Оригинальная статья / Original article
УДК 663.423
DOI: https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-479-486

Исследование ароматобразующих компонентов хмеля с применением химических сенсоров

© А.В. Коростелев, П.В. Рукавицын, И.В. Новикова, Т.А. Кучменко, Р.У. Умарханов, А.С. Муравьев

Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Российская Федерация

Резюме: *Проведен подбор массива сенсоров с учетом специфики компонентного состава эфирного масла хмеля. Исследована интенсивность аромата нескольких сортов хмеля путем применения высокочастотных пьезоэлектрических резонаторов с высокой чувствительностью, низкими пределами обнаружения легколетучих компонентов. Аналитические сигналы массива сенсоров в парах равновесной газовой фазы проб были скомпонованы в многомерный набор данных, представленных в виде «визуального отпечатка» (диаграммы построены по максимальным откликам сенсоров в равновесной газовой фазе образцов в течение временного интервала 60 с). Данные для образцов с приемлемыми органолептическими характеристиками, соответствующими нормативным документам, принимали за стандарт. Для исследуемых образцов отклики химических сенсоров в равновесной газовой фазе были представлены в виде суммарного сигнала и сопоставлены с «визуальным отпечатком» максимумов для стандарта в программном обеспечении, рассчитаны площади фигур отпечатков S_{Σ}, $Г_{ц.с.}$. В качестве дополнительных характеристик были применены 5 параметров идентификации A_{ij}, рассчитанные по сигналам отдельных сенсоров в газовой фазе анализируемых образцов и выбранных стандартов. При относительном различии параметров фигур «визуального отпечатка» менее чем на 20% была установлена идентичность состава анализируемой пробы и соответствующего стандарта. При относительном различии более 20% параметров фигур сигналов пробу считали не идентичной выбранному стандарту. Результаты исследований использованы для установления идентичности или аутентичности проб гранулированного хмеля из разных партий.*

Ключевые слова*: хмель, аромат, эфирные масла, химические сенсоры, легколетучие компоненты*

Информация о статье: *Дата поступления 27 марта 2020 г.; дата принятия к печати 31 августа 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2020 г.*

Для цитирования: Коростелев А.В., Рукавицын П.В., Новикова И.В., Кучменко Т.А., Умарханов Р.У., Муравьев А.С. Исследование ароматобразующих компонентов хмеля с применением химических сенсоров. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология.* 2020. Т. 10. N 3. С. 479–486. https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-479-486

Study of hop aroma components using chemical sensors

Alexey V. Korostelev, Pavel V. Rukavitsyn, Inna V. Novikova, Tatyana A. Kuchmenko, Ruslan U. Umarkhanov, Aleksandr S. Muravev

Voronezh state university of engineering technologies, Voronezh, Russian Federation

Abstract: *An array of sensors was selected taking into account the specific component composition of the essential oil contained in the hop plant. The aroma intensity of several hop varieties was investigated using high-frequency piezoelectric resonators with a high sensitivity and low detection limits for volatile components. Analytical signals of the sensor array in the vapour of the equilibrium gas phase of the samples were assembled into a multidimensional data set, presented in the form of a "visual imprint" (diagrams were plotted according to the maximum responses of the sensors in the equilibrium gas phase of the samples during a time interval of 60 s). Data for the samples with acceptable organoleptic characteristics complying with regulatory documents were taken as the standard. For the samples under study, the responses of chemical sensors in the equilibrium gas phase were presented in the form of a total signal and compared with the "visual imprint" of the maxima for the standard; the areas of indentation figures were calculated – S_{Σ}, $G_{c.s.}$. As*

additional characteristics, 5 identification parameters A_{ij} were used, calculated from the signals of individual sensors in the gas phase of the analyzed samples and selected standards. The identity between the composition of the sample under analysis and the corresponding standard was established, when the relative difference in the parameters of the "visual imprint" figures did not exceed 20%. Conversely, a sample was considered not identical to the selected standard, when the relative difference was higher than 20%. The experimental results were used to establish the identity or authenticity of hop pellet samples from different batches.

