Метод инверсионной вольтамперометрии на пленках TiO_2, допированных иттрием, для определения ионов кадмия в жидкостях

В. С. Воробец[a,*], И. А. Медик[a], Г. Я. Колбасов[a], С. В. Карпенко[b], Н. Г. Антонюк[c]

[a] *Институт общей и неорганической химии им. В.И. Вернадского НАН Украины, г. Киев, 03142, Украина*
[b] *Институт проблем материаловедения им. И.М. Францевича НАН Украины, г. Киев, 03142, Украина*
[c] *Национальный университет «Киево-Могилянская академия», г. Киев, 04655, Украина*
[*] *e-mail: vorobetsvs@i.ua*

Поступила в редакцию 20.10.2025
После доработки 08.04.2026
Принята к публикации 14.04.2026

Показана возможность применения метода анодной инверсионной вольтамперометрии (ИВАМ) с использованием электродов на основе наноструктурированных пленок диоксида титана, допированных иттрием (Y–TiO_2), для определения концентрации ионов кадмия (Cd^{2+}) в жидких средах. Анализ методами рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии подтвердил образование однородных наноструктурированных пленок Y–TiO_2 с улучшенными электрохимическими свойствами. Показано, что допирование иттрием увеличивает каталитическую активность электродов TiO_2 при определении ионов кадмия методом ИВАМ и улучшает чувствительность аналитического сигнала Cd^{2+}. Оптимизированы условия электрохимического определения ионов Cd^{2+}, включая состав электрода и фонового электролита, время и потенциал предварительного электроконцентрирования, а также изучено влияние ионов Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}, Na^+ и K^+ на аналитический сигнал (АС) кадмия. Установлена линейная зависимость интенсивности аналитического сигнала от концентрации ионов кадмия в диапазоне 0,003–8 мг·л$^{-1}$ с пределом обнаружения 0,003 мг·л$^{-1}$ и относительной погрешностью 5%.

Ключевые слова: инверсионная вольтамперометрия, диоксид титана, иттрий, наноструктурированные пленки, кадмий, электрохимический сенсор, токсичные металлы

УДК 543.552.054.1:546.48
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.2.29

ВВЕДЕНИЕ

Методы электрохимического анализа играют важную роль в современной химии, позволяя точно и быстро определять концентрацию различных веществ, в том числе тяжелых металлов, среди которых выделяется кадмий (Cd^{2+}), который признан чрезвычайно опасным тяжелым металлом-загрязнителем, представляющим значительную угрозу как для экологических систем, так и для здоровья человека. Классификация кадмия как особо опасного загрязнителя обусловлена его высокой токсичностью, кумулятивным эффектом и способностью вызывать нарушения функций организма даже при низких концентрациях. Все соединения кадмия считаются высокотоксичными веществами, им присвоен второй класс опасности. Минимальное значение концентрации кадмия в воде, предназначенной для потребления, согласно Директиве Европейского парламента (ЕС) 2020/2184, составляет 0,005 мг/л [1]. Кадмий является канцерогеном и способен накапливаться в организме человека. Широкое промышленное использование кадмия в различных секторах, включая электронику, аккумуляторы, покрытия и гальванизацию, способствует его распространенности в окружающей среде, что требует строгого мониторинга. В связи с этим разработка и совершенствование высокочувствительных, точных и надежных методов контроля его содержания в объектах окружающей среды, включая водные растворы, является чрезвычайно актуальной научно-практической задачей.

Среди электрохимических методов анодная инверсионная вольтамперометрия (ИВАМ) зарекомендовала себя как один из наиболее мощных и перспективных инструментов для определения следов тяжелых металлов [2]. Ее преимущества включают низкий предел обнаружения, высокую чувствительность, селективность и относительную простоту выполнения. Метод состоит из двух основных этапов:

– на этапе предварительного концентрирования присутствующие в растворе ионы металлов (например, Cd^{2+}) электрохимически восстанавливаются на рабочем электроде при контролируемом катодном потенциале. На этом этапе аналит концентрируется из разбавленных

растворов на поверхности электрода или в приэлектродном слое, значительно повышая общую чувствительность обнаружения;

– этап десорбции/обнаружения: после предварительного концентрирования накопленные продукты катодного восстановления ионов металлов окисляются при сканировании потенциала в положительном направлении. Этот процесс генерирует характерный пик тока, величина которого пропорциональна начальной концентрации ионов металла в растворе. Ключевым преимуществом является то, что для каждого иона металла обычно демонстрируется четкий потенциал анодного окисления продуктов катодного восстановления, что позволяет одновременно и количественно определять несколько видов тяжелых металлов в одном анализе.

По сравнению с традиционными спектроскопическими методами, такими как атомно-абсорбционная спектрометрия [3] или масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой [4], вольтамперометрия имеет значительные практические преимущества, включая снижение затрат на разработку, повышенную портативность и возможность проведения экспресс-анализов в полевых условиях в реальном времени, что является критически важным для мониторинга окружающей среды.

