

Р. С. Сякаев (асп.)^а, Г. Г. Бижанова (к.х.н., ст.преп.)^б,
А. В. Сидельников (д.х.н., проф.)^б, А. Г. Мустафин (д.х.н., проф.)^а

ТЕМПОРАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОМУ РАСПОЗНАВАНИЮ ВИТАМИНОВ ГРУППЫ В С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОПОЛИМЕРИЗАЦИИ *o*-АНИЗИДИНА И МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО МЕТОДУ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

Уфимский университет науки и технологий,
^а кафедра физической химии и химической экологии,
^б кафедра зеленой химии и ресурсосберегающих технологий
450076, г. Уфа, ул. Заки Валиди 32; e-mail: bizhanova111@mail.ru

R. S. Syakaev, G. G. Bizhanova, A. V. Sidelnikov, A. G. Mustafin

A TEMPORAL APPROACH TO THE VOLTAMMETRIC RECOGNITION OF B VITAMINS USING *o*-ANISIDINE ELECTROPOLYMERIZATION AND MACHINE LEARNING USING THE PRINCIPAL COMPONENT METHOD

Ufa University of Science and Technology
32, Zaki Validi Str., 450076, Ufa, Russia; e-mail: bizhanova111@mail.ru

Исследовано вольтамперометрическое поведение темпорального электрохимического сенсора, основанного на индикаторной электрополимеризации анизида в присутствии различных биологически активных веществ на примере витаминов группы В. Использование темпорального подхода оправдано в тех случаях, когда реакцию или процесс необходимо проводить в течение большего промежутка времени, чем это необходимо для реализации общеизвестных методов вольтамперометрического анализа, при этом регистрируется в сотни раз больше вольтамперограмм в формате временных рядов токов, происходит накопление малых сигналов на фоне больших, возрастает чувствительность сенсорной системы за счет применения специальных способов обработки темпоральных баз данных. Установлено, что массив токов во всем диапазоне рабочих потенциалов отражает динамику изменения поверхностного слоя, который постоянно самоочищается по мере образования полимерных молекул в присутствии микрокомпонентов витаминных препаратов.

Ключевые слова: анизидин; биологически активные вещества; витамины; вольтамперометрия; метод главных компонент; электронный язык; электрополимеризация.

This work is the first to study the voltammetric behavior of a temporal electrochemical sensor based on the indicator electropolymerization of anisidine in the presence of various biologically active substances using the example of B vitamins. The use of a temporal approach is justified in cases where a reaction or process must be carried out over a longer period of time than necessary for the implementation of well-known methods of voltammetric analysis. With the temporal approach, hundreds of times more voltammograms are recorded in the format of time series of currents, small signals accumulate against the background of large ones, and the sensitivity of the sensor system increases due to the use of special methods for processing temporal databases. It has been established that the array of currents over the entire range of operating potentials reflects the dynamics of changes in the surface layer, which is constantly self-modifying as polymer molecules are formed in the presence of microcomponents of vitamin preparations.

Key words: anisidine; biologically active substances; electronic language; electropolymerization; principal component method; vitamins; voltammetry.

Дата поступления 30.06.24

В современной литературе по естественным наукам имеется ограниченное количество работ, раскрывающих проблему темпоральности и ее практической значимости, а в области химии таких работ – единицы. Между тем в социологии, биологии, психологии, музыке, истории и других некоторых областях темпоральный подход к исследованию больших данных изучается достаточно давно.