***Keywords**: hops, aroma, essential oils, chemical sensors, volatile components*

***Information about the article:** Received March 27, 2020; accepted for publication August 31, 2020; available online September 30, 2020.*

***For citation**:* Korostelev AV, Rukavitsyn PV, Novikova IV, Kuchmenko TA, Umarkhanov RU, Muravev AS. Study of hop aroma components using chemical sensors. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology.* 2020;10(3):479–486. (In Russian) https://doi.org/10.21285/2227-2925-2020-10-3-479-486

ВВЕДЕНИЕ

Хмелевое эфирное масло придает хмелю присущий ему специфический аромат. Хмелевое масло – смесь летучих маслообразных веществ с приятным ароматом, содержащихся в основном в лупулине. Эфирное масло содержит около 300 соединений, компоненты эфирного масла состоят из двух фракций: углеводородной (40–80 %) и кислородосодержащей. Большую часть (60–80 %) углеводородной фракции составляют мирцен, кариофиллен, гумулен, гераниол, линалоол и фарнезен. Мирцен придает аромату остроту и может быть причиной резкого аромата (в хмеле с «тонким» ароматом его не более 50 %). Содержание гумулена положительно сказывается на аромате, поэтому в сортах с «тонким» ароматом его содержание выше. При хранении хмеля под влиянием кислорода воздуха, а также в результате активности ферментов и жизнедеятельности микроорганизмов происходят окислительные и биохимические процессы, оказывающие влияние на качество хмеля и пива [1, 2].

Качество и безопасность гранулированного хмеля как сырья для пивоваренного производства контролируют по набору физико-химических и органолептических показателей. При постоянстве и соответствии нормам физико-химических показателей проб гранулированного хмеля на производстве возникает проблема в оценке различий аромата, определяющего в процессе дальнейшего производства органолептические свойства пива. Органолептическая объективная оценка аромата предполагает наличие не менее 5 квалифицированных дегустаторов, что невыполнимо для малотоннажных производств. Органолептический анализ проб хмеля достаточно длителен, результаты анализа зависят от многих факторов, и в случае изучения данных объектов воспроизводимость результатов и их математическая обработка являются сложными задачами. Не менее важным является решение задач контроля воспроизводимости аромата разных партий хмеля одного производителя (или нескольких производителей) с целью сохранения прослеживаемости схожих органолептических свойств пива. Актуальна апробация сортов хмеля для приготовления разнообразных сортов пива, в том числе с применением сухого охмеления [7–12].

Цель работы – экспресс-оценка аромата сортов хмеля с помощью системы искусственного интеллекта. Задачей исследования являлись: подбор массива сенсоров с учетом специфики компонентного состава эфирного масла хмеля; исследование интенсивности аромата сортов хмеля для установления идентичности или аутентичности проб гранулированного хмеля из разных партий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Применяли образцы хмеля сорта Перле урожаев 2014, 2015 гг. Хмель урожая 2015 г. (стандарт 1 – С1) – тип 45, α = 7,0%; хмель урожая 2014 г. (стандарт 2 – С2) – тип 45, α = 10,0%. Провели сравнение обоих стандартов с анализируемым образцом из партии, для которой нужно доказать соответствие или принадлежность продукции одному из производителей стандартов 1 или 2. Исследования идентичности проб гранулированного хмеля по запаху с применением химических сенсоров проводили в статическом детектирующем устройстве «пьезоэлектронный нос» (в ООО «Сенсорика – новые технологии»). Матрица прибора сформирована из пьезорезонаторов с различными пленками сорбентов на обеих сторонах кристалла, обеспечивающего высокую чувствительность, низкий предел обнаружения, простоту работы, экспрессность анализа без сложной пробоподготовки. Устройство позволяет обеспечить одновременность детектирования нескольких компонентов легколетучей фракции запаха, удобную визуализацию индивидуального профиля химического состава запаха проб, сохранение и сравнение их в любое время, в том числе удаленно в программном обеспечении. В результате получают качественные и количественные критерии, позволяющие объективно принимать решение о степени идентичности проб гранулированного

хмеля как для оценки воспроизводимости аромата, так и оценки изменений в процессе его хранения [3–6]. Идентичность проб гранулированного хмеля по запаху устанавливали с применением химических сенсоров, что включало подготовку пробы, отбор равновесной газовой фазы и детектирование легколетучих компонентов.

