

# Физическая химия Physical chemistry

Научная статья  
УДК 544.01 + 544.08 + 544.6  
DOI: 10.14529/chem250116

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АЦЕТАМИНОФЕНА С ПОМОЩЬЮ СЕНСОРА НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА САМАРИЯ И НИТРИДА УГЛЕРОДА

**Е.А. Булатова, А.Т. Миронова, Е.Е. Фахрутдинова, Л.А. Бушуева, Д.С. Скороход, М.С. Шумакова, Д.А. Манько, О.И. Большаков, М.С. Головин**<sup>✉</sup>  
Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия  
<sup>✉</sup> golovinms@susu.ru

**Аннотация.** В настоящее время обнаружение лекарственных препаратов в биологических образцах – длительный и трудоемкий процесс, требующий использования дорогостоящего оборудования. Ацетаминофен является эффективным жаропонижающим и болеутоляющим средством. Именно благодаря широкому применению этого препарата в лечебных целях его обнаружение в биологических образцах имеет важное значение. В этой работе рассматривается электрохимический подход для выявления ацетаминофена в воде. Использование угольно-пастового электрода модифицированного композитным материалом  $\text{SmFeO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$  позволяет легко и быстро определить препарат, благодаря лучшим сочетаниям свойств. Минимальная точка обнаружения ацетаминфена предложенным электродом составила 500 нМ, максимальное – 230 мкМ.

**Ключевые слова:** феррит самария, ацетаминофен, электрохимическое определение.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках грантовой программы Виктора Христенко «Шаг в будущее»

**Для цитирования:** Электрохимическое определение ацетаминофена с помощью сенсора на основе феррита самария и нитрида углерода / Е.А. Булатова, А.Т. Миронова, Е.Е. Фахрутдинова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Химия». 2025. Т. 17, № 1. С. 167–176. DOI: 10.14529/chem250116

Original article  
DOI: 10.14529/chem250116

## ELECTROCHEMICAL DETERMINATION OF ACETAMINOPHEN BY A SENSOR BASED ON SAMARIUM FERRITE AND CARBON NITRIDE

**E.A. Bulatova, A.T. Mironova, E.E. Fakhrutdinova, L.A. Bushueva, D.S. Skorokhod, M.S. Shumakova, D.A. Man'ko, O.I. Bol'shakov, M.S. Golovin**<sup>✉</sup>  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia  
<sup>✉</sup> golovinms@susu.ru

**Abstract.** Currently, the detection of drugs in biological samples is a lengthy and time-consuming process that requires the use of expensive equipment. Acetaminophen is an effective antipyretic agent and a painkiller. Detection of acetaminophen in biological samples is important due to widespread use of this drug for medicinal purposes. In this paper an electrochemical approach is considered for the detection of acetaminophen in water. The use of a carbon paste electrode modified with  $\text{SmFeO}_3/\text{g-C}_3\text{N}_4$  composite material makes determination easy and fast, thanks to the best combinations of properties. The detection limit of acetaminophen for the proposed electrode is 500 nM, the maximum is 230  $\mu\text{M}$ .

**Keywords:** samarium ferrite, acetaminophen, electrochemical determination

© Булатова Е.А., Миронова А.Т., Фахрутдинова Е.Е., Бушуева Л.А., Скороход Д.С., Шумакова М.С., Манько Д.А., Большаков О.И., Головин М.С., 2025.

*Acknowledgments.* The work was carried out within V. Khristenko's grant program "Step into the Future".

*For citation:* Bulatova E.A., Mironova A.T., Fakhrutdinova E.E., Bushueva L.A., Skorokhod D.S., Shumakova M.S., Man'ko D.A., Bol'shakov O.I., Golovin M.S. Electrochemical determination of acetaminophen by a sensor based on samarium ferrite and carbon nitride. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Chem.* 2025;17(1):167–176. (In Russ.) DOI: 10.14529/chem250116

## Введение

Ацетаминофен широко распространенное жаропонижающее, являющееся эффективным средством для снятия боли и лихорадки в повседневной жизни [1–2]. Использование его в умеренных дозах не вызывает никаких серьезных побочных эффектов [3–5], однако чрезмерное применение ацетаминофена может вызывать повышение артериального давления, кожную сыпь, заболевания печени, нефротоксичность и воспаление поджелудочной железы [6–8]. Также стоит отметить, что попадание ацетаминофена в водные источники может привести к привыканию патогенов к действию лекарств и снижению эффективности препарата в дальнейшем [1]. Чтобы предотвратить такие проблемы, важно контролировать уровень ацетаминофена в организме человека и водных источниках, таких как питьевая, речная и озерная вода [9]. Именно благодаря широкому применению этого препарата в лечебных целях его обнаружение в биологических образцах имеет важное значение [10].

В настоящее время выявление лекарств – очень длительный и трудоемкий процесс, существует множество методов анализа для ацетаминофена, включая высокоэффективную жидкостную хроматографию (ВЭЖХ) [11–12], высокоэффективный капиллярный электрофорез (ВЭКЭ) [13], хемилюминесценцию [14] и спектроскопию [15]. Однако большинство из этих методов требуют дорогостоящего оборудования, сложных операций и много времени, что ограничивает его дальнейшее практическое применение [16]. По сравнению с этими методами электрохимический метод пользуется большей популярностью для количественного и качественного обнаружения лекарств, из-за простоты использования, низкого энергопотребления, быстрого отклика [17–18].