Роль времени в исследовании многомерных данных уже не является только хронологическим параметром состояния системы как точки отсчета включения тех или иных новых значений и характеристик объекта. Подтверждением являются работы в области информатики и появление новых по своему содержанию баз данных с приставкой «темпоральные». Для темпоральных баз данных (ТБД) требуются и новые алгоритмы обработки, задачами которых занимаются специалисты по информатике в последнее время все чаще и чаще. Методология исследования объектов, реакций и процессов с использованием темпорального подхода требует «особых» приемов накопления и обработки и основывается на концепции BIGDATA, регистрируемых в течение многих и многих периодов времени. В зависимости от природы сигналов, механизма их формирования такие временные циклы могут насчитывать секунды, минуты и даже годы. Важно, что при регистрации большого числа данных должно формироваться достаточное количество темпоральных сигналов, содержащих полезную информацию. Чаще эти данные с малой интенсивностью и поэтому не всегда распознаются с первого взгляда, но с использованием методов хеометрики в большом временном интервале могут быть расшифрованы с необходимой точностью и достоверной вероятностью. Например, в основе хроматографического разделения веществ лежат многократные процессы сорбции/десорбции компонентов при их движении в колонке в течение продолжительного времени. Время, как один из факторов разделения компонентов, играет принципиальную роль в этом методе. Простейший пример повышения чувствительности за счет протяженного во времени процесса накопления информации является ночная фотосъемка при длительной выдержке, позволяющей запечатлеть ночные объекты в полной для человеческого глаза темноте, и стать видимыми для детектора.

Другой пример из области инверсионной вольтамперометрии: временной фактор протяженности процесса необходим для повышения чувствительности и селективности метода определения веществ (чувствительность возрастает на несколько порядков), однако не совсем темпоральный подход, который раскроется далее ¹.

По аналогии со многими научными методами из смежных областей (экономики, биологии, социологии, филологии и др.) ²⁻⁴, где явление темпоральности динамических систем открыто намного раньше, темпоральными также можно считать подходы к исследованию физико-химических процессов в широкой временной протяженности с использованием цифровых технологий. Как будет показано далее, координата времени при этом позволяет описать не только хронологию процессов в системе, но и ее темпоральную структуру и свойства, извлекаемые из структуры всего массива данных методами хеометрики. В этом направлении потенциал известных методов хеометрики еще далеко не полностью раскрыт. В частности, удастся выявить на фоне макропроцесса уникальные вольтамперограммы, структурированные по временному континууму для каждой группы процессов или кластеров. Это доступно только в темпоральных условиях исследования объектов и процессов. При этом следует отличать время t – с хронологической функцией и время T' – с темпоральной функцией, для которой производная по времени не имеет смысла. Уместно провести пример музыкальной мелодии, где одна нота, как мгновенное значение своеобразного, единичного сигнала гипотетической музыкальной функции не дает информацию о том, какая мелодия звучит в целом.

Ранее явление темпоральности в области сенсорики электрохимических систем относилось к разного рода сдвигам во времени физико-химических параметров электродов в результате многократного их функционирования. Эту проблему сенсорных систем обозначили, например, в вольтамперометрических «электронных языках» с самого начала исследования их электрохимического поведения ⁵. Авторы подчеркивают внимание читателей на примерах «электронных языков», так как именно в таких устройствах проблема стабильности сигнала, его точности в больших объемах данных при анализе сложных многокомпонентных растворов требует особого решения, как с позиции математики/информатики, так и с позиции электроаналитики.

Темпоральный сдвиг – результат многочисленных необратимых процессов, протекающих в вольтамперометрической системе при многократном циклическом наложении напряжения. Это явление на начальном этапе развития мультисенсорики считалось проблемой, которую необходимо было устранять, в отличие от тех задач, которые в противовес могут решаться темпоральным подходом. Но известные приемы математической компенсации сдвига в условиях функционирования батареи вольтамперометрических сенсоров не

дают стабильных характеристик всей мультисенсорной системы. В связи с этим неконтролируемый темпоральный сдвиг, обусловленный быстрым «старением» сенсоров, ограничивает чувствительность и специфичность вольтамперометрических мультисенсорных систем⁶. Это приводит к ошибкам первого и второго рода.

В отличие от потенциометрических «электронных языков» вольтамперометрические не имеют широкого распространения в качестве коммерческих «электронных языков» до настоящего времени. В научной литературе практически отсутствуют систематические сведения о вольтамперометрическом поведении мультисенсорных систем, функционирующих продолжительное время. Как отмечено выше, контролируемая временная протяженность процессов при определенных условиях является дополнительным фактором получения полезной химической информации. При кратковременном функционировании системы она не всегда выявляется и ею пренебрегают, принимая за случайный шум. Но чем больше состояний системы мы фиксируем при накоплении больших данных в широком временном интервале, тем больше становится степень доверия к таким «шумам». А методы хеометрики, в частности, метод главных компонент позволяет построить необходимую траекторию поиска латентных структур и закономерностей поведения динамической системы.

Подчеркнем, что вольтамперометрические мультисенсорные системы, как любая динамическая система, под воздействием электрического тока и химических компонентов исследуемых растворов претерпевают многофакторные изменения – меняются физико-химические параметры сенсорных слоев, их геометрия, шероховатость и т.п. Это приводит к сдвигу значений емкостных, фарадеевских, миграционных, кинетических, адсорбционных токов и др. В условиях многократного функционирования, когда электроды глубоко и необратимо «стареют», мультисенсорная система изменяет свою пространственно-временную структуру и характеристики чувствительности/специфичности могут кардинально поменяться. Массив вольтамперограмм, накопленный в формате вольтамперных временных рядов, может содержать информацию об истории всех изменений во времени или, другими словами, создаются условия для формирования нового формата знаний о темпоральности динамической системы. В таких условиях функционирования (то есть с обязательным накоплением временной базы данных) мультисенсорная система получает дополнительное определение как «темпоральная мультисенсорная система» или «темпоральный сенсор». Все эти

объекты исследования функционируют под воздействием управляемых факторов извне – в виде электрического тока с заданными значениями напряжений/потенциалов/силы тока.

В данной работе условием детерминированности темпорального сенсора является управляемый индикаторный процесс электрополимеризации специально введенного мономера – *о*-анизида. Его выбор обусловлен тем, что электроактивность подобных мономеров (так же, как например, анилина и толуидина) зависит от природы и концентрации компонентов фонового раствора (маркеров).

Кроме этого, условия эксперимента подобраны таким образом, что на вольтамперограммах не наблюдаются пики окисления/восстановления компонентов-маркеров исследуемых растворов, а также отсутствуют пики окисления/восстановления индикатора – *о*-анизида в связи с его низкой концентрацией – малой растворимостью – в воде. Все эти условия в совокупности обеспечивают долговременность функционирования темпорального сенсора; при этом его глубокое «старение» не достигается в ходе всего эксперимента.

Таким образом, основными задачами работы явились:

- 1) описать динамику процесса электрополимеризации *о*-анизида по вольтамперным временным рядам с использованием предложенного подхода на основе метода главных компонент – установить количество факторов, влияющих на фазовый портрет сенсоров в присутствии биологически активных веществ (БАВ);
- 2) на примере витаминов группы В выявить характеристичные реакции и процессы путем структурирования во времени вольтамперограмм маркеров в пространстве измерений;
- 3) на примере витаминов группы В оценить аналитические возможности темпорального анизинового сенсора при распознавании биологически активных веществ.

Экспериментальная часть

Электрохимическая ячейка

Вольтамперограммы регистрировали в трехэлектродной ячейке:

- рабочий электрод – углеродсодержащий (ООО «НПП «Томьаналит») диаметром не менее 11 мм², содержит электропроводящую смесь полиэтилена и технического углерода (30% мас.);
- электрод сравнения – хлоридсеребряный (ЭСр-10103/3,5, «Измерительная техника», Россия);
- вспомогательный электрод – графитовый стержень (г. Черноголовка).

Режим работы потенциостата («Элинс», Россия):

- форма развертки потенциалов – циклическая;

- начальный потенциал – 0.0 В, максимальный потенциал 1700 мВ, конечный потенциал -200 мВ, скорость развертки потенциалов 450 мВ/с.

Все измерения проводили при комнатной температуре. Регенерацию рабочего электрода проводили механическим путем – срезанием тонкого слоя (0.1–0.3 мм) специальным резак.

Приготовление растворов

Исследовали медицинские препараты с биологически активными веществами – витаминами группы В: В₁, В₂, В₆, В₁₂, приготовленные на фоне физиологического раствора («Натрия хлорид-СОЛОфарм», 0.9% NaCl).

Электроактивным индикатором служил *o*-анизидин, синтезированный в Лаборатории органических функциональных материалов УФИХ УФИЦ РАН (г. Уфа).

Раствор индикатора готовили растворением расчетной аликвоты *o*-анизида в соляной кислоте с последующим разбавлением его концентрации до уровня 10⁻³ М на фоне физиологического раствора.

Массив временных рядов токов каждого исследуемого объекта включал 100 вольтамперограмм (ВАГ) по 1600 измерений токов в исследуемом диапазоне потенциалов.

Результаты и их обсуждение

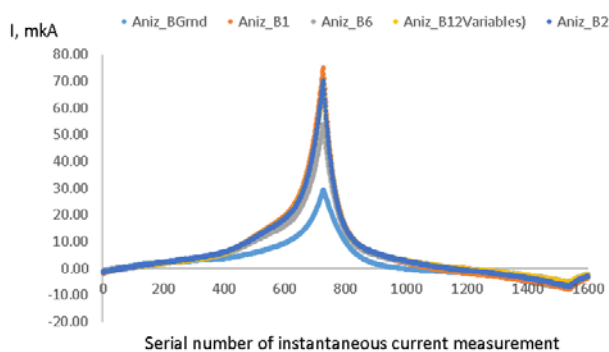
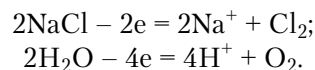


Рис. 1. Амперограммы исследуемых растворов фона и витаминов в условиях циклической вольтамперометрии

Как видно из рис. 1, явных пиков окисления/восстановления компонентов исследуемых растворов – анизида и витаминов, не наблюдается. Вокруг точки разворота амперограммы (700 точка/+1700 мВ потенциал рабочего электрода) наблюдается максимальные значения анодных токов, которые обусловлены, как известно, процессами электролиза хлорида натрия и воды:



Во всей области потенциалов значения токов анилинового сенсора в отсутствие витаминов меньше значений токов в присутствии витаминов. При высокой концентрации фоновых веществ (хлорида натрия и соляной кислоты) такое поведение не связано с различием в миграционных токах растворов, а обусловлено, скорее всего, допирующим действием компонентов БАВ на электропроводящие свойства образующегося полимера.

Для выявления полезной химической информации из малых сигналов массива данных использовали метод главных компонент (МГК), позволяющий отделять в необходимом соотношении содержательную часть от шума. На данном этапе исследования важно обнаружить сигналы, обусловленные присутствием витаминов различной группы, которые влияют на процесс электрополимеризации *o*-анизида.

Для первичного анализа структуры данных и обнаружения кластеров в условиях машинного обучения «с учителем» провели МГК-моделирование всей матрицы данных токов исследуемых растворов (рис. 2).

Интерпретация результатов МГК-моделирования темпоральных баз данных динамических систем имеет свои преимущества перед обычными способами расшифровки вольтамперометрических данных: возможно одновременно отслеживать как начальное, конечное состояния исследуемых систем, их кластеризацию, так и динамику (эволюцию сенсоров) в пространстве данных. Каждая главная компонента – это линия тренда, направленная вдоль максимальной дисперсии в исходном пространстве данных отдельно по каждому фактору электрического напряжения, повлиявшего на разделение кластеров.

В простейшем – хрональном формате моделирования различие в расположении кластеров на плоскостях разных главных компонент объясняется различием в вольтамперометрическом поведении компонентов электролита с различной химической активностью в выбранном диапазоне потенциалов – без учета эволюции сенсорной системы.

На рис. 2 в пространстве первых шести главных компонент образуются шесть кластеров с монотонным дрейфом точек. Это характерно для вольтамперометрических сенсоров, так как каждое предыдущее измерение вольтамперограмм меняет поверхность рабочего электрода, меняет состав двойного электрического тока, уменьшает концентрацию исходных деполаризаторов, увеличивает концентрацию продуктов в отсутствие перемешивания и регенерации сенсора и т.п.

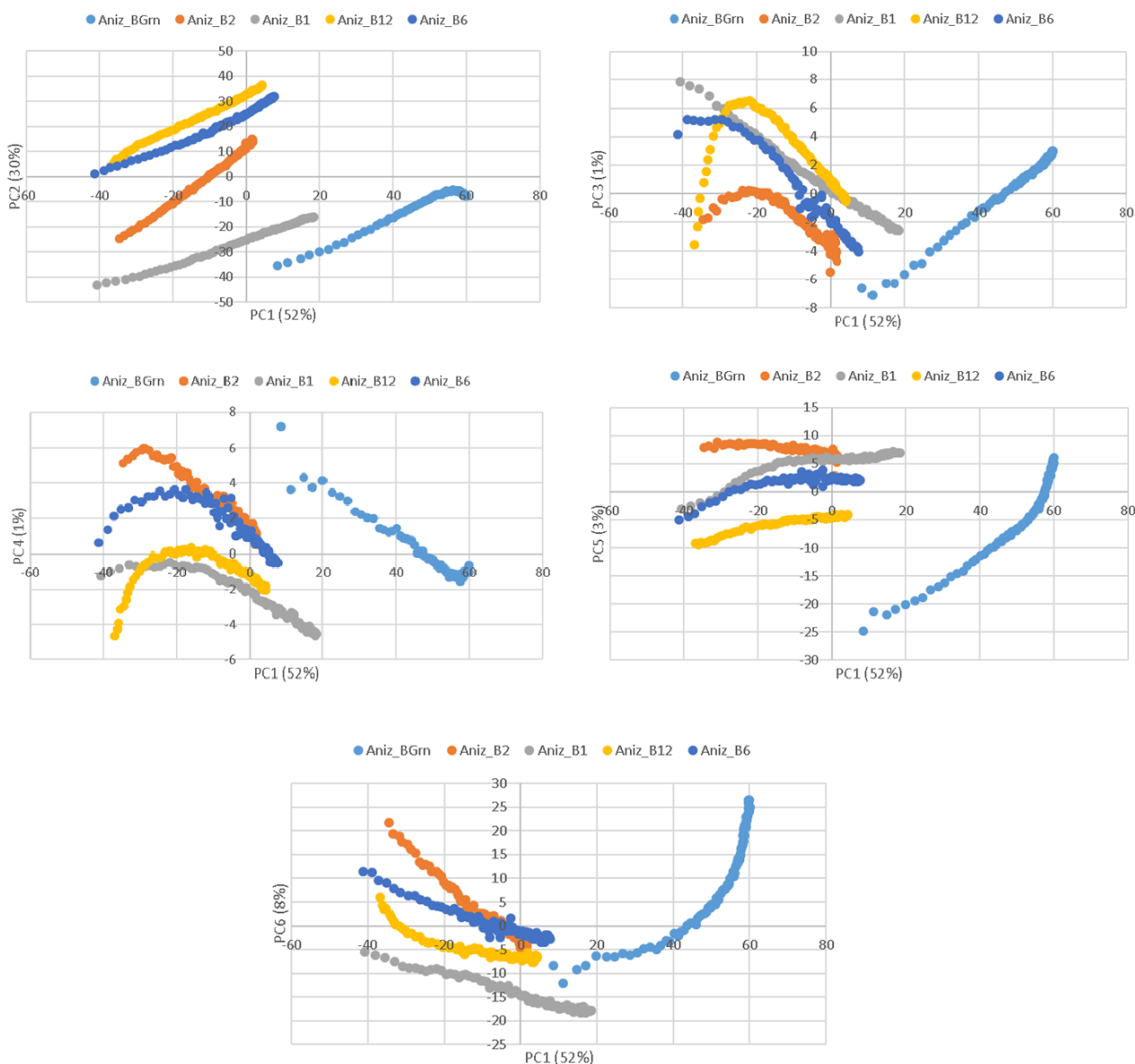


Рис. 2. Графики счетов МГК-моделирования амперограмм исследуемых образцов витаминов на плоскостях главных компонент PC1-PC6

При протекании контролируемой реакции полимеризации различаются характер смещения точек кластеров и само расположение кластеров у сенсорных систем в присутствии маркеров витаминов и их отсутствии. Это различие прослеживается вплоть до 6 главной компоненты. Это указывает на наличие, как минимум, шести факторов в исходных вольтамперограммах, которые в неявном виде формируют латентные структуры в матрице данных.

Напомним, что явных пиков в исходных непреобразованных данных, свидетельствующих о процессах окисления/восстановления компонентов, сорбции/десорбции, взаимодействии с полимерной молекулой не обнаруживается. В этом заключается одно из практически важных функций темпорального подхода к регистрации вольтамперометрических сигналов - темпоральных баз данных.

Сравнительный анализ формы кластеров и направления смещения точек вдоль главных компонент (рис. 2) указывает на качественные различия в динамике полимеризации *o*-анизидина под влиянием витаминов разного состава. Особенно это характерно при моделировании с PC3 по PC6.

Следует отметить, что направление точек смещения токов на плоскости PC1-PC2 в целом имеет схожесть у всех БАВ и обусловлено общим одинаковым по шагу изменением перколяции токов в сенсорной системе: в ходе полимеризации образуется проводящий полимер, который имеет меньшую электропроводность, чем электропроводность материала электрода (графитового композита) и в ходе роста полимерных молекул этот эффект сохраняется.

Анализ вольтамперометрического поведения образцов по результатам рис. 2 на плоскостях

PC1–PC3, PC1–PC4, PC1–PC5, PC1–PC6 позволяет сделать вывод о схожести во влиянии витаминов на полимеризацию *o*-аниидина. Вид динамических кривых у всех витаминов схож между собой, но отличается по направлениям смещения точек от *o*-аниидина. Характеристичными компонентами здесь являются PC3, PC5 и PC6, которые охватывают 3, 1, 1 процент объясненной дисперсии, соответственно. Это доказывает, что для выявления малых отличий между близкими по вольтамперометрическому поведению веществами, содержащими следовые количества электроактивных или неэлектроактивных молекул, необходимо накопить достаточное количество (не менее 100 вольтамперограмм) данных. Так, например, значение объясненной дисперсии в 1% означает, что обнаруживается один (латентный обобщенный!) сигнал из ста измеренных^{7–9}. Это объясняет, почему невозможно «поймать» такой сигнал в отсутствии четких пиков, если проводить 3–5 измерений, как это принято в классических методах вольтамперометрического анализа.

Следует отметить, что модель МГК вычисляет по тому объему выборки, которую включил исследователь для расшифровки. В представленных выше результатах использовали общеизвестный подход к первичному анализу массива данных, когда вольтамперограммы всех образцов во всем исследуемом диапазоне потенциалов включены в математическую обработку, и влияют как на направление главных компонент, так и на расположение кластеров. В этом случае МГК-модель хорошо справляется с задачами кластерного анализа, особенно, в случае исследования не динамики, а термодинамических состояний систем^{10, 11}. Так, например, на рис. 3 выглядит график счетов («карта образцов») исследуемых растворов в конце функционирования сенсорной системы с максимальным заполнением полимерными молекулами электродов в выбранных временных рамках.

Результаты демонстрируют, что в ходе полимеризации аниидинового сенсора в темпоральных условиях происходит одновременно его самомодифицирование под действием анализируемых витаминов. Это приводит в конце эксперимента к «расслаиванию» кластеров в пространстве главных компонент – повышению чувствительности и специфичности распознавать различные БАВ.

Таким образом, во временном интервале мы имеем дело не с одним электродом с постоянным

составом сенсорного слоя, а с несколькими темпоральными электродами. Весь индикаторный процесс электрополимеризации от начала регистрации одной вольтамперограммы до формирования конечной базы данных, является маркером на уникальный состав исследуемого раствора в электрохимической ячейке. Это явление позволяет исследовать сложные электродные процессы с участием следов веществ, распознавать неэлектроактивные химические вещества в сложных растворах с высокой точностью.

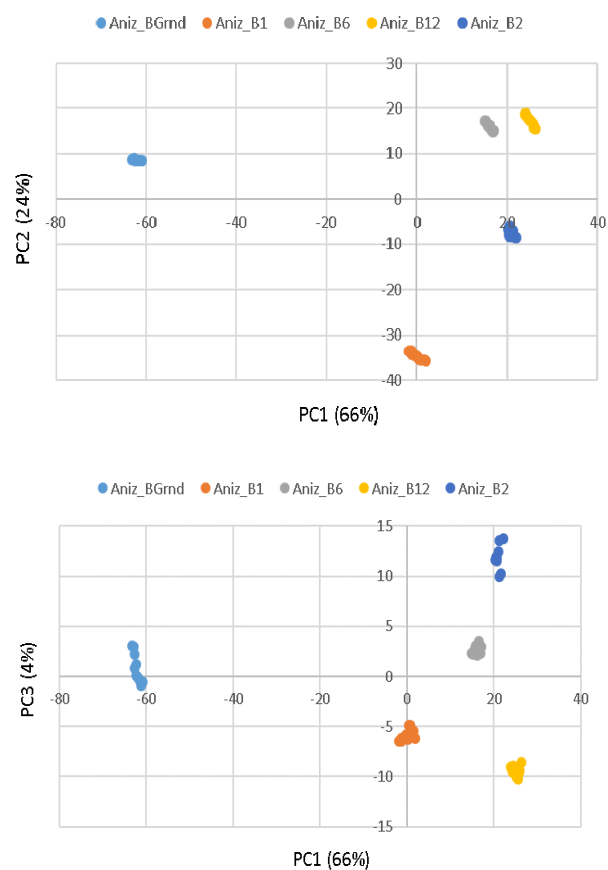


Рис. 3. Графики счетов МГК-моделирования данных десяти последних циклов вольтамперограмм исследуемых образцов

В аналитическом аспекте реакция электрополимеризации служит индикаторным процессом, обеспечивающим отклик мультисенсорной системы на химический состав растворов. Полученные результаты показали высокую чувствительность и специфичность аниидинового сенсора распознавать препараты витаминов группы В в условиях циклической вольтамперометрии.

Литература

1. Sidel'nikov A., Bikmeev D., Kudasheva F., Maystrenko V. Voltammetric identification of motor oils using electronic tongue on carbon-paste electrode basis // *J. Chem. Chem. Eng.* – 2012. – V.6. – Pp.199-208.
2. Nilsen E.A., Klishin A.I., Rubert I.B., Kiseleva S.V., Mironova M.Yu., Sanzharova O.N. Diachronic conceptology as the basis of temporality evolution studies / In book: *Anglistics in modern society*. – Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Economics, 2020. – Pp.105-160.
3. Gallardo P., Caamal-Monsreal C., Mascaro M., Sanchez A., Pascual C., Rosas C., Olivares A., Martinez-Yanez R., Domingues P.M. Digestive physiology of octopus maya and o. Mimus: Temporality of digestion and assimilation processes // *Front Physiol.* – 2017. – V.8. – Art. no.355.
4. Olmstead N. A. Data and temporality in the spectral city // *Philosophy & Technology*. – 2021. – V.34. – Pp.243-263.
5. Holmin S., Krantz-Rulcker C., Lundstorm I., Winquist F. Drift correction of electronic tongue responses // *Meas. Sci. Technol.* – 2001. – V.12, №8. – Pp.1348-1354.
6. Sinha S., Bhardwaj R., Sahu N., Ahuja H., Sharma R., Mukhiya R. Temperature and temporal drift compensation for Al₂O₃-gate ISFET-based pH sensor using machine learning techniques // *Microelectronics Journal*. – 2020. – V.97, Art.№104710.
7. Mav I., Zigon M. ¹H NMR study of the kinetics of substituted aniline polymerization. I. Homopolymerization of 2-methoxyaniline // *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.* – 2001. – V.39. – Pp. 2471-2481.
8. Mav I., Zigon M. ¹H NMR study of the kinetics of substituted aniline polymerization. II. Copolymerization of 2-methoxyaniline and 3-aminobenzenesulfonic acid // *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.* – 2001. – V.39. – Pp.2482-2493.
9. Mezhev Ya.O., Korshak Yu.V., Shtilman M.I., Pokhil S.E., Strakhov I.S. Kinetic features of N-ethylaniline polymerization // *Russ. J. Gen. Chem.* – 2015. – V.85. – Pp.1482-1486.
10. Nigmatullin R.R., Budnikov H.C., Mustafin A.G., Andriianova A.N., Shigapova A.R., Sidelnikov A.V. Process of electrochemical electrode modification by polyaniline in the frame of percolation model // *J. Solid State Electrochem.* – 2019. – V.23. – Pp.1221-1235.
11. Mustafin A.G., Latypova L.R., Andriianova A.N. Synthesis and polymerization of 2-(1-methylbut-2-en-1-yl)aniline and its products modification // *Polymer Testing*. – 2021. – V.104. – Art.№107351.

References

1. Sidel'nikov A., Bikmeev D., Kudasheva F., Maystrenko V. [Voltammetric identification of motor oils using electronic tongue on carbon-paste electrode basis]. *J. Chem. Chem. Eng.*, 2012, vol.6, pp.199-208.
2. Nilsen E.A., Klishin A.I., Rubert I.B., Kiseleva S.V., Mironova M.Yu., Sanzharova O.N. [Diachronic conceptology as the basis of temporality evolution studies]. In book: *Anglistics in modern society*. Saint Petersburg, Saint Petersburg State University of Economics Publ., 2020, pp.105-160.
3. Gallardo P., Caamal-Monsreal C., Mascaro M., Sanchez A., Pascual C., Rosas C., Olivares A., Martinez-Yanez R., Domingues P.M. [Digestive physiology of octopus maya and o. Mimus: Temporality of digestion and assimilation processes]. *Front Physiol.*, 2017, vol.8, art.no.355.
4. Olmstead N. A. [Data and temporality in the spectral city]. *Philosophy & Technology*, 2021, vol.34, pp.243-263.
5. Holmin S., Krantz-Rulcker C., Lundstorm I., Winquist F. [Drift correction of electronic tongue responses]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, vol.12, no.8, pp.1348-1354.
6. Sinha S., Bhardwaj R., Sahu N., Ahuja H., Sharma R., Mukhiya R. [Temperature and temporal drift compensation for Al₂O₃-gate ISFET-based pH sensor using machine learning techniques]. *Microelectronics Journal*, 2020, vol.97, art.no.104710.
7. Mav I., Zigon M. [¹H NMR study of the kinetics of substituted aniline polymerization. I. Homopolymerization of 2-methoxyaniline]. *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.*, 2001, vol.39, pp. 2471-2481.
8. Mav I., Zigon M. [¹H NMR study of the kinetics of substituted aniline polymerization. II. Copolymerization of 2-methoxyaniline and 3-aminobenzenesulfonic acid]. *J. Polym. Sci. A Polym. Chem.*, 2001, vol.39, pp.2482-2493.
9. Mezhev Ya.O., Korshak Yu.V., Shtilman M.I., Pokhil S.E., Strakhov I.S. [Kinetic features of N-ethylaniline polymerization]. *Russ. J. Gen. Chem.*, 2015, vol.85, pp.1482-1486.
10. Nigmatullin R.R., Budnikov H.C., Mustafin A.G., Andriianova A.N., Shigapova A.R., Sidelnikov A.V. [Process of electrochemical electrode modification by polyaniline in the frame of percolation model]. *J. Solid State Electrochem.*, 2019, vol.23, pp.1221-1235.
11. Mustafin A.G., Latypova L.R., Andriianova A.N. [Synthesis and polymerization of 2-(1-methylbut-2-en-1-yl)aniline and its products modification]. *Polymer Testing*, 2021, vol.104, art.no.107351.