

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ИНВЕРСИОННОЙ ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИИ С УЧЕТОМ ПРОБОПОДГОТОВКИ

*А.В. Никитин, А.А.Никитин*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: ktn17@yandex.ru

*Рассмотрены тенденции развития метода инверсионной вольтамперометрии для измерения малых концентраций тяжелых металлов в природных и техногенных электролитах с учетом физико-химических, электрохимических методик пробоподготовки, оптимизации условий проведения анализа и модификации электродов.*

Метод инверсионной вольтамперометрии является одним из наиболее чувствительных методов в аналитической химии, для измерения малых концентраций тяжелых металлов в водной среде. Метод инверсионной вольтамперометрии обеспечивает концентрирование малых количеств тяжелых металлов на электроде путем электролиза при контролируемом потенциале и регистрацию вольтамперограммы последовательного окисления металлов при развертке потенциала окисления. Вольтамерограмма — волнообразная кривая, расположение волн которой соответствует потенциалам окисления металлов, а высота волн или площадь волн — концентрации металлов в растворе.

Объект анализа представляет собой сложную полиминеральную и органическую систему. Поэтому информация о ее химическом составе, полученная в результате анализа, всегда в той или иной мере ограничена и даже искажена не только погрешностью анализов, но и степенью корректности процедуры пробоотбора и пробоподготовки. Эти обстоятельства вынуждают учитывать и разрабатывать новые методы пробоподготовки и предварительного концентрирования.

Селективность метода инверсионной вольтамперометрии не слишком высока, кроме того электроды чувствительны к по-

сторонним примесям. Продолжают развиваться теория и практическое применение метода, используются химические и электрохимические методики пробоподготовки, изучение комплексообразующих и экстракционных свойств минеральных и органических реагентов. Разрабатываются методики определения малых содержаний ионов металлов и органических веществ в различных объектах, в том числе и в связи с решением экологических проблем [1, 2, 3].

В приложении для автоматизации экологических исследований электрохимические методы инверсионной вольтамперометрии, разработанные в аналитических лабораториях не всегда применимы из-за сложности методики и процедур анализа, не приспособленности аналитического инструментария для массовых анализов, хотя рациональные аналитические приемы, новые подходы, методики, новые реакции, новые реагенты, повышающие точность измерения и снижающие предел определяемых концентраций компонентов, должны использоваться. Это приводит к необходимости проведения критического анализа результатов, полученных в аналитических лабораториях на предмет возможности их использования для массовых измерений, возможности автоматизации, возможности проведения анализа на местах (on-sait), где находятся объекты анализа.

Инверсионная вольтамперометрия является одним из завершающих методов при анализе и определении тяжелых металлов в различных средах. Применению этого метода предшествует пробоподготовка, включающая различные методики, специфичные для каждой анализируемой среды, которые позволяют создать оптимальные условия для использования метода инверсионной вольтамперометрии, получения необходимого порога чувствительности, воспроизводимости, достоверности и точности результатов, устранения дестабилизирующих факторов и обеспечения необходимого набора анализируемых металлов. Оптимальные условия для электролиза при минимальном пределе обнаружения обычно формируются соответствующей пробоподготовкой. При этом формируется среда электролиза — состав фонового электролита, значение pH, ионная сила электролита, температура раствора и другие параметры. В процессе приготовления пробы для вольтамперометри-

ческого анализа используются различные физические, химические и электрохимические методы, обеспечивающие дополнительное концентрирование определяемых металлов и минимально-допустимое загрязнение пробы. При пробоподготовке возможна замена растворителя (матрицы) при использовании дополнительного концентрирования элементов, изменение природы и фазы растворителя. Параметры процесса концентрирования и конечная фаза концентрирования выбираются так, чтобы обеспечить концентрирование металла и стабильность параметров концентрационных кривых.

Особенностью проводимых исследований является совершенствование метода инверсионной вольтамперометрии, использование химических реакций на стадии концентрирования. Такой способ отличается большей селективностью. Добавляется реагент, вступающий в реакцию с определяемым металлом и осаждающийся вместе с ним на электрод. Продолжают проводиться исследования электродных процессов, включающих химические стадии в объеме раствора электролита или на поверхности электрода. Это интенсивно развивающиеся направление электрохимических методов исследования и анализа [4]. В рамках инверсионной вольтамперометрии эти процессы изучены пока недостаточно, особенно в части поверхностных (гетерогенных) химических реакций, хотя именно здесь и могут быть выявлены дополнительные возможности снижения границы определяемых содержаний электроактивных веществ методом инверсионной вольтамперометрии.