Для электрохимического метода, в качестве сенсора используется угольно-пастовой электрод, модифицированный композитом феррита самария ( $\text{SmFeO}_3$ ) и нитрида углерода ( $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ). Применение угольно-пастового электрода позволяет создавать электроды с необходимыми характеристиками. Чувствительность улучшается благодаря модификации электродов композитными материалами с разными электронными характеристиками и их химическими свойствами [19]. Феррит самария был выбран в качестве модификатора, поскольку он относится к одним из выдающихся представителей редкоземельных ортоферритов, обладая очень хорошим магнитным свойствам, сложной электронной структуре, высокой диэлектрической проницаемостью [20]. Редкоземельные ортоферриты имеют широкие перспективы применения из-за их широкого использования в областях производства, таких как: хранение энергии, преобразование энергии, датчики, приводы и биомедицинские устройства [16].

Вторым составляющим композита является графитоподобный нитрид углерода ( $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ) [21]. Графитоподобный нитрид углерода ( $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ) – наиболее исследованный безметалльный полупроводник нового поколения [22] с превосходной структурой, электрическими свойствами, характеристиками поглощения видимого света, стабильными химическими свойствами, термической стабильностью и т. д. [23]. Использование  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  в композитном материале должно увеличивать площадь поверхности, снижать сопротивление переноса заряда [24], что может положительно сказаться на чувствительности сенсора.

Очень важным аспектом является простота синтеза материалов. Поэтому для получения композита были использованы 3 наиболее простых подхода: термолиз, ультразвуковая обработка и механическое перемешивание. Сравнение характеристик композитов, полученных тремя подходами, должно дать возможность выявить наиболее чувствительный сенсор для определения ацетаминофена.

## Экспериментальная часть

### Материалы и реагенты

Оксид самария ( $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ), оксид железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), меламин ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$ ) были приобретены в ООО «Русхим» (Россия). Гидроксид натрия ( $\text{NaOH}$  1М, 2М), дистиллированная вода, ортофос-

форная кислота ( $H_3PO_4$ , конц.), борная кислота ( $H_3BO_3$ ), уксусная кислота (AcOH, конц.), гексацианоферрат калия (II), гексацианоферрат калия (III), хлорид калия, хлорид кальция, хлорид натрия, крахмал растворимый для йодометрии, D-глюкоза были приобретены в ООО «Химкрафт» (Россия). Углеродный порошок, парафиновое масло производства Sigma Aldrich (Сент-Луис, Миссури, США). Ацетаминофен (аналитический стандарт) производства ООО «ЦТС «Наука» (Россия). Все реактивы были качеством не ниже «ч.д.а.» и использованы без дополнительной очистки.

### Оборудование

Рентгеновский дифрактометр RIGAKU ULTIMA IV (Япония), сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM 7001F (Япония), FTIR-спектрометре Shimadzu IRAffinity-1S (Япония), бипотенциостат Corrtest Instruments (Corrtest Instruments Corp., Ltd., Китай), модель FRA CS2350, рабочий электрод – модифицированный УПЭ электрод, электрод сравнения – Ag/AgCl, противоелектрод – платиновая проволока.

### Синтез материалов

**Синтез феррита самария.** Смесь, состоящую из оксида самария (III) и оксида железа (III) в стехиометрическом соотношении 1:1 тщательно перетирали в ступке до однородного состояния. Полученную смесь прессовали в таблетку с нагрузкой 6 тонн. Далее таблетку переносили в фарфоровый тигель и прокачивали при 1000 °С, со скоростью нагрева 1 °С/мин и выдержкой 6 часов при этой температуре в атмосфере воздуха. Полученный образец перетерли до порошкообразного состояния.

**Синтез нитрида углерода.** 4 г меламина помещали в фарфоровый тигель с крышкой, переносили в муфельную печь и нагревали до 600 °С со скоростью 1 °С/мин, выдерживали в течение 4 часов. Затем тигель с образцом вынимали из печи и перемалывали до порошкообразного состояния.

**Синтез композитного материала  $SmFeO_3/C_3N_4$ .** Синтез композитного материала на основе феррита самария и нитрида углерода проводили тремя способами, а именно:

а) спекание – 0,5 г меламина и 10 мг феррита самария были тщательно перемешаны в ступке. Полученную смесь поместили в тигель и подвергли нагреванию в муфельной печи при 600 °С (скорость нагрева 1 °С/мин, время выдержки 4 ч). После процесса спекания образец изымали из печи и перемалывали в ступке до получения однородной порошковой смеси;

б) ультразвуковое диспергирование – после взвешивания 100 мг нитрида углерода и 10 мг феррита самария перемещали в стакан, добавили туда 10 мл дистиллированной воды и производили ультразвуковое диспергирование в течение 5 минут. Полученную суспензию медленно высушивали в шкафу при 80 °С;

в) механическое перемешивание – 100 мг нитрида углерода и 10 мг феррита самария перемешивали в ступке в течение 20 минут. Полученную смесь использовали без дополнительной обработки.

**Подготовка электродов и растворов для электрохимического анализа.** Стандартный угольно-пастовый электрод (УПЭ) готовили путем смешивания в течение 30 минут 80 % по массе углеродного порошка и 20 % парафинового масла в ступке. Модифицированные электроды готовили с определенным количеством (по массе) синтезированных материалов к немодифицированной углеродной пасте (соотношение 1:9 по массе). Процентное содержание рассчитывалось только в составе графитового порошка, а процентное содержание масла всегда было постоянным – 20 %. После гомогенизации смеси тефлоновый корпус заполняли углеродной пастой, а поверхность электрода очищали бумагой и использовали без дополнительной очистки.

