

WYKORZYSTANIE ELEKTRONICZNEGO JĘZYKA DO ANALIZY ŻYWNOSCI

APPLICATION OF THE ELECTRONIC TONGUE FOR THE FOOD ANALYSIS

dr inż. Małgorzata Łabańska
IHAR-PIB Oddział w Boninie, e-mail: m.labanska@ihar.edu.pl

Streszczenie

Od wielu lat poszukiwane są nowe narzędzia analityczne, które pozwolą na szybszą, bardziej wydajną oraz tańszą analizę produktów spożywczych, za pomocą której w prosty sposób, dzięki pojedynczemu badaniu, możliwe jest otrzymanie wielu informacji o badanej próbce. Takimi urządzeniami są elektroniczne języki, które poprzez połączenie wielu czujników o częściowej selektywności z blokiem rozpoznawania obrazu pozwalają na uzyskanie ogólnej informacji o próbce, tzw. obrazu chemicznego. Praca przedstawia pokrótce historię powstania elektronicznego języka, jego budowę oraz przykładowe zastosowania do analizy produktów spożywczych.

Słowa kluczowe: analiza żywności, elektroniczny język, matryca czujnikowa

Abstract

For many years, new analytical tools have been developed to enable a faster, more efficient and less expensive analysis of food products, whereby a great deal of information about the sample is obtained easily through a single test. Such devices are electronic sensing devices which, by combining an array of partial selective sensors with a pattern recognition block, provide an overall chemical image of the sample. This paper briefly describes the history of the development of the electronic tongue, its construction and example applications for food analysis.

Keywords: electronic tongue, food analysis, sensor array

Rosnąca świadomość konsumentów oraz rozwój metod badawczych skutkuje coraz większą kontrolą produktów spożywczych. W celu zapewnienia najwyższej jakości oraz bezpieczeństwa produktów spożywczych każdy etap procesu produkcji, począwszy od surowców oraz sposobów ich pozyskiwania, przez przetwarzanie, transport, obrót handlowy, aż do konsumpcji poddawany jest kontroli (Kumirska i in. 2010). Jakość tych produktów określana jest na podstawie oceny sensorycznej, składu chemicznego, właściwości fizycznych, stopnia zanieczyszczenia mikrobiologicznego i toksycznego oraz sposobu przechowywania, pakowania i znakowania produktów (Śliwińska i in. 2014).

Na przestrzeni lat opracowano wiele metod laboratoryjnych, które służą jakościowej oraz ilościowej ocenie produktów spożywczych. Stosowane są klasyczne metody analityczne, takie jak metoda wagowa oraz miareczkowania, jak również metody instrumentalne. Większość laboratoriów jest wyposa-

żona również w nowoczesną aparaturę analityczną. Najbardziej rozpowszechnione są techniki rozdzielania wykorzystujące różnice w podziale składników między fazę ruchomą a stacjonarną, zwane technikami chromatograficznymi. Do najczęściej stosowanych należą: chromatografia cienkwarstwowa (TLC), wysokosprawna chromatografia cieczowa (HPLC) oraz chromatografia gazowa (GC). W zależności od celu analizy oraz rodzaju próbki chromatografy łączone są z odpowiednimi detektorami, np. spektrometrem mas (MS) czy spektrofotometrem UV-VIS (Sikorski 2007). Urządzenia te są jednak kosztowne, wymagają wyspecjalizowanego personelu, a przeprowadzona analiza jest skomplikowana i czasochłonna. Z tego powodu poszukiwane są alternatywne metody, umożliwiające szybką oraz niedrogą analizę próbek.

Konsumenci przywiązują znaczną wagę do cech jakości produktów, takich jak wygląd, zapach czy smak, które są w zasadzie niemożliwe do oceny za pomocą metod la-

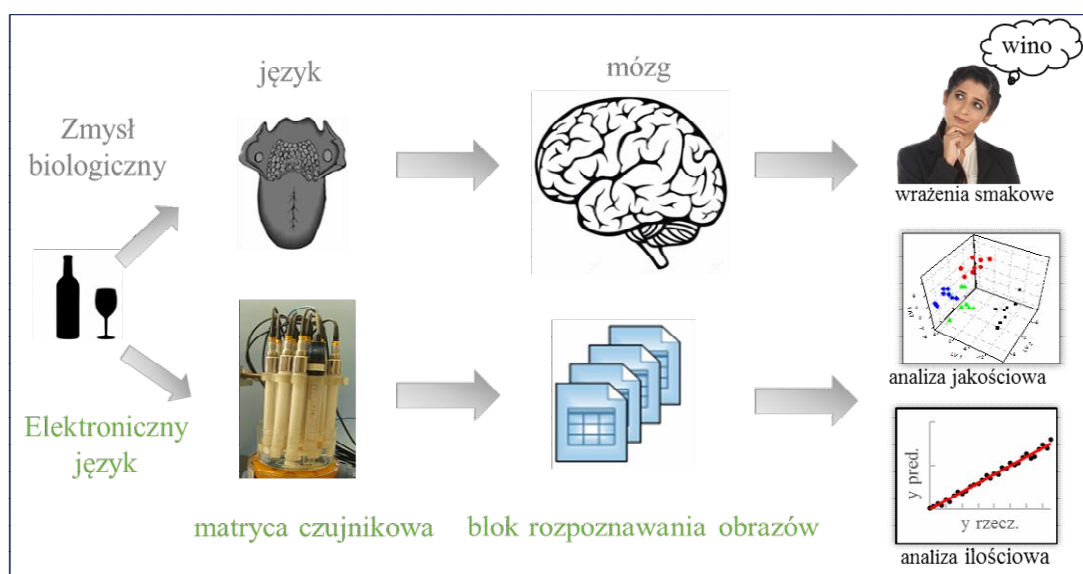
boratoryjnych. Z tego względu badania organoleptyczne przeprowadzane są z wykorzystaniem tzw. panelu sensorycznego. Jest to grupa przeszkolonych wolontariuszy, którzy na podstawie swoich wrażeń zmysłowych (wzrok, smak, zapach, dotyk) dokonują oceny organoleptycznej próbek. Jednakże ludzki zmysł smaku jest bardzo złożony i w dużej mierze indywidualny dla każdego człowieka, przez co wyniki badań organoleptycznych pozostają subiektywne (Woertz 2010). Możliwość obiektywnej oceny walorów zmysłowych przyniosłaby wiele korzyści w przemyśle spożywczym szczególnie w przypadku produktów takich jak alkohole, sery czy kawa, których cena zależy od walorów smakowych oraz marki. Stąd potrzeba opracowania nowoczesnych narzędzi analitycznych, umożliwiających szybką i niedrogą kontrolę produktów spożywczych oraz procesu ich wytwarzania wraz z poszukiwaniem obiektywnych metod oceny wrażeń zmysłowych, doprowadziła do rozwoju badań nad elektronicznymi zmysłami.

Elektroniczny język

Rozwój elektronicznych zmysłów (nosa oraz języka) był inspirowany biologicznymi narządami zmysłów ssaków. Zmysł węchu składa się z dużej liczby niespecyficznych receptorów, które reagują na lotne związki, a następnie bodźce są przenoszone przez układ nerwowy do mózgu, gdzie sieć neuronów przetwarza je na „wzory odpowiedzi”. Zmysł

smaku pracuje podobnie, jednak jest słabiej rozwinięty (ma mniej receptorów). Elektroniczny język w rzeczywistości może być traktowany jako daleki analog swojego biologicznego odpowiednika (Baldwin i in. 2011; Ciosek, Wróblewski 2007). Służy on do analizy próbek cieczy o złożonym składzie oraz do określania ich cech charakterystycznych. W przeciwieństwie do klasycznej analizy nie dostarcza bezpośredniej informacji na temat zawartości poszczególnych składników, ale tworzy tzw. „cyfrowy odcisk palca”, który porównywany jest z bazą danych urządzenia, analogicznie do ludzkiej pamięci.

Elektroniczny język składa się z matrycy czujników o częściowej selektywności (matryca chemoczuła) oraz tzw. bloku rozpoznawania obrazu (PARC, ang. Pattern Recognition System) (Vlasov i in. 2005). Matryca chemoczuła pełni funkcję podobną do receptorów na języku, których zadaniem jest zebranie informacji o próbce, natomiast metody chemometryczne (blok rozpoznawania obrazu), naśladując pracę mózgu, przetwarzają uzyskane dane i odpowiednio klasyfikują/rozpoznają badane obiekty (Ciosek, Wróblewski 2011). W każdym eksperymencie konieczny jest odpowiednio duży zbiór badanych próbek, który pozwoli utworzyć bazę danych urządzenia. Na rysunku 1 przedstawiono analogiczne do biologicznego zmysłu smaku etapy rozpoznawania za pomocą elektronicznego języka.



Rys. 1. Porównanie działania elektronicznego języka z jego biologicznym odpowiednikiem (Łabańska 2019)

Badania nad urządzeniami naśladującymi działanie biologicznych zmysłów prowadzono już na początku XX wieku. W latach 60. Moncrieff (1961) zaprezentował mechaniczne urządzenie pozwalające na rozróżnienie prostych oraz złożonych aromatów. Jednak dopiero 20 lat później, w 1982 r., badacze z Uniwersytetu Warwick (Wielka Brytania) skonstruowali urządzenie łączące matrycę czujników gazowych z metodami analizy wielowymiarowych danych, służące do rozpoznawania próbek gazowych. Urządzenie to było pierwszą udaną próbą opracowania tzw. inteligentnego „elektronicznego nosa” (Persaud, Dodd 1982). Od tamtego czasu opracowano wiele tego typu urządzeń zawierających różnorodne czujniki gazowe (Peris, Escuder-Gilabert 2009).

Obecnie na rynku dostępnych jest kilkanaście urządzeń do różnych zastosowań. Wśród nich popularne są modele PEN oferowane przez niemiecką firmę Airsense Analytics, modele FOX oraz najnowszy Heracles produkowane przez francuską firmę AlphaMOS (Schwarzböck 2012). Do tej pory elektroniczne nosy były wykorzystane m.in. do kontroli procesów produkcji żywności (Pinheiro i in. 2002), wykrywania chorób ludzkich i roślinnych (Chang i in. 2017, Wilson 2018) czy rozpoznawania skażenia produktów spożywczych spowodowanego patogenami (Berna i in. 2008).

W ostatnich latach laboratoryjny prototyp elektronicznego nosa został zastosowany do detekcji mokrej zgnilizny, bakteryjnej choroby ziemniaka. Zastosowane połączenie 5 czujników gazowych z odpowiednimi metodami analizy danych pozwoliło na rozróżnienie pomiędzy próbkami zdrowymi oraz zainfekowanymi, a także sklasyfikowanie próbek pod kątem poziomu zaawansowania choroby (Chang i in. 2017). Biondi i inni (2014) wykorzystali komercyjny system PEN 3 do rozpoznawania próbek ziemniaków porażonych brązową zgnilizną oraz bakteriozą pierścieniową ziemniaka. Eksperymenty przeprowadzono w skali laboratoryjnej, pośredniej oraz rzeczywistej. Otrzymane rezultaty wskazywały, że zastosowanie urządzenia do detekcji chorób bakteryjnych ziemniaka jest możliwe.

Kilka lat po skonstruowaniu pierwszego elektronicznego nosa opracowano analo-

giczne narzędzie analityczne do analizy próbek ciekłych, tzw. sensor smaku (ang. Taste Sensor) (Hayashi i in. 1990). W 1997 r. efektem międzynarodowej współpracy naukowców z włoskiego uniwersytetu Tor Vergata oraz Petersburskiego Uniwersytetu Państwowego było kolejne urządzenie, wyposażone w czujniki potencjometryczne, tzw. elektroniczny język (Vlasov i in. 1996). W kolejnych latach różnego rodzaju systemy typu elektroniczny język zostały z powodzeniem zastosowane w analizie żywności (Escuder-Gilabert, Peris 2010), medycynie (Lvova i in. 2009), ochronie środowiska (Mimendia i in. 201) czy farmacji (Łabańska, Ciosek-Skibińska, Wróblewski 2019). Pomimo szerokiego zakresu zastosowań na rynku oferowanych jest znacznie mniej urządzeń do analizy próbek ciekłych w porównaniu z gazowymi.

Warto zwrócić uwagę, że pomimo nazw nawiązujących do zmysłów biologicznych są to sztuczne instrumenty, które nie są w stanie działać dokładnie tak jak one (tj. rozpoznawać smaku czy zapachu), ale działają jak ich znacznie uproszczone analogi. W wielu przypadkach w celu weryfikacji uzyskanych wniosków przeprowadza się badania referencyjne z wykorzystaniem paneli sensorycznych lub modeli zwierzęcych (Legin, Kirsanov, del Valle 2019). Elektroniczne języki oferują możliwości wykraczające poza zdolności ludzkiego mózgu, takie jak obiektywność, powtarzalność, brak wątpliwości etycznych (dotyczących badań na ludziach i zwierzętach) oraz wrażliwość na niejadalne lub niebezpieczne związki chemiczne. Z drugiej strony, biologiczne zmysły pozwalają na odbieranie kombinacji wrażeń, smakowych i zapachowych oraz odpowiedzi z receptorów wzroku i dotyku, które często są trudne do rozróżnienia i naśladowania (Vlasov, Legin, Rudnitskaya 2008).

Zastosowanie elektronicznego języka do analizy żywności

Do tej pory opublikowano wiele prac, w których zaprezentowano różnorodne zastosowania systemów typu elektroniczny język. Analiza produktów spożywczych i napojów stanowi największą ich część. Różne rodzaje elektronicznych języków zostały wykorzystane do badania takich produktów jak: soki

owocowe, napoje bezalkoholowe, herbata, produkty ziołowe, jabłka, cebula, kiwi, pomidory, alkohol, kawa, mleko, oliwa z oliwek, piwo, ryż i mięso (Woertz i in. 2011). Początkowo celem badań było rozróżnianie różnego typu produktów spożywczych oraz produktów pochodzących od różnych producentów. Na podstawie tych badań potwierdzono, że elektroniczny język pozwala na klasyfikację m.in. kawy, piwa, soków owocowych oraz wód mineralnych pochodzących od różnych producentów (Legin i in. 199; Ciosek, Brzóska, Wróblewski 2004).

Toko (1994) wraz ze współpracownikami podjął próbę skonstruowania mapy smaku przy użyciu Sensora Smaku, a następnie wyrażenia smaków produktów spożywczych jako połączenie podstawowych smaków. W kolejnych latach urzędzenia te stosowano do analizy ilościowej. Zaprojektowane modele matematyczne pozwoliły przewidzieć m.in.

poziom zawartości fruktozy i glukozy w napojach bezalkoholowych (Dias i in. 2011), zawartość alkoholu, całkowitą kwasowość, pH, zawartość kwasu winowego i całkowitą zawartość polifenoli w próbkach wina (Legin i in. 1999, Cetó i in. 2012), a także właściwości organoleptyczne takie jak jasność, twardość, ton barwy czy gumowatość suszów jabłkowych (Kutyła-Olesiuk i in. 2013). Z czasem urzędzenia te wykorzystywano do rozwiązywania coraz bardziej skomplikowanych problemów badawczych, takich jak: ocena przydatności do spożycia ryb czy wykrywanie zafałszowań wina, oliwy z oliwek oraz mięs, które stanowią wyzwania również dla klasycznej analizy instrumentalnej. Systemy typu elektroniczny język z powodzeniem stosowane są do kontroli warzyw, owoców, zbóż, a także procesów ich przetwarzania. W tabeli 1 zebrano przykłady zastosowań tych urzędzeń w analizie żywności.

Tabela 1

Przykładowe zastosowania systemów typu elektroniczny język do analizy próbek spożywczych

Typ analizy	Cel analizy	Próbki	Literatura
Rozróżnianie produktów	rozpoznanie producenta	soki, mleko, tonik, piwo	Ciosek i in. 2005 Ciosek i in. 2006
	rozpoznanie producenta	woda mineralna i kranowa, soki, piwo	Lvova i in. 2002
Kontrola procesu produkcji	kontrola procesu fermentacji alkoholowej	piwo	Kutyła-Olesiuk i in. 2012
	monitorowanie procesu starzenia wina	wino	Apetrei i in. 2012
Ocena przydatności i czasu przechowywania	ocena zmiany smaku w czasie przechowywania	morele	Kantor i in. 2008
	kontrola czasu przechowywania	ryby	Gil i in. 2008
	monitorowanie jakości i czasu przechowywania	pasteryzowane mleko	Wei i in. 2013
Potwierdzenie autentyczności	wykrywanie fałszowania produktów	wino	Parra i in. 2006
	rozpoznawanie typu pyłku	miód	Dias i in. 2008
	rozróżnianie odmiany winorośli oraz pochodzenia	wino	Novakowski i in. 2011

Źródło: Łabańska 2019

Rozwiązaniem mającym na celu udoskonalenie urządzenia typu elektroniczny język jest wprowadzenie tzw. matrycy hybrydowej, która zawiera czujniki różnego typu, np. potencjometryczne czy woltamperometryczne. W ten sposób dostarczanych jest więcej informacji o próbkach, co pozwala uzyskać lepsze wyniki klasyfikacji/rozróżniania czy przewidywania cech ilościowych (Winquist 2000).

W ostatnich latach intensywnie rozwijanym kierunkiem badań jest tzw. bioelektroniczny język, którego matryca czujnikowa zawiera biosensory (Wasilewski, Kamysz, Gębicki 2020). W takich urządzeniach warstwa receptorowa czujników zawiera elementy biologiczne takie jak kubki smakowe czy receptory smaku, zbliżając w ten sposób działanie urządzenia do biologicznego pierwowzoru. Jak dotąd ten typ urządzeń wciąż jest na wstępnym etapie badań naukowych.

Podsumowanie

Od wielu lat poszukiwane są nowe techniki, które pozwolą na szybszą, bardziej wydajną oraz tańszą analizę, za pomocą której w prosty sposób, dzięki jednej analizie, uzyskamy wiele informacji o próbce. Takimi urządzeniami są elektroniczne języki, które poprzez połączenie wielu czujników o częściowej selektywności z blokiem rozpoznawania obrazu pozwalają na uzyskanie ogólnej informacji o badanej próbce, tzw. obrazu chemicznego. Dostępne są komercyjne urządzenia typu elektroniczny język, jednak wiele laboratoriów badawczych konstruuje własne systemy analityczne. Zakres ich zastosowań, początkowo ograniczony do produktów spożywczych, poszerzył się o monitorowanie bioprocessów, analizę próbek klinicznych, środowiskowych i innych. Nadal jednak analiza żywności stanowi znaczną część. Urządzenia tego typu stanowią alternatywę lub uzupełnienie skomplikowanych i kosztownych klasycznych technik analitycznych, umożliwiając badanie próbek bez etapu ich przygotowania. Dodatkowo pozwalają rozwiązać złożone zadania badawcze, które nie zależą tylko od jednej cechy próbki, np. potwierdzenie autentyczności wina. Wprowadzenie kolejnych udoskonaleń, takich jak hybrydowe matryce oraz bioczujniki, mają na

celu poszerzenie zakresu zastosowań oraz zwiększenie użyteczności tych urządzeń.

Elektroniczny język oraz elektroniczny nos mogą znaleźć zastosowanie we wczesnej diagnostyce chorób roślin, gdzie pozwolą na szybkie i tanie rozpoznanie próbek odbiegających od normy i skierowanie ich do dalszej analizy, np. PCR. Warto jednak pamiętać o tym, że urządzenia te jak dotychczas nie są w stanie ocenić wrażeń smakowych. Chociaż wszystkie zastosowania przedstawione w niniejszej pracy wydają się bardzo obiecujące, elektroniczne języki są nadal we wczesnej fazie rozwoju, zwłaszcza systemy bioelektroniczne.

Literatura

1. **Apetrei I. M., Rodríguez-Méndez M. L., Apetrei C., Nevares I., Del Alamo M., De Saja J. A. 2012.** Monitoring of evolution during red wine aging in oak barrels and alternative method by means of an electronic panel test – *Food Res. Int.* 45: 244-249;
2. **Baldwin E. A., Bai J., Plotto A., Dea S. 2011.** Electronic noses and tongues: applications for the food and pharmaceutical industries – *Sensors* 11: 4744-4766;
3. **Berna A. Z., Trowell S., Cynkar W., Cozzolino D. 2008.** Comparison of metal oxide-based electronic nose and mass spectrometry-based electronic nose for the prediction of red wine spoilage – *J. Agric. Food Chem.* 56: 3238-3244;
4. **Biondi E., Blasioli S., Galeone A., Spinelli F., Cellini A., Lucchese C., Braschi I. 2014.** Detection of potato brown rot and ring rot by electronic nose: From laboratory to real scale – *Talanta* 129: 422-443;
5. **Cetó X., Gutiérrez J. M., Gutiérrez M., Céspedes F., Capdevila J., Mínguez S., Jiménez-Jorquera C., Del Valle M. 2012.** Determination of total polyphenol index in wines employing a voltammetric electronic tongue – *Anal. Chim. Acta* 732: 172-179;
6. **Chang Z., Lv J., Qi H., Ma Y., Chen D., Xie J., Sun Y. 2017.** Bacterial infection potato tuber soft rot disease detection based on electronic nose. *Open Life Sci.* 12: 379-385;
7. **Ciosek P., Wróblewski W. 2007.** Sensor arrays for liquid sensing–electronic tongue systems – *Analyst* 132: 963-978;
8. **Ciosek P., Wróblewski W. 2011.** Potentiometric Electronic Tongues for Foodstuff and Biosample Recognition-An Overview – *Sensors* 11: 4688-4701;
9. **Ciosek P., Brzóška Z., Wróblewski W. 2004.** Classification of beverages using a reduced sensor array. – *Sens. Actuators B: Chem.* 103: 76-83;
10. **Ciosek P., Brzóška Z., Wróblewski W. 2006.** Electronic tongue for flow-through analysis of beverages – *Sens. Actuators B: Chem.* 118: 454-460;
11. **Ciosek P., Sobański**

- T., Augustyniak E., Wrób-lewski W. 2005.** ISE-based sensor array system for classification of foodstuffs – *Measure. Sci. Techn.* 17: 6-11; **12. Dias L. G., Peres A. M., Barcelos T. P., Morais J. S., Machado A. A. S. C. 2011.** Semi-quantitative and quantitative analysis of soft drinks using an electronic tongue – *Sens. Actuators B: Chem.* 154: 111-118; **13. Dias L. A., Peres A. M., Vilas-Boas M., Rocha M. A., Estevinho L., Machado A. A. 2008.** An electronic tongue for honey classification – *Microchim. Acta* 163: 97-102; **14. Escuder-Gilabert L., Peris M. 2010.** Review: Highlights in recent applications of electronic tongues in food analysis – *Anal. Chim. Acta* 665: 15-25; **15. Gil L., Barat J. M., Escriche I., Garcia-Breijo E., Martínez-Máñez R., Soto, J. 2008.** An electronic tongue for fish freshness analysis using a thick-film array of electrodes – *Microchim. Acta* 163: 121-129; **16. Hayashi K., Yamanaka M., Toko K., Yamafuji K. 1990.** Multichannel taste sensor using lipid membranes – *Sens. Actuators B: Chem.* 2: 205-213; **17. Kantor B., Hitka G., Fekete A., Balla C. 2008.** Electronic tongue for sensing taste changes with apricots during storage – *Sens. Actuators B: Chem.* 131: 43-47; **18. Kumirska J., Gołębiowski M., Paszkiewicz M., Bychowska A. 2010.** Zakres, rozwój i znaczenie analizy żywności. [W:] *Skrypt z ochrony środowiska. Analiza żywności.* Wyd. UG Gdańsk: 9-12; **19. Kutyla-Olesiuk A., Nowacka M., Wesoly M., Ciosek P. 2013.** Evaluation of organoleptic and texture properties of dried apples by hybrid electronic tongue – *Sens. Actuators B: Chem.* 187: 234-240; **20. Kutyla-Olesiuk A., Zaborowski M., Prokaryn P., Ciosek P. 2012.** Monitoring of beer fermentation based on hybrid electronic tongue – *Bioelectrochem.* 87: 104-113; **21. Legin A., Kirsanov D., del Valle M. 2019.** Avoiding nonsense in electronic taste sensing – *Trend Anal. Chem.* 121: 115675; **22. Legin A., Rudnitskaya A., Vlasov Y., Di Natale C., Davide F., D'Amico A. 1997.** Tasting of beverages using an electronic tongue – *Sens. Actuators B: Chem.* 44: 291-296; **23. Legin A., Rudnitskaya A., Vlasov Y., Di Natale C., Mazzone E., D'Amico A. 1999.** Application of electronic tongue for quantitative analysis of mineral water and wine – *Electroanal.* 11: 814-820; **24. Lvova L., Martinelli E., Dini F., Bergamini A., Paolesse R., Di Natale C., D'Amico A. 2009.** Clinical analysis of human urine by means of potentiometric electronic tongue – *Talanta* 77: 1097-1104; **25. Lvova L., Kim S. S., Legin A., Vlasov Y., Yang J. S., Cha G. S., Nam H. 2002.** All-solid-state electronic tongue and its application for beverage analysis – *Anal. Chim. Acta* 468: 303-314; **26. Łabańska M. 2019.** Badania nad zastosowaniem elektronicznego języka do rozpoznawania próbek farmaceutycznych. *Rozpr. dokt. Politech. Warsz.* 27. **Łabańska M., Ciosek-Skibińska P., Wróblewski W. 2019.** Critical Evaluation of Laboratory Potentiometric Electronic Tongues for Pharmaceutical Analysis – An Overview. – *Sensors* 19: 5376-5392; **28. Mimendia A., Gutiérrez J. M., Leija L., Hernández P. R., Favari L., Muñoz R., del Valle M. 2010.** A review of the use of the potentiometric electronic tongue in the monitoring of environmental systems – *Environ. Model. Softw.* 25: 1023-1030; **29. Moncrieff R. W. 1961.** An instrument for measuring and classifying odors – *J. Appl. Physiol.* 16: 742-748; **30. Novakowski W., Bertotti M., Paixão T. R. 2011.** Use of copper and gold electrodes as sensitive elements for fabrication of an electronic tongue: Discrimination of wines and whiskies – *Microchem. J.* 99: 145-151; **31. Parra V., Arrieta Á. A., Fernández-Escudero J. A., Rodríguez-Méndez M. L., De Saja J. A. 2006.** Electronic tongue based on chemically modified electrodes and voltammetry for the detection of adulterations in wines – *Sens. Actuators B: Chem.* 118: 448-453; **32. Peris M., Escuder-Gilabert L. 2009.** A 21st century technique for food control: Electronic noses – *Anal. Chim. Acta* 638:1-15; **33. Persaud K., Dodd G. 1982.** Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose – *Nature* 299: 352-355; **34. Pinheiro C., Rodrigues C. M., Schäfer T., Crespo J. G. 2002.** Monitoring the aroma production during wine-must fermentation with an electronic nose – *Biotechnol. Bioeng.* 77: 632-640; **35. Schwarzböck T. 2012.** Market Review on Available Instruments for Odour Measurements. Berlin, Germany; **36. Sikorski Z. E. 2007.** *Chemiczne metody badania produktów żywnościowych.* [W:] *Chemia żywności. T. 3. Pr. zbior. pod red. Z. E. Sikorskiego:* 226-235; **37. Śliwińska M., Wiśniewska P., Dymerski T., Namiesnik J., Wardencki W. 2014.** Food analysis using artificial senses – *J. Agric. Food Chem.* 62: 1423-1448; **38. Toko K. 1994.** Multichannel taste sensor using electric potential changes in lipid membranes – *Biosens. Bioelectron.* 9: 359-364; **39. Vlasov Y. G., Legin A., Rudnitskaya A. M. 2008.** Electronic tongue: Chemical Sensor Systems for Analysis of Aquatic Media – *Russ. J. Gen. Chem.* 52: 101-112; **40. Vlasov Y. G., Legin A. V., Rudnitskaya A. M., Di Natale C., D'Amico A. 1996.** Multisensor system with an array of chemical sensors and artificial neural networks (electronic tongue) for quantitative analysis of multicomponent aqueous solutions – *Russ. J. Appl. Chem.* 69: 848-853; **41. Vlasov Y., Legin A., Rudnitskaya A., Di Natale C., D'Amico A. 2005.** Nonspecific sensor arrays (electronic tongue) for chemical analysis of liquids (IUPAC Technical Report) – *Pure Appl. Chem.* 77, 11: 1965-1983; **42. Wasi-**

- lewski T., Kamysz W., Gębicki J. 2020.** Bioelectronic tongue: Current status and perspectives – *Biosens. Bioelectron.* 150: 111923; **43. Wei Z., Wang J., Zhang X. 2013.** Monitoring of quality and storage time of unsealed pasteurized milk by voltammetric electronic tongue – *Electrochim. Acta* 88: 231-239; **44. Wilson A. D. 2018.** Applications of electronic-nose technologies for noninvasive early detection of plant, animal and human diseases – *Chemosensors* 6: 45; **45. Winqvist F., Holmin S., Krantz-Rülcker, C. Wide P., Lundström I. 2000.** A hybrid electronic tongue – *Anal. Chim. Acta* 406: 147-157; **46. Woertz K., Tissen C., Kleinebudde P., Breitzkreutz J. 2010.** Performance qualification of an electronic tongue based on ICH guideline Q2 – *J. Pharm. Biomed. Anal.* 51: 497-506; **47. Woertz K., Tissen C.; Kleinebudde P., Breitzkreutz J. 2011.** Taste sensing systems (electronic tongue) for pharmaceutical applications – *Int. J. Pharm.* 417: 256-271