В процессе исследований выявляются оптимальные условия для электролиза групп элементов. Для каждой группы добавляется соответствующий реагент, и создаются условия проведения электролиза (рН, ионная сила раствора, задаются диапазоны потенциалов электролиза и окисления металлов). Пример последовательного анализа приведен в [5].

Стал классическим способ выделения Cd, Bi, In, Cu, Sb, Sn, когда используется осаждение ртути на электрод из растворов вместе с измеряемыми элементами. Количество добавляемой ртути в виде соли, например  $\text{Hg}(\text{NO}_3)_2$ , превышает количество металлов в 100 – 1000 раз. При этом предел обнаружения металлов уменьшается на по-

рядок. Это пример совместного осаждения ртути и металлов, при этом используется простота получения воспроизводимой ртутной поверхности, расширяются возможности анализа многокомпонентных систем. Эта методика изложена во многих старых обзорах, например в [6].

Способ анализа с добавлением меди  $\text{Cu}(\text{II})$  в раствор позволяет определять As, Se, Te. При электролизе образуются интерметаллические соединения на графитовом электроде, определение этих элементов становится возможным с малым пределом обнаружения. Предел обнаружения уменьшается на два порядка при использовании указанных интерметаллических соединений. Фоновый раствор 0,1  $\text{HCl}$  содержащий  $2 \cdot 10^{-7}$  г-ион/л As(III), Se(IV), Te (IV) после добавления  $6 \cdot 10^{-7}$  -  $12 \cdot 10^{-7}$  г-ион/л  $\text{Cu}(\text{II})$  [7].

Для определения благородных металлов используется диапазон положительных потенциалов, а также известное свойство благородных металлов легко образовывать комплексные соединения с лигандами, содержащими серу или другие элементы. Вольтамперометрия комплексов платиновых металлов рассмотрена в обзоре [8]. Селективность метода в этом случае в значительной мере определяется рациональным выбором используемых в качестве аналитических форм комплексов Pt-металлов. Ввиду возможного взаимодействия со ртутью многих комплексов Pt-металлов в вольтамперометрических методах часто вместо ртутного капаящего электрода (р. к. э.) применяют твердые электроды из платины, стеклоуглерода, графита и других материалов. Следует отметить перспективность использования графитовых электродов, достоинством которых является химическая инертность и электрохимическая стабильность, сравнительно невысокая стоимость. В последние годы Pt-металлы стали определять в органических средах, что позволило сочетать методы инверсионной вольтамперометрии с экстракцией и повысить благодаря этому и чувствительность, и селективность метода.

Много работ выполнено в области каталитической вольтамперометрии [9]. На основе результатов исследования условий каталитического выделения водорода разработаны методики прямых и косвенных определений различных металлов. Среди них следует отметить чувствительные методики

определения платиновых металлов (Ru, Rh Os, Pt) в растворах их комплексов с серосодержащими органическими лигандами с содержанием определяемых элементов на уровне  $10^{-6}$  —  $10^{-5}$  %.

Каталитические волны водорода часто сопровождают электровосстановление на ртутном электроде координационных соединений переходных и платиновых металлов в протонодонорных средах. В ряде случаев они намного превышают диффузионные токи восстановления этих комплексов и поэтому представляют интерес, в связи с возможностью снижения предела обнаружения как ионов металлов, так и органических веществ [9, 10]. Расширен круг каталитически активных систем с участием окислителей. Показано, что каталитическое восстановление их происходит не только в присутствии ионов металлов, но также и неметаллов (S, Se) и некоторых органических веществ. Предложен способ косвенного определения некоторых поверхностно активных веществ по снижению каталитических токов окислителей.

Не ослабевает интерес к изучению комплексообразования в растворах. Эти исследования, начатые в лабораториях органического профиля, примыкают к традиционно научному направлению в области химии фосфорорганических соединений. Методами полярографии, потенциометрии, спектрофотометрии изучены комплексообразующие, окислительно-восстановительные и экстракционные свойства большого ряда органических соединений, используемых в качестве аналитических реагентов, например в обзоре [11] рассмотрены аспекты применения в вольтамперометрии гетероциклических азосоединений, обоснованы условия экстракционных разделений элементов.

