

УДК 543.552:631.879.34

Применение минерально-органических фоновых электролитов для вольтамперометрического контроля химического состава жидких неорганических отходов I-II классов опасности

Л. В. Трубачева, С. Ю. Лоханина, А. В. Трубачев

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

Аннотация. Химико-аналитический контроль имеет важное значение для реализации оптимальных технологических процедур по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности на производственно-технических комплексах соответствующего профиля. Установление состава жидких неорганических отходов, поступающих на переработку, выполняется на основе применения различных методик количественного химического анализа, позволяющих проводить определение тех или иных компонентов с помощью комплекса химических и физико-химических методов, среди которых электрохимические методы (вольтамперометрия, потенциометрия) занимают одно из ведущих мест. Жидкие производственные неорганические отходы представляют собой, как правило, многокомпонентные смеси, состоящие из кислотно-основной матрицы и катионно-анионной части в виде солей тяжелых металлов. Анализ таких сложных смесей требует улучшения селективности определения, в связи с чем разработка новых перспективных методов анализа и исследования химического состава отходов является актуальной задачей. Приведены современные способы определения ионов металлов в многокомпонентных матрицах применительно к производственным отходам, оценены возможности применения вольтамперометрии для анализа таких отходов, показана перспективность применения минерально-органических фоновых электролитов с высокой сольватирующей способностью для селективного вольтамперометрического определения тяжелых металлов в жидких неорганических отходах I и II классов опасности.

Ключевые слова: вольтамперометрия, жидкие неорганические отходы, минерально-органические фоновые электролиты, селективность.

✉ Алексей Трубачев, trub_av@mail.ru

Application of Mineral-Organic Background Electrolytes for Voltammetric Control of the Chemical Composition of Liquid Inorganic Waste of Hazard Classes I-II

Larisa V. Trubacheva, Svetlana Yu. Lochanina, Alexey V. Trubachev

Udmurt State University (Universitetskaya Str., 1, Izhevsk, 426034, Izhevsk, Russian Federation)

Summary. Chemical-analytical control is important for the implementation of optimal technological procedures for treatment, disposal and neutralization of waste of hazard classes I and II at industrial-technical complexes of the corresponding profile. The determination of the composition of liquid inorganic waste received for processing is carried out on the basis of the use of various methods of quantitative chemical analysis, which make it possible to determine certain components using a complex of chemical and physicochemical methods, among which electrochemical methods (voltammetry, potentiometry) occupy one of the leading places. Liquid industrial inorganic waste is usually a multicomponent mixture consisting of an acid-base matrix with a cationic-anionic component in the form of heavy metal salts. The analysis of such complex mixtures requires improving the selectivity of the determination, and therefore the development of new promising methods for analyzing and studying the chemical composition of waste is an urgent task. Modern methods for the determination of metal ions in multicomponent matrices in relation to industrial waste are presented, the possibilities of using voltammetry for the analysis of such waste are evaluated, and the prospects for the use of mineral-organic background electrolytes with high solvating activity for the selective voltammetric determination of the content of heavy metals in liquid inorganic waste of hazard classes I and II are shown.

Keywords: voltammetry, liquid inorganic waste, mineral-organic background electrolytes, selectivity.