Для приготовления 40 мМ буферного раствора Бриттона – Робинсона в колбе, объемом 1 литр, для этого смешивали:  $H_3PO_4$  (0,02 М); AcOH (0,02 М);  $H_3BO_3$  (0,02 М).

### Обсуждение результатов

#### Характеризация материалов

Дифрактограмма чистого образца соответствовала  $SmFeO_3$  (N°: 00-074-1474 CSD: 027276 ICSD) (рис. 1А). Чистота фазы > 99 %, параметры элементарной ячейки:  $a = 5,400 \text{ \AA}$ ,  $b = 5,597 \text{ \AA}$ ,  $c = 7,711 \text{ \AA}$ , тип решетки: орторомбическая. Далее полученные образцы композитных материалов

также были исследованы данным методом. На рис. 1Б видно, что все композитные материалы имеют 2 фазы. Первая фаза – нитрид углерода, представлена двумя широкими рефлекссами на  $12,9$  и  $27,3^\circ$ , соответствующие плоскостям (100), (002). Вторая фаза соответствует ферриту самария с основными рефлекссами на углах  $22,8; 31,9; 32,7; 33,1; 46,7; 48,3; 53,2; 58,8^\circ$ , относящихся к плоскостям (110), (020), (112), (200), (220), (221), (131), (204), соответственно. Образец, полученный спеканием, обладает более интенсивными рефлекссами обеих фаз по сравнению с другими образцами и меньшим значением полуширины на полувысоте основного рефлекса при  $27,3^\circ$ . Наименьшей кристалличностью обладает образец, полученный механической смесью исходных материалов [20].

Для исследования структурных свойств использовался метод ИК-спектроскопии. В ИК-спектрах, представленных на рис. 1В, все образцы имеют пики, характерные для фазы нитрида углерода.  $808\text{ см}^{-1}$  – «мода дыхания» триазиновых звеньев,  $1800\text{--}1150\text{ см}^{-1}$  – валентные колебания с-триазиновых звеньев,  $1182, 1280, 1379$  и  $1463\text{ см}^{-1}$  относятся к колебаниям N–C, и  $1593, 1618\text{ см}^{-1}$  к C=N колебаниям, диапазон с волновыми числами  $> 3000\text{ см}^{-1}$  относится к колебанию N–H группы [25]. Фаза феррита самария не представлена, это связано тем, что основные связи RE–O и Fe–O слабо интенсивные и находятся в области до  $600\text{ см}^{-1}$ , поэтому определить их затруднительно, особенно если в составе присутствует органическое соединение.

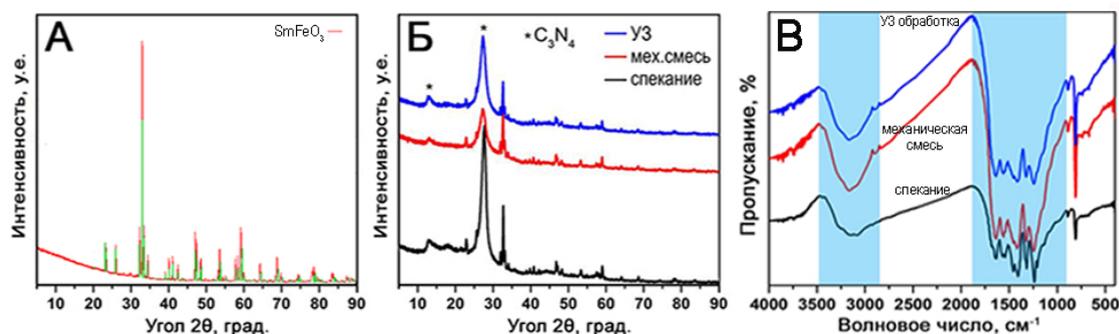


Рис. 1. (А) Анализ структуры феррита самария; (Б) Графики рентгеновской дифракции композитных образцов; (В) Графики ИК-спектроскопии

Морфология образцов представлена слоистыми агрегатами неправильного размера. Сверху морфология была зафиксирована с помощью детектора вторичных электронов, на картинках снизу – с помощью детектора отраженных электронов. При анализе с помощью вторичных электронов можно увидеть, как распределяется феррит самария в образце (рис. 2).

