = 1 : 2$, образующегося в результате предшествующей диссоциации комплекса $\text{Bi} : \text{ДМСО} = 1 : 3$, а в случае диметилформамидсодержащих сред – восстановлением на электроде комплекса состава $\text{Bi} : \text{ДМФА} = 1 : 1$,

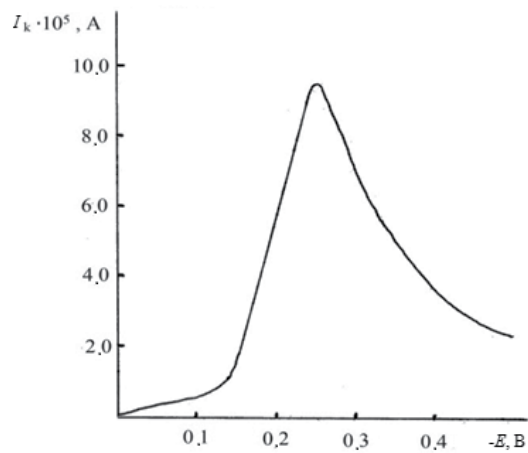


Рис. 1. Катодная вольтамперограмма висмута (III) в ацетатно-перхлоратном диметилсульфоксидсодержащем электролите. $c_{\text{Bi}} = 5 \times 10^{-4}$ М, $c_{\text{ДМСО}} = 6.0$ М, 0.1 М NaAc, pH 2, $v = 0.2$ В/с.

образующегося в результате предшествовавшей диссоциации комплекса $\text{Bi} : \text{ДМФА} = 1 : 3$.

Изучение зависимости величины тока катодного пика висмута (III) от его содержания в анализируемом растворе показало, что линейный характер данной зависимости соблюдается в диапазоне концентраций деполяризатора $4 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-3}$ М, при этом в случае диметилсульфоксидсодержащих растворов линейная зависимость сохраняется в более широкой концентрационной области ДМСО

и может быть описана уравнением: $y = (6.82 \pm \pm 0.02)x$, где y — плотность максимального катодного тока висмута (III) (А/см^2), x — концентрации висмута (III) в растворе (моль/л).

Влияние мешающих (сопутствующих) ионов на вольтамперометрическое поведение висмута (III) в выбранных условиях изучали путем сравнения формы вольт-амперной кривой, значений катодных токов и потенциалов Bi(III) в присутствии этих ионов с заданной концентрацией и в их отсутствие.

Неискаженную форму вольтамперограммы, воспроизводимые значения потенциалов максимума катодного тока и его значений в присутствии различных содержаний исследуемых ионов считали признаком отсутствия мешающего влияния.

Выбор элементов для изучения мешающего влияния соответствующих ионов на вольтамперометрическое поведение висмута (III) определялся их возможным присутствием в разнообразных висмутсодержащих материалах и продуктах: нейзильберах, полупроводниковых сплавах и пленках, термоэлектрических материалах, лекарственных препаратах и т.п.

Найдено, что на вольтамперометрическое поведение висмута (III) в ацетатно-перхлоратных диметилсульфоксид- и диметилформамидсодержащих электролитах не влияют 100-кратные избытки Mg(II) , Al(III) , Ga(III) , Ge(IV) , In(III) ,

Таблица 3. Результаты расчетов электрохимических характеристик висмута (III) для определения числа координированных молекул ДМСО/ДМФА в ацетатно-перхлоратном электролите ($c_{\text{Bi}} = 5 \times 10^{-4}$ М, 0.1 М NaAc, $v = 0.2$ В/с)

$c_{\text{ДМСО (ДМФА), М}}$	$-E_{\text{равн.}}, \text{ В}$	$i_o \times 10^5, \text{ А/см}^2$	p_1	p_2
Диметилсульфоксид				
2	0.16	4.74	2.86	1.77
3	0.17	5.11	2.79	1.78
4	0.18	5.86	2.94	1.74
5	0.19	6.73	2.68	1.72
6	0.20	7.16	3.11	1.75
			Среднее: 2.88	Среднее: 1.75
Диметилформамид				
2	0.15	2.72	2.89	0.95
3	0.16	3.12	2.92	0.98
4	0.17	3.60	3.01	1.18
5	0.18	4.18	2.95	1.13
6	0.19	4.73	3.11	1.12
			Среднее: 2.98	Среднее: 1.07

As(V), Se(IV), Te(IV), 20-кратные избытки Sn(II), Pb(II), 5-кратные избытки Sb(III) и ряда других ионов.