✉ Alexey Trubachev, trub_av@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Одним из приоритетов национального проекта "Экология" является утилизация и переработка отходов. Работа с опасными отходами требует обеспечение контроля содержания различных токсикантов (тяжелых металлов, других токсичных элементов) в данных отходах. Для исследования состава и количественной оценки компонентов отходов применяют различные физико-химические методы анализа, обладающие различными метрологическими характеристиками [1]. Так, например, измерение массовой доли алюминия, бария, бериллия, ванадия, железа и других элементов в отходах производства и потребления проводят с помощью атомно-абсорбционного метода с электротермической атомизацией [2], определение содержания кислоторастворимых форм кадмия, свинца, меди, цинка, висмута и других токсичных элементов в осадках сточных вод – с помощью методов инверсионной вольтамперометрии [3], измерение массовой доли анионов (фторидов, нитратов и других) – с помощью потенциометрического метода [4], для определения содержания органических составляющих в отходах применяют масс-спектрометрию, газовую и жидкостную хроматографию [5]. Эффективность применения тех или иных методик количественного химического анализа отходов зависит как от их морфологического состава, так и от химического состава их матрицы, являющейся многокомпонентной системой, при этом оптимальные решения, позволяющие улучшить экспрессность, точность и селективность определения, могут вырабатываться как на основе реализации существующих, так и применении новых химико-аналитических способов [6]. Одним из перспективных направлений в этой области является разработка методов электрохимического анализа многокомпонентных сред, среди которых вольтамперометрия занимает одно из ведущих мест [7]. Особый интерес представляет применение в вольтамперометрии металлов минерально-органических растворителей с высокой сольватирующей способностью в качестве фоновых сред, позволяющих повысить селективность и точность определения аналитов в многокомпонентных системах [8]. Ранее такие фоновые среды для вольтамперометрического определения компонентного состава производственных отходов не применялись.

В данной работе оценены возможности использования вольтамперометрии в анализе производственных отходов, показана перспективность применения диметилсульфоксидсодержащих фоновых электролитов для селективного вольтамперометрического определения содержания тяжелых металлов в жидких неорганических отходах I и II классов опасности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Вольтамперограммы исследуемых растворов регистрировали на полярографе универсальном ПУ-1 (Белоруссия) в режиме линейной развертки поляризующего напряжения, задавая различные скорости сканирования потенциала (от 0.1 до 2.0 В/с) в области потенциалов от 0.0 до -2.1 В. Исследования проводили в термостатируемой электрохимической ячейке, используя в качестве рабочего электрода стационарный ртутно-пленочный электрод на серебряной подложке (СРПЭ) либо ртутный капаящий электрод (РКЭ), все потенциалы указаны относительно электрода Hg|Hg₂Cl₂ KCl(нас.). Растворы в ячейке деаэрировали аргоном в течение 5 минут, после чего снимали вольтамперограммы, поддерживая температуру постоянной и равной (25±0.1) °С. Рабочие растворы деполаризаторов готовили растворением точных навесок соответствующих металлов либо их нитратов в 0.1 М HClO₄ при нагревании, электролиты для полярографирования – смешением в мерной колбе емкостью 25 см³ соответствующих аликвот растворов металлов, диметилсульфоксида (ДМСО) и неорганических кислот (или их солей), доводя объем до метки дистиллированной водой. Необходимые значения pH исследуемых растворов устанавливали с помощью иономера И-120М (Россия) добавлением соответствующих

количеств растворов гидроксида натрия или хлорной кислоты. Модельные растворы жидких неорганических отходов готовили смещением соответствующих количеств их компонентов. Все реактивы, используемые в работе, имели квалификацию «х.ч.».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Жидкие неорганические отходы I и II классов опасности, работы с которыми предполагается проводить на производственно-техническом комплексе "Камбарка", подразделяются на 4 типа: кислотнo-щелочные, хромсодержащие, медно-аммиачные и содержащие комплексообразующие компоненты [9]. В табл. 1 приведен качественный состав отходов с указанием предельных содержаний их компонентов. Из таблицы видно, что данные отходы в больших количествах содержат такие токсичные ионы металлов, как Cu^{2+} , Ni^{2+} и Cr^{6+} , контроль содержания которых представляет важную задачу.