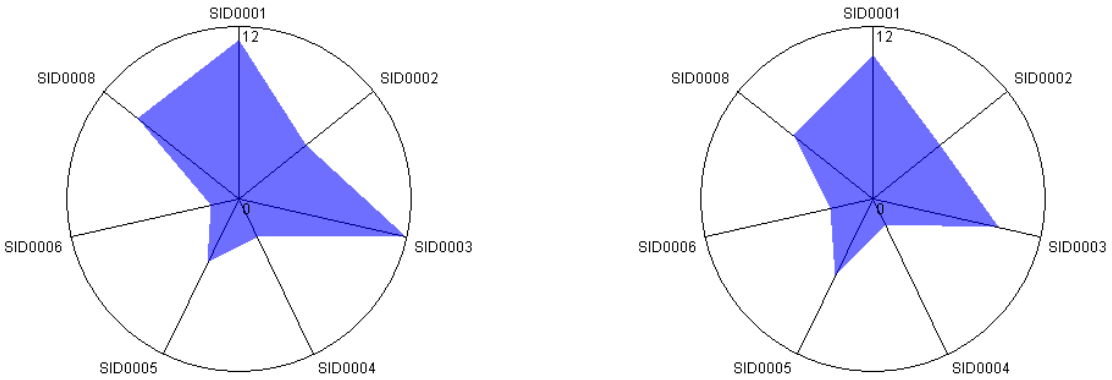
Осуществляли подбор системы сенсоров для проведения исследований образцов хмеля.

Для модификации электродов семи пьезокварцевых резонаторов АТ-среза с базовой частотой колебаний 10,0 МГц применяли растворы поливинилпирролидона, (ПВП), полиэтиленгликоль фталата (ПЭГФ), полиэтиленгликоль сукцината (ПЭГСк), полиэтиленгликоля (ПЭГ-2000), дициклогексана-18-краун-6 (18К6), пчелиного клея (прополис) (ПК), полиэтиленгликоль себацината (ПЭГСб). Тонкие пленки сорбентов формировали нанесением микрошприцем их растворов на тензочувствительную область пьезокварцевых резонаторов (электродов). При выборе покрытий электродов учитывали необходимость идентификации веществ, определяющих аромат гранулированного хмеля, его индивидуальность для разных наименований и производителей. Избыток растворителя удаляли в сушильном шкафу в течение 15–20 мин при температуре 40 ^{o}C. Чувствительность по массе адсорбируемых молекул данным набором сенсоров составляет не менее 8 Гц/10 нг сорбата, предел обнаружения летучих соединений наиболее чувствительного сенсора 1 составляет 150 нг/дм^3.

Пробу гранулированного хмеля в нативном состоянии массой 5–10 г. помещали в стеклянный бюкс на ½ от объема. Герметично закрывали инертной мягкой мембраной, выдерживали в течение 20 мин, отбирали стерильным шприцем 3 см^3 равновесной газовой фазы над пробой, вкалывали пробу в закрытую ячейку детектирования.

При диффузии легколетучих веществ в околосенсорное пространство ячейки детектирования и их адсорбции на пленках химических сенсоров изменялись частоты колебаний кварцевой пластины химических сенсоров, которые регистрировали в программном обеспечении в течение 60 с с шагом 1 с.

После измерению регенерация сенсора (полное восстановление начальной частоты колебаний) производили с помощью обработки сенсора осушенным лабораторным воздухом, подающимся в ячейку с помощью компрессора в течение 4–6 с. Аналитическим сигналом массива сенсоров в парах равновесной газовой фазы проб, принимаемых за стандарт и соответствующих по показателям нормативным документам, с приемлемыми органолептическими характеристиками являлся многомерный набор данных, представляемых в виде «визуального отпечатка» максимумов (рис. 1). Сопоставляли «визуальные отпечатки» анализируемых образцов и стандартов, рассчитывали площади и другие параметры фигур с помощью специального программного обеспечения [13–15]. При относительном различии параметров фигур менее чем на 20 % делали вывод об идентичности состава анализируемой пробы и соответствующего стандарта. При относительном различии более 20% различия в составе смеси легколетучих соединений считали значимыми, а пробу – не идентичной выбранному стандарту.