Ценность органических аналитических реагентов определяется не только их широким использованием в отдельных методах аналитической химии, но и разнообразием этих методов, анализируемых объектов, диапазоном определяемых содержаний, простотой и экономичностью методик, доступностью реагентов, соответствием предлагаемых решений запросам времени. С этих позиций гетероциклические азосоединения (ГАС) можно отнести к одним из наиболее перспективных аналитических реагентов. Отсутствие в большинстве случаев ступенчатого комплексообразования,

экстрагируемость комплексов и доступность ГАС обусловили их широкое применение в качестве реагентов. Наличие различных донорных атомов (азот, кислород, сера) и разных по состоянию атомов (азот гетероцикла, азогруппы, аминогруппы боковой цепи) обусловили высокую реакционную способность ГАС, а современные методы многоэлементного анализа использовали ее при анализе различных объектов, см. таблицу, заимствованную из обзора [11]. Использование комплексов приводит к значительному снижению пределов обнаружения, расширяет область применения анализа.

К этому направлению примыкает применение химически модифицированных электродов [12, 13, 14, 15]. Нетрадиционные исследования по использованию в аналитических целях химических сенсоров на основе иммобилизованных ферментов, начаты на кафедре аналитической химии Казанского университета в конце 70-х годов, были первыми исследованиями в стране среди кафедр химического профиля. Разработанный электрохимический датчик с иммобилизованной холинэстеразой успешно применяют как в стационарном, так и проточном режимах для высокочувствительного и селективного определения ингибиторов холинэстеразы, являющихся потенциальными загрязнителями окружающей среды (фосфор-, азот-, хлорсодержащие пестициды, тяжелые металлы) с  $c_n = n \cdot 10^{-12}$  —  $n \cdot 10^{-11}$  М. В настоящее время эти разработки привлекли внимание экологов для выполнения исследований.

Химически модифицированные электроды — новое направление в электроанализе, в том числе и в вольтамперометрии, получившее развитие за последние десять лет. Химической модификацией поверхности рабочего электрода придаются специфические свойства, обеспечивающие высокоселективно и высокочувствительное определение компонентов контролируемых растворов без сложных операций их предварительного разделения. Модифицированные электроды получают предварительным нанесением вещества на поверхность в режиме *in situ* (непосредственно в процессе электроконцентрирования определяемого элемента) или вещества и компонента-иммобилизатора.

Таблица - Гетероциклические азосоединения в вольтамперметрических методах

Ион	Электрод, метод	Реагент, фон (-Е.п. В)	Диапазон определяемых содержаний (С.мн)	Объект
Cu(II)	РКЭ АдВА ОП	ТАДАП, рН 3,4; 50% этанола ТАДОН, рН 12; этилендиамин (0,86) ПАР, рН 4,4	2,0·10 <sup>-6</sup> —5,0·10 <sup>-6</sup> (0,05 мг/мл) (0,1 мкг/мл)	Алюминиевые сплавы Руды, чистое олово Руды
Ga(III)	КВ КВВК ОП	ПАР, Н <sub>2</sub> О <sub>2</sub> , NaBrO <sub>3</sub> ПАР, рН 1,8—2,0 ПАР, 0,8 М NaOH; 0,5% маннита (0,68)	0,005—1 мг/мл	Алюминиевые сплавы, стали Магнелиевые сплавы Почвы, горные породы
V(V)	АдВА Ди АдВА АдВА КВ, р. к. э. КВ, р. к. э. АдВА РП АдВА КВ, р. к. э.	ПАР, 0,8 М NaOH (0,69) ПАР, 0,1 М NH <sub>3</sub> —NH <sub>4</sub> Cl 5-Вг-ПААФ 0,01 М NaOH (0,04) ПАР, рН 2,1; NaClO <sub>2</sub> (0,1) 5-Вг-ПААФ, Н <sub>2</sub> О <sub>2</sub> , NaClO <sub>2</sub> 5-Вг-ПААФ, 0,6 М H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (0,05) 5-Вг-ПААФ, Н <sub>2</sub> О <sub>2</sub> , H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ПАР, винная кислота, NaClO <sub>2</sub> , рН 4,9 (0,90)	2,0·10 <sup>-9</sup> —3,0·10 <sup>-7</sup> М (7,5·10 <sup>-11</sup> М) 1—400 нг/мл 8·10 <sup>-8</sup> —2·10 <sup>-5</sup> М 2·10 <sup>-5</sup> —8·10 <sup>-3</sup> М 1—80 мкг/л	Волосы человека То же Геологические материалы Геологические объекты
Cr(III)	ОП	5-Вг-ПААФ, рН 5,5 (0,45)	1,40·10 <sup>-9</sup> —4·10 <sup>-6</sup>	Природные воды
Mn(VI)	КВ, р. к. э. ВААДК	ПАР, NaClO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , рН 1,7 5-Вг-ПААФ (0,56; 0,65) (E <sub>накопл</sub> = = -0,40 В отн. Ag/AgCl-электро- да), рН 1,8	1—50 нг/мл ≤25 нг/мл	Минералы Морская вода
Fe(II)	КАдВА	5-Вг-ПААФ, рН 9—10, триэтанол- амин, (0,63)	2,8·10 <sup>-8</sup> —8,9·10 <sup>-7</sup> М	Алюминиевые сплавы, корма, вода
Fe(III)	АдВА	3,5-Вг-ПААФ (0,43)	(5 нг/мл)	Сталь
Co(II)	КВ КВ	5-Вг-ПААФ, NH <sub>4</sub> OH, рН 11,7—13 3,5-Вг-2-ПА-1,3-ДАБ, NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , рН 4,5	1,7·10 <sup>-9</sup> —3,4·10 <sup>-7</sup> М 1·10 <sup>-10</sup> —1·10 <sup>-8</sup> М	Волосы человека, витрат никеля
Ni(II)	АдВА, ОП, Р. к. э.	ПАР; 0,3 М NaOH, 0,05 М цитрат натрия (0,94)	0,005—0,8 мкг/мл	Вода