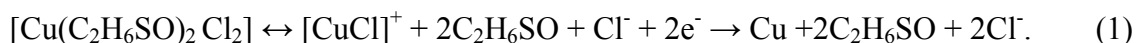
Таблица 1. Состав жидких неорганических отходов I и II классов опасности
Table 1. Composition of liquid inorganic waste of I and II hazard classes

№	Вид отходов Waste type	Химические компоненты Chemical components	$C_{\text{пред.}}$ г/л C_{ultimate} g/l
1	Кислотно-щелочные отходы (кислая часть) Acid-alkaline waste (acidic part)	Серная кислота H_2SO_4	100
		Хлорид железа(III) FeCl_3	100
		Сульфат меди(II) CuSO_4	50
		Сульфат никеля(II) NiSO_4	50
2	Кислотно-щелочные отходы (щелочная часть) Acid-alkaline waste (alkaline part)	Гидроксид натрия NaOH	100
		Алюминат натрия NaAlO_2	100
		Цинкат натрия Na_2ZnO_2	100
3	Хромсодержащие отходы Chromium-containing waste	Хромовый ангидрид CrO_3	250
		Серная кислота H_2SO_4	5
		Фторид натрия NaF	10
		Сульфат никеля (II) NiSO_4	5
4	Медно-аммиачные отходы Copper-ammonia waste	Аммоний хлористый NH_4Cl	150
		Гидроксид аммония NH_4OH	500
		Хлорид меди(II) CuCl_2	110
		Аммоний углекислый $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$	30
		Фосфорная кислота H_3PO_4	20
5	Отходы, содержащие комплексообразующие компоненты Wastes containing complexing components	Гидроксид натрия NaOH	50
		Органические соединения Organic compounds	100
		Комплексы меди(II) (в расчете на катион меди) Copper (II) complexes (based on copper cation)	100

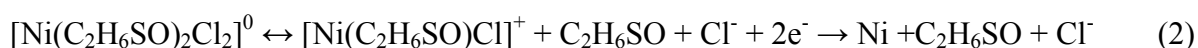
Матричный состав жидких неорганических отходов достаточно сложный и включает воду, серную кислоту, гидроксид натрия, фосфаты, фториды, хлориды, органические соединения. Для определения содержания ионов металлов в водных и водно-органических растворах существенные преимущества имеют электроаналитические методы, позволяющие с высокой степенью точности и селективности определять малые концентрации ($10^{-5} - 10^{-8}$ моль/л) металлокатионов в сложных многокомпонентных смесях [10] при достаточно простом и недорогом аппаратурном оформлении. Применение в вольтамперометрии смешанных минерально-органических электролитов с высокой сольватирующей способностью в качестве фоновых сред для определения р-, d- и f-элементов позволяет проводить прямое определение анализируемых ионов металлов без их разделения и отделения от компонентов матрицы [11].

Для изучения возможностей одновременного электрохимического определения содержания Cu^{2+} и Ni^{2+} в кислой части кислотно-щелочных отходах с использованием в качестве фоновых сред минерально-органических растворителей с высокой сольватирующей способностью было проанализировано вольтамперометрическое поведение меди(II) и никеля(II) в присутствии серной кислоты и железа(III) в растворах, содержащих диметилсульфоксид (ДМСО).

Известно [12], что медь(II) в хлористоводороднокислых растворах ДМСО при соотношении компонентов ДМСО : 1 М HCl : H₂O = 3 : 3 : 4 (по объёму) восстанавливается на электроде, образуя максимум тока при потенциале -0.19 В, который смещается в область более отрицательных значений при увеличении концентраций ДМСО и хлорида в электролите, что свидетельствует об образовании в растворе комплексов меди(II) с ДМСО и хлорид-ионом, при этом электродный процесс протекает квазиобратимо с участием двух электронов в соответствии с уравнением:



Никель(II) на фоне 1 М раствора хлорида калия, содержащего от 3 до 6 М ДМСО, восстанавливается на электроде, образуя максимум тока в области потенциалов от -1.05 до -1.15 В. Установлено, что собственно электродному процессу предшествует диссоциация комплексных частиц, образующихся в растворе, в результате которой формируются электрохимически активные комплексы Ni(II). Электровосстановление протекает необратимо с участием двух электронов при диффузионно-кинетическом контроле предельного тока в соответствии с уравнением:



Электрохимические реакции (1) и (2) ответственны за формирование аналитических сигналов меди(II) и никеля(II) в данных условиях. Найдено, что добавление серной кислоты в диметилсульфоксидхлоридные растворы меди(II) и никеля(II) не оказывает влияния на форму аналитического сигнала деполяризаторов, при этом введение избытка железа(III) искажает катодную вольтамперограмму, на позволяя фиксировать четкий аналитический сигнал Cu^{2+} . Данное обстоятельство объясняется тем, что ионы Fe^{3+} восстанавливаются на электроде в две стадии согласно общей схеме $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^0$, где потенциал электровосстановления железа(III) до железа(II) лежит в области значений, близких к 0 В, и соответствующая катодная волна искажает волну меди(II). Ионы железа(II) восстанавливаются в данных условиях в области потенциалов от -1.30 до -1.40 В и не оказывают влияния на электровосстановление ионов меди(II) и никеля(II). Линейные зависимости предельных токов меди(II) и никеля(II) от их содержания в анализируемом растворе сохраняется в пределах от $4 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ моль/л.

Расчет показывает, что предельные содержания компонентов в кислой части кислотно-щелочных отходов соответствуют следующим молярным концентрациям: H₂SO₄ – 0.98 моль/л, FeCl₃ – 0.61 моль/л, CuSO₄ – 0.31 моль/л, NiSO₄ – 0.32 моль/л. С учетом данных значений и концентрационных соотношений компонентов фонового электролита предложена методика одновременного вольтамперометрического определения меди(II) и

никеля(II) в кислой части кислотнo-щелoчных отходов, заключающаяся в следующем: в мерную колбу емкостью 200 см³ помещают 80 мл 2.5 моль/л раствора хлорида калия, вносят 1 мл модельной смеси жидких отходов, добавляют 10 мл 0.2 моль/л раствора сульфата натрия для восстановления железа(III) до железа(II), затем 60 мл диметилсульфоксида, доводят объем до метки дистиллированной воды и тщательно перемешивают. Для съемки вольтамперограммы аликвоту рабочего раствора объемом 5 мл помещают в электрохимическую ячейку, деаэрируют аргоном и регистрируют вольтамперограмму в области от 0.0 до -1.2 В при скорости сканирования потенциала 0.2 В/с. Определение содержания меди(II) и никеля(II) проводят методом градуировочного графика, измеряя величину максимальных токов деполяризаторов при соответствующих потенциалах. На рис. 1 приведена вольтамперограмма меди(II) и никеля(II), полученная в данных условиях.

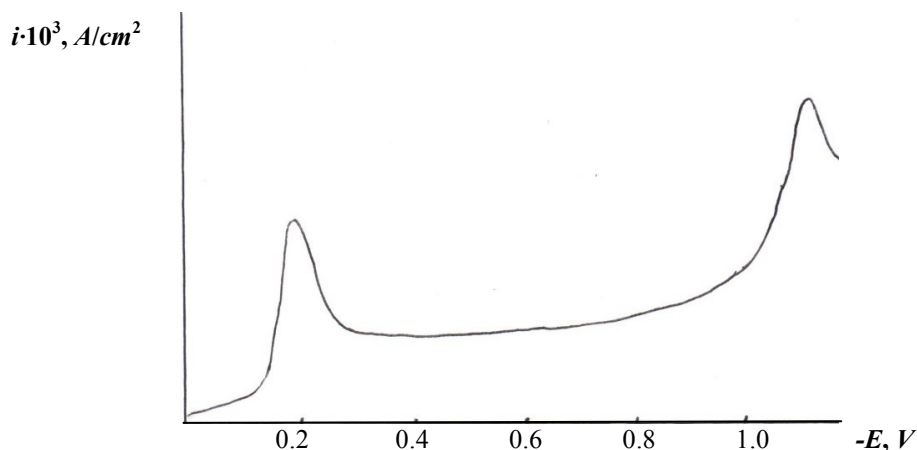


Рис. 1. Вольтамперограмма смеси ионов меди(II) и никеля(II), на фоне 1 М раствора KCl, содержащего 4 моль/л ДМСО

Fig. 1. Voltammogram of a mixture of copper (II) and nickel (II) ions on the background of 1 M KCl solution containing 4 mol/l DMSO

В табл. 2 представлены результаты одновременного вольтамперометрического определения содержания меди(II) и никеля(II) в модельных растворах кислой части кислотнo-щелoчных отходов.