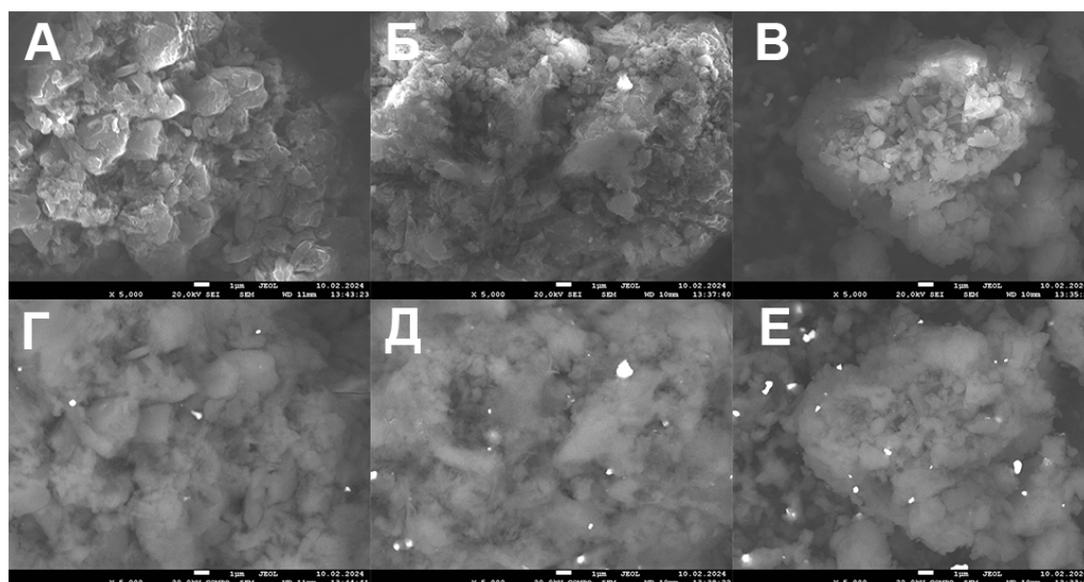


Рис. 2. СЭМ-изображение образца: А, Г – ультразвук, Б, Д – спекание, В, Е – механическая смесь

Белые пятна – это феррит самария, серые – нитрид углерода. Во всех случаях расположение хаотичное, феррит самария не встраивается в межслоевое пространство нитрида углерода. Агрегированные частицы феррита самария достаточно большие для этого (размер порядка нескольких сотен нанометров). Дополнительных морфологических особенностей между образцами не выявлено.

### Электрохимическое исследование ацетоменофена

Циклическая вольтамперометрия применялась для электрохимического исследования поверхности электродов, полученных 3 путями. Все измерения проводили в 0,1 М растворе KCl, содержащем 5 мМ окислительно-восстановительного пробы  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-/4-}$  при скорости сканирования 20, 40, 60, 80, 100 мВ/с в диапазоне потенциалов от –1 В до +1,0 В с начальным потенциалом –1 В. На циклических вольтамперограммах характерные анодные и катодные пики наблюдались для всех образцов, что говорит о прохождении окислительно-восстановительной реакции (ОВР). Результаты представлены на рис. 3А, Б, В. Наиболее выражено реакция ОВР происходила у электродов с наличием композитов, полученных с помощью ультразвука (рис. 3Г).

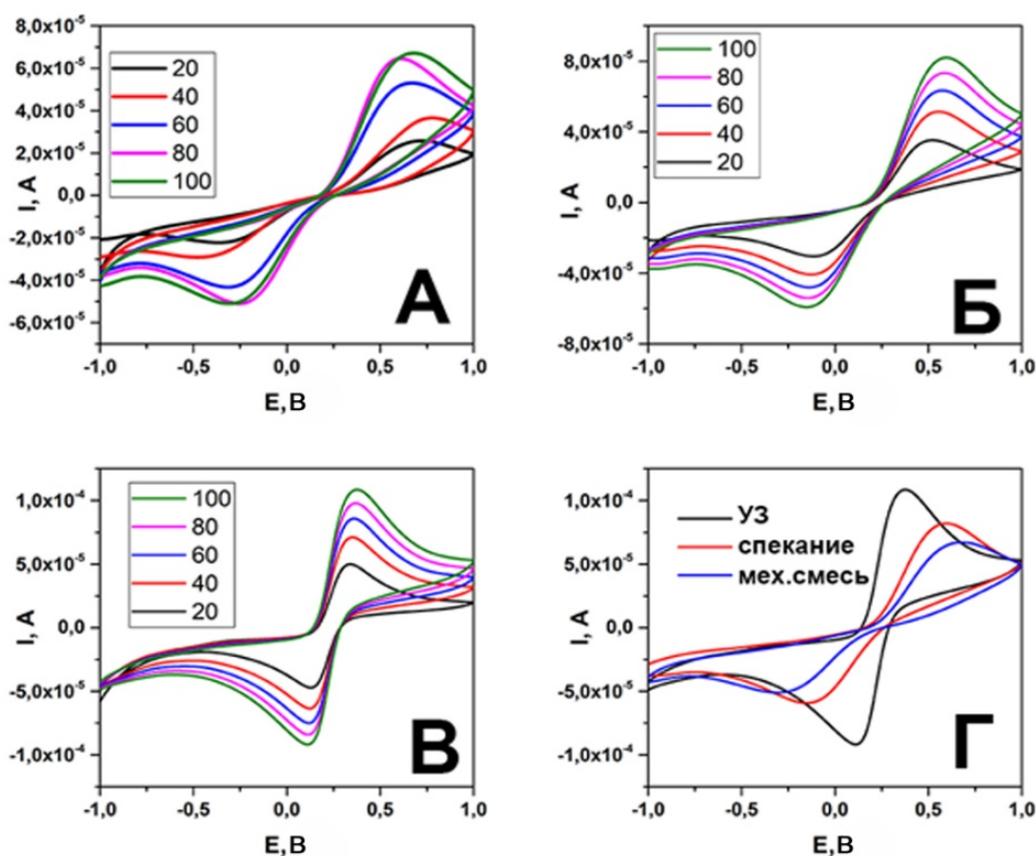


Рис. 3. Результаты электрохимического исследования поверхности электродов: А – электрода полученного с помощью механического измельчения, Б – спекания, В – ультразвуковой обработки; Г – сравнение электродов на одном графике

На рис. 4 показано сравнение композитных образцов. Сравнение проводили при максимальных скоростях сканирования. Наибольший отклик по току наблюдался для образца  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$ , полученного путем ультразвуковой обработки (11 мкА). Такое увеличение отклика по сравнению с другими образцами можно связать с дезагрегацией частиц нитрида углерода и феррита самария, что позволило синтезировать пасту с наилучшим распределением частиц в объеме пасты.