Стандарт 1 Стандарт 2

a b

Рис. 1. «Визуальные отпечатки» максимумов для образцов проб хмеля разных производителей: стандарт 1 (a) и стандарт 2 (b). По осям – номера сенсоров с различными покрытиями, по вертикали – максимальные отклики сенсоров за время измерения (ΔF_{max}, Гц)

Fig. 1. "Visual imprints" of maximums for hop samples from different manufacturers. Standard 1 (a) and Standard 2 (b). The axes show the sensor numbers with different coatings. Vertically, the maximum sensor responses during the measurement (ΔF_{max}, Hz) are given

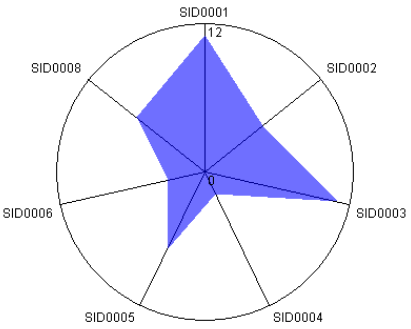
При совпадении физико-химических показателей, измеренных другими методами (например, ВЭЖХ-анализ), выявление значимых различий свидетельствовало об изменении аромата партии хмеля, что может приводить к изменению органолептических показателей пива. Снижение степени идентичности «визуальных отпечатков» максимумов можно объяснить нарушением технологии производства гранулированного хмеля, изменением сорта или качества сырья, порчей сырья, несоблюдением условий хранения хмеля и др. [16–20].

Продолжительность анализа с учетом пробоподготовки составляла 25 мин при двухкратном повторении измерения, время измерения – 1 мин; число измерений без обновления массива сенсоров – 150. Продолжительность повторного нанесения пленок на электроды пьезорезонаторов – не более 45 мин.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Провели анализ образца гранулированного хмеля (анализируемый образец) из партии, для которой нужно было доказать соответствие или принадлежность продукции одному из производителей (стандарту 1 или 2) (рис. 2). По физико-химическим показателям анализируемый образец соответствует всем требуемым нормам для продукции всех производителей и соответствует стандартам – образцам двух лидеров рынка гранулированного хмеля 1 и 2. При этом вызывал сомнение аромат образца, по которому трудно доказать соответствие ранее реализованной партии гранулированного хмеля производителя 1. Для измерения качественного и количественного состава легколетучей фракции запаха всех проб и их сравнения применен набор химических сенсоров в приборе «пьезоэлектронный нос».

Аналитическим сигналом массива сенсоров в парах равновесной газовой фазы проб, принимаемых за стандарт и соответствующих по показателям нормативным документам, с приемлемыми органолептическими характеристиками запаха являлся многомерный набор данных, представленных в виде «визуального отпечатка» максимумов. Диаграммы построены по максимальным откликам сенсоров в равновесной газовой фазе образцов за 60 с. «Визуальные отпечатки» максимумов для анализируемого образца (см. рис. 2) и стандартов (см. рис. 1) сопоставляли в программном обеспечении, рассчитывали их площадь S_Σ, Гц.с и другие характеристики.



Анализируемый образец

Рис. 2. «Визуальный отпечаток» максимумов для анализируемого образца гранулированного хмеля, для которого необходимо установить идентичность пробам стандартов 1 или 2

Fig. 2. “Visual imprint” of the maximum for the analyzed granular hop to ascertain the identity to Standard 1 or 2

Площадь «визуальных отпечатков» сигналов сенсоров в большей степени характеризует интенсивность запаха образцов. Качественный химический состав смеси детектируемых сенсорами соединений, формирующих легколетучую фракцию запаха, отражает набор расчетных параметров идентификации A_{ij}, рассчитанных по сигналам отдельных сенсоров в парах анализируемого образца и выбранных стандартов как частное откликов двух сенсоров (таблица). Это относительная характеристика сравнения чувствительности двух сенсоров по отношению к одному и тому же набору соединений (безразмерная величина). Для массива из семи сенсоров таких параметров может быть 24. Но для каждого вида смеси соединений выбираются наиболее представительные показатели (минимаксные значения набора). Таких показателей для анализируемых проб 4 и рассчитаны они по сигналам сенсоров, проявляющих сродство и селективность к спиртам, кислотам, аминам, альдегидам, специфическим ароматическим соединениям.

Параметры идентификации
Identification Parameters

Вид пробы	S_Σ, Гц.с	Относительное изменение S_Σ, %	Вид параметра A_{ij}			
			1	*2*	*3*	*4*
Стандарт 1	**123***		0,27	1,33	0,67	2,0
Стандарт 2	**98**		**0,20***	1,29	**1,5**	**3,0**
Анализируемый образец (А)	**112**		**0,18**	1,57	**1,5**	**3,0**
Стандарт 1 – А		9				
Стандарт 2 – А		14				
Совпадение показателей	Стандарт 1 – А	X	–	–	–	–
	Стандарт 2 – А	X	X	–	X	X

*Отмечены параметры, близкие друг другу; X – совпадение показателей.

По форме «визуального отпечатка» максимумов и относительной разнице площадей для анализируемого образца и стандартов 1 и 2 не установлено существенных отличий. По сравнению со стандартами 1 и 2 относительное изменение площади «визуального отпечатка» максимумов для анализируемой пробы менее 20%. Но с учетом дополнительных параметров A_{ij} анализируемый образец отличался от стандарта 1 на 80% (4 из 5 выбранных параметров различаются), а от стандарта 2 – на 20% (отличался 1 из 5 выбранных показателей). Различия в аромате анализируемой пробы гранулированного хмеля от стандарта 1 значимы, от стандарта 2 – не значимы. С учетом задачи (доказать соответствие какому-либо из стандартов) принимали, что анализируемый образец по составу легколетучей фракции запаха идентичен стандарту 2, а значит, не соответствует продукции производителя более ранних партий хмеля со стандартом 1.

Продолжительность анализа с учетом пробоподготовки составила 25 мин с учетом двукратного повторения измерения, время измерения – 1 мин.

ВЫВОДЫ

Исследование аромата образцов хмеля с помощью химических сенсоров может обеспечить экспрессность анализа хмеля без сложной пробоподготовки, с высокой чувствительностью, низкими пределами обнаружения легколетучих компонентов аромата. Чувствительность химических сенсоров, модифицированных различными фазами сорбентов малой массы, позволяет провести одновременно детектирование нескольких компонентов легколетучей фракции аромата (при применении одновременно семи разнохарактерных химических сенсоров). Возможна визуализация индивидуального профиля химического состава запаха образцов, сохранение и сравнение их в программном обеспечении в любое время, в том числе удаленно.

Метод исследования обеспечивает получение качественных (параметры А) и количественных (площадь «визуального отпечатка») критериев, позволяющих объективно идентифицировать пробы сортового хмеля разных лет урожая и определить изменения их органолептических характеристик в процессе хранения. Отклики химических сенсоров в парах равновесной газовой фазы фиксируются в течение 60 с и формируются в виде суммарного сигнала в «визуальный отпечаток» максимумов, который сопоставляется в программном обеспечении прибора с «визуальным отпечатком» максимумов для стандарта. При относительном различии параметров фигур менее чем на 20 % делается вывод об идентичности состава анализируемой пробы и соответствующего стандарта, при относительном различии более 20% – различия в составе смеси легколетучих соединений считаются значимыми, а проба – не идентичной выбранному стандарту.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кунце В. Технология солода и пива; пер. с нем. СПб.: Профессия, 2001. 912 с.

2. Мелединa Т.В. Сырье и вспомогательные материалы в пивоварении. СПб.: Профессия, 2003. 304 с.

3. Кучменко Т.А. Химические сенсоры на основе пьезокварцевых микровесов. В кн.: Проблемы аналитической химии; под ред. Ю.Г. Власова. Т. 14. Химические сенсоры. М.: Наука, 2011. С. 127–202.

4. Roy R.B., Tudu B., Bandyopadhyay R., Bhattacharyya N. Application of electronic nose and tongue for beverage quality evaluation // Engineering Tools in the Beverage Industry. 2019. Vol. 3. P. 229–254. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815258-4.00008-1

5. Кучменко Т.А., Шуба А.А., Бельских Н.В. Пример решения идентификационных задач в методе пьезокварцевого микровзвешивания смесей некоторых органических соединений // Аналитика и контроль. 2012. Т. 16. N 2. С. 1–11.

6. Пат. № 2670651, Российская Федерация. Способ установления идентичности проб гранулированного хмеля по запаху с применением химических сенсоров / А.В. Коростелев, Т.А. Кучменко, И.В. Новикова, Р.У. Умарханов, П.В. Рукавицын; заявл. 21.03.2017; опубл. 11.12.2018.

7. Новикова И.В., Юрицын И.А., Муравьев А.С. Исследование влияния интенсивности аэрации на жизнедеятельность дрожжей *Brettanomyces bruxellensis* // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. N 1. С. 102–108. https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-1-102-108

8. Новикова И.В., Рукавицын П.В., Муравьев А.С. К вопросу перехода ароматических соединений хмеля в пиво при реализации сухого охмеления // Пищевая промышленность. 2019. N 1. С. 69–73.

9. Kairbayeva A., Vasilenko V., Dzhinguilbayev S., Baibolova L., Frolova L. Development of the mathematical model for the process of oil raw materials pressing // Journal of Engineering & Applied Sciences. 2017. Vol. 12. Issue 6 Sl. P. 7836–7842. https://doi.org/10.36478/jeasci.2017.7836.7842

10. Авцинов И.А., Кожевников Ю.Е., Суханова Н.В. Модель кинетики процесса культивирования микроорганизмов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2017. Т. 23. N 3. С. 481–487. https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.481-487

11. Шелехова Н.В., Поляков В.А., Серба Е.М., Шелехова Т.М., Веселовская О.В., Скворцова Л.И. Информационные технологии в аналитическом контроле качества алкогольной продукции //

Пищевая промышленность. 2018. N 8. С. 30–33.

12. Матвеева, Н.А., Титов А.А. Применение технологии сухого охмеления в пивоварении // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. N 1. С. 111–118.

13. Zhong Y. Electronic nose for food sensory evaluation // Evaluation Technologies for Food Quality. 2019. P. 7–22. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814217-2.00002-0

14. Singh T.S., Verma P., Yadava R.D.S. Fuzzy subtractive clustering for polymer data mining for SAW sensor array based electronic nose // Proceedings of Sixth International Conference on Soft Computing for Problem Solving. Springer, Singapore, 2017. P. 245–253.

15. Zhang L., Tian F., Zhang D. In: Electronic Nose: Algorithmic Challenges. Springer, Singapore. 2018. P. 11–20. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2167-2_2

16. Men H., Shi Y., Jiao Y., Gong F., Liu J. Electronic nose sensors data feature mining: a synergetic strategy for the classification of beer // Analytical Methods. 2018. Vol. 10. Issue 17. P. 2016–2025. https://doi.org/10.1039/C8AY00280K

17. Santos J.P., Lozano J., Aleixandre M. Electronic noses applications in beer technology (open access peer-reviewed chapter). In: Kanauchi M. (ed.), Brewing Technology. IntechOpen, 2017. https://doi.org/10.5772/intechopen.68822

18. Aliani M., Eideh A., Kapourchali F.R., Alharbi R., Fahmi R. Evaluation of bitterness by the electronic tongue: correlation between sensory tests and instrumental methods. In: Aliani M, Eskin MNA (eds.) Bitterness: Perception, Chemistry and Food Processing. John Wiley & Sons, Inc.; 2017. Chapter 9. P. 195–207. https://doi.org/10.1002/9781118590263

19. Ocvirk M., Mlinarič N.K., Košir I.J. Comparison of sensory and chemical evaluation of lager beer aroma by gas chromatography and gas chromategraphy/mass spectrometry // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2018. Vol. 98. Issue 10. P. 3627–3635. https://doi.org/10.1002/jsfa.8840

20. Martins C., Almeida A., Rocha S.M. Recent advances and challenges for beer volatile characterization based on gas chromatographic techniques // Recent Advances in Analytical Techniques. 2017. Vol. 1. P. 141–199. https://doi.org/10.2174/9781681084473117010

REFERENCES

1. Kunze W. *Technologie Brauer und Mälzer*. Im Verlag der Berlin (Russ. ed.: Kunze W. *Tekhnologiya soloda i piva*. St. Petersburg: Professiya; 2001. 912 p.)

2. Meledina TV. *Raw and auxiliary materials in brewing.* St. Petersburg: Professiya; 2003. 304 p. (In Russian)

3. Kuchmenko TA. Chemical sensors based on piezoquartz microweights. In: *Problems of analytical chemistry*. Vol. 14. Moscow: Nauka; 2011. p. 127–202. (In Russian)

4. Roy RB, Tudu B, Bandyopadhyay R, Bhattacharyya N. Application of electronic nose and tongue for beverage quality evaluation. *Engineering Tools in the Beverage Industry.* 2019;3:229–254. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815258-4.00008-1

5. Kuchmenko TA, Shuba AA, Belskich NV. The identification parameters of organic substances in multisensors piezoquartz microbalance. *Analitika i kontrol = Analytics and Control.* 2012;16(2):1–11. (In Russian)

6. Korostelev AV, Kuchmenko TA, Novikova IV, Umarkhanov RU, Rukavitsyn PV. Method of identification of granulated hope samples by odor with chemical sensors. Patent RF, no. 2670651; 2017. (In Russian)

7. Novikova IV, Yuritsyn IA, Muravev AS. Effects of aeration intensity on the growth and activity of *Brettanomyces bruxellensis. Izvestia Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universitets. Applied chemistry and biotechnology.* 2019;9(1):102–108. (In Russian) https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-1-102-108

8. Novikova IV, Rukavitsyn PV, Murav'ev AS. To the question of hops aromatic compounds transition to beer during dry hopping process. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry.* 2019;1:69–73. (In Russian)

9. Kairbayeva A, Vasilenko V, Dzhinguilbayev S, Baibolova L, Frolova L. Development of the mathematical model for the process of oil raw materials pressing. *Journal of Engineering & Applied Sciences.* 2017;12(6):7836–7842. https://doi.org/10.36478/jeasci.2017.7836.7842

10. Avtsinov IA, Kozhevnikov YuE., Sukhanova NV. Model of kinetics of the microorganisms cultivation process. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2017;23(3):481–487. (In Russian) https://doi.org/10.17277/vestnik.2017.03.pp.481-487

11. Shelekhova NV, Polyakov VA, Serba EM, Shelekhova TM, Veselovskaya OV, Skvorcova LI. Information technology in the analytical quality control of alcoholic beverage. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry.* 2018;8:30–33. (In Russian)

12. Matveeva NA, Titov AA. The use of dry hopping technique in brewing. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Processy i apparaty pishchevyh proizvodstv = Scientific Journal NRU ITMO. Series "Processes and Food Production Equipment".* 2015;1;111–118. (In Russian)

13. Zhong Y. Electronic nose for food sensory evaluation. *Evaluation Technologies for Food Quality*. 2019:7–22. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814217-2.00002-0

14. Singh TS, Verma P, Yadava RDS. Fuzzy

subtractive clustering for polymer data mining for SAW sensor array based electronic nose. In: *Proceedings of Sixth International Conference on Soft Computing for Problem Solving*. Springer, Singapore, 2017:245–253.

15. Zhang L, Tian F, Zhang D. In: *Electronic Nose: Algorithmic Challenges*. Springer, Singapore. 2018. P. 11–20. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2167-2_2

16. Men H, Shi Y, Jiao Y, Gong F, Liu J. Electronic nose sensors data feature mining: a synergetic strategy for the classification of beer. *Analytical Methods*. 2018;10(17):2016–2025. https://doi.org/10.1039/C8AY00280K

17. Santos JP, Lozano J, Aleixandre M. Electronic noses applications in beer technology (open access peer-reviewed chapter). In: Kanauchi M. (ed.), Brewing Technology. IntechOpen; 2017. https://doi.org/10.5772/intechopen.68822

18. Aliani M, Eideh A, Kapourchali FR, Alharbi R, Fahmi R. Evaluation of bitterness by the electronic tongue: correlation between sensory tests and instrumental methods. In: Aliani M, Eskin MNA (eds.) Bitterness: Perception, Chemistry and Food Processing. John Wiley & Sons, Inc.; 2017. Chapter 9. P. 195–207. https://doi.org/10.1002/9781118590263

19. Ocvirk M, Mlinarič NK, Košir IJ. Comparison of sensory and chemical evaluation of lager beer aroma by gas chromatography and gas chromategraphy/mass spectrometry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018;98(10):3627–3635. https://doi.org/10.1002/jsfa.8840

20. Martins C, Almeida A, Rocha SM. Recent advances and challenges for beer volatile characterization based on gas chromatographic techniques. In: *Recent Advances in Analytical Techniques*. Vol. 1. Chapter 5. Bentham Science Publishers; 2017. p.141–199. https://doi.org/10.2174/97816810844731170101

Критерии авторства

Коростелев А.В., Рукавицын П.В., Новикова И.В., Кучменко Т.А., Умарханов Р.У., Муравьев А.С. выполнили экспериментальную работу. Авторы совместно обобщили результаты, написали рукопись, имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Contribution

Alexey V. Korostelev, Pavel V. Rukavitsyn, Inna V. Novikova, Tatyana A. Kuchmenko, Ruslan U. Umarkhanov, Aleksandr S. Muravev carried out the experimental work. The authors on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. All authors have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Коростелев Алексей Васильевич,
к.т.н., доцент кафедры технологии бродильных и сахаристых производств,
Воронежский государственный университет инженерных технологий,
394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19,
Российская Федерация,
e-mail: kafedra_tbisp@mail.ru

Рукавицын Павел Владимирович,
экстерн кафедры технологии бродильных и сахаристых производств,
Воронежский государственный университет инженерных технологий,
394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19,
Российская Федерация

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexey V. Korostelev,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Technologies of Fermentation and Sugar Industries Bepartment,
Voronezh State University of Engineering Technologies,
19, Revolutsii Ave., Voronezh, 394036,
Russian Federation,
e-mail: kafedra_tbisp@mail.ru

Pavel V. Rukavitsyn,
Postgraduate Student,
Technologies of Fermentation and Sugar Industries Bepartment,
Voronezh State University of Engineering Technologies,
19, Revolutsii Ave., Voronezh, 394036,
Russian Federation

Новикова Инна Владимировна,
д.т.н., профессор кафедры технологии бродильных и сахаристых производств,
Воронежский государственный университет инженерных технологий,
394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19,
Российская Федерация,
✉ e-mail: noviv@list.ru

Кучменко Татьяна Анатольевна,
д.х.н., профессор, заведующая кафедрой физической и аналитической химии,
Воронежский государственный университет инженерных технологий,
394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19,
Российская Федерация

Умарханов Руслан Умарханович,
доцент кафедры физической и аналитической химии,
Воронежский государственный университет инженерных технологий,
394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19,
Российская Федерация

Муравьев Александр Сергеевич,
к.т.н., инженер отдела стандартизации и метрологии,
Воронежский государственный университет инженерных технологий
394036, г. Воронеж, пр-т Революции, 19,
Российская Федерация,
e-mail: hntrun@mail.ru

Inna V. Novikova,
Dr. Sci. (Engineering), Professor,
Technologies of Fermentation and Sugar Industries department,
Voronezh State University of Engineering Technologies,
19, Revolutsii Ave., Voronezh, 394036,
Russian Federation,
✉ e-mail: noviv@list.ru

Tatyana A. Kuchmenko,
Dr. Sci. (Chemistry), Professor,
Head of the Department of Physical and Analytical Chemistry,
Voronezh State University of Engineering Technologies,
19, Revolutsii Ave., Voronezh, 394036,
Russian Federation

Ruslan U. Umarkhanov,
Associate Professor,
Department of Physical and Analytical Chemistry,
Voronezh State University of Engineering Technologies,
19, Revolutsii Ave., Voronezh, 394036,
Russian Federation

Aleksandr S. Muravev
Cand. Sci. (Engineering), Engineer,
Department of Metrology and Standardization,
Voronezh State University of Engineering Technologies,
19, Revolutsii Ave., Voronezh, 394036,
Russian Federation,
e-mail: hntrun@mail.ru