Таблица 2. Определение меди(II) и никеля(II) в модельных растворах кислой части кислотнo-щелoчных отходов на фоне 1 М KCl в присутствии 4 М ДМСО

Table. 2. Determination of copper (II) and nickel (II) in model solutions of the acidic part of acid-base waste on the background of 1 M KCl in the presence of 4 M DMSO

№ опыта Experience number	$C_{Cu(II)} \cdot 10^{-4}$, моль/л; mol/L		Погрешность, % Error, %	$C_{Ni(II)} \cdot 10^{-4}$, моль/л mol/L		Погрешность, % Error, %
	введено introduced	найдено found		введено introduced	найдено found	
1	1.00	0.98	1.0	1.00	1.11	1.1
2	2.00	1.94	1.7	2.00	2.03	1.4
3	4.00	3.96	1.6	4.00	4.12	1.8
4	6.00	5.92	2.8	6.00	6.07	2.3
5	8.00	7.96	2.0	8.00	8.02	2.1

Основным токсичным компонентом хромсодержащих отходов является хром в степени окисления +6. При электровосстановлении хромат-анионов наблюдается достаточно сложный многоступенчатый электродный процесс, сопровождающийся образованием нескольких пиков тока в достаточно широкой области потенциалов, при этом характер процесса зависит от материала электрода [13]. В связи с этим целесообразно переводение хрома из аниона в форму катиона Cr³⁺, вольтамперометрическое поведение которого более

однозначно. Показано [12], что хром(III) в хлористоводороднокислых водно-органических электролитах, содержащих ДМСО, восстанавливается на РКЭ с образованием максимума тока в области потенциалов от -0.9 до -1.1 В. Процесс протекает обратимо с участием 1 электрона при диффузионно-кинетическом контроле предельного тока, линейная зависимость предельного тока хрома(III) от его содержания в растворе сохраняется в диапазоне его концентраций от $5 \cdot 10^{-5}$ до $4 \cdot 10^{-3}$ моль/л.

Расчет показывает, что предельные содержания компонентов в хромсодержащих отходах соответствуют следующим молярным концентрациям: CrO_3 – 2.50 моль/л, H_2SO_4 – 0.05 моль/л, NaF – 0.24 моль/л, NiSO_4 – 0.03 моль/л. Для определения содержания хрома аликвоту модельной смеси 2.5 мл сначала разбавляют дистиллированной водой до 25 мл в соответствующей мерной колбе, затем в мерную колбу емкостью 200 см^3 помещают 40 мл 2.5 моль/л раствора хлорида калия, вносят 0.5 мл разбавленной модельной смеси хромсодержащих отходов, добавляют 10 мл 0.2 моль/л раствора сульфита натрия для восстановления хрома(VI) до хрома(III), затем 60 мл диметилсульфоксида, доводят объем до метки дистиллированной воды и тщательно перемешивают. Для съемки вольтамперограммы аликвоту рабочего раствора объемом 5 мл помещают в электрохимическую ячейку, деаэрируют аргоном и регистрируют вольтамперограмму в области от -0.7 до -1.2 В при скорости сканирования потенциала 0.2 В/с. Определение содержания хрома(III) проводят методом градуировочного графика, измеряя величину максимального тока при соответствующем потенциале.

В табл. 3 представлены результаты вольтамперометрического определения содержания Cr(III) в модельных растворах хромсодержащих отходов, на рис. 2 приведена вольтамперограмма Cr(III), полученная в данных условиях.