Известно, что соединения висмута широко применяют в медицинской практике для лечения язвенной болезни желудка (например, препараты “Де-Нол”, “Викалин” и др. на основе субстанции висмута-калия-дицитрата $C_{12}H_{10}BiK_3O_{14}$) [16]. Для определения содержания висмута в таких препаратах применяют, в частности, ионометрию [6], спектрофотометрию и инверсионную вольтамперометрию [7], рентгенофлуоресцентный анализ [17], однако соответствующие методики достаточно трудоемки и требуют применения специальных приемов пробоподготовки.

В предлагаемом варианте вольтамперометрического определения содержания висмута в лекарственном препарате “Де-Нол” пробу препарата растворяют в азотной кислоте с последующим добавлением хлорной кислоты, соответствующего минерально-органического электролита и регистрируют вольтамперограмму полученного раствора без предварительных операций отделения, экстракции и концентрирования.

Методика определения сводится к следующему: навеску тонко измельченного препарата массой от 500 до 1 000 мг помещают в коническую колбу емк. 50 мл, добавляют 5 мл конц. HNO_3 , кипятят смесь до полного растворения навески и упаривают до минимального объема. Раствор охлаждают, добавляют 5 мл 5 М хлорной кислоты, количественно переносят в мерную колбу емк. 50 мл и доводят до метки дистиллированной водой.

Аликвоту раствора 2.5 мл помещают в мерную колбу емк. 25 мл, прибавляют 2.5 мл 1 М раствора ацетата натрия, 12 мл ДМСО, тщательно перемешивают и доводят до метки дистиллированной водой. Аликвоту полученного раствора помещают в электрохимическую ячейку, деаэрируют аргоном в течение 5 мин. и регистрируют вольтамперограмму, измеряя ток катодного пика висмута (III) при скорости сканирования потенциала 0.2 В/с в области от -0.05 В до -0.50 В.

Содержание висмута рассчитывают по градуировочному графику, построенному в координатах ток-концентрация висмута на фоне ацетатно-перхлоратного диметилсульфоксидсодержащего электролита при соотношении компонентов, соответствующем анализируемому раствору. Относительное стандартное отклонение s_r при определении содержания висмута по предложенной методике в препарате “Де-Нол” составило 0.1%. Итог эксперимента приведен в табл. 4.

* * *

Изучено вольтамперометрическое поведение висмута (III) в ацетатно-перхлоратных диметилсульфоксид- и диметилформамидсодержащих электролитах, установлены зависимости потенциалов электровосстановления и токов висмута (III) от состава смешанного электролита. Показано, что в данных условиях возможно образование электрохимически активных комплексов висмутила BiO^+ , включающих в состав координационной сферы различное количество молекул диметилсульфоксида и диметилформамида. Найдены области линейной зависимости токов пиков висмута (III) от его концентрации в растворе. Предложена методика вольтамперометрического определения содержания висмута в лекарственном препарате “Де-Нол” с применением диметилсульфоксидсодержащих ацетатно-перхлоратных фоновых сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guo H., Li Y., Xiao P., He N. Determination of trace amount of bismuth (III) by adsorptive anodic stripping voltammetry at carbon paste electrode // *Anal. Chim. Acta*. 2005. V. 534. № 1. P. 143.
2. Profumo A., Fagnoni M., Merli D., Quartarone E., Protti S., Dondi D., Albini A. Multiwalled carbon nanotube chemically modified gold electrode for inorganic As speciation and Bi(III) determination // *Anal. Chem.* 2006. V. 78. № 12. P. 4194.
3. Каменев А.И., Катенауре Р., Ищенко А.А. Инверсионно-вольтамперометрическое определение меди и висмута на ртутно-пленочном