На рис. 5А представлено влияние скорости сканирования на пиковый ток окисления ацетаминофена с концентрацией 33 мкМ с использованием электрода  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$  в буферном растворе Бритонна – Робинсона при рН 4. С увеличением скорости сканирования от 20 до 300 мВ/с наблюдается увеличение интенсивности тока окисления ацетаминофена. Уравнение регрессии

представленное на рисунке 5Б, показывает линейную зависимость  $I$  от  $v^{1/2}$ , и выражается уравнением  $I(\mu A) = 0,205 v^{1/2}(\text{мВ/с})^{1/2} + 0,051$  со значением  $R^2 = 0,9976$ . Наклон прямой меньше значения 0,5, что свидетельствует о том, что электрохимический окислительно-восстановительный процесс контролируется диффузией. Связь зависимости логарифмического пикового тока от логарифмической скорости сканирования (рис. 5В) представляет собой линейное уравнение  $\log(I) = 0,471\log(v) - 0,615$  при  $R^2 = 0,9960$ .

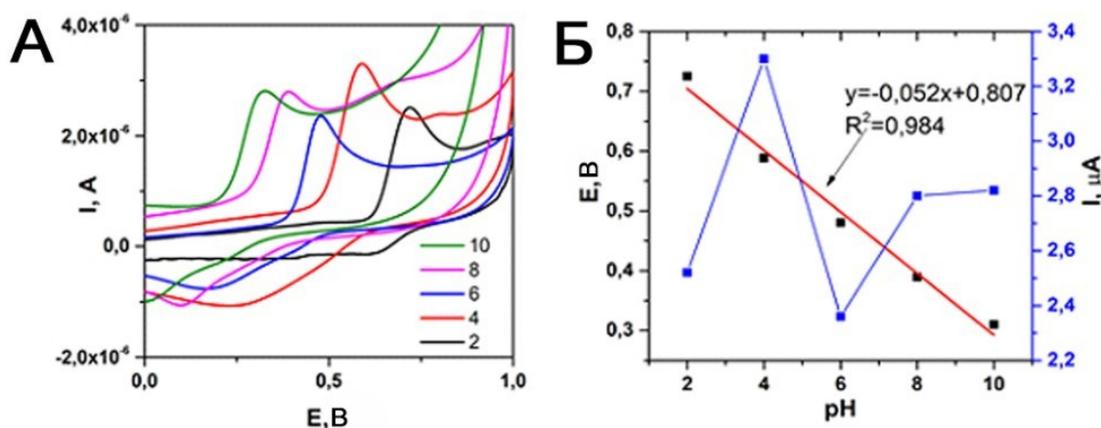


Рис. 4. Подбор условий измерения (А) влияние рН; (Б) график зависимости  $E$  от рН и  $I$  от рН

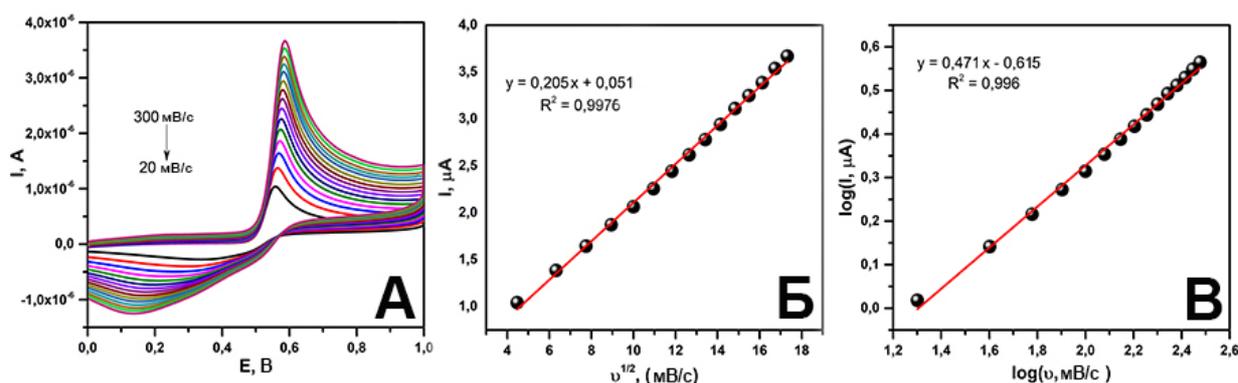


Рис. 5. (А) Циклические вольтамперограммы  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$  при различных скоростях сканирования от 20 до 300 мВ/с в буферном растворе Бриттона – Робинсона при рН 4 с ацетаминофеном концентрации 33 мкМ, диапазон от  $-1$  В до 1 В; (Б) линейные графики зависимости квадратного корня из скорости сканирования от силы тока; (В) Логарифм от скорости сканирования в сравнении с логарифмом от силы тока

Метод циклической вольтамперометрии также применялся и для изучения влияния рН на пиковый потенциал и пиковый ток. Исследование влияния рН на электрохимическое окисление 1500 мкл (50 мкМ) ацетаминофена с концентрацией 1 мМ с использованием электрода  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4(\text{УЗ})/\text{УПЭ}$  в буферном растворе Бриттона – Робинсона при значениях рН от 2 до 10 (рис. 6А). Наибольший пиковый ток наблюдался при рН = 4. Поэтому для всех электрохимических исследований обнаружения ацетаминофена с  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4(\text{УЗ})/\text{УПЭ}$  был выбран рН = 4.