Таблица 3. Определение хрома (III) в модельных растворах хромсодержащих отходов на фоне 0.5 М KCl в присутствии 4 М ДМСО

Table 3. Determination of chromium (III) in model solutions of chromium-containing waste on the background 0.5 M KCl in the presence of 4 M DMSO

№ опыта Experience number	$C_{\text{Cr(III)}} \cdot 10^{-4}$, моль/л; mol/L		Погрешность, % Error, %
	введено / introduced	найдено / found	
1	1.00	1.09	1.2
2	2.00	2.04	1.1
3	4.00	4.13	1.8
4	6.00	6.06	2.1
5	8.00	8.02	2.0

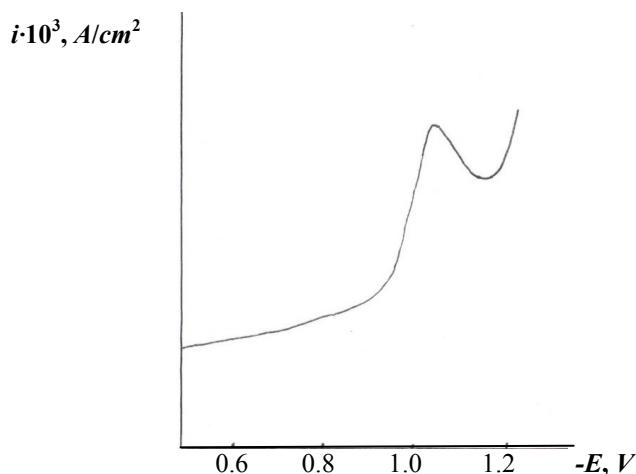


Рис. 2. Вольтамперограмма хлористоводороднокислого диметилсульфоксидсодержащего раствора Cr(III) ($C_{\text{KCl}} = 0.1$ моль/л, $C_{\text{ДМСО}} = 4$ моль/л)

Fig. 2. Voltammogram of dimethyl sulfoxide hydrochloric acid solution of Cr(III) ($C_{\text{KCl}} = 0.1 \text{ mol/l}$, $S_{\text{DMSO}} = 4 \text{ mol/l}$)

ВЫВОДЫ

На основании результатов исследования вольтамперометрического поведения меди(II), никеля (II) и хрома(III) в минерально-органических фоновых средах, содержащих диметилсульфоксид, показана возможность их применения для определения состава кислотнo-щелочных и хромсодержащих жидких неорганических отходов. Установлено, что медь(II), никель(II) и хром(III) в условиях определения образуют хорошо выраженные аналитические сигналы, позволяющие с допустимым уровнем погрешности определять содержание анализируемых компонентов. Предложена методика одновременного вольтамперометрического определения меди(II) и никеля(II) в кислой части кислотнo-щелочных жидких неорганических отходах, а также методика вольтамперометрического определения содержания хром(III) в хромсодержащих отходах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутаков Д. В., Залозная Н. Г. Аналитическая химия в экологическом мониторинге // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2010. № 2. С. 74-79.
2. Измерение массовой концентрации элементов (Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Ti, V, Zn) в пробах отходов производства и потребления // М 09-02-2016. ПНД Ф 16.3.85-17 (ФР.1.31.2016.25161). URL: www.normacs.ru (дата обращения: 12.11.2020).
3. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм тяжелых металлов и токсичных элементов (Cd, Pb, Cu, Zn, Bi, Tl, Ag, Fe, Se, Co, Ni, As, Sb, Hg, Mn) в почвах, грунтах, донных отложениях, осадках сточных вод методом инверсионной вольтамперометрии // ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.46-06 (ФР.1.31.2008.01734). URL: www.normacs.ru (дата обращения: 12.11.2020).
4. Методика выполнения измерений массовой концентрации фторид-ионов в сточных, природных поверхностных и подземных водах потенциометрическим методом // ПНД Ф 14.1:2:3.173-2000 (ФР.131.2005.01752). URL: www.normacs.ru (дата обращения: 12.11.2020).
5. Щепетова В. А. Современные методы оценки качества отходов. Пенза: ПГУАС, 2014. 88 с.
6. Трубачева Л. В., Лоханина С. Ю., Трубачев А. В. Научно-исследовательские аспекты входного и производственного аналитического контроля на производственно-технических комплексах по обработке, утилизации и обезвреживанию опасных отходов // Сборник трудов конф. "Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения". Саратов: Амирит, 2020. С. 91-94.
7. Будников Г. К., Евтюгин Г. А., Майстренко В. Н. Модифицированные электроды для вольтамперометрии в химии, биологии и медицине. М.: Лаборатория знаний, 2020. 419 с.
8. Трубачев А. В., Трубачева Л. В. Минерально-органические растворители в вольтамперометрии металлов. Ижевск: Удмуртский университет, 2018. 308 с.
9. Производственно-технический комплекс по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов I и II классов опасности "Камбарка" // Проектная документация АО "ГСПИ". 2020. Т. 5.7.2.2, № 116.2-01-ИОС7.2.2. С. 12-52.
10. Будников Г. К., Майстренко В. Н., Вяселев М. Р. Основы современного электрохимического анализа. М.: Мир, 2003. 470 с.
11. Трубачев А. В. Вольтамперометрия р-, d- и f-элементов в минерально-органических фоновых электролитах // Журнал аналитической химии. 2003. Т. 58, № 12. С. 1264-1270.
12. Трубачев А. В., Трубачева Л. В. Электрохимически активные формы ионов металлов в водно-органических средах с высокой сольватирующей способностью. Часть II. D-металлы // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 4. С. 615-622.
13. Фигуринене И. В. Влияние материала электрода на электрохимическое поведение хрома(VI) // Труды университета. 2008. № 1(30). С. 23-25.