Обозначения. Р. к. э. — ртутный каплющий электрод; АдВА — адсорбционная вольтамперметрия; ОП — осциллополяр-  
графия; КВ — каталитическая волна; КВВК — катодная волна восстановления комплекса; Ди АдВА — дифференциальная  
импульсная адсорбционная вольтамперметрия; АдВА РП — адсорбционная вольтамперметрия с линейной разверткой  
потенциала; ВААДК — вольтамперметрия со стационарным ртутным электродом и адсорбционным концентрированием;  
КАдВА — каталитическая адсорбционная вольтамперметрия.

Абревиатуры упоминаемых реагентов. Пиридиновые азосоединения: 5-Вг-ПААФ - 2-(5-бром-2-пиридилазо)-5-  
диэтиламинофенол; 3,5-Вг-ПААФ - 2-(3,5-дибром-2-пиридилазо)-5-диэтиламинофенол; 3,5-Вг-ПА-1,3-ДАБ -  
4-(3,5-дибром-2-пиридилазо)-1,3-диаминобензол; ПАР — 4-(2-пиридилазо) резорцин. Тиазольные азосоединения:  
ТАДАП - 3-(2-тиазолилазо)-2,6-диаминопиридин; ТАДОН — 1-(2-тиазолилазо)-2,7-диоксинафталин.

Электроды с предварительной иммобилизацией модификатора на электродной поверхности представляют одно из наиболее перспективных направлений в вольтамперометрии. Это связано с возможностью создания электродов (сенсоров) для определения практически любого элемента или вещества. Можно провести определенную аналогию с ионоселективными электродами. При этом в вольтамперометрии становится возможным с помощью набора электродов определять концентрацию заданных ионов и других химических форм компонентов раствора при этом резко повышается селективность метода по сравнению с обычными ртутными и графитовыми электродами, и сохраняется высокая чувствительность, характерная для инверсионных вариантов вольтамперометрии.

Ряд работ, посвящен различным способам модификации поверхности электродов, конкретные ссылки на работы приведены в обзоре [12]. Описаны непосредственная прививка модификатора к поверхности, несущей активные функциональные группы; обратимая или необратимая адсорбция; электрохимическое осаждение; взаимодействие поверхности с радикалами, образующимися в плазме при электрическом разряде в газах. Рассмотрены иммобилизация окислительно-восстановительных медиаторов, электрохимическое выделение микрочастиц металла в тонких слоях полимерных пленок и механическое диспергирование оксидов металлов на поверхности стеклоуглеродных электродов. Модификацию можно проводить путем ковалентной сшивки или необратимой адсорбции монослоя пленки. Предложено выделять следующие принципы иммобилизации электроактивных веществ на поверхности полупроводников, оксидов металлов, графитовых и платиновых электродов: хемисорбцию, образование ковалентных связей с помощью органосиланов, приготовление полимерных пленок.

Описаны способы модификации поверхности твердых электродов ферментами, пленками функциональных полимеров и комплексантов с целью получения электродов, селективных по отношению к ряду органических веществ.

Рассмотрены принципы действия функциональных пленок, свойства и способы их получения. Изучено строение модифицирующей пленки с хемосорбированным мономолекулярным слоем реагента на поверхности углеродных и металлических (Hg, Au, Pt) электродов, покрытых электроактивным реагентом, образующим ковалентную связь с поверхностью химически модифицированного электрода, и строение мультимолекулярных слоев пленок окислительно-восстановительных полимеров, ионообменников, цеолитов и других материалов, нанесенных на поверхность. Сформулированы основные требования, предъявляемые к полимерным мембранам, используемым для изготовления химически модифицированных электродов: химическая инертность, малая растворимость в различных средах, высокая прочность сцепления с поверхностью электрода.

Разработаны индикаторные электроды, модифицированные полимерами, содержащими вещества с окислительно-восстановительными или комплексообразующими свойствами, для определения следов металлов в растворах. Для улучшения разрешающей способности метода инверсионной вольтамперометрии и определения следов тяжелых металлов предложено использовать ртутно-пленочный электрод, покрытый ацетилцеллюлозной пленкой. Разработаны мембранные электроды, покрытые ртутной пленкой, для отдельного определения каждой из физико-химических форм нахождения металла в природных водах. Перспективно исследование и разработка химических сенсоров на основе модифицированных угольно-пастовых электродов для определения токсичных органических и неорганических веществ.

В области исследования химически модифицированных электродов можно выделить следующие направления: совершенствование технологии модифицирующей пленки (способ нанесения, выбор оптимальных условий, например, влияние поверхностно-активных веществ; способ защиты пленки и т. д.); изучение метрологических характеристик (воспроизводимость, предел обнаружения и т. д.) при использовании модифицированных электродов; расшире-

ние области применения модифицированных электродов для анализа конкретных объектов.

Для снижения нижней границы определяемых содержаний металлов перспективным оказалось сочетание предварительного «бестокового» накопления веществ на электроде. Большое значение приобретают методы дополнительного концентрирования во время пробоподготовки, существенно снижающие предел обнаружения следов измеряемых металлов. Находят применение методы сорбции с использованием эффективных современных сорбентов и мембранных фильтров, особенно в случаях, когда нет необходимости десорбции перед электролизом концентрата. Это позволяет значительно — на один, два порядка уменьшить пределы обнаружения металлов в водной среде. Например, в водопроводной воде, когда мембранное концентрирование меди, свинца и кадмия с применением водного раствора полиэтиленimina (ПЭИ) и фильтрации дает возможность получить концентрат определяемых элементов, минуя стадию рекстракции (десорбции), что сокращает время концентрирования и снижает возможность дополнительного загрязнения. Методика рекомендуется для определения  $n \cdot 10^{-2}$  мкг/л, Cd, Pb, Cu(II) на стандартном мембранном оборудовании ФМ-2 производства предприятия «Биоспектр», Россия, г. Санкт-Петербург [16].

Применение модифицированных сорбентов рассмотрено в [17].

Сорбция из газовой фазы применима для концентрирования летучих загрязнителей — ртути, сероводорода, галогенидов, находящихся в воздухе или испаряющихся с поверхности. Сорбция происходит на поверхности металлического (Au, Ag, Ti) электрода с последующим определением веществ методом вольтамперометрии [18]. При использовании этого метода при времени сорбции ртути 10 мин. предел обнаружения составляет 1,7 нг ртути в литре воздуха, при потоке воздуха 1 л/мин. Для сероводорода предел обнаружения составляет 0,7 мкг.

Дальнейшее развитие получает экстракционная вольтамперометрия. Результаты вольтамперометрического исследования электрохимического поведе-

ния хелатов металлов позволили обоснованно подойти к выбору экстракционных реагентов и растворителей для экстракционно-вольтамперометрических определений многих металлов в сплавах, продуктах химической промышленности, удобрениях и пестицидах, в материалах цветной металлургии, объектах окружающей среды. Для этого применяются органические реагенты, см. обзоры [11, 17].