Ключевым фактором, определяющим эффективность этого метода, является рабочий электрод, и его модифицирование – это постоянный объект исследований. В последнее время значительное внимание уделяется использованию нанодисперсных материалов для создания новых электродных систем с улучшенными характеристиками. Диоксид титана (TiO_2) является перспективным полупроводниковым материалом, который интенсивно используется в таких областях, как фотовольтаика, фотокатализ и сенсорные технологии [5]. Его широкое внедрение объясняется привлекательным набором полезных свойств, включая нетоксичность, химическую стабильность, устойчивость к фотокоррозии и общую экономическую эффективность. При синтезе в виде наноматериалов TiO_2 демонстрирует высокое соотношение площади поверхности к объему, большое количество поверхностно-активных центров и высокую каталитическую эффективность [5]. Однако использование диоксида титана (TiO_2) в качестве сенсорного материала для электрохимического детектирования ионов тяжелых металлов находится на ранней стадии. Насколько нам известно, в научной литературе представлено лишь ограниченное число работ, посвященных системам на основе оксида титана (TiO_2) [6], функционализированных нанотрубок TiO_2 [7, 8] или наностержней TiO_2 [9].

Каталитическая активность TiO_2 может возрастать при использовании наночастиц TiO_2, допированных некоторыми редкоземельными элементами (РЗЭ) [10, 11]. Допирование TiO_2 РЗЭ может приводить к созданию кислородных вакансий в кристаллической решетке TiO_2 и формированию примесных энергетических уровней в его запрещенной зоне, что способствует повышению фотокаталитической активности диоксида титана [12]. Включение РЗЭ в решетку TiO_2 приводит к деформации решетки и изменению его физико-химических свойств [13, 14]. Также допирование диоксида титана иттрием повышает его каталитическую активность и стабильность в реакции электровосстановления кислорода по сравнению с немодифицированным TiO_2 [15].

Данные о возможности применения допированных РЗЕ TiO_2-материалов в электроаналитической практике для электрохимического обнаружения ионов тяжелых металлов отсутствуют. Поэтому целью данной работы является проведение исследований электрохимического обнаружения ионов кадмия (Cd^{2+}) в водных растворах методом анодной инверсионной вольтамперометрии с использованием нового нетоксичного, химически инертного электродного материала со стабильными свойствами на основе диоксида титана, допированного ионами иттрия (III).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Наноструктурированный диоксид титана получали золь-гель методом из тетраизопропоксида титана (IV) с использованием методики [15]. Необходимое количество Тритон X-100 растворяли в этаноле (EtOH), после чего к раствору добавляли уксусную кислоту (AcOH). Далее при интенсивном перемешивании к раствору добавляли прекурсор диоксида титана – тетраизопропоксид титана (TTIP). Мольное соотношение компонентов было X100 : EtOH : AcOH : TTIP = 1,0 : 69 : 6:1. Для получения TiO_2, допированного ионами иттрия Y^{3+} (далее Y–TiO_2) (содержание Y = 0,5; 1; 2; 3 и 5% ат.), в прекурсор вводили ацетат иттрия. Для получения пленок TiO_2 и Y–TiO_2 прозрачный золь наносили на предварительно подготовленные токопроводящие подложки и отжигали при температуре T = 500 ºC в течение 30 мин. В качестве токопроводящей подложки использовали пластины из титановой фольги, предварительно обработанной в смеси кислот HF и HNO_3 для удаления оксидного слоя. Нанесение золя на

токопроводящую подложку проводили методом окунания. Для этого на подготовленную подложку наносили первый слой золя, после чего электрод высушивали в сушильном шкафу при температуре 120 ºС в течение 10 минут. Описанную процедуру повторяли 10 раз. Электроды с нанесенными слоями на основе золя Y–TiO_2 отжигали на воздухе в муфельной печи при t = 500 ºС в течение 30 мин и охлаждали при комнатной температуре.

Морфологию поверхности пленок TiO_2 и Y–TiO_2 исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЕМ) MIRA3 TESCAN (ускоряющее напряжение 10 кВ).

Сенсорные свойства электродов TiO_2 и Y–TiO_2 изучали в процессе электрохимического определения ионов Cd^{2+} в жидкостях методом анодной инверсионной вольтамперометрии. Метод заключался в предварительном электроконцентрировании продуктов катодной реакции на рабочем электроде и последующем анодном их окислении. Электроконцентрирование проводили в растворах ацетатного буфера (pH 3,8 ÷ 6,0), соляной (0,1 М HCl, pH 1,1) и ортофосфорной (0,1 М H_3PO_4, pH 1,5) кислот в диапазоне потенциалов (1000—1600) мВ (относительно хлорсеребряного электрода сравнения) в течение 60—240 с со скоростью развертки потенциала 50 мВ·c^{-1}.