Наклон линейной зависимости рН от потенциала (52 мВ) близок к идеальному значению 59 мВ, что указывает на эквивалентность протонов и электронов в реакции окисления ацетаминофена. Согласно уравнению Нернста [26]:

$$\frac{dE_p}{dpH} = -2.303 \frac{mRT}{nF}, \quad (1)$$

где  $m/n$  равно 1, электрохимический процесс является изоэлектронно-изопротонным процессом.

Следующий этап: оптимизация параметров. Он включал исследование амплитуды, частоты и шага потенциала в присутствии 1500 мкл (50 мкМ) ацетаминофена с концентрацией 1 мМ в буфере Бриттона – Робинсона (рН = 4). Исходя из результатов данного этапа были выбраны ампли-

туда 0,04 В, частота 60 Гц и шаг потенциала 0,009 мВ в связи с более высокой интенсивностью пика окисления ацетоминофена.

Для электрохимического определения ацетоминофена изначально выбирали метод анализа. Два основных метода (квадратно-волновая вольтамперометрия (КВВ) и дифференциально-импульсная вольтамперометрия (ДИВ)) тестировали в похожих условиях, для определения наиболее чувствительного из них. Метод квадратно-волновой вольтамперометрии был выбран для электрохимического обнаружения ацетоминофена, так как он показал отклик почти вдвое выше, чем дифференциально-импульсная вольтамперометрия (рис. 6А).

Далее искали минимальное значение для определения и максимальное. Калибровочный график зависимости текущего отклика от малых концентраций описывается уравнением  $y = 0,0539x + 0,4257$  с коэффициентом корреляции  $R^2 = 0,9952$  (рис. 6Б). Минимальная точка обнаружения ацетоминофена составила 500 нМ, максимальное 230 мкМ (рис. 6В). Это говорит о возможности использования разработанного электрода для реальных образцов.

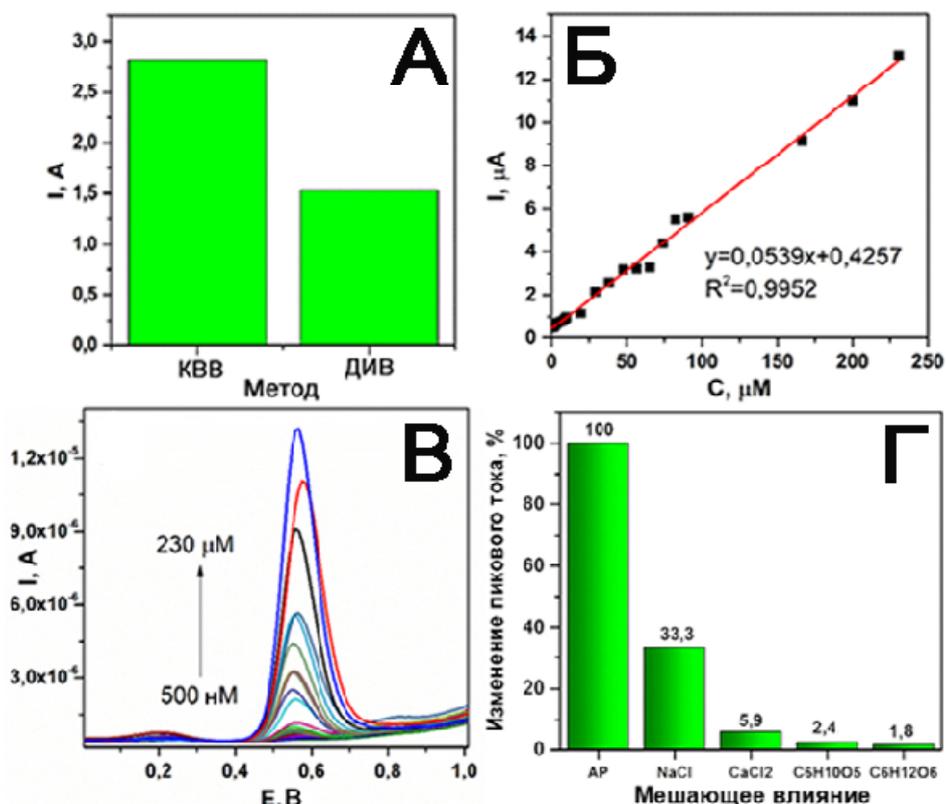


Рис. 6. (А) Результаты электрохимического определения парацетамола двумя методами; (Б) Калибровочный график зависимости текущего отклика от малых концентраций; (В) График обнаружения ацетоминофена; (Г) Мешающие влияния на определение ацетаминофена

Для определения возможности использования электрода, модифицированного композитом  $SmFeO_3/C_3N_4/УПЭ$ , для анализа ацетаминофена на реальных образцах, было проведено исследование влияния мешающих соединений. В качестве мешающих компонентов использовались неорганические –  $NaCl$  и  $CaCl_2$ , и органические – крахмал и глюкоза, соединения. Растворы этих соединений использовались в концентрации 33 мкМ и добавлялись к буферному раствору Бритонна – Робинсона pH 4, содержащему 33 мкМ ацетаминофена. Для исследования использовался метод КВВ, и данные представлены на рис. 6Г. Наибольшее влияние на определение ацетаминофена оказывает  $NaCl$ , который увеличивает высоту пика на 33,3 %. Соединения  $CaCl_2$  (5,9 %), крахмала (2,4 %), и глюкозы (1,8 %) незначительно увеличивают пиковый ток. В результате, можно установить, что данный электрод возможно использовать для определения ацетаминофена на реальных образцах.