Таблица 4. Результаты вольтамперометрического определения висмута в препарате “Де-Нол”

c_{Bi} , мг/г (инструкция к препарату)	Найдено c_{Bi} , мг/г ($n = 5$)	$\bar{x}$, мг/г	$D \times 10^{-2}$, мг ² /г ²	$S \times 10^{-1}$, мг/г	$\pm \Delta$, мг/г ($P = 0.95$)
107.6	107.8, 107.3, 106.7, 107.4, 107.5	107.3	0.13	0.36	0.18

- углеситалловом электроде // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. 2004. Т. 45. № 4. С. 255.
4. *Ashrafi A.M., Vytřas K.* Determination of trace bismuth (III) by stripping voltammetry at antimony-coated carbon paste electrode // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2012. V. 7. № 1. P. 68.
 5. *Щербакова Л.В., Темерев С.В., Свердлова Е.С.* Безопасный вольтамперометрический способ определения висмута. Патент РФ № 2693515. Заявка № 2018128540 от 02.08.2018, опублик. 03.07.2019.
 6. *Харитонов С.В., Козырева Ю.М., Зарембо В.И.* Определение висмута в комбинированных лекарственных формах с помощью ионоселективного электрода // *Хим.-фарм. журн.* 2008. Т. 42. № 10. С. 54.
 7. *Vizer A.A., Ivanovskaya E.A., Ligostaev A.V.* The comparison of methods for the quantification of the pharmaceutical substance bismuth subsalicylate by UV-spectrophotometry and stripping voltammetry // *J. Siberian Med. Sci.* 2021. № 1. P. 73.
 8. *Трубачева Л.В., Лоханина С.Ю., Трубачев А.В.* Метод системной селективности как способ избирательного формирования электроаналитических сигналов ионов металлов в минерально-органических средах // *Химическая физика и мезоскопия.* 2020. Т. 22. № 3. С. 341.
 9. *Randles G.E.* A cathode-ray polarography. Part II. The current-voltage curves // *Trans. Faraday Soc.* 1948. V. 44. № 5. P. 327.
 10. *Delahay P.* Theory of irreversible waves in oscillographic polarography // *J. Am. Chem. Soc.* 1953. V. 75. № 5. P. 1190.
 11. *Стромберг А.Г.* Теория электродных процессов на амальгамном капельном электроде. Замедленный разряд-ионизация // *Журн. физ. химии.* 1955. Т. 29. № 3. С. 409.
 12. *Стромберг А.Г.* Теория электродных процессов на амальгамном капельном электроде. Приведенный ток обмена и уравнение катодно-анодной волны // *Журн. физ. химии.* 1955. Т. 29. № 12. С. 2152.
 13. *Ватаман И.И., Чикризова Е.Г.* Применение метода осциллографической полярографии в изучении комплексов, разряжающихся необратимо на электроде / Исследования по химии координационных соединений и физ.-хим. методам анализа / Под ред. А.В. Аблова. Кишинев: РИО АН МолдССР, 1969. С. 120.
 14. *Трубачев А.В.* Вольтамперометрия р-, d- и f-элементов в минерально-органических фоновых электролитах // *Журн. аналит. химии.* 2003. Т. 58. № 12. С. 1264.
 15. *Бусев А.И.* Аналитическая химия висмута. М.: АН СССР, 1953. 382 с.
 16. *Юхин Ю.М., Найдено Е.С., Карпова Е.М., Фрумин Л.Е., Савельева К.Р., Хлябич Г.Н., Шестаков В.Н.* Противоязвенный препарат на основе субстанции висмута (III) калия дицитрата // *Бутлеровские сообщения.* 2014. Т. 38. № 4. С. 87.
 17. *Моногарова О.В., Поликарпова П.Д.* Рентгенофлуоресцентное определение висмута в лекарственных препаратах “Де-Нол” и “Викалин” // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия.* 2015. Т. 56. № 2. С. 70.