REFERENCES

1. Butakov D. V., Zaloznaya N. G. Analiticheskaya khimiya v ekologicheskom monitoringe [Analytical chemistry in ecological monitoring]. *Nauchnye i obrazovatel'nye problem grazhdanskoy zashchity* [Scientific and Educational Problems of Civil Protection], 2010, no. 2, pp. 74-79. (In Russian).
2. Izmerenie massovoy kontsentratsii elementov (Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Ti, V, Zn) v probakh otkhodov proizvodstva i potrebleniya [Measurement of mass concentration of elements (Al, As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Ti, V, Zn) in samples of production and consumption waste. *M 09-02-2016. PND F 16.3.85-17 (FR.1.31.2016.25161)*. URL: www.normacs.ru (accessed November 12, 2020).

3. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli kislotorastvorimykh form tyazhelykh metallov i toksichnykh elementov (Cd, Pb, Cu, Zn, Bi, Tl, Ag, Fe, Se, Co, Ni, As, Sb, Hg, Mn) v pochvakh, gruntakh, donnykh otlozheniyakh, osadkakh stochnykh vod metodom inversionnoy vol'tamperometrii [Methods for measuring the mass fraction of acid-soluble forms of heavy metals and toxic elements (Cd, Pb, Cu, Zn, Bi, Tl, Ag, Fe, Se, Co, Ni, As, Sb, Hg, Mn) in soils, grounds, bottom sediments, sewage sludge by stripping voltammetry]. *PND F 16.1:2.2:2.3.46-06 (FR.1.31.2008.01734)*. URL: www.normacs.ru (accessed November 12, 2020).
4. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy koncentracii fluorid-ionov v stochnykh, prirodnykh poverhnostnykh i podzemnykh vodah potentsiometricheskim metodom [Methods for measuring the mass concentration of fluoride ions in waste, natural surface and groundwater by the potentiometric method]. *PND F 14.1:2:3.173-2000 (FR.131.2005.01752)*. URL: www.normacs.ru (accessed November 12, 2020).
5. Shechetova V. A. *Sovremennye metody ochenki kachestva othodov*. [Modern methods of waste quality assessment]. Penza: PGUAS Publ., 2014. 88 p.
6. Trubacheva L. V., Lohanina S. Yu., Trubachev A. V. Nauchno-issledovatel'skie aspekty vhodnogo i proizvodstvennogo analiticheskogo kontrolya na proizvodstvenno-tekhnicheskikh kompleksah po obrabotke, utilizacii i obezvrezhivaniyu opasnykh othodov [Research aspects of input and production analytical control at industrial-technical complexes for the processing, disposal and neutralization of hazardous waste]. *Sbornik trudov konf. "Ekologicheskij monitoring opasnykh promyshlennykh ob'ektov: sovremennye dostizheniya, perspektivy i obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti naseleniya"* [Proc. Environmental Monitoring of Hazardous Industrial Facilities: Modern Achievements, Prospects and Ensuring Environmental Safety of the Population]. Saratov: Amirit Publ., 2020, pp. 91-94. (In Russian).