Эффективность электрода  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$  была определена на реальных образцах. Для данного анализа использовалась водопроводная вода без какой-либо очистки. К 29,5 мл буферного раствора Бриттона – Робинсона и 0,5 мл водопроводной воды, добавляли известную концентрацию ацетаминофена, и концентрацию аналита определяли методом КВВ при ранее подобранных условиях. В таблице представлены результаты, рассчитанные с использованием уравнения калибровочного графика.

Определение ацетаминофена в реальных образцах

Образец	Добавленная концентрация, мкМ	Определенная концентрация, мкМ	Извлечение %
Водопроводная вода	9,9	8,5	85,9
	47,6	42,2	88,7
	90,9	74,4	81,5

Воспроизводимость  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$  была изучена методом КВВ с использованием трех паст, модифицированных  $\text{SmFeO}_3$ , сделанных по одной методике и при одинаковых условиях. Для анализа использовался буферный раствор Бриттана – Робинсона pH 4 с концентрацией ацетаминофена 33 мкМ (рис. 7А). В результате, значение стандартного отклонения пикового тока между экспериментами составляет 2,13 %.

Для исследования стабильности электрода  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$  проводили измерение пасты, приготовленной 14 дней назад, с использованием буферного раствора Бриттона – Робинсона pH 4 с концентрацией ацетаминофена 33 мкМ методом КВВ (рис. 7Б). Концентрация была рассчитана с использованием уравнения калибровочного графика. Отклонение определяемой концентрации составляет 1,84 %.

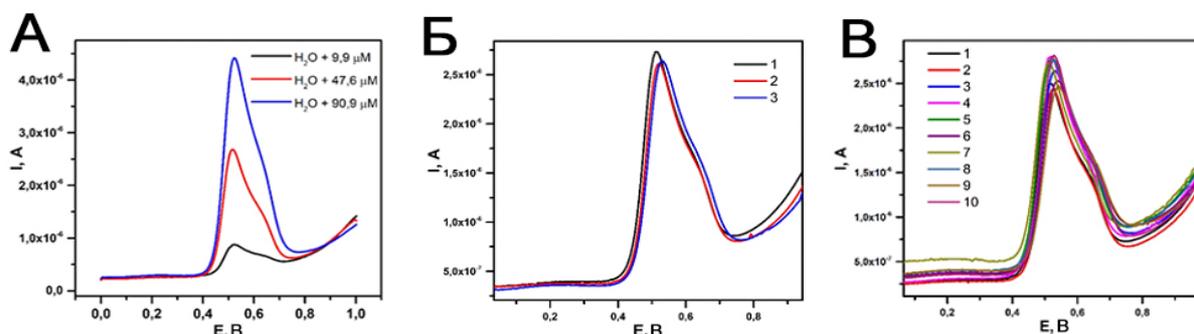


Рис. 7. (А) Определение содержания ацетаминофена в водопроводной воде, с использованием  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$ ; (Б) Определение воспроизводимости для  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$  по отношению к 33,3 мкМ ацетаминофена, диапазон от 0 В до 1 В (представлена часть графика с пиками); (В) Определение стабильности для  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$  по отношению к 33,3 мкМ ацетаминофена, диапазон от 0 В до 1 В (представлена часть графика с пиками)

Исследование стабильности проводили 10 анализами при одинаковых условиях и параметрах методом КВВ, с использованием буферного раствора Бриттона-Робинсона pH 4 с концентрацией ацетаминофена 33 мкМ (рис. 7В). В результате, электрод  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$  показал хорошую стабильность, и значение отклонения составляет 5,58 %.

### Заключение

В данной работе для электрохимического определения ацетаминофена были использованы электроды из углеродной пасты, модифицированные композитным материалом на основе феррита самария и нитрида углерода. Синтез образцов  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4$  производили тремя способами: спекание, ультразвуковое диспергирование и механическое перемешивание. Методом порошковой дифракции было определено, что все композитные материалы имеют 2 фазы. Первая фаза – нитрид углерода, вторая фаза соответствует ферриту самария. С помощью метода ИК-спектроскопии обнаружено, что все образцы имеют пики, характерные для фазы нитрида углерода. Наибольший отклик по току наблюдался для образца  $\text{SmFeO}_3/\text{C}_3\text{N}_4/\text{УПЭ}$ , полученного путем ультразвуковой обра-

ботки. Оптимизация условий позволила использовать полученный электрод для обнаружения ацетаминофена в диапазоне от 500 нМ до 230 мкМ. Наибольшее влияние на определение ацетаминофена оказывает NaCl, который увеличивает высоту пика на 33,3 %. Соединения CaCl<sub>2</sub> (5,89 %), крахмала (2,42 %), и глюкозы (1,76 %) незначительно увеличивают пиковый ток. Для определения эффективности полученного электрода SmFeO<sub>3</sub>/C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/УПЭ проводили анализ с использованием водопроводной воды без какой-либо очистки. На основании полученных результатов можно утверждать, что разработанная методика подходит для электрохимического обнаружения ацетаминофена в реальных образцах.

#### Список источников

1. Wang S., Chen F., Li Z. *et al.* // *Surfaces and Interfaces*. 2023.V. 39. P. 102910. DOI: 10.1016/J.SURFIN.2023.102910.
2. Kachosangi R.T., Wildgoose G.G., Compton R.G. // *Anal. Chim. Acta*. 2008. V. 618. P. 54. DOI: 10.1016/J.ACA.2008.04.053.
3. Yang K., Yang H., Zheng Y. *et al.* // *Microchem. J.* 2024. V. 203. P. 110874. DOI: 10.1016/J.MICROC.2024.110874.
4. D'Souza O.J., Mascarenhas R.J., Thomas T. *et al.* // *J. Electroanal. Chem.* 2015. V. 739. P. 49. DOI: 10.1016/J.JELECHEM.2014.12.012.
5. Li J., Liu J., Tan G. *et al.* // *Biosens. Bioelectron.* 54. 2014. P. 468. DOI: 10.1016/J.BIOS.2013.11.001.
6. Larson A.M., Polson J., Fontana R.J. *et al.* // *Hepatology*. 2005. V. 42. P. 1364. DOI: 10.1002/HEP.20948.
7. Fu L., Lai G., Yu A. // *RSC Adv*. 2015. V. 5. P. 76973. DOI: 10.1039/C5RA12520K.
8. Tyszczyk-Rotko K., Bęczkowska I., Wójciak-Kosior M. *et al.* // *Talanta*. 2014. V. 129. P. 384. DOI: 10.1016/J.TALANTA.2014.06.023.
9. Karuppusamy N., Mariyappan V., Chen S.M. *et al.* // *Surfaces and Interfaces*. 2023. V. 37. P. 102681. DOI: 10.1016/J.SURFIN.2023.102681.
10. Boopathi M., Won M.S., Shim Y.B. // *Anal. Chim. Acta*. 2004. V. 512, No. 2. P. 191. DOI: 10.1016/J.ACA.2004.03.005.
11. Ishii Y., Iijima M., Umemura T. *et al.* // *J. Pharm. Biomed. Anal.* 2006. V. 41. P. 1325. DOI: 10.1016/J.JPBA.2006.02.045.
12. Kutluay A., Aslanoglu M. // *Anal. Chim. Acta*. 2014. V. 839 P. 59. DOI: 10.1016/J.ACA.2014.05.018.
13. Chu Q., Jiang L., Tian X. *et al.* // *Anal. Chim. Acta*. 2008. V. 606. P. 246. DOI: 10.1016/J.ACA.2007.11.015.
14. Ruengsitagoon W., Liawruangrath S., Townshend A. // *Talanta*. 2006. V. 69. P. 976. DOI: 10.1016/J.TALANTA.2005.11.050.
15. Erk N. // *J. Pharm. Biomed. Anal.* 1999. V. 21. P. 429. DOI: 10.1016/S0731-7085(99)00157-0.
16. Sasmal A., Sen S., Devi P.S. // *Mater. Res. Bull.* 2020. V. 130. P. 110941. DOI: 10.1016/J.MATERRESBULL.2020.110941.
17. Zhang Y., Li K., Liu Y.Q. *et al.* // *J. Alloys Compd.* 2023. V. 936. P. 168155. DOI: 10.1016/J.JALLCOM.2022.168155.
18. Li Y., Chen S.M. // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2012. V. 7. P. 2175. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)13871-5.
19. Ji L., Li F., Li C. *et al.* // *Microchem. J.* 2022. V. 181. P. 107688. DOI: 10.1016/J.MICROC.2022.107688.
20. Song G., Su J., Fang S. *et al.* // *Phys. B Condens. Matter*. 2020. V. 589. P. 412185. DOI: 10.1016/J.PHYSB.2020.412185.
21. Hao J., Wang Q., Zhao Z. // *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 2017. V. 335. P. 94. DOI: 10.1016/J.JPHOTOCHEM.2016.11.002.
22. Zhao G.Q., Zou J., Hu J. *et al.* // *Sep. Purif. Technol.* 2021. V. 279. P. 119769. DOI: 10.1016/J.SEPPUR.2021.119769.
23. Yang X., Zhao L., Wang S. *et al.* // *J. Mater.* 2021. V. 7. P. 728. DOI: 10.1016/J.JMAT.2021.01.004.

24. *Ahmad T., Alotaibi B.M., Alrowaily A.W. et al. // Ceram. Int. 2024. V. 50. P. 15100. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2024.01.429.*

25. *Liu Y., Wu T., Zhao H. et al. // Ceram. Int. 2023. V. 49 P. 23775. DOI: 10.1016/J.CERAMINT.2023.04.217.*

26. *Chen J., Chen Y., Li S. et al. // Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp. 2022. V. 650. P. 129318. DOI: 10.1016/J.COLSURFA.2022.129318.*

**Булатова Екатерина Андреевна** – лаборант-исследователь лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, аспирант кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: bulatovaea@susu.ru

**Миронова Анастасия Тарасовна** – лаборант-исследователь лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, студент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: mironovaat@susu.ru

**Фахрутдинова Елизавета Евгеньевна** – студент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: fahrutdinovaelizaveta7@gmail.com

**Бушуева Лада Алексеевна** – студент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: ladabushueva17@gmail.com

**Скороход Дарья Сергеевна** – студент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: sds1501@yandex.ru

**Шумакова Мария Сергеевна** – студент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: melonandcabbage2004@gmail.com

**Манько Данил Андреевич** – студент кафедры экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: speedik0000@gmail.com

**Большаков Олег Игоревич** – старший научный сотрудник НОЦ «Нанотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: bolshakovoi@susu.ru

**Головин Михаил Сергеевич** – научный сотрудник НОЦ «Нанотехнологии», лаборант-исследователь лаборатории экологических проблем и постиндустриальной агломерации, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. E-mail: golovinms@susu.ru

*Статья поступила в редакцию 11 октября 2024 г.*

*The article was submitted 11 October 2024.*