

A descrição teórica da detecção eletroanalítica do ácido ibotênico e da muscazona, assistida pelo compósito de oxihidróxido de vanádio com o polímero condutor

Volodymyr V. Tkach^{1,2*}, Marta V. Kushnir¹, Natalia M. Storoshchuk¹, Sílvio C. de Oliveira², Olga V. Luganska³, Vira V. Kopiika³, Valerii I. Domnich³, Svitlana M. Lukanova¹, Yana G. Ivanushko⁴, Valentyna G. Ostapchuk⁴, Svitlana P. Melnychuk⁴, Petro I. Yagodynets⁵, José I. Ferrão de Paiva Martins⁵, Maria João Monteiro⁶, Tetiana V. Morozova⁷, Vikroriia O. Khrutba⁷

¹ Universidade Nacional de Chernivtsi, 58012, Rua de Kotsyubyns'ky, 2, Chernivtsi, Ucrânia

² Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Av. Sen. Felinto. Müller, 1555, C/P. 549, 79074-460, Campo Grande, MS, Brazil

³ Universidade Nacional de Zaporizhzhia, 69600, Rua de Zhukovsky, 66, Zaporizhzhya, Ucrânia

⁴ Universidade Estatal de Medicina de Bucovina, 58001, Praça Teatral, 9, Chernivtsi, Ucrânia

⁵ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Porto, Portugal

⁶ Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5001-801, Folhadela, Vila Real, Portugal

⁷ Universidade Nacional de Transporte e Rodagem da Ucrânia, 02000, Rua de Omelianovych-Pavlenko, 1, Kyiv, Ucrânia

*Autor correspondente: nightwatcher2401@gmail.com

Recebido: 15 de abril de 2022

Revisado: 27 de agosto de 2023

Aceto: 2 de setembro de 2023

RESUMO

Introdução: Neste trabalho, pela primeira vez foi analisada, do ponto de vista teórico, a possibilidade da determinação eletroanalítica das micotoxinas muscazona e ácido ibotênico, assistida pelo compósito de oxihidróxido de vanádio com polímero condutor. **Desenvolvimento:** O processo eletroanalítico realiza-se mediante a redução catódica, e a reação eletroquímica se realiza de maneira diferente para o ácido ibotênico e para a muscazona. Em virtude disto, a realização do comporta-

mento oscilatório em parâmetro eletroquímico é muito mais provável que em casos mais simples. **Resultado:** Malgrado o supracitado, o compósito polímero condutor – VO(OH) pode ser um modificador eficiente para a detecção eletroanalítica do ácido ibotênico com a muscazona.

Palavras-chave: ácido ibotênico, muscazona, sensor eletroquímico, polímero condutor, oxihidróxido de vanádio trivalente, estado estacionário estável

SUMMARY

The theoretical description for ibotenic acid and muscazone electrochemical determination, assisted by the vanadium oxyhydroxide composite with conducting polymer.

Introduction: In this work, the possibility for the electroanalytical determination of ibotenic acid and muscazone mycotoxin, assisted by a conducting polymer/vanadium oxyhydroxide composite has been analyzed for the first time. **Proposal:** The electroanalytical process is carried out by cathodic reduction by different manner for ibotenic acid and for muscazone. For this reason, the oscillatory behavior in electrochemical parameter is far more probable than in the simplest case. **Result:** the conducting polymer – VO(OH) composite may be an efficient electrode modifier for electroanalytical detection of ibotenic acid and muscazone.

Keywords: ibotenic acid, muscazone, electrochemical sensor, conducting polymer, trivalente vanadium oxyhydroxide, stable steady-state

RESUMEN

Descripción teórica de la detección electroanalítica del ácido ibotênico y de la muscazona, asistida por el compuesto de oxihidróxido de vanadio con el polímero conductor

Introducción: En este trabajo, por la primera vez, ha sido analizada, del punto de vista teórico, la posibilidad de la determinación electroanalítica de las micotoxinas muscazona y ácido ibotênico, asistida por el compuesto de oxihidróxido de vanadio con el polímero conductor. **Propuesta:** El proceso electroanalítico se realiza mediante la reducción catódica, y la reacción electroquímica se realiza de manera

diferente para el ácido iboténico y la muscazona. Por esta razón, la realización del comportamiento oscilatorio en parámetro electroquímico es mucho más probable que en casos más simples. **Resultado:** A pesar de lo arriba dicho, el compuesto polímero conductor – VO(OH) puede ser un modificador eficiente para la detección electroanalítica del ácido iboténico con la muscazona.

