

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-58-72>

Поступила 12.09.2024

Поступила после рецензирования 14.03.2025

Принята в печать 17.03.2025

© Бурак Л. Ч., Завалей А. П., Яблонская В. В., Сапач А. Н., 2025



<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Open access

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОУЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА АНТИОКСИДАНТНУЮ АКТИВНОСТЬ СОКА БУЗИНЫ (*SAMBUCUS NIGRA L.*)

Бурак Л. Ч.¹, Завалей А. П.², Яблонская В. В.², Сапач А. Н.^{1*}

¹ Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА», Минск, Республика Беларусь

² Совместное общество с ограниченной ответственностью «Ароматик», Дзержинск, Минская область, Республика Беларусь

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

сок бузины,
пастеризация,
термоультразвуковая
обработка, цветовой
индекс, флавоноиды,
антоцианы,
антиоксидантная
активность

Многочисленные исследования химического состава ягод бузины черной показали, что они содержат биологически активные соединения с высокой антиоксидантной способностью. Цель работы — исследование влияния термоультразвуковой обработки на содержание биологически активных веществ и антиоксидантную активность сока бузины (*Sambucus nigra L.*). В качестве объектов исследований использовали свежееотжатый сок из бузины, сок бузины пастеризованный и подвергнутый термоультразвуковой обработке. Цвет определяли колориметрическим методом, общее содержание флавоноидов, антоцианов и антиоксидантную активность по активности связывания DPPH радикала образцов сока определяли спектрофотометрическим методом. Термообработку ультразвуком проводили в ультразвуковом гомогенизаторе. Установлено, что сок бузины, обработанный термоультразвуком, обладал более высоким цветовым индексом (CD), повышенным значением яркости (L), большим общим цветовым различием (ΔE), а также уменьшенными значениями угла оттенка (h) и индекса желтого (YI). Общее содержание фенолов, флавоноидов и антоцианов в образце, обработанном термоультразвуком (мощность 600 Вт, частота 20 кГц, температура 65 °С, 15 минут), было выше на 13,32%, 251,72% и 94,12% соответственно по сравнению с необработанным образцом и образцом, пастеризованным при 65 °С в течение 30 минут. Способность связывать 1,1-дифенил-2-пикрилгидразил (DPPH) и гидроксильные радикалы (-OH) была увеличена до 65,22% и 51,13% соответственно, что значительно выше, чем у контрольного образца. Содержание основных антоцианов цианидин-3-О-самбубиозита, цианидин-3-О-глюкозида и цианидин-3-О-самбубиозид-5-О-глюкозида составило 987,5 мг/дм³, 752,4 мг/дм³ и 191,4 мг/дм³. Корреляционный анализ показал, что содержание антиоксидантов оказывает значительное влияние на цветовой индекс сока бузины, а цианидин-3-О-глюкозид и цианидин-3-О-самбубиозит определяют яркость или темноту сока. Термическая обработка ультразвуком значительно улучшает содержание общих фенольных соединений, флавоноидов и антоцианов, а также способствует увеличению антиоксидантной активности сока бузины. Результаты позволяют предположить, что данный способ может быть эффективным методом пастеризации сока бузины с сохранением качества и антиоксидантной активности.

Received 12.09.2024

Accepted in revised 14.03.2025

Accepted for publication 17.03.2025

© Burak L. Ch., Zavaley A. P., Yablonskaya V. V., Sapach A. N., 2025

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

EFFECT OF THERMOULTRASONIC TREATMENT ON THE ANTIOXIDANT ACTIVITY OF ELDERBERRY (*SAMBUCUS NIGRA L.*) JUICE

Leonid Ch. Burak¹ Andrey P. Zavaley², Veranika V. Yablonskaya², Alexander N. Sapach^{1*}

¹ BELROSAKVA Limited Liability Company, Minsk, Republic of Belarus

² Joint Limited Liability Vompany "Aromatic", Dzherzhinsk, Minsk Region, Republic of Belarus

KEY WORDS:
elderberry juice,
thermoultrasonic
treatment, color
index, flavonoids,
anthocyanins,
antioxidant activity