Чувствительность Y–TiO_2 электродов при определении ионов Cd^{2+} методом ИВАМ изучали в потенциодинамическом режиме с использованием потенциостата PGSTAT 4-16. Исследования проводили в трехэлектродной электрохимической ячейке, где в качестве индикаторного электрода использовали пленки TiO_2, модифицированные иттрием, в качестве электрода сравнения – хлорсеребряный электрод и вспомогательный электрод – платину.

Кадмий определяли при анодном сканировании потенциала, регистрируя ток электрорастворения продуктов реакции, образующихся на индикаторном электроде после предварительного катодного электроконцентрирования, который является аналитическим сигналом кадмия. При исследованных в работе значениях pH и потенциалах таким продуктом, согласно диаграмме Пурбе [16, 17], может быть металлический кадмий.

Определение концентрации Cd^{2+} в ячейке проводили методом добавок. Для этого использовали растворы, содержащие определенное количество кадмия, которые были приготовлены на основе стандартных образцов и биди стиллированной воды. Пробу каждого образца определяли как среднее значение трех измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Микрофотографии тонких пленок TiO_2 и 1%Y–TiO_2 показаны на рис. 1. Тонкие пленки Y–TiO_2 обычно имеют структуру анатаза [15]. Синтезированные нами пленки соответствуют размерам кристаллитов 8–30 нм (рис. 1).

С целью получения наилучшей чувствительности Y–TiO_2-электродов при определении Cd^{2+} методом ИВАМ было исследовано влияние следующих параметров, а именно: содержания допирующего металла в составе электрода, состава фонового электролита, времени и потенциала электроконцентрирования, а также других ионов (Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}, Na^+ и K^+), присутствующих в растворе.

Влияние содержания допирующего металла в составе электрода. На интенсивность аналитического сигнала кадмия существенно влияла концентрация допанта в составе электрода, как показано на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что интенсивность аналитического сигнала кадмия для образцов Y–TiO_2 сначала возрастает, а затем уменьшается с увеличением содержания Y, с максимумом для пленок 1% Y–TiO_2 (рис. 2б). Это увеличение аналитического сигнала (АС) можно объяснить увеличением количества адсорбционных центров на поверхности электрода и электрокаталитической ролью металла-допанта. Увеличение значения АС для образцов с содержанием $Y \leq 1\%$ коррелирует со структурными изменениями, связанными с внедрением Y в кристаллическую решетку анатаза, а именно с увеличением объема решетки и ее деформацией [15]. Иттрий, подобно лантану [18], может образовывать связи с кислородом, благодаря чему при допировании диоксида титана он связывает кислород, что приводит к образованию на поверхности TiO_2 кислородных вакансий и может влиять на его электрокаталитические свойства. Максимальная интенсивность АС кадмия была достигнута при концентрации иттрия 1 ат.%, что указывает на максимальное количество допанта, которое может улучшить перенос заряда на поверхности электрода. Уменьшение АС кадмия при увеличении содержания иттрия в пленках (> 1%) может быть связано с влиянием неактивной аморфной фазы [15].

Влияние состава фонового электролита на интенсивность АС кадмия. Результаты показывают, что наилучшая чувствительность Y–TiO_2 электродов к кадмию наблюдается в растворах 0,1М H_3PO4 с pH 1,5 и ацетатного буфера с pH 5,0, как показано на рис. 3 (прямые *3*, *4*). Уменьшение интенсивности АС кадмия в растворе 0,1М HCl с pH = 1,1 (рис. 3, прямая *1*) возможно

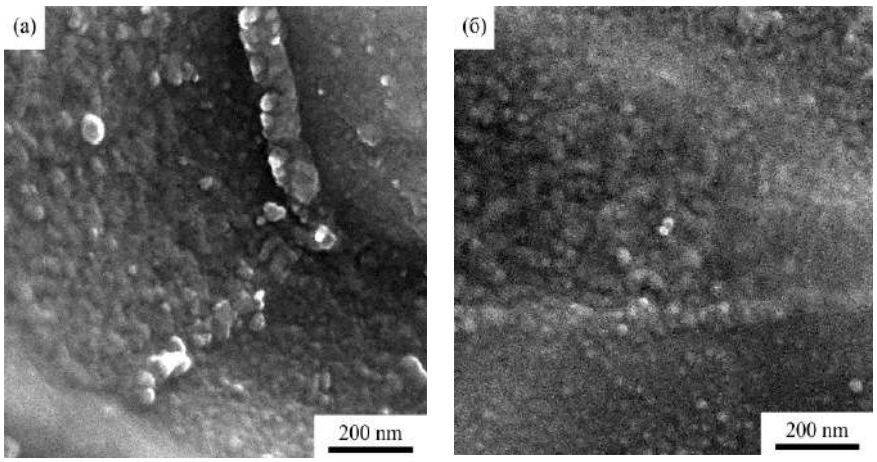


Рис. 1. СЭМ-микрофотографии тонких пленок TiO_2 (а) и 1% Y–TiO_2 (б), кальцинированных при 500 °С.

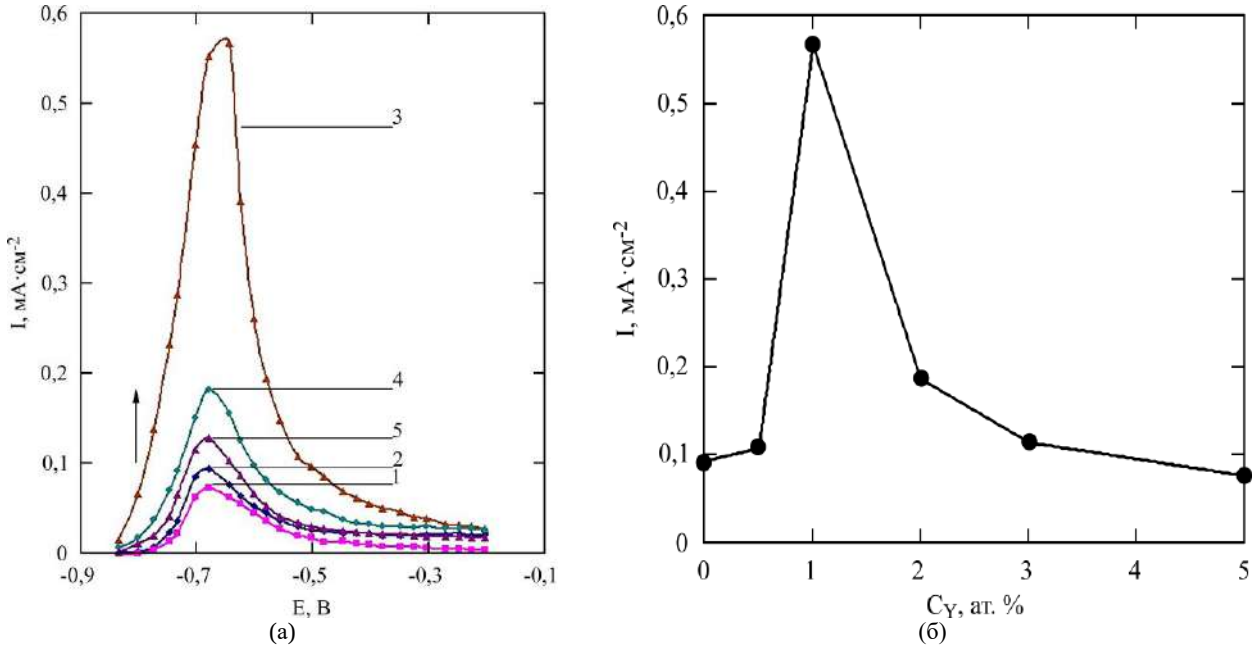


Рис. 2. Анодные поляризационные кривые в ацетатном буфере (pH=5,5) на Y–TiO_2-электродах с содержанием иттрия ат.%: *1* – 0; *2* – 0,5; *3* – 1,0; *4* – 2,0; *5* – 3,0; C_{Cd2+}=1 мг·л$^{-1}$, E_e= –1.4В, t_e = 180 с (а) и влияние содержания иттрия в составе Y–TiO_2 электрода на интенсивность АС кадмия Cd^{2+} (б).

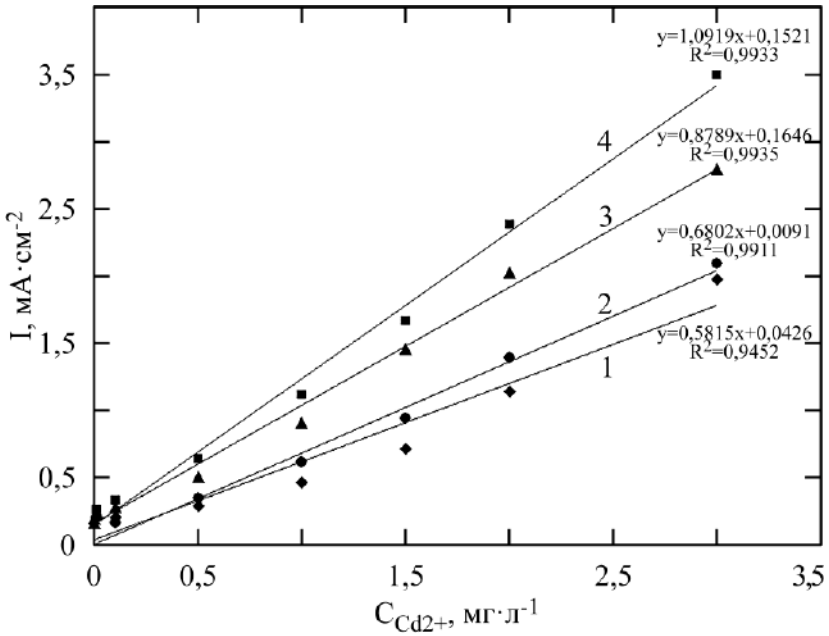


Рис. 3. Влияние состава фонового электролита на концентрационную зависимость Cd^{2+}: *1* – 0,1М HCl (pH =1,1); *2* – ацетатный буфер с pH =6,0; *3* – ацетатный буфер с pH =5,0; *4* – 0,1М H_3PO_4 (pH =1,5).

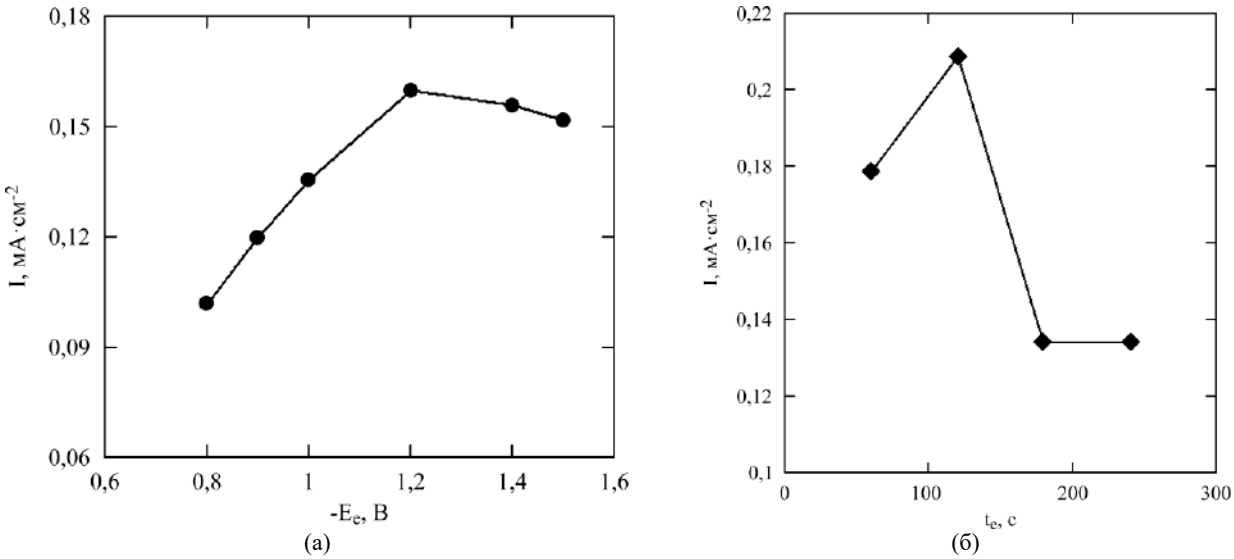


Рис. 4. Зависимость интенсивности аналитического сигнала кадмия на 1%Y-TiO_2-электроде в растворе ацетатного буфера (pH=5,0) с содержанием C_{Cd2+} = 3 мг·л$^{-1}$: от потенциала электронакопления (t_e = 120 с) (а); от времени электронакопления (E_e= –1,5 В отн. Ag/AgCl) (б).

связано с конкуренцией протонов с ионами кадмия за занятие активных центров на поверхности электрода и чрезмерным выделением водорода при низких значениях pH, что может повлиять на осаждение ионов кадмия. При повышении pH до 6 (рис. 3, прямая *2*) интенсивность АС кадмия уменьшается с увеличением щелочности из-за образования нерастворимого неактивного гидроксида кадмия $Cd(OH)_2$ [19].

Влияние времени и потенциала электроконцентрирования на интенсивность АС кадмия. Другие важные параметры, которые необходимо оптимизировать, – это время и потенциал электроконцентрирования. На рис. 4а,б показаны зависимости тока АС кадмия от потенциала (E_e, В) и времени (t_e, с) электроконцентрирования. Потенциал электроконцентрирования варьировали в диапазоне от –1,0 до –1,5 В. Время электронакопления изменяли от 0 до 240 с.

Из рис. 4а видно, что максимальная интенсивность АС кадмия регистрируется при потенциале электронакопления –1,2 В (отн. х.с.э.). Время электронакопления (t_e) зависит от концентрации кадмия в растворе: чем меньше концентрация, тем больше потребуется t_e для получения хорошо измеримого аналитического сигнала кадмия. Из рис. 4б видно, что интенсивность АС кадмия при времени электронакопления до 120 с возрастает, а при t_e > 120 с – уменьшается. Возможно, это связано с гидролизом или другими осложнениями, или с истощением раствора. Таким образом, время электронакопления, при котором наблюдается максимальная интенсивность аналитического сигнала кадмия, составляет 120 с. При регистрации аналитического сигнала кадмия рабочая скорость изменения потенциала составляет 50 мВ/с, что позволяет регистрировать хорошо воспроизводимый пик окисления с высоким разрешением (рис. 5).

Итак, оптимальными условиями для определения ионов кадмия в жидкостях методом ИВАМ на электродах Y-TiO_2 являются:

– фоновый электролит – 0,1М H_3PO_4 (pH =1,5);

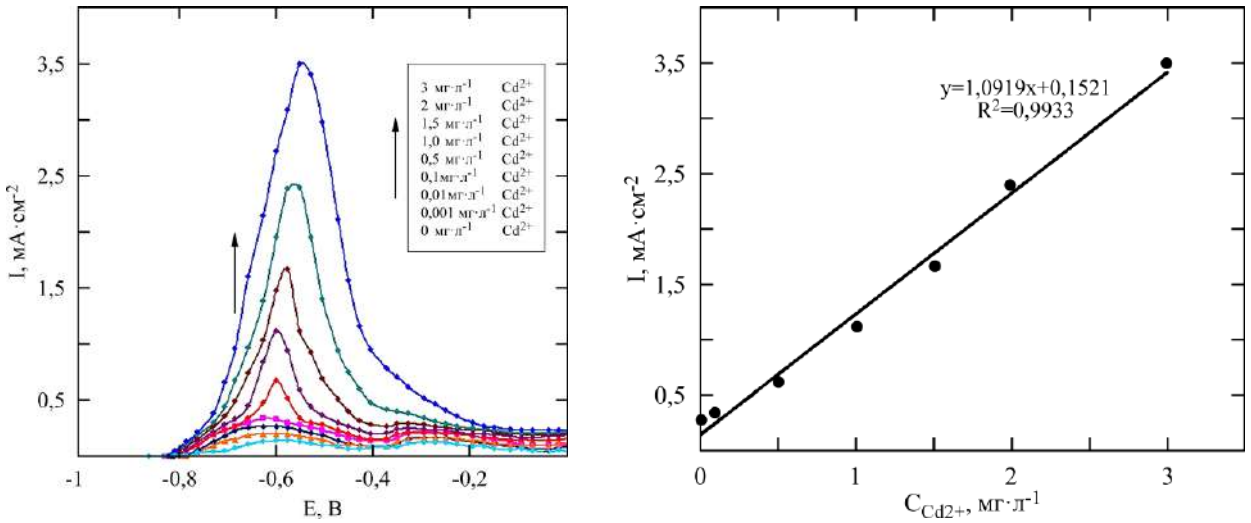
– содержание металла-допанта в пленках Y-TiO_2 – 1 ат.%;

– потенциал предварительного электроконцентрирования – –1,2 В (отн. Ag/AgCl);

– время электроконцентрирования – 120 с.

Анодные вольтамперограммы для определения АС кадмия методом ИВАМ на электродах 1% Y-TiO_2 при различных концентрациях ионов Cd в фоновом электролите 0,1М H_3PO_4, полученные с учетом оптимальных условий, а также калибровочный график для определения кадмия в жидкостях представлены на рис. 5а,б. Пиковый ток АС кадмия линейно возрастал с увеличением концентрации Cd^{2+} на исследованных электродах. Предел обнаружения (LOD), определенный как LOD=3S_a/b [20], где S_a – стандартное отклонение отклика, а b – наклон калибровочной кривой, составлял 0,003 мг·l^{-1}.

Влияние мешающих ионов. Селективность является одним из критических показателей, позволяющих оценить надежность электродов для практического применения. Селективность Y-TiO_2-электродов при определении Cd^{2+} оценивали в присутствии ионов некоторых других металлов, которые могут влиять на его аналитический сигнал (а именно: Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}, Na^+ i K^+). Для этого сравнивали высоту пиков анодного растворения Cd в отсутствие и в присутствии этих ионов, концентрации которых



(а) (б)

Рис. 5. Анодные вольтамперограммы на 1%Y–TiO_2 электродах в буферном растворе 0,1М H_3PO_4 в диапазоне концентраций Cd^{2+} от 0 до 3 мг·l^{-1}; E_e = –1,2В, t_e=120 с (а), зависимость интенсивности АС кадмия от концентрации ионов Cd^{2+}. Потенциал относительно Ag/AgCl электрода.

Таблица. Влияние ионов на аналитический сигнал Cd^{2+} при их присутствии в растворе 0,1М H_3PO_4 при одинаковых концентрациях металлов C_{Me}^{n+} = 1,5 мг·l^{-1}

Me	АС Cd^{2+}, %
Cd^{2+}	100
Zn^{2+}	98,5
Pb^{2+}	99,6
Cu^{2+}	79,3
K^+	102
Na^+	100,6

равнялись концентрации ионов кадмия: 1,5 мг·$л^{-1}$ Cd^{2+}. Эти данные приведены в таблице.

Установлено, что присутствие ионов Zn^{2+} и Pb^{2+} существенно не влияло на определение Cd^{2+} даже при трехкратном превышении их концентраций в растворе. При этом интенсивность АС кадмия почти не изменялась, а потенциал электрорастворения незначительно смещался в анодную область. Также установлено, что присутствие ионов Cu^{2+}, даже при невысоких концентрациях, влияет на определение Cd^{2+}, уменьшая его анодный пик, возможно, из-за образования интерметаллических соединений при катодном концентрировании. В присутствии ионов K+ и Na+ аналитический сигнал Cd^{2+} незначительно увеличивался (см. таблицу).

Таким образом, установлено, что электроды на основе наноструктурированных пленок диоксида титана, модифицированных иттрием (Y–TiO_2), обладают высокой чувствительностью и селектив-ностью при определении ионов кадмия в жидких средах. Такие электроды могут быть использованы в составе электрохимических мультисенсоров для контроля содержания токсичных элементов, включая кадмий, в водных растворах. Высокая стабильность и воспроизводимость характеристик Y–TiO_2-электродов обеспечили точность определения концентрации кадмия на уровне 5%, что свидетельствует о перспективности их использования в системах анализа и мониторинга загрязненных жидкостей.

ВЫВОДЫ

Установлена возможность применения метода анодной инверсионной вольтамперометрии на электродах, изготовленных на основе наноструктурированных пленок диоксида титана, допированных иттрием (Y–TiO_2), для определения ионов кадмия (Cd^{2+}) в жидких средах. Методами рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии подтверждено формирование однородных наноструктурированных пленок TiO_2 с улучшенными электрохимическими свойствами после допирования иттрием. Показано, что допирование иттрием диоксида титана повышает каталитическую активность Y–TiO_2-электродов и способствует увеличению интенсивности аналитического сигнала при определении ионов Cd^{2+} методом ИВАМ. Оптимизированы экспериментальные параметры электрохимического анализа – состав фонового электролита, потенциал и время электроконцентрирования, а также состав электрода. Изучено влияние ионов Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}, Na^+, K^+ на аналитический сигнал кадмия. Установлена линейная зависимость интенсивности аналити-

ческого сигнала от концентрации ионов Cd^{2+} в диапазоне 0,003–8 мг·л$^{-1}$. Предел обнаружения составил 0,003 мг·л$^{-1}$, а относительная погрешность измерений – 5%. Полученные результаты подтверждают перспективность использования наноструктурированных Y–TiO_2-электродов для создания высокочувствительных и селективных электрохимических сенсоров, предназначенных для анализа содержания токсичных металлов, в частности кадмия, в жидких средах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках конкурсного проекта № 0125U000651 Национальной академии наук Украины.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council. https://www.legislation.gov.uk/eudr/2020/2184/annexes.
2. Brainina, Kh.Z., Stozhko, N.Yu., Belysheva, G.M., Inzhevatova, O.V., et al., Determination of heavy in untreated dry wines by anodic stripping voltammetry with modified thick-film electrode, *Anal. Chim. Acta*, 2004, vol. 14, no. 2, p. 227.
3. Uslu, H., Buyukpinar, C., Unutkan, T., Serbest, H., et al., A novel analytical method for sensitive determination of lead: Hydrogen assisted Tshape slotted quartz tube-atom trap-flame atomic absorption spectrometry, *Microchem. J.*, 2018, vol. 137, p. 155.
4. Wang, J., Hansen, E.H., and Miro, M. Sequential injection–bead injection–lab-on-valve schemes for on-line solid phase extraction and preconcentration of ultra-trace levels of heavy metals with determination by electrothermal atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry, *Anal. Chim. Acta*, 2003, p. 139.
5. Park, H., Park, Y., Kim, W., and Choi, W., Surface modification of TiO_2 photocatalyst for environmental applications, *J. Photochem. Photobiol. C: Photochem. Rev.*, 2013, vol. 15, p. 1. https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2012.10.001
6. Ma, H., An, R., Chen, L., Fu, Y., et al., A study of the photodeposition over Ti/TiO2 electrode for electrochemical detection of heavy metal ions, *Electrochem. Commun*, 2015, vol. 57, p. 18.
7. Liu, M., Zhao, G., Tang, Y., and Yu, Z., A simple, stable and picomole level lead sensor fabricated on DNA-based carbon hybridized TiO_2 nanotube arrays, *Environ. Sci. Technol*, 2010, vol. 44, p. 4241.
8. Pirvu, C., Prodana, M., Dumitriu, C., Gheboianu A.-G., et al., Heavy Metal Ion Detection Using TiO_2 Nanotubes and Self-Reduced TiO_2 Nanotube Electrodes, *Appl. Sci.*, 2024, vol. 14, art. ID 11879. https://doi.org/10.3390/app142411879
9. Ameen, S., Highly Dense TiO_2 Nanorods as Potential Electrode Material for Electrochemical Detection of Multiple Heavy Metal Ions in Aqueous Medium, *Micromachines*, 2025, vol. 16, no. 3, art. ID 275. https://doi.org/10.3390/mi16030275
10. Hamden, Z., Ferreira, D.P., Vieira Ferreira, L.F., and Bouattour, S., Li–Y doped and codoped TiO_2 thin films: Enhancement of photocatalytic activity under visible light irradiation, *Ceram. Int.*, 2014, vol. 40, no. 2, p. 3227.
11. Štengl, V., Bakardjieva, S., and Murafa, N., Preparation and photocatalytic activity of rare earth doped TiO_2 nanoparticles, *Mater. Chem. Phys.*, 2009, vol. 114, p. 217.
12. Ma, Y.-T., and Li, S.-D., Photocatalytic Activity of TiO_2 Nanofibers with Doped La Prepared by Electrospinning Method, *J. Chin. Chem. Soc.*, 2015, vol. 62, no. 4, p. 380.
13. Đorđević, V., Milićević, B., and Dramićanin, M.D., Rare Earth-Doped Anatase TiO_2 Nanoparticles, *Titanium Dioxide* Ed. by M. Janus: InTech, 2017, p. 25. doi: 10.5772/intechopen.68882.
14. Priyanka, K.P., Revathy, V.R., Rosmin, P., Thrivedu B., et al., Influence of La doping on structural and optical properties of TiO_2 nanocrystals, *Mater. Charact. Materials Characterization*, 2016, vol. 113, p. 144. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.01.015.
15. Vorobets, V.S., Kolbasov, G.Y., and Medyk, I.A., Harashchenko, A.Yu., et al., Synthesis, Photo- and Electrocatalytic Properties of Nanostructured Y–TiO_2 Films, *Surf. Engin. Appl. Electrochem*., 2021, vol. 57, p. 535. doi: 10.3103/S1068375521050136.
16. Дремлюженко, С.Г., Захарук, З.І., Фочук, П.М., Савчук, А.Й., Зміна дефектності та складу поверхні CdTe, $Cd_{1-x}Mn_xTe$, $Cd_{1-kh}Zn_xTe$ в залежності від обробки, Фізика і хімія твердого тіла, т. 8, № 4, с. 748.
17. Волощук, А.Г., Лукіянчук, Е.М. Термодинамічний аналіз взаємодії кадмій телуриду з розчинами системи Na2S-NaOH-H2O, *Фізика і хімія твердого тіла*, 2004, т. 5, № 4. с. 799.
18. Gao, X.-X., Ge, Q.-Q., Xue, D.-J., Ding, J., et al., Tuning the Fermi-level of TiO_2 mesoporous layer by lanthanum doping towards efficient perovskite solar cells, *Nanoscale*, 2016, vol. 8, p. 16881. https://doi.org/10.1039/c6nr05917a
19. Kokkinos, C., Economou, A., Raptis, I., and Efstathiou, C.E., Lithographically fabricated disposable bismuth-film electrodes for the trace determination of Pb(II) and Cd(II) by anodic stripping

voltammetry, *Electrochim. Acta*, 2008, vol. 53, no. 16, p. 5294.

https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.02.079.

20. Shrivastava, A., and Gupta, V., Methods for the determination of limit of detection and limit of quantitation of the analytical methods, *Chron. Young Sci.*, 2011, vol. 2, p. 21.

https://doi.org/10.4103/2229-5186.79345.

Summary

This study demonstrates the applicability of the anodic stripping voltammetry (ASV) method using electrodes based on nanostructured titanium dioxide films modified with yttrium-doped titanium dioxide (Y–TiO_2) for the detection of cadmium ions (Cd^{2+}) in liquid media. X-ray diffraction and scanning electron microscopy analyses confirmed the formation of uniform nanostructured TiO_2 films with improved electrochemical properties. It was shown that yttrium modification enhances the catalytic activity of TiO_2-based electrodes in the determination of cadmium ions by the ASV and increases the sensitivity of the Cd^{2+} analytical signal. The conditions for the electrochemical determination of Cd^{2+} ions were optimized, including the electrode composition, supporting electrolyte composition, preconcentration time, and potential. The effect of interfering ions (Cu^{2+}, Pb^{2+}, Zn^{2+}, Na^{+}, and K^{+}) on the analytical signal of cadmium was also investigated. A linear dependence of the analytical signal on the cadmium ion concentration was established in the range of 0.003–8 $mg \cdot L^{-1}$, with a detection limit of 0.003 $mg \cdot L^{-1}$ and a relative error of 5%. The obtained results indicate the promising potential of nanostructured Y–TiO_2 electrodes for the development of highly sensitive and selective electrochemical sensors for monitoring toxic metal content in liquid media.

Keywords: stripping voltammetry, titanium dioxide, yttrium, nanostructured films, cadmium, electrochemical sensor, toxic metals