Palabras clave: ácido iboténico, muscazona, sensor electroquímico, polímero conductor, oxihidróxido de vanadio trivalente, estado estacionario estable

INTRODUÇÃO

O cogumelo *Amamita muscaria*, conhecido popularmente como mata-moscas, é um dos cogumelos venenosos mais abundantes na Europa e na América do Norte, principalmente nas zonas climáticas moderada e subtropical [1-4]. Existem também relatos da expansão do seu habitat para países tropicais e até equatoriais [4]. Assim como a maior parte dos cogumelos do gênero *Amamita*, o mata-moscas é considerado tóxico e, por conseguinte, não se usa na alimentação, mesmo que seja nas formas cozida e assada.

Os sintomas principais da intoxicação pelo cogumelo [5-8] são euforia, sentimento de felicidade falsa, vivacidade, alucinações, seguidos pela depressão repentina, ansiedade, sonolência, entre outros. Mesmo com as doses relativamente pequenas, a desintoxicação realiza-se lentamente, não passando pela “ressaca”. As doses altas podem causar danos cerebrais irreparáveis e mudanças comportamentais permanentes. Os efeitos tóxicos do mata-moscas são associados à presença do ácido iboténico e derivados (Fig. 1):

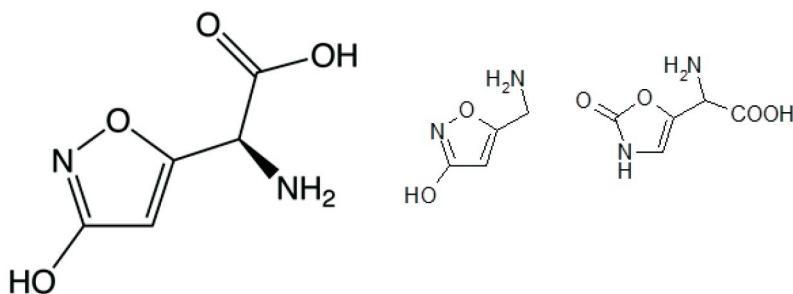


Fig. 1. Da esquerda à direita: ácido iboténico, muscimol e muscazona

O ácido ibotênico (Fig. 1, à esquerda) é um aminoácido principal do mata-moscas. Do ponto de vista químico, é um aminoácido, substituído pelo anel isoxazólico, que o faz um composto com propriedades básicas predominantes. A sua toxicidade baseia-se na sua facilidade de trespassar a barreira hematoencefálica, intervindo na síntese de proteínas cerebrais, modificando a sua composição [9-11]. Entretanto, em alguns países ele ainda é usado na medicina popular para alcançar a estimulação cerebral e espiritual [12]. Outrossim, este ácido é usado em testes bioquímicos de resposta neu-rofisiológica [13]. A sua decarboxilação transforma-o numa amina, conhecida como muscimol, um composto ainda mais tóxico [14].

Por outro lado, a muscazona (Fig. 1. à direita), é um dos isômeros do ácido ibotênico, que é produzido dentro do cogumelo a partir deste sob irradiação ultravioleta. Em relação ao ácido ibotênico e, ainda mais, ao seu isômero, a muscazona é menos tóxica [5, 14-16], mas possui um efeito mais duradouro, além de reforçar o efeito deles dois, provocando perdas de memória, atenção, orientação e visão.

Haja vista o supracitado, o desenvolvimento de um método de detecção e quantificação precisa e exata da concentração de ambos os ácidos é realmente atual, e os métodos eletroanalíticos poderiam servir de boa solução a este problema [17, 18].

Alguns métodos eletroanalíticos e eletroforéticos têm sido desenvolvidos para a quantificação do ácido ibotênico [18, 19]. Quanto à muscazona, nenhum método eletroanalítico para a detecção deste aminoácido tem sido desenvolvido até agora. Haja vista o anel isoxazólico, é preferível usar o processo catódico ao anódico, pois o composto é difícil de oxidar, mas que facilmente se reduz. Um dos modificadores de elétrodo, que poderiam providenciar esse processo, poderia ser o oxihidróxido de vanádio [20]. É um composto com comportamento eletroquímico flexível, mas com maior tendência de ser oxidado [21].