7. Budnikov G. K., Evtyugin G. A., Majstrenko V. N. *Modifitsirovannyye elektrody dlya voltamperometrii v himii, biologii i medicine* [Modified electrodes for voltammetry in chemistry, biology, and medicine]. Moscow: Laboratoriya znaniy Publ., 2020. 419 p.
8. Trubachev A. V., Trubacheva L. V. *Mineral'no-organicheskie rastvoriteli v vol'tamperometrii metallov* [Mineral-organic solvents in metal voltammetry]. Izhevsk: Udmurtskiy universitet Publ., 2018. 308 p.
9. *Proizvodstvenno-tekhnicheskij kompleks po obrabotke, utilizacii i obezvrezhivaniyu othodov I i II klassov opasnosti "Kambarka"* [Industrial-technical complex for processing, utilization and neutralization of waste of hazard classes I and II "Kambarka"]. Proektnaya dokumentatsiya AO "GSP". 2020. T. 5.7.2.2, № 116.2-01-IOS7.2.2. pp. 12-52.
10. Budnikov G. K., Majstrenko V. N., Vyaselev M. R. *Osnovy sovremennogo elektrohimicheskogo analiza* [Fundamentals of modern electrochemical analysis]. Moscow: Mir Publ., 2003. 470 p.
11. Trubachev A. V. Voltammetry of p-, d-, and f-block elements in mineral-organic supporting electrolytes. *Journal of Analytical Chemistry*, 2003, vol. 58, no. 12, pp. 1132-1138. (In Russian). <https://doi.org/10.1023/B:JANC.0000008951.35338.31>
12. Trubachev A. V., Trubacheva L. V. Elektrohimicheski aktivnyye formy ionov metallov v vodno-organicheskikh sredakh s vysokoy solvatiruyushchej sposobnostyuu. Chast II. D-metally [Electrochemically active forms of metal ions in water-organic media with high solvating ability. Part II. D-metals]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopics], 2018, vol. 20, no. 4, pp. 615-622. (In Russian).
13. Figurinene I. V. Vliyanie materiala elektroda na elektrohimicheskoe povedenie hroma(VI) [Influence of the electrode material on the electrochemical behavior of chromium (VI)]. *Trudy universiteta* [University Proceedings], 2008, no. 1(30), pp. 23-25. (In Kazakhstan).

Поступила 11.05.2021; после доработки 13.07.2021; принята к опубликованию 12.08.2021
Received 11 May 2021; received in revised form 13 July 2021; accepted 12 August 2021

Трубачева Лариса Викторовна, кандидат химических наук, заведующий кафедрой фундаментальной и прикладной химии ИЕН УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

Larisa V. Trubacheva, Cand. Sci. (Chem.), Head of the Department of Fundamental and Applied Chemistry, IEN Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

Лоханина Светлана Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры фундаментальной и прикладной химии ИЕН УдГУ

Svetlana Yu. Lochanina, Cand. Sci. (Tech.), Professor of Department of Fundamental and Applied Chemistry, IEN Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation

Трубачев Алексей Владиславович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, e-mail: trub_av@mail.ru

Alexey V. Trubachev, Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher, Izhevsk, Russian Federation