ABSTRACT

Numerous studies of the chemical composition of black elderberries have shown that they contain biologically active compounds with high antioxidant capacity. The purpose of the work is to study the effect of thermoultrasonic treatment on the content of biologically active substances and antioxidant activity of elderberry (*Sambucus nigra L.*) juice. The research objects were freshly squeezed elderberry juice, pasteurized elderberry juice, and juice subjected to thermoultrasonic treatment. The color was determined by the calorimetric method, the total content of flavonoids, anthocyanins and antioxidant activity by DPPH radical scavenging activity of the juice samples were determined using a spectrophotometric method. Thermal treatment with ultrasound was carried out in an ultrasonic homogenizer. It has been found that elderberry juice treated with thermoultrasound had a higher color index (CD), juice brightness values (L*), overall color difference (ΔE) and lower values of hue angle (h), yellow index (YI). The total content of phenols, flavonoids and anthocyanins in the sample treated with thermoultrasound with a power of 600 W, frequency of 20 kHz, and a temperature of 65 °C for 15 minutes was higher by 13.32%, 251.72% and 94.12%, respectively, compared to the untreated sample and sample pasteurized at 65 °C for 30 minutes. The 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) and hydroxyl radical (-OH) scavenging activities were increased to 65.22% and 51.13%, respectively, which was significantly higher than those of the control sample. The content of the main anthocyanins cyanidin-3-O-sambubioside, cyanidin-3-O-glucoside and cyanidin-3-O-sambubioside-5-O-glucoside was 987.5 mg/dm³, 752.4 mg/dm³ and 191.4 mg/dm³. Correlation analysis has shown that the antioxidant content has a significant effect on the color index of elderberry juice, and cyanidin-3-O-glucoside and cyanidin-3-O-sambubiositol determine the brightness or darkness of the juice. Heat treatment with ultrasound significantly improves the content of total phenolic compounds, flavonoids and anthocyanins, and helps to increase the antioxidant activity of elderberry juice. The results suggest that this method can be an effective method for pasteurizing elderberry juice while maintaining the quality and antioxidant activity.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Бурак, Л. Ч., Завалей, А. П., Яблонская, В. В., Сапач, А. Н. (2025). Влияние термоультразвуковой обработки на антиоксидантную активность сока бузины (*Sambucus nigra L.*). *Пищевые системы*, 8(1), 58–72. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-58-72>

FOR CITATION: Burak, L. Ch., Zavaley, A. P., Yablonskaya, V. V., Sapach, A. N. (2025). Effect of thermoultrasonic treatment on the antioxidant activity of elderberry (*Sambucus nigra L.*) juice. *Food Systems*, 8(1), 58–72. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-58-72>

1. Введение

Современный потребитель отдает предпочтение качественным продуктам питания с приемлемым сроком годности, высокой пищевой ценностью и антиоксидантной активностью. Соки являются важной частью рациона питания большинства населения, так как содержат многие питательные вещества, микро- и макроэлементы, минеральные вещества, витамины и другие биологически активные вещества. С целью обеспечения микробиологической стабильности, ингибирования ферментной активности и увеличения срока годности в процессе производства соков широко используется термическая пастеризация. Вместе с тем в процессе пастеризации под действием температуры происходят нежелательные изменения вкуса, цвета и снижение пищевой ценности фруктовых и овощных соков. С этой целью в последние десятилетия разрабатываемые и применяемые в пищевой промышленности способы пастеризации и стерилизации пищевых продуктов ориентированы на использование низкотемпературных систем, сокращение цикла обработки, расширение технологических возможностей, снижение затрат и обеспечение экологической безопасности [1]. Термоультразвуковая обработка (TS) — это термообработка с использованием ультразвука, которая представляет собой современный метод консервирования пищевых продуктов, включающий использование как тепла, так и ультразвука [2]. Термическая обработка ультразвуком (TS), также называемая ультразвуковой тепловой обработкой, считается одним из наиболее перспективных методов нетермической обработки для сохранения фруктовых соков. Данный способ обработки позволяет обеспечить микробиологическую стабильность и таким образом улучшить общее качество и срок годности фруктовых и овощных соков [1,2]. Пищевой продукт в этом процессе подвергается воздействию ультразвука в сочетании с умеренной температурой для повышения эффективности уничтожения микроорганизмов и/или инактивации нежелательных ферментов. Эта комбинация сокращает время и температуру процесса TS, сохраняя цвет, вкус и пищевую ценность продукта [1]. Кроме того, было показано, что обработка TS повышает содержание биологически активных веществ и микробную безопасность некоторых фруктовых соков, включая сок манго [3], сливы [4], карамболы [5], яблочного сока и сока пшеницы [6,7]. Следует также отметить, что за счет низкого энергопотребления данный способ обработки позволяет снизить эксплуатационные расходы, метод предусматривает короткое время обработки, что будет способствовать снижению трудозатрат и повышению эффективности производства [8,9]. Более того, использование ультразвуковой технологии является экологически чистой и признанной «зеленой» технологией, поскольку способствует сокращению использования воды и, следовательно, уменьшению объема сточных вод [10]. На основании полученных данных можно сделать вывод, что обработка TS может быть эффективным альтернативным методом обработки, позволяющим сохранять пищевую ценность соков, снижать энергозатраты и, таким образом, повышать экономическую эффективность производства соков.