Na pesquisa bibliográfica, realizada pelo grupo dos autores do presente trabalho, não se encontraram citações, referentes a trabalhos experimentais acerca da modificação do elétrodo por VO (OH) para fins eletroanalíticos, apesar de este mesmo grupo ter publicado alguns teóricos [22-24], que comprovam essa possibilidade. O principal é que a introdução de um novo modificador de elétrodo pode acarretar os problemas como:

- Possível incompatibilidade do modificador com o meio da eletroanálise;
- Possibilidade da aparição das instabilidades eletroquímicas, características para o comportamento do composto semelhante, que é o oxihidróxido de cobalto [25-28], durante o desempenho mediador de VO(OH). A sua aparição pode não estar aquém do desiderado de um eficiente processo eletroanalítico.

Destarte, o objetivo geral deste trabalho é avaliar, do ponto de vista teórico, o comportamento do sistema com a determinação do ácido ibotênico e muscazona no cátodo, modificado pelo oxihidróxido de vanádio. A sua realização incluirá o alcance dos objetivos específicos:

- Sugerir um mecanismo do desempenho do sensor, incluindo as etapas químicas e eletroquímicas, com a expressão clara do papel que o modificador (no caso, o oxihidróxido de vanádio) desempenha no processo;
- Elaborar e analisar um modelo matemático, capaz de descrever de maneira adequada o comportamento do sistema;
- Da análise do modelo, derivar os requisitos do melhor desempenho eletroanalítico do elétrodo com o ácido inotênico, bem como as condições, sob cuja satisfação são realizadas as instabilidades oscilatória e monotônica;
- Comparar o desempenho do sistema com o dos semelhantes [22-24].

O SISTEMA E O SEU MODELO

A redução do ácido ibotênico e da muscazona dá-se de mecanismos diferentes. Em ambos os casos, porém, ocorre a ruptura do anel. No caso do ácido ibotênico, a redução realizar-se-á de duas maneiras. Assim, esquematicamente, o comportamento do sistema será descrito conforme na Fig. 2:

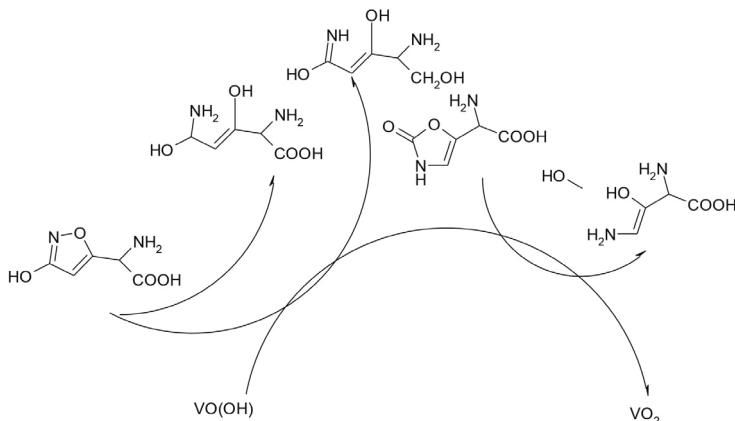


Fig. 2. Representação esquemática do sistema eletroanalítico

Vale a pena mencionar que a redução de muscazona no processo reproduz o seu metabolismo no organismo humano. Um dos produtos da sua redução é o metanol, responsável pela cegueira parcial ou total – um dos efeitos da intoxicação pelo mata-moscas.

Havendo vista o supracitado, para investigar o comportamento do sistema, introduzimos três variáveis:

m – concentração do ácido ibotênico na camada pré-superficial;

m^* - concentração da muscazona na camada pré-superficial;

v – grau de recobrimento da matriz polimérica pelo vanádio tetravalente.

Para simplificar a modelagem, supomos que o reator esteja agitando-se intensamente, de modo que possamos menosprezar o fluxo de convecção, que o eletrólito de suporte esteja em excesso, para menosprezar o fluxo de migração. Também supomos que a camada pré-superficial esteja de espessura constante, igual a δ , e que o perfil concentracional dos dois analitos seja linear.

É possível mostrar que o comportamento do sistema será descrito pelo conjunto de equações diferenciais (1):

$$\begin{cases} \frac{dm}{dt} = \frac{2}{\delta} \left(\frac{M}{\delta} (m_0 - m) - r_{iso} - r_{11} - r_{12} \right) \\ \frac{dm^*}{dt} = \frac{2}{\delta} \left(\frac{M^*}{\delta} (m^*_0 - m^*) + r_{iso} - r_2 \right) \\ \frac{dv}{dt} = \frac{1}{V} (r_{11} + r_{12} + r_2 - r_V) \end{cases} \quad (1)$$

Sendo M e M^* os coeficientes de difusão de cada um dos aminoácidos m_0 e m^*_0 são as concentrações de cada um dos aminoácidos, V é a concentração superficial máxima e os parâmetros r são as velocidades das reações correspondentes, que se podem calcular conforme (2 – 6):

$$r_{iso} = k_{iso} m \exp(-am) \quad (2)$$

$$r_{11} = k_{11} m (1 - v)^6 \exp(-am) \quad (3)$$

$$r_{12} = k_{12} m (1 - v)^8 \exp(-am) \quad (4)$$

$$r_2 = k_2 m * (1 - v)^4 \exp(-bm) \quad (5)$$

$$r_v = k_v v \exp\left(-\frac{F\varphi_0}{RT}\right) \quad (6)$$

Em que os parâmetros k são as constantes das respectivas reações, a e b são parâmetros, que relacionam a concentração do ácido ibotênico e da muscazona com a DCE, F é o número de Faraday, φ_0 é o salto do potencial, relativo ao potencial da carga zero, R é a constante universal de gases, T é a temperatura absoluta.

Como todas as etapas químicas e eletroquímicas do processo influem a DCE, o comportamento deste sistema é mais dinâmico que nos casos semelhantes [22-24]. Nada obstante, o sistema eletroanalítico é eficiente, o que será representado abaixo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para investigar o comportamento do sistema com a detecção eletroanalítica do ácido ibotênico na presença da muscazona, assistida pelo compósito do oxihidróxido de vanádio com polímero condutor, analisamos o conjunto de equações diferenciais (1), além das relações algébricas (2 – 6) mediante a teoria de estabilidade linear. Os valores estacionários da matriz funcional Jacobiana podem ser expressos conforme (7):

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} a_{11} = & \frac{2}{\delta} \left(-\frac{M}{\delta} - k_{iso} \exp(-am) + ak_{iso}m \exp(-am) - k_{11}(1 - v)^6 \exp(-am) + \right. \\ & \left. ak_{11}m(1 - v)^6 \exp(-am) - k_{12}(1 - v)^8 \exp(-am) + ak_{12}(1 - v)^8 \exp(-am) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$a_{12} = 0 \quad (10)$$

$$a_{13} = \frac{2}{\delta} (6k_{11}m(1 - v)^5 \exp(-am) + 8k_{12}m(1 - v)^7 \exp(-am)) \quad (11)$$

$$a_{21} = \frac{2}{\delta} (k_{iso} \exp(-am)) \quad (12)$$

$$a_{22} = \frac{2}{\delta} \left(-\frac{M^*}{\delta} (m *_0 - m *) - k_2(1 - v)^4 \exp(-bm) + bk_2m * (1 - v)^4 \exp(-bm) \right) \quad (13)$$

$$a_{23} = \frac{2}{\delta} (4k_2m * (1 - v)^3 \exp(-bm)) \quad (14)$$

$$a_{31} = \frac{1}{v} (k_{11}(1 - v)^6 \exp(-am) - ak_{11}m(1 - v)^6 \exp(-am) + k_{12}(1 - v)^8 \exp(-am) - ak_{12}(1 - v)^8 \exp(-am)) \quad (15)$$

$$a_{32} = \frac{1}{v} (k_2(1 - v)^4 \exp(-bm) - bk_2m * (1 - v)^4 \exp(-bm)) \quad (16)$$

$$a_{33} = \frac{1}{v} \left(-6k_{11}m(1 - v)^5 \exp(-am) - 8k_{12}m(1 - v)^7 \exp(-am) - 4k_2m * (1 - v)^3 \exp(-bm) - k_v \exp\left(-\frac{F\varphi_0}{RT}\right) + jk_v v \exp\left(-\frac{F\varphi_0}{RT}\right) \right) \quad (17)$$

O comportamento oscilatório é passível de realizar, desde que sejam satisfeitas as condições da bifurcação de Hopf. A sua condição necessária é a presença dos elementos positivos na diagonal principal da matriz Jacobiana. Como se vê, o comportamento oscilatório é ainda mais provável neste sistema que nos semelhantes [22-24], por haver mais de um elemento, que pode ter valores positivos.

Neste caso, a estrutura da DCE está alterada não só durante a etapa eletroquímica, mas durante a isomerização, que leva à transformação de uma forma iônica noutra. Essas alterações estruturais provocam, também, as alterações nos valores da capacidade da DCE, o que pode causar o comportamento oscilatório.

Este comportamento se descreve pela positividade dos elementos, $ak_{iso}m \exp(-am) > 0$, $ak_{11}m(1 - v)^6 \exp(-am) > 0$ e $ak_{12}(1 - v)^8 \exp(-am) > 0$ se $a > 0$, $bk_2m * (1 - v)^4 \exp(-bm) > 0$, se $b > 0$ e $jk_v v \exp(-(F\varphi_0)/RT) > 0$ se $j > 0$. Estes elementos descrevem as influências

das etapas químicas nas capacitâncias da DCE, que também podem ser responsáveis pelo comportamento oscilatório. No entretanto, a realização de todas essas influências desestabilizadoras na dupla camada dar-se-á nos valores paramétricos, afastados do limite de detecção, o que se mostrará abaixo.

Para investigar a estabilidade do estado estacionário, aplicamos ao conjunto de equações diferenciais (1) o critério Routh-Hurwitz. Evitando as expressões grandes, introduzimos as novas variáveis, reescrevendo o determinante conforme (18):

$$\frac{4}{\delta^2 V} \begin{vmatrix} -\kappa_1 - \Sigma - \Lambda & 0 & \Sigma & T \\ \Sigma & -\kappa_2 - X & T & \Omega \\ \Lambda & X & -\Sigma - T - \Omega & \end{vmatrix} \quad (18)$$

Abrindo os parênteses e aplicando o requisito $\text{Det } J < 0$, saliente do critério, obtemos a condição de estabilidade do estado estacionário, exposta conforme (19):

$$-\kappa_1(\kappa_2\Sigma + X\Sigma + \kappa_2T + \kappa_2\Omega + X\Omega) - \Sigma(\kappa_2\Sigma + \kappa_2T + \kappa_2\Omega + X\Omega) - \Lambda(\kappa_2T + \kappa_2\Omega + X\Omega) + \Sigma\kappa_2\Sigma < 0 \quad (19)$$

Ela obtém uma forma mais complexa que nos casos semelhantes [22-24] e descreve um sistema eletroanalítico eficiente, controlado pela difusão e cinética do processo ao mesmo tempo.

Haja vista o serem usadas as condições de pH, correspondentes ao ponto isoelétrico do ácido ibotênico, a estabilidade dele e do oxihidróxido de vanádio não é comprometida. Assim, o estado estacionário estável é eletroanaliticamente eficiente, o que corresponde à linearidade da dependência entre a concentração do analito e o parâmetro eletroquímico (neste caso, corrente).

A condição da instabilidade monotônica, relativa ao limite de detecção, para este sistema descreve-se conforme:

$$\kappa_1(\kappa_2\Sigma + X\Sigma + \kappa_2T + \kappa_2\Omega + X\Omega) - \Sigma(\kappa_2\Sigma + \kappa_2T + \kappa_2\Omega + X\Omega) - \Lambda(\kappa_2T + \kappa_2\Omega + X\Omega) + \Sigma\kappa_2\Sigma = 0 \quad (20)$$

Caso, em vez do ácido ibotênico, seja usado um analito cíclico, mas que é difícil de ionizar, os parâmetros α e β anular-se-ão, e o comportamento do sistema far-se-á menos dinâmico. O estado estacionário, porém, far-se-á mais estabilizado. Assim, todas as reações de redução podem ser apresentadas em suma, e, destarte, o conjunto de equações diferenciais (1) será análogo ao já descrito em [22-24].

CONCLUSÕES

Da análise do comportamento do sistema eletroanalítico, baseado em oxihidróxido de vanádio na detecção eletroquímica do ácido ibotênico na presença da muscazona, pode-se concluir que:

- O oxihidróxido de vanádio pode ser um modificador eficiente na determinação de ambos os ácidos no cátodo. Realiza-se a abertura do anel izoxazólico, com a redução subsequente do seu produto acíclico. A reversibilidade de VO(OH) obtém-se na etapa eletroquímica;
- O processo eletroanalítico é eficiente e controlado pela difusão e cinética dos processos;
- O comportamento oscilatório neste sistema é mais provável que nos semelhantes, haja vista o existirem mais processos a influenciarem a dupla camada elétrica e as suas capacidades. A realização deste tipo de comportamento obtém-se quando os valores dos parâmetros estão além do limite de detecção.

CONFLITOS DE INTERESSE

Os autores não têm conflitos de interesse a declarar.

REFERÊNCIAS

1. Q. Carboue, M. Lopez, *Amanita muscaria: Ecology, chemistry, myths, Encyclopedia*, **1**(3) 905–914 (2021).
2. F.I. Rampoll, P. Kamler, C.C. Carlino, F. Bedussi, The deceptive mushroom: Accidental *Amanita muscaria* poisoning, *Eur.J. Case Rep. Int. Med.*, **8**(2), 002212 (2021).
3. C.E. Housecroft, The fungus *Amanita Muscaria*: From neutoroxin to vanadium accumulation, *Chimia*, **73**, 96–97 (2019).
4. N. Vargas, S.C. Gonçalves, A.E. Franco-Molano *et al.*, In Colombia the Eurasian fungus *Amanita muscaria* is expanding its range into native, tropical, *Quercus humboldtii* forests, *Mycologia*, **111**(5), 758–771 (2019).

5. M. Voynova, A. Shkondrov, M. Kondeva-Burdina, I. Krasteva, Toxicological and pharmacological profile of *Amanita muscaria* (L.) Lam. – A new rising opportunity for biomedicine, *Pharmacia*, **67**(4), 317–323 (2020).
6. S. Modaberi, M. Shahbazi, N. Naghdi, F. Bagherzadeh, Effects of bilateral microinjections of ibotenic acid into neostriatal region and forced exercise on spatial learning and memory and anthropometric characteristics of male rats, *Koomesh J.*, **23**(5), 654–664 (2021).
7. M.A. Mikaszewska-Sokolewicz, S. Pankowska, M. Janiak, *et al.*, Coma in the course of severe poisoning after consumption of red fly agaric (*Amanita muscaria*), *Acta Biochim. Pol.*, **63**(1), 181–182 (2016).
8. H. Li, H. Zhang, Y. Zhang, *et al.*, Mushroom Poisoning Outbreaks — China, 2019, *China CDC Wkly.*, **2**(2), 19–24 (2020)
9. M.R. Lee, E. Dukan, I. Milne, *Amanita Muscaria* (Fly Agaric): From a shamanistic hallucinogen to the search for acetylcholine, *J. R. Coll. Physicians Edinb.*, **48**(1), 85–91 (2018).
10. ChemSpider: Search and share chemistry, Ibotenic acid. URL: <http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.5036193.html>, acesso aos 8 de abril de 2022.
11. K. Stebelska, Psychoactive drugs of fungal origin, psilocin, ibotenic acid, and muscimol, *Ther. Drug. Monit.*, **35**, 420–422 (2013).
12. M. Lumpert, S. Kretf, Catching flies with *Amanita muscaria*: traditional recipes from Slovenia and their efficacy in the extraction of ibotenic acid, *J. Ethnopharmacol.*, **187**, 1–8 (2016).
13. S. Lee, Y.S. Yu, S.R. Lee, K.H. Kim, Non-peptide secondary metabolites from poisonous mushrooms: overview of chemistry, bioactivity, and biosynthesis, *Nat. Prod. Rep.*, **39**, 512–559 (2022).
14. M. Voynova, A. Shkondrov, M. Kondeva-Burdina, I. Krasteva, *In vitro* effects of synthetic muscimol and an extract from *Amanita muscaria* on human recombinant MAOB enzyme, *Pharmacia*, **68**(1), 147–150 (2021).
15. A. Sawangjit, M. Harkotte, C. Oyanedel, *et al.*, Two distinct ways to form long-term object recognition memory during sleep and wakefulness, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **119**(34), e2203165119 (2022).

