

## Вольтамперометрическое определение синтетического пищевого красителя синий блестящий FCF

**М.А. Бухаринова, Е.И. Хамзина, В.К. Тамошенко,  
А.В. Тарасов, \*Н.Ю. Стожко**

ФГБОУ ВО «Уральский государственный экономический университет»,  
Российская Федерация, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта/Народной Воли, 62/45

\*Адрес для переписки: Стожко Наталья Юрьевна, E-mail: sny@usue.ru

Поступила в редакцию 06.09.2024 г., после доработки – 19.09.2024 г.

Разработан высокочувствительный и селективный вольтамперометрический сенсор на основе нетканого углеродного материала, модифицированного фитосинтезированными наночастицами серебра и графеновыми нанопластинами, для определения пищевого синтетического красителя синий блестящий FCF (E133). Наночастицы серебра получены в результате простого, быстрого и экологически безопасного фитосинтеза с применением экстракта листьев облепихи без использования токсичных химических реагентов. Модифицирование углеродного электрода фитонаночастицами серебра и графеновыми нанопластинами способствовало увеличению активной площади поверхности электрода, возрастанию максимального тока окисления красителя E133 и снижению перенапряжения этого процесса относительно немодифицированного электрода. Выбраны условия формирования максимального аналитического сигнала красителя, включающие состав нанокompозитного модификатора (массовая доля наночастиц серебра и графеновых нанопластин составляет 4.4 % и 95.6 % соответственно) и кислотность фонового электролита (фосфатный буферный раствор pH 5). Установлено, что процесс электроокисления красителя E133 на модифицированном углеродном электроде является необратимым, двухэлектронным, протекает без участия протонов и контролируется диффузией. Предложена схема электродного процесса, согласующаяся с литературными данными. Сенсор характеризуется низким пределом обнаружения (6.1 нМ), широким диапазоном определяемых концентраций (0.06 – 40 мкМ) и хорошей повторяемостью аналитического сигнала красителя  $s_r < 7\%$ . Показано, что изученные мешающие вещества не оказывают существенного влияния на аналитический сигнал красителя E133. Разработанный сенсор успешно применен для анализа напитков и карамели без предварительной пробоподготовки. Степень открытия красителя E133 в реальных образцах составляет 97 – 103 %, что свидетельствует об отсутствии значимой систематической погрешности.

**Ключевые слова:** триарилметановый краситель, синий блестящий FCF, фитосинтез, графен, серебряные наночастицы, углеродный электрод, электрохимический сенсор, напитки

For citation: Analitika i kontrol' [Analytics and Control], 2024, vol. 28, no. 3, pp. 251-258

DOI: 10.15826/analitika.2024.28.3.003

## Voltammetric determination of synthetic food dye brilliant blue FCF

**M.A. Bukharinova, E.I. Hamzina, V.K. Tamoshenko,  
A.V. Tarasov, \*N.Yu. Stozhko**

Ural State University of Economics,  
62/45 8 Marta/Narodnoy Voli Str., Yekaterinburg, 620144, Russian Federation

\*Corresponding author: Nataliya Yu. Stozhko, E-mail: sny@usue.ru

Submitted 06 September 2024, received in revised form 19 September 2024

A highly sensitive and selective voltammetric sensor based on a non-woven carbon fiber material modified with phytosynthesized silver nanoparticles and graphene nanoplatelets was developed for determining

food synthetic dye Brilliant Blue FCF (E133). Silver nanoparticles were prepared employing simple, fast and environmentally friendly phytosynthesis using sea buckthorn leaf extract without use of harmful chemical reagents. Modification of the carbon fiber electrode with silver phytonanoparticles and graphene nanoplatelets contributed to an increase in the active surface area of the electrode, an increase in the maximum oxidation current of E133 and a decrease in the overvoltage of this process relative to the unmodified electrode. Conditions for producing maximum analytical signal from the dye, including composition of the nanocomposite modifier (mass fraction of silver nanoparticles and graphene nanoplatelets, of 4.4 and 95.6 %, respectively) and the background electrolyte acidity (phosphate buffer solution with pH of 5) were selected. It was found that the process of electrooxidation of E133 dye on the modified carbon fiber electrode is irreversible, two-electron, occurs in the absence of protons and is controlled by diffusion. Scheme of the electrode process consistent with the literature data is suggested. The sensor is characterized by a low detection limit (6.1 nM), a wide range of detectable concentrations (0.06–40 µM), and good repeatability of the analytical signal of the dye  $s_r < 7\%$ . It was shown that potential interferents did not have a significant effect on the analytical signal of E133 dye. The developed sensor was successfully applied for analysis of beverages and caramel without preliminary sample preparation. The values of recovery of E133 dye in the range of 97–103 % in real samples prove the absence of a systematic error.

**Keywords:** triarylmethane dye, Brilliant Blue FCF, phytosynthesis, graphene, silver nanoparticles, carbon fiber electrode, electrochemical sensor, beverages.

## ВВЕДЕНИЕ

В пищевой промышленности для сохранения физико-химических и сенсорных (органолептических) свойств пищевых продуктов используют различные вещества, такие как консерванты, загустители, разрыхлители, пеногасители и красители. Пищевые красители применяют для усиления или изменения цвета продуктов питания и напитков во время хранения и переработки. Относительно низкая себестоимость, устойчивость к изменениям pH, температуры и интенсивности света обеспечивают конкурентные преимущества синтетическим пищевым красителям. Они встречаются практически во всех видах обработанной продукции: напитках, конфетах, молочной продукции. В частности, синтетический пищевой краситель синий блестящий FCF (E133) широко используют в безалкогольных напитках, сиропах, лекарственных средствах.

Потребление красителей в течение длительного времени может вызывать аллергию, заболевания дыхательных путей, печени и почек [1], а у детей - гиперактивность и дефицит внимания [2, 3]. Исследования безопасности пищевых добавок привели к запрету некоторых синтетических пищевых красителей, таких как амарант, цитрусовый красный, красный 2G. ВОЗ и надзорные органы многих стран установили нормы содержания красителей в продуктах питания. Например, содержание синего блестящего FCF не должно превышать 12.5 мг/кг, а допустимая суточная норма его потребления составляет 6 мг/кг массы тела человека в день [4], поэтому количественное определение этого синтетического красителя в продуктах питания является важной аналитической задачей.

Современные методы обнаружения красителя синего блестящего FCF включают высокоэффективную жидкостную хроматографию [5, 6], капиллярный электрофорез [7, 8], УФ-видимую [9] и флуоресцентную [10, 11] спектроскопию. Эти методы широко распространены в рутинном анализе, несмотря на сложность пробоподготовки, большие временные и

материальные затраты, дорогостоящее оборудование. На этом фоне выделяются электрохимические методы анализа с невысокой стоимостью, простотой проведения анализа и высокой чувствительностью. Для определения красителя синий блестящий FCF применяют стеклоглеродные [12, 13], угольно-пастовые [14–16] электроды, которые модифицируют многостенными углеродными нанотрубками [17], оксидами металлов [18, 19]. Для увеличения активной поверхности и надежного закрепления модификатора на электроде в последнее время используют новый электродный материал – углеродную вуаль, которая представляет собой высокопористый нетканый материал, изготовленный из случайно ориентированных рубленых волокон со связующим [20, 21]. Этот материал был специально разработан для применения в различных областях промышленности, включая аэрокосмическую, строительную, автомобильную, бытовую электронику и альтернативную энергетику. Как и другие материалы на основе углерода, вуаль обладает собственной электропроводностью, что делает ее полезной при разработке электрохимических сенсоров. Анализ литературы свидетельствует об отсутствии электрохимических сенсоров на основе углеволоконного материала для определения красителя синего блестящего FCF.

Для увеличения электрического контакта между волокнами углеродной вали целесообразно использовать родственный материал, в частности, графен, который обладает хорошими электрическими и каталитическими свойствами. Дополнительное модифицирование углеродной вали наночастицами благородных металлов способствует облегчению процесса переноса электронов и улучшению проводимости [20]. Используя растительный экстракт в качестве восстановителя и стабилизатора, можно фитосинтезировать наночастицы металлов просто, быстро и без применения токсичных химических реагентов [22].

Статья посвящена разработке углеродного электрода, модифицированного композитом, включающим фитосинтезированные наночастицы серебра и нанопластины графена, для определения синтетического пищевого красителя синий блестящий FCF методом вольтамперометрии.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Фитосинтезированные наночастицы серебра (фито-AgНЧ) были получены с использованием экстракта листьев облепихи. Растительный экстракт приготовлен в соответствии с методикой, описанной в [23, 24]. Для синтеза фито-AgНЧ полученный экстракт доводили до pH 11 с помощью раствора гидроксида натрия (чда, ЗАО «НПО ЭКРОС», Россия). Процедура синтеза заключалась в добавлении 0.6 мл щелочного экстракта к 5 мл раствора нитрата серебра (хч, АО «ЛенРеактив», Россия) с концентрацией 1 мМ, предварительно нагретого до 70 °С. Реакционную смесь выдерживали при постоянном перемешивании 1200 об/мин и температуре 70 °С в течение 5 мин с использованием мешалки с контролируемым подогревом RCT Basic (IKA-Werke GmbH and Co., Ltd., KG, Германия). Далее полученный золь охлаждали до комнатной температуры и выдерживали при перемешивании магнитной мешалкой со скоростью 1200 об/мин ещё в течение 30 мин. Средний диаметр фитосинтезированных наночастиц серебра по данным, полученным на просвечивающем электронном микроскопе JEM-2100 (JEOL Ltd., Япония), составил 10 нм.

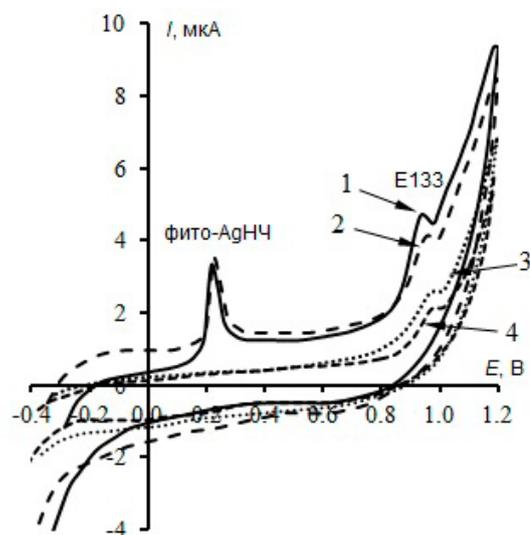
Водную дисперсию графеновых нанопластин (1 мг/мл) (НПК «Русграфен», Россия) получали путем их добавления в дистиллированную воду и дальнейшей обработки полученной дисперсии в ультразвуковой ванне (RH PS-20A (S-Line Estern Electronic, Китай) в течение 15 мин. Композитный наномодификатор (фито-AgНЧ–графен) готовили путем смешивания соответствующих аликвот золь фито-AgНЧ и водной дисперсии графена.

Электрохимические исследования методом вольтамперометрии с циклической и линейной разверткой потенциала проводили с использованием инверсионного вольтамперометрического анализатора ИВА-5 (ООО НПВП «Ива», Россия) в комплекте с трехэлектродной ячейкой, в которой электродом сравнения служил хлоридсеребряный электрод (Ag/AgCl/KCl, 3.5 М) (ОАО «ГЗИП», Беларусь), а вспомогательным электродом – углеродный стержень. В качестве рабочих электродов использовали немодифицированный и модифицированные углеродные электроды (УВЭ). Модифицирование УВЭ, изготовленного из углеродной вуали (Jiaxing Fu-Tech New Materials Co., Ltd., China) и полиэтилентерефталатной пленки (Fellowes Inc., Itasca, United States) в соответствии с технологией, описанной в [25], проводили капельным методом, после чего электрод высушивали на воздухе. Электроактивную площадь поверхности устанавливали по хроноампе-

рометрическим данным с использованием уравнения Коттрелла. Для УВЭ она составила 17 мм<sup>2</sup>, а для модифицированного фито-AgНЧ–графен/УВЭ – 25 мм<sup>2</sup>. Контроль pH фонового электролита – фосфатного буферного раствора, приготовленного из гидрофосфата натрия (чда, АО «Вектон», Россия) и дигидрофосфата калия (хч, ООО «НеваРеактив», Россия), осуществляли на pH/иономере ТА-Ион (НПП «Томьаналит», Россия). Дистиллированную воду, полученную с помощью установки Аквалаб-УВОИ-«М-Ф» (АО «НПК Медиана-Фильтр», Москва, Россия), использовали для приготовления растворов.

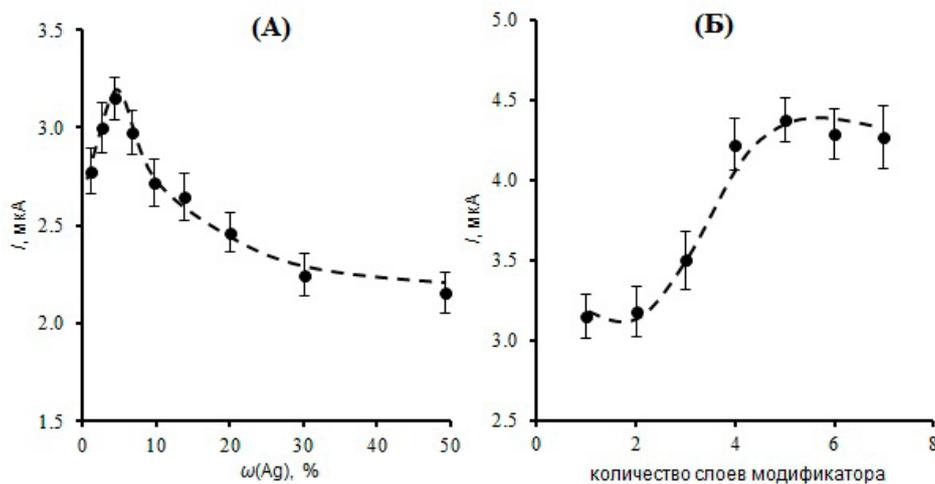
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Циклические вольтамперограммы 10 мкМ красителя E133, зарегистрированные с использованием немодифицированного и модифицированных УВЭ, представлены на рис. 1. На немодифицированном УВЭ и УВЭ, модифицированном графеновыми нанопластинами, краситель E133 необратимо окисляется около 0.98 В, при этом регистрируется слабо выраженный сигнал. Модифицирование УВЭ графеном увеличивает этот сигнал на 25 %, а иммобилизация фито-AgНЧ на поверхность УВЭ делает отклик красителя более отчетливым и сдвигает его в область меньших значений на 20 мВ. На УВЭ с нанокондитным модификатором фито-AgНЧ–графен максимальный ток окисления красителя E133 увеличивается почти в два раза, и его потенциал становится на 50 мВ меньше по сравнению с немодифицированным УВЭ. Таким



**Рис. 1.** Циклические вольтамперограммы в присутствии 10 мкМ красителя E133, зарегистрированные на разных электродах (1 – фито-AgНЧ–графен/УВЭ, 2 – фито-AgНЧ/УВЭ, 3 – графен/УВЭ, 4 – УВЭ) в фосфатном буферном растворе pH 7,  $\nu = 50$  мВ/с

**Fig. 1.** Cyclic voltammograms in presence of 10  $\mu$ M E133 dye recorded on different electrodes (1 – phyto-AgNPs–graphene/CVE, 2 – phyto-AgNPs/CVE, 3 – graphene/CVE, 4 – CVE) in phosphate buffer solution, pH 7,  $\nu = 50$  mV/s



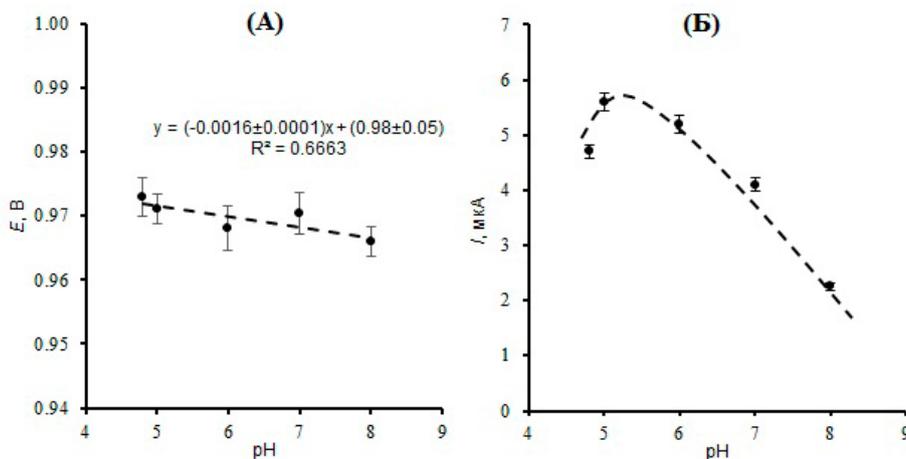
**Рис. 2.** Влияние массовой доли фито-AgНЧ в одном слое композита (А) и количества слоев модификатора (Б) на сигнал 10 мкМ красителя E133 в фосфатном буферном растворе pH 7

**Fig. 2.** Effect of phyto-AgNPs mass fraction in one layer of composite (A) and number of modifier layers (B) on the signal of 10  $\mu\text{M}$  E133 dye in phosphate buffer solution, pH 7

образом, модифицирование УВЭ фито-AgНЧ и графеном способствует снижению перенапряжения и увеличению тока электроокисления красителя E133.

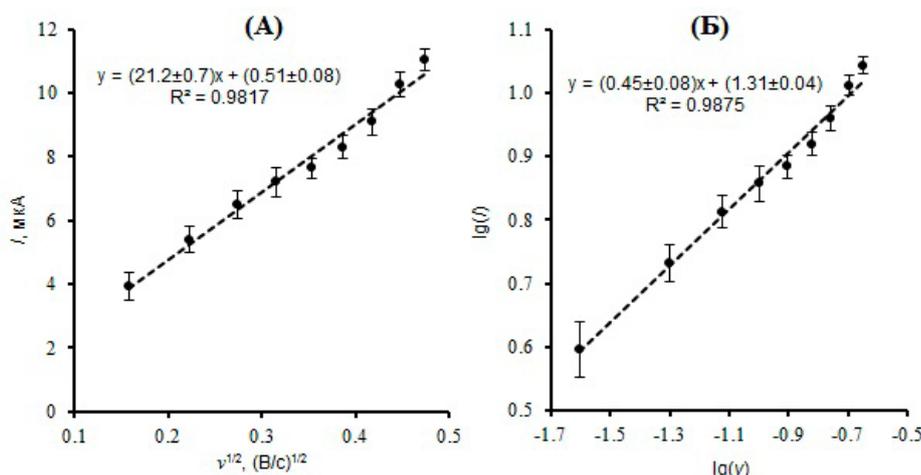
Для выбора количественного состава модификатора были приготовлены смеси нанокompозита фито-AgНЧ–графен с различной массовой долей наночастиц серебра. Согласно рис. 2А с увеличением массовой доли серебра в нанокompозите до 4.4 % сигнал электроокисления красителя E133 увеличивается, что было обусловлено возрастанием числа каталитических и адсорбционных центров на поверхности электрода. Последующее увеличение массовой доли фито-AgНЧ в нанокompозите приводило к снижению сигнала окисления красителя, что могло быть связано с уменьшением числа активных центров вследствие агрегации наночастиц в композите. Оптимальное содержание фито-AgНЧ в нанокompозитном модификаторе было выбрано

на уровне 4.4 %. Чтобы установить необходимое количество слоев модификатора фито-AgНЧ–графен, обеспечивающих максимальный сигнал красителя E133, оценивали силу тока его окисления в зависимости от количества наносимых слоев на УВЭ (рис. 2Б). С увеличением количества слоев нанокompозитного модификатора на электроде вначале наблюдается рост сигнала окисления красителя E133. Это объясняется возрастанием активной площади поверхности и электропроводности электрода. Однако при нанесении пяти и более слоев модификатора сигнал окисления красителя E133 перестает значительно изменяться. Вероятно, этому способствует полное заполнение пустот между углеродными волокнами, поэтому нанесение более пяти слоев модификатора не целесообразно. Для всех последующих экспери-



**Рис. 3.** Влияние pH фонового электролита на параметры сигнала электроокисления 10 мкМ красителя E133 на фито-AgНЧ–графен/УВЭ

**Fig. 3.** Effect of pH of background electrolyte on parameters of electrooxidation signal of 10  $\mu\text{M}$  E133 dye on phyto-AgNPs–graphene/CVE



**Рис. 4.** Кинетические зависимости  $I = f(v^{1/2})$  (А) и  $\lg(I) = f(\lg(v))$  (Б) для 10 мкМ красителя E133. Диапазон скорости развертки потенциалов 25 – 225 мВ/с

**Fig. 4.**  $I = f(v^{1/2})$  (A) and  $\lg(I) = f(\lg(v))$  (B) kinetic dependencies for 10  $\mu\text{M}$  E133 dye. The potential scan rate range was 25–225 mV/s

ментов УВЭ был модифицирован пятью слоями нанокompозита фито-AgНЧ–графен.

Для исследования влияния кислотности фонового электролита на процесс окисления пищевого красителя E133 на фито-AgНЧ–графен/УВЭ регистрировали сигналы красителя E133 в фосфатном буферном растворе в диапазоне pH от 4.8 до 8.0. Как видно из рис. 3А, потенциал максимального тока электроокисления красителя E133 практически не изменяется при варьировании pH и угловой коэффициент зависимости  $E = f(\text{pH})$  близок к 0 (рис. 3А), из чего можно заключить, что протоны не участвуют в электродном процессе. Эти результаты согласуются с литературными данными [15, 19]. Сигнал электроокисления красителя E133 имеет наибольшее значение в фоновом растворе с pH 5, и при дальнейшем уменьшении кислотности сигнал уменьшается (рис. 3Б). По-видимому, такое поведение красителя E133 обусловлено тем, что при pH 5 – 6 он преимущественно находится в молекулярной форме ( $\text{p}K_a = 5.63$ ) [26, 27], которая лучше всего взаимодействует с электродной поверхностью. Для дальнейших экспериментов в качестве фонового электролита использован фосфатный буферный раствор с pH 5.

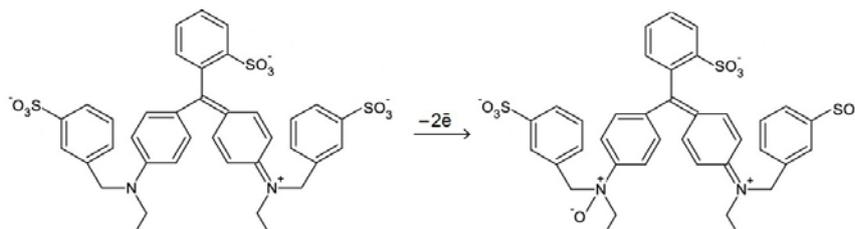
На рис. 4 представлены зависимости  $I = f(v^{1/2})$  и  $\lg(I) = f(\lg(v))$ . Максимальный ток окисления красителя E133 линейно зависит от корня квадратного из скорости сканирования потенциала (рис. 4А) и

угловой коэффициент логарифмической зависимости  $\lg(I) = f(\lg(v))$  близок к 0.5 (рис. 4Б). Эти данные свидетельствуют о диффузионном характере процесса окисления красителя E133 на фито-AgНЧ–графен/УВЭ. На основании циклической вольтамперограммы 10 мкМ красителя E133, зарегистрированной при скорости сканирования потенциала 5 мВ/с, была построена зависимость Тафеля и рассчитан коэффициент анодного переноса  $\alpha = 0.31$ . Число электронов ( $n$ ), участвующих в необратимой электродной реакции, контролируемой диффузией, и рассчитанное по формуле  $\Delta E_{1/2} = 47.7/\alpha_a n$ , составило 1.9. Схема электроокисления красителя E133 с участием двух электронов, представленная на рис. 5, согласуется с литературными данными [19].

Аналитические характеристики разработанного сенсора устанавливали с использованием режима регистрации производных вольтамперограмм, обеспечивающего более высокую чувствительность измеряемого сигнала. Как видно из рис. 6, аналитический сигнал красителя E133 возрастает с увеличением его концентрации в диапазоне от 0.06 до 40 мкМ. Линейная зависимость аналитического сигнала красителя E133 от его концентрации описывается уравнением:

$$dI/dE(\text{мкА/В}) = (3.35 \pm 0.15) c_{E133}(\text{мкМ}) + (0.56 \pm 0.02), R^2 = 0.9980.$$

Предел обнаружения красителя E133 составляет 6.1 нМ. Аналитические характеристики разработан-



**Рис. 5.** Схема электроокисления красителя E133 на фито-AgНЧ–графен/УВЭ

**Fig. 5.** Scheme of electrooxidation of E133 dye on phyto-AgNPs–graphene/CVE

Таблица 2

Результаты вольтамперометрического определения пищевого красителя E133 в реальных образцах с использованием фито-AgНЧ–графен/УВЭ ( $n = 3, P = 0.95$ )

Table 2

Results of voltammetric determination of E133 food dye in real samples using phyto-AgNPs-graphene/CVE ( $n = 3, P = 0.95$ )

Образец	Найдено в образце, мкМ	$s_r, \%$	Введено, мкМ	Найдено в образце с добавкой, мкМ	$s_r, \%$	$R, \%$
Сироп с натуральным соком	$89 \pm 2$	1.7	90	$182 \pm 5$	2.2	103
Напиток «Дабл Фанни»	$0.60 \pm 0.04$	5.6	0.60	$1.18 \pm 0.03$	1.8	97
Леденцы «Эвкалипт»	$0.07 \pm 0.01$	7.0	0.07	$0.135 \pm 0.015$	4.5	93

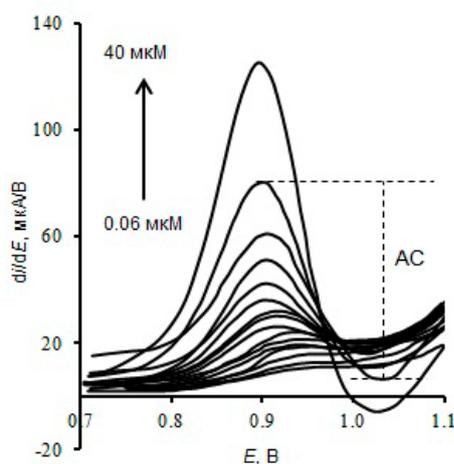


Рис. 6. Производные вольтамперограмм, зарегистрированные при разных концентрациях красителя E133 в фосфатном-буферном растворе pH 5 с помощью фито-AgНЧ–графен/УВЭ,  $v = 50$  мВ/с

Fig. 6. Derivatives of voltammograms recorded at different concentrations of E133 dye on phyto-AgNPs-graphene/CVE in phosphate buffer solution, pH 5,  $v = 50$  mV/s

ного сенсора фито-AgНЧ–графен/УВЭ превосходят характеристики других электрохимических сенсоров (табл. 1).

Межэлектродную прецизионность оценивали на основе измерения отклика 10 мкМ красителя E133 на шести электродах, а повторяемость - по результатам измерений сигнала на одном и том же электроде. Относительное стандартное отклонение ( $s_r$ ) составило 6.9 % и 5.8 % соответственно.

Для оценки селективности разработанного электрохимического сенсора по отношению к ряду мешающих веществ были зарегистрированы производные вольтамперограммы 10 мкМ красителя E133 на фито-AgНЧ–графен/УВЭ в присутствии избытка различных компонентов, содержащихся наряду с красителем в реальных образцах. Так, 800-кратный избыток ацесульфамы, 90-кратный избыток глюкозы и 2-кратный избыток цитрата натрия, красителей тартразина и понсо 4R не оказывают существенного влияния на сигнал электроокисления E133.

Результаты использования разработанного сенсора для определения красителя E133 в реальных объектах: безалкогольном напитке «Дабл Фанни», сиропе с натуральным соком и биологически-активной добавке леденцах «Эвкалипт», приобретенных в местных магазинах, представлены в табл. 2. Значения относительного стандартного отклонения  $s_r$  находится на уровне 1.7 – 7.0 %, что свидетельствует о хорошей прецизионности результатов анализа. Для подтверждения правильности результатов анализа в исследуемые образцы были введены добавки красителя E133 известной концентрации (табл. 2). Значения 97 – 103 % степени открытия ( $R$ ) красителя E133 указывают на отсутствие значимой систематической погрешности результатов анализа и применимость сенсора фито-AgНЧ–графен/УВЭ для анализа напитков и карамели.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый вольтамперометрический сенсор на основе углеволоконного электрода и композитного модификатора, включающего нанопластины графена и наночастицы серебра. Установлены параметры электроокисления пищевого синтетического красителя E133 на модифицированном электроде и выбраны условия формирования его максимального аналитического сигнала. Разработанный сенсор обеспечивает высокую чувствительность, селективность и надежность определения красителя в широком диапазоне концентраций, что позволило использовать его в анализе пищевых продуктов (напитков и карамели). Достигнутые аналитические характеристики сенсора при определении красителя E133 превосходят характеристики других модифицированных электродов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 23-23-00353.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The study received funding from Russian Science Fund, grant № 23-23-00353.

## ЛИТЕРАТУРА

- Silva M.M., Reboredo F.H., Lidon F.C. Food colour additives: A synoptical overview on their chemical properties, applications in food products, and health side effects // *Foods*. 2022. V.11. Article 379.
- Food additives and hyperactive behaviour in 3-year-old and 8/9-year-old children in the community: a randomised, double-blinded, placebo-controlled trial / D. McCann [et al.] // *Lancet*. 2007. V. 370. P. 1560–1567.
- Inetianbor J.E., Yakubu J.M., Ezeonu S.C. Effects of food additives and preservatives on man – A review // *Asian J. Sci. Technol.* 2015. V. 6, № 2. P. 1118-1135.
- Safety evaluation of certain contaminants in food: prepared by the eighty fourth meeting of the joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). WHO Food additive series; 75, 2019. 234 p.
- Simultaneous determination of synthetic dyes in foodstuffs and beverages by high-performance liquid chromatography coupled with diode-array detector / S. Bonan [et al.] // *Dyes Pigm.* 2013. V. 99, № 1. P. 36–40.
- Mathiyalagan S., Kumar Mandal B., Ling Y.-C. Determination of synthetic and natural colorants in selected green colored foodstuffs through reverse phase-high performance liquid chromatography // *Food Chem.* 2019. V. 278. P. 381-387.
- Sensitive simultaneous determination of synthetic food colorants in preserved fruit samples by capillary electrophoresis with contactless conductivity detection / J.Yi [et al.] // *Food Anal. Methods*. 2018. V. 11. P. 1608-1618.
- Dispersive solid-phase microextraction and capillary electrophoresis separation of food colorants in beverages using diamino moiety functionalized silica nanoparticles as both extractant and pseudostationary phase / F.J. Liu [et al.] // *Talanta*. 2015. V. 132. P. 366-372.
- He S.H., Jiang H. Qualitative and quantitative analysis of some co-existing colorants in some hard candies // *J. Food Compos. Anal.* 2022. V. 109. Article 104475.
- Red-emitting carbon dots as fluorescent probes for the rapid detection of brilliant blue FCF in foods / Q. Wu [et al.] // *Food Control*. 2023. V. 149. Article 109719.
- Dual-emission color-controllable nanoparticle based molecular imprinting ratiometric fluorescence sensor for the visual detection of Brilliant Blue / Q. Yang [et al.] // *Sens. Actuators, B*. 2019. V. 284. P. 428-436.
- MWCNT-modified Electrode for Voltammetric Determination of Allura Red and Brilliant Blue FCF in Isotonic Sport Drinks / P. Sierra-Rosales [et al.] // *Electroanalysis*. 2019. V. 31, № 5. P. 1-9.
- Khan K.A., Shah A., Nisar J. Electrochemical detection and removal of brilliant blue dye via photocatalytic degradation and adsorption using phyto-synthesized nanoparticles // *RSC Adv*. 2024. V. 14. P. 2504-2517.
- Simultaneous voltammetric determination of Brilliant Blue FCF and Tartrazine for food quality control / Lipskikh O.I. [et al.] // *Talanta*. 2020. V. 218. Article 121136.
- Ghoreishi S.M., Behpour M., Golestaneh M. Simultaneous voltammetric determination of Brilliant Blue and Tartrazine in real samples at the surface of a multi-walled carbon nanotube paste electrode // *Anal. Methods*. 2011. V. 3, № 12. P. 2842-2847.
- Electrochemical Determination of Brilliant Blue and Tartrazine Based on an Ionic Liquid-Modified Expanded

Graphite Paste Electrode / W.Wang [et al.] // *J. AOAC Int.* 2015. V. 98, № 3. P. 817-821.

- Development of a facile sensor for the determination of Brilliant Blue FCF in beverages / Wang M. [et al.] // *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 2015. V. 95, № 11. P. 969-979.
- An ultrasensitive electrochemical platform based on copper oxide nanoparticles and poly (crystal violet) for the detection of brilliant blue FCF from soft drinks / Ion B.-C. [et al.] // *Food Chem.* 2024. V. 437. Article 137751.
- Gimadudinova L., Ziyatdinova G., Davletshin R. Selective Voltammetric Sensor for the Simultaneous Quantification of Tartrazine and Brilliant Blue FCF // *Sensors*. 2023. V. 23. Article 1094.
- Carbon Paper Modified with Functionalized Poly(diallyldimethylammonium chloride) Graphene and Gold Phytonanoparticles as a Promising Sensing Material: Characterization and Electroanalysis of Ponceau 4R in Food Samples / N.Y. Stozhko [et al.] // *Nanomater.* 2022. V. 12, № 23. Article 4197.
- Highly sensitive voltammetric determination of allura red (e129) food colourant on a planar carbon fiber sensor modified with shungite / M.A. Bukharinova [et al.] // *Anal. Chim. Acta*. 2023. V. 1272. Article. 341481.
- A review on biological synthesis of silver nanoparticles and their potential applications / A. Dhaka [et al.] // *Results Chem.* 2023. V. 6. Article 101108.
- Potentiometry in antioxidant activity evaluation of microsuspensions, extracts and living plants / Kh.Z. Brainina [et al.] // *J. Plant Biochem. Physiol.* 2018. V. 6. P. 86-87.
- Potentiometric method of plant microsuspensions antioxidant activity determination / K. Brainina [et al.] // *Food Chem.* 2019. V. 278. P. 653-658.
- Film Carbon Veil-Based Electrode Modified with Triton X-100 for Nitrite Determination / N.Y. Stozhko [et al.] // *Chemosensors*. 2020. V. 8. Article 78.
- Spectrophotometry and Electrochemistry of Brilliant Blue FCF in Aqueous Solution of NaX / B. Tutunaru [et al.] // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2017. V. 12, № 1. P. 396-412.
- Flury M., Flühler H. Brilliant Blue FCF as a Dye Tracer for Solute Transport Studies – A Toxicological Overview / *J. Environ. Qual.* 1994. V. 23, № 5. P. 1108-1112.

## REFERENCES

- Silva M.M., Reboredo F.H., Lidon F.C. Food colour additives: A synoptical overview on their chemical properties, applications in food products, and health side effects. *Foods*, 2022, vol. 11. Article 379. doi: 10.3390/foods11030379.
- McCann D., Barrett A., Cooper A., Crumpler D., Dalen L., Grimshaw K., Kitchin E., Lok K., Porteous L., Prince E., Sonuga-Barke E., Warner J.O., Stevenson J. Food additives and hyperactive behaviour in 3-year-old and 8/9-year-old children in the community: a randomised, double-blinded, placebo-controlled trial. *Lancet*, 2007, vol. 370, pp. 1560-1567. doi: 10.1016/S0140-6736(07)61306-3.
- Inetianbor J.E., Yakubu J.M., Ezeonu S.C. Effects of food additives and preservatives on man – A review. *Asian J. Sci. Technol.*, 2015, vol. 6, no. 2, pp. 1118-1135.
- Safety evaluation of certain contaminants in food: prepared by the eighty fourth meeting of the joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). WHO Food additive series; 75, 2019. 234 p.
- Bonan S., Fedrizzi G., Menotta S., Elisabetta C. Simultaneous determination of synthetic dyes in foodstuffs and beverages by high-performance liquid chromatography coupled with

- diode-array detector. *Dyes Pigm.*, 2013, vol. 99, no. 1, pp. 36-40. doi: 10.1016/j.dyepig.2013.03.029.
6. Mathiyalagan S., Kumar Mandal B., Ling Y.-C. Determination of synthetic and natural colorants in selected green colored foodstuffs through reverse phase-high performance liquid chromatography. *Food Chem.*, 2019, vol. 278, pp. 381-387. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.11.077.
  7. Yi J., Zeng L., Wu Q., Yang L., Xie T. Sensitive simultaneous determination of synthetic food colorants in preserved fruit samples by capillary electrophoresis with contactless conductivity detection. *Food Anal. Methods.*, 2018, vol. 11, pp. 1608-1618. doi: 10.1007/s12161-017-1141-6.
  8. Liu F.-J., Liu C.-T., Li W., Tang A.-N. Dispersive solid-phase microextraction and capillary electrophoresis separation of food colorants in beverages using diamino moiety functionalized silica nanoparticles as both extractant and pseudostationary phase. *Talanta*, 2015, vol. 132, pp. 366-372. doi: 10.1016/j.talanta.2014.09.014.
  9. He S.H., Jiang H. Qualitative and quantitative analysis of some co-existing colorants in some hard candies. *J. Food Compos. Anal.*, 2022, vol. 109, article 104475. doi: 10.1016/j.jfca.2022.104475.
  10. Wu Q., Duan X.-J., Lv H.-T., Wang L.-T. Red-emitting carbon dots as fluorescent probes for the rapid detection of brilliant blue FCF in foods. *Food Control*, 2023, vol. 149, article 109719. doi: 10.1016/j.foodcont.2023.109719.
  11. Yang Q., Li J., Wang X., Peng H., Xiong H., Chen L. Dual-emission color-controllable nanoparticle based molecular imprinting ratiometric fluorescence sensor for the visual detection of Brilliant Blue. *Sens. Actuators, B.*, 2019, vol. 284, pp. 428-436. doi: 10.1016/j.snb.2018.12.134.
  12. Sierra-Rosales P., Toledo-Neira C., Ortúza-Salazar P., Squella J. A. MWCNT-modified Electrode for Voltammetric Determination of Allura Red and Brilliant Blue FCF in Isotonic Sport Drinks. *Electroanalysis*, 2019, vol. 31, no. 5, pp. 1-9. doi: 10.1002/elan.201800786.
  13. Khan K.A., Shah A., Nisar J. Electrochemical detection and removal of brilliant blue dye via photocatalytic degradation and adsorption using phyto-synthesized nanoparticles. *RSC Adv.*, 2024, vol. 14, pp. 2504-2517. doi: 10.1039/D3RA07519B.
  14. Lipskikh O.I., Korotkova E.I., Berek J., Vyskocil V., Saqib M., Khristunova E.P. Simultaneous voltammetric determination of Brilliant Blue FCF and Tartrazine for food quality control. *Talanta*, 2020, vol. 218, article 121136. doi: 10.1016/j.talanta.2020.121136.
  15. Ghoreishi S.M., Behpour M., Golestaneh M. Simultaneous voltammetric determination of Brilliant Blue and Tartrazine in real samples at the surface of a multi-walled carbon nanotube paste electrode. *Anal. Methods*, 2011, vol. 3, no. 12, pp. 2842-2847. doi: 10.1039/C1AY05327B.
  16. Wang W., Chen Y., Zhang J., Wang X., Chen Z. Electrochemical Determination of Brilliant Blue and Tartrazine Based on an Ionic Liquid-Modified Expanded Graphite Paste Electrode. *J. AOAC Int.*, 2015, vol. 98, no. 3, pp. 817-821. DOI: 10.5740/jaoacint.14-232.
  17. Wang M., Yang M., Sun Q., Gao Y., Zhao J. Development of a facile sensor for the determination of Brilliant Blue FCF in beverages. *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 2015, vol. 95, no. 11, pp. 969-979. doi: 10.1080/03067319.2015.1077521.
  18. Ion B.C., van Staden J.K.F., Georgescu-State R., Comnea-Stancu I.R. An ultrasensitive electrochemical platform based on copper oxide nanoparticles and poly (crystal violet) for the detection of brilliant blue FCF from soft drinks. *Food Chem.*, 2024, vol. 437, article 137751. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.137751.
  19. Gimadudinova L., Ziyatdinova G., Davletshin R. Selective Voltammetric Sensor for the Simultaneous Quantification of Tartrazine and Brilliant Blue FCF. *Sensors*, 2023, vol. 23, article 1094. doi: 10.3390/s23031094.
  20. Stozhko, N.Y.; Khamzina, E.I.; Bukharinova, M.A.; Tarasov, A.V.; Kolotygina, V.Y.; Lakiza, N.V.; Kuznetcova, E.D. Carbon Paper Modified with Functionalized Poly(diallyldimethylammonium chloride) Graphene and Gold Phytonanoparticles as a Promising Sensing Material: Characterization and Electroanalysis of Ponceau 4R in Food Samples. *Nanomater.*, 2022, vol. 12, no. 23, article 4197. doi: 10.3390/nano12234197.
  21. Bukharinova M.A., Khamzina E.I., Stozhko N.Y., Tarasov A.V. Highly sensitive voltammetric determination of allura red (e129) food colourant on a planar carbon fiber sensor modified with shungite. *Anal. Chim. Acta.*, 2023, vol. 1272, article. 341481. doi: 10.1016/j.aca.2023.341481.
  22. Dhaka A., Mali S.C., Sharma S., Trivedi R. A review on biological synthesis of silver nanoparticles and their potential applications. *Results Chem.*, 2023, vol. 6, article 101108. doi: 10.1016/j.rechem.2023.101108.
  23. Brainina Kh.Z., Stozhko N.Yu., Bukharinova M.A., Hamzina E.I. Potentiometry in antioxidant activity evaluation of microsuspensions, extracts and living plants. *J. Plant Biochem. Physiol.* 2018, vol. 6, pp. 86-87. doi: 10.4172/2329-9029-C1-003.
  24. Brainina K., Stozhko N., Bukharinova M., Khamzina E., Vidrevich M. Potentiometric method of plant microsuspensions antioxidant activity determination. *Food Chem.* 2019, vol. 278, pp. 653-658. doi: 10.1016/j.foodchem.2018.11.098.
  25. Stozhko N.Y., Bukharinova M.A., Khamzina E.I., Tarasov A.V., Sokolov S.V. Film Carbon Veil-Based Electrode Modified with Triton X-100 for Nitrite Determination. *Chemosensors*, 2020, vol. 8, Article 78. doi: 10.3390/chemosensors8030078.
  26. Tutunaru B., Tigae C., Spînu C., Prunaru I. Spectrophotometry and Electrochemistry of Brilliant Blue FCF in Aqueous Solution of NaX. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 396-412. doi: 10.20964/2017.01.64.
  27. Flury M., Flühler H. Brilliant Blue FCF as a Dye Tracer for Solute Transport Studies – A Toxicological Overview. *J. Environ. Qual.*, 1994, vol. 23, no. 5, pp. 1108-1112. doi: 10.2134/jeq1994.00472425002300050037x.