Для пробоподготовки возможно предварительное концентрирование методом соосаждения, применимое для некоторых электролитов, например, морской воды, содержащей достаточное количество Mg, гидроксид которого используется для соосаждения тяжелых металлов, содержащихся в морской воде. При высоком значении pH, равном 10 ÷ 12 в катодной камере проводится соосаждение тяжелых металлов с гидроксидами. Из морской воды вместе с гидроксидом магния, соосаждаются ионы многих (почти всех) металлов содержащихся в морской воде. Соосаждение эффективный метод с большим коэффициентом концентрирования  $10^2 - 10^3$ . Содержание марганца в морской воде составляет 0,5 ÷ 1,3 ‰. Этого достаточно, чтобы из 1 л морской воды осадить 1 - 2 г гидроксида при повышении pH катода до 10 - 12 ед электрохимическим способом, не применяя для этого загрязняющие химические щелочи, которые часто содержат примеси в количестве, превышающем содержание тяжелых металлов в морской воде. При осаждении 0,5 ÷ 0,6 г гидроксида магния в него переходит 50-55 % содержащегося в литре морской воды каждого микроэлемента. Это происходит при электролизе морской воды в течение 20 минут при токе 2 А и непрерывном перемешивании раствора [19].

Концентрат металлов с гидроксидом магния может использоваться для определения количества металлов методом инверсионной вольтамперометрии при разведении концентрата химически чистой соляной кислотой.

Для проведения экологического контроля водной среды необходимы автоматизированные измерения непосредственно на объектах, что накладывает жесткие требования к методике и технике

измерений по сравнению с аналитическими лабораториями и критически оценивать новые методические приемы и технические решения с учетом необходимости выполнения массовых измерений.

Для целей автоматизированных экологических измерений, снижения пределов обнаружения и расширения номенклатуры измеряемых металлов целесообразно применение химических реакций, как в объеме исследуемой пробы, так и при модификации электрода, что связано с добавлением (инъекцией) химически чистых реагентов. Технологически это достаточно сложная операция связанная с расходом реагента, его дозированием. Операция может быть реализована инъекцией реагента в проточной системе измерений с регенерацией рабочего электрода электрохимическим способом. Это наиболее перспективный путь для выполнения автоматизированных экологических измерений и мониторинга малых концентраций тяжелых металлов непосредственно в исследуемой среде.

Применение высокочувствительных специализированных модифицированных электродов (сенсоров) больше подходит для экспресс-анализа среды, т.к. время работы таких электродов, как правило, ограничено, хотя в этом направлении прилагаются значительные усилия, разрабатываются новые технологии, для увеличения времени функционирования сенсоров.

Эффективно применение предварительного концентрирования при пробоподготовке, значительно повышающее предел обнаружения следов металлов. Особенно эффективно применение сорбентов, размещенных на фильтре в небольшом объеме, не требующих десорбции для анализа методом инверсионной вольтамперометрии, как непосредственно из электролита, так и при осаждении из газовой фазы, при испарении (выделении) летучих элементов из жидкости. Все большее применение находит экстракционная вольтамперометрия с использованием комплексных соединений (аналитических реагентов), гетероциклических азосоединений, которые помимо понижения предела обнаружения металла позволяют увеличить количество определяемых металлов, увеличить раз-

решение по потенциалам восстановления металлов и других элементов. Для анализа морской воды очень эффективно соосаждение металлов с гидроксидом магния, который осаждается электрохимическим способом при повышении pH электролита, т.к. магний содержится в достаточном количестве в морской воде. Такое предварительное концентрирование позволяет существенно расширить номенклатуру определяемых металлов, содержащихся в морской воде и обеспечить необходимый предел обнаружения этих металлов.

Быстрое развитие метода инверсионной вольтамперометрии с учетом пробоподготовки, с использованием всего арсенала методик средств и опыта аналитической химии и появление множества методик применения этого метода для конкретных объектов анализа свидетельствует о перспективности применения метода инверсионной вольтамперометрии для экологических исследований. необходимо преодоление технологических трудностей и внедрение этого метода для измерений концентраций тяжелых металлов и других загрязнителей, для создания автоматизированных экологических систем, обеспечивающих мониторинг природной и техногенной обстановки окружающей среды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мур Дж. В., Рамамурти С. Тяжелые металлы в природных водах. -М.: Мир, 1987.
2. Линник П.Н., Набиванец В.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. Л.: Гидрометеопиздат, 1986. - 169 с.
3. Томилов А. П., Черных И. Н., Каргин Ю. М.// Электрохимия элементоорганических соединений. Элементы I, II, III групп периодической системы и переходные металлы. М.: Наука. 1985.
4. Карбаинов Ю. А., Вагина С. Э.// Влияние поверхностной реакции образования комплекса  $ML_{aq}$  на стадию электролиза в условиях необратимого электродного процесса в инверсионной вольтамперометрии. Журн. аналит. химии. 1991. Т. 46. Вып. 1. - С. 127.
5. Каплин А.А., Пичугина В.М.// Многоэлементный последовательный инвер-

- сионно вольтамперометрический анализ. Журн. аналит. химии. 1984. Т. 39. Вып. 4. - С. 664-670.
6. *Нейман Е.Я., Долгополова Г.М.* // Электроды и электродные материалы в инверсионной вольтамперометрии. Журн. аналит. химии. 1980. Т. 35. Вып. 5. - С. 976-991.
7. *Нейман Е.Я., Пономаренко Г.Б.* // Некоторые особенности определения мышьяка, селена и теллура методом инверсионной вольтамперометрии на графитовых электродах. Журн. аналит. химии. 1975. Т. 30. Вып. 6. - С. 1132-1139.
8. *Езерская Н.А.* // Вольтамперометрическое определение платиновых металлов. Журн. аналит. химии. 1991. Т. 46. Вып. 4. - С. 675-682.
9. *Хомутова Е.Г., Рысев А.П., Романовская Л.Е. и др.* // Исследование состояния и каталитической активности соединения иридия в реакции окисления ртути (I) церием (IV) Журн. аналит. химии. 1995. Т. 50. Вып. 12. - С. 1271-1274.
10. *Медянцева Э.П., Будников Г.К.* // Каталитическое выделение водорода на графитовом и угольно-пастовом электродах в растворах комплексов свинца (II) и кадмия (II) с серосодержащими лигандами. Журн. аналит. химии. 1991. Т. 46. Вып. 4. - С. 783-785.
11. *Иванов В.М.* // Перспективные аспекты применения гетерочиклических азосоединений в аналитической химии. Журн. аналит. химии. 1991. Т. 46. Вып. 4. - С. 645.
12. *Каплин А.А., Пикула Н.П., Нейман Е.Я.* // Электроды в вольтамперометрии. Журн. аналит. химии. 1990. Т. 45. Вып. 11. - С. 2086-2120.
13. *Романов В., Бедненко Т.* // Микроэлектронные биосенсорные системы Spreeta. ЭЖиС №4, 2004. Научно-производственная фирма VD MAIS. Киев.
14. *Лауринавичюс В.А., Циценене Р.А., Куртинайтене Б.С. и др.* // Определение триглицеридов, глицерина и АТФ полиферментным биосенсором. Журн. аналит. химии. 1995. Т. 50. Вып. 12. - С. 1318-1323.
15. *Никольская Е.Б., Ягодина О.В., Искандеров Р.Р.* // Зависимость аналитических характеристик биоспецифических и газочувствительных сенсоров от выбора потенциометрического датчика. Журн. аналит. химии. 1995. Т. 50. Вып. 12. - С. 1275-1279.
16. *Маркова И.В., Шкинев В.М., Воробьева Г.А., Гекклер К.Е.* // Определение меди, свинца и кадмия в водных растворах полиэтиленimina после мембранного концентрирования методом инверсионной вольтамперометрии. Журн. аналит. химии. 1991. Т. 46. Вып. 1. - С. 182-186.
17. *Мясоедова Г.В. Антакольская И.И.* // Комплексообразующие сорбенты «полиоркс» для концентрирования благородных металлов. Журн. аналит. химии. 1991. Т. 46. Вып. 6. - С. 1068-1076.
18. *Шольц Ф., Нитшке Л., Хенрион Г.* // Сорбция из газовой фазы как новый метод концентрирования в инверсионной вольтамперометрии. Журн. аналит. химии. 1988. Т. XLIII. Вып. 7. - С. 1166-1168.
19. *Коварский Н.Я., Ковековдова Л.Т., Пряжевская И.С. и др.* // Предварительное концентрирование микроэлементов из морской воды электроосажденным гидроксидом магния. Журн. аналит. химии. 1981. Т. 36. Вып. 11. - С. 2264-2270.