16. S. Obermaier, M. Müller, Ibotenic acid biosynthesis in the fly agaric is initiated by glutamate hydroxylation, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **59**, 12432–12435 (2020).
17. A. Poliwoda, K. Zielinska, M. Halama, P.P. Wieczorek, Determination of muscimol and ibotenic acid in mushrooms of Amanitaceae by capillary electrophoresis, *Electrophoresis*, **35**(18), 2593–2599 (2014)
18. P. Ginterova, B. Sokolova, P. Ondra, *et al.*, Determination of mushroom toxins ibotenic acid, muscimol and muscarine by capillary electrophoresis coupled with electrospray tandem mass spectrometry, *Talanta*, **125**, 242–247 (2014).
19. S. Deja, E. Jawien, I. Jasicka-Mysiak, Rapid determination of ibotenic acid and muscimol in human urine, *Magn. Reson. Chem.*, **52**(11), 711–714 (2014).
20. T. Sasaki, S. Hirokatsu, Yu. Hiradate, *et al.*, Behavioural effects in mice orally exposed to domoic acid or ibotenic acid are influenced by developmental stages and sex differences, *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, **558**, 175–182 (2021).
21. Y. Xu, X. Han, L. Zheng, S. Wei, Y. Xie, First investigation on charge-discharge reaction mechanism of aqueous lithium ion batteries: A new anode material of $\text{Ag}_2\text{V}_4\text{O}_{11}$ nanobelts, *Dalton Trans.*, **40**, 10751–10757 (2011).
22. V.V. Tkach, M.V. Kushnir, V.V. Kopiika, *et al.*, Theoretical description for ibotenic acid and muscazone determination in mushroom pulp and biological liquids over conducting polymer-modified electrode, *Biointerface Res. Appl. Chem.*, **13**, 275 (2023).
23. V.V. Tkach, M.V. Kushnir, L.V. Romaniv, *et al.*, The Theoretical description for ibotenic acid and muscimol electrochemical determinbation in mushroom pulp and mushroom-based alcoholic beverages on nano-CuS composite with conducting polymer, *Lett. Appl. NanoBioSci.*, **13**, 37 (2024).
24. V.V. Tkach, M.V. Kushnir, V.V. Kopiika, *et al.*, The theoretical description for amavadin ion electrochemical determination in *Amanita muscaria* mushroom pulp and extract by galvanostatic conducting polymer doping, *Biointerface Res. Appl. Chem.*, **13**, 400 (2023).
25. I. Das, N.R. Agrawal, S.A. Ansari, S.K. Gupta, Pattern formation and oscillatory electropolymerization of thiophene, *Ind. J. Chem. A*, **47**(12), 1798–1803 (2008).
26. K. Aoki, I. Mukoyama, J. Chen, Competition between polymerization and dissolution of poly(3-methylthiophene) films, *Russ. J. Electrochem.*, **40**, 280–285 (2004).

27. I. Das, N. Goel, N.R. Agrawal, S.K. Gupta, Growth patterns of dendrimers and electric potential oscillations during electropolymerization of pyrrole using mono-and mixed surfactants, *J. Phys. Chem.*, **114**, 12888–12896 (2010).
28. I. Das, N. Goel, S.K. Gupta, N.R. Agrawal, Electropolymerization of pyrrole: Dendrimers, nano-sized patterns and oscillations in potential in presence of aromatic and aliphatic surfactants, *J. Electroanal. Chem.*, **670**, 1–10 (2012).

COMO CITAR ESTE ARTIGO

V.V. Tkach, M.V. Kushnir, N.M. Storoshchuk, S.C. de Oliveira, O.V. Luganska, V.V. Kopiika, V.I. Domnich, S.M. Lukanova, Y.G. Ivanushko, V.G. Ostapchuk, S.P. Melnychuk, P.I. Yagodynets', J.I. Ferrão de Paiva-Martins, M.J. Monteiro, T.V. Morozova, V.O. Khrutba, A descrição teórica da detecção eletroanalítica do ácido ibotênico e da muscazona, assistida pelo compósito de oxihidróxido de vanádio com o polímero condutor, *Rev. Colomb. Cienc. Quim. Farm.*, **52**(3), 1208-1220 (2023). <https://doi.org/10.15446/rcciquifa.v52n3.112479>