Бузина черная (*Sambucus nigra* L.), представитель семейства *Adoxaceae*, распространена в умеренных регионах Европы и других частях северного полушария. Ее простота выращивания и богатый химический состав, а также ее широкая доступность в дикой природе стимулировали повышенный интерес к ее использованию в последние десятилетия [11]. Ягоды черной бузины известны своим высоким уровнем биологически активных соединений, которые способствуют их антидиабетическим, противовирусным и мочегонным свойствам, а также их потенциалу для профилактики атеросклероза, сердечно-сосудистых заболеваний и рака [12,13]. Химический состав плодов бузины черной может значительно различаться в зависимости от таких факторов, как сорт, климат, местоположение и стадия созревания. Основные биологически активные соединения в бузине представлены антоцианами и полифенолами, которые были тщательно изучены научным сообществом различных стран [14,15]. По сравнению с другими ягодами, бузина содержит значительное количество полифенолов. Преобладающие соединения в бузине включают кверцетин-3-рутинозид (рутин), кверцетин, кверцетин-3-глюкозид (изокверцитрин), неохлорогеновую кислоту, криптохлорогеновую кислоту, хлорогеновую кислоту, кемпферол-3-рутинозид, изорамнетин-3-глюкозид (астрагалин) и изорамнетин-3-глюкозид. Среди них рутин является наиболее распространенным, в то время как другие астрагалины, флавонолы и изокверцитрин присутствуют в меньших количествах. Результаты многочисленных исследований подтверждают значительную антиоксидантную активность сока бузины, которая объясняется высоким содержанием фенолов и флавоноидов [14,15,16,17]. Они действуют как антиоксиданты, уменьшают воспаление, модулируют иммунную систему, демонстрируют актив-

ность против рака и демонстрируют широкий спектр противовирусных свойств [14,18].

В целом, бузина является перспективным источником биоактивных ингредиентов и обладает широким потенциалом для разработки функциональных продуктов питания или нутрицевтиков для профилактики и лечения определенных хронических заболеваний [13,14,15]. Необходимы дальнейшие исследования для лучшего понимания факторов до и после сбора урожая, которые влияют на рост и продуктивность растений, а также для изучения новых областей применения и промышленного использования этого малоиспользуемого вида [13,18].

Сок бузины богат антоцианами, которые известны своими биоактивными свойствами и потенциально могут использоваться в качестве натуральных красителей в пищевых продуктах. Эти антоцианы не только придают соку яркий цвет, но и вносят значительный вклад в антиоксидантную способность сока. Однако такие методы обработки, как термоультразвуковая обработка, могут влиять на эти свойства [13]. Было установлено, что термоультразвуковая обработка, сочетающая в себе мягкое тепло и ультразвук, является эффективным методом повышения содержания биоактивных компонентов во фруктовых соках. Например, в айвовом соке термоультразвуковая обработка, оптимизированная при 38,7 °C, 5,6 минут и амплитуде 50,9%, увеличивала общее содержание фенолов и антиоксидантную способность, хотя и приводила к снижению содержания аскорбиновой кислоты [2]. Это говорит о том, что, хотя обработка термоультразвуком может усиливать действие одних биологически активных соединений, она также может разрушать другие в зависимости от их термической чувствительности. Аналогичным образом, сравнительное исследование сока барбариса показало, что обработка ультразвуком, особенно при более высоких амплитудах, привела к увеличению общего содержания фенола и антиоксидантной активности по сравнению с термической обработкой. Следует отметить, что обработка ультразвуком незначительно снижала общее содержание антоцианов и цвет сока по сравнению с термической обработкой. Кинетика разложения антоцианов соответствовала кинетике первого порядка: обработанные ультразвуком образцы имели более длительный период полураспада (111,33–158,58 дней) по сравнению с термически обработанными образцами (64–90 дней) [3]. Это указывает на то, что обработка ультразвуком в меньшей степени разрушает антоцианы, чем термическая обработка, что, возможно, будет приемлемо для сохранения стабильности цвета сока бузины.

Кроме того, на стабильность антоцианов и органолептические показатели сока бузины существенно влияют такие факторы, как pH, время хранения и температура. В исследовании по оценке изменения цвета концентрированного сока бузины было установлено, что время хранения оказывает наиболее существенное влияние на концентрацию антоцианов, при этом pH также играет решающую роль в стабильности цвета [4]. На основании анализа результатов научных исследований можно предположить, что термоультразвуковая обработка будет перспективным способом обработки сока бузины, потенциально повышающим его антиоксидантную активность, за счет сохранения содержания антоцианов и стабильности цвета. Вместе с тем оптимизация параметров обработки, таких как температура, амплитуда и продолжительность, необходима для максимального сохранения биологически активных веществ и минимизации любого неблагоприятного воздействия на чувствительные соединения, такие как аскорбиновая кислота. Результаты исследований соков айвы и барбариса дают возможность предположить, что нетермические методы, такие как обработка ультразвуком, могут быть более эффективны в сохранении качества и биологической активности сока, чем традиционная термическая обработка. В связи с этим целью данной работы стало исследование влияния термоультразвуковой обработки на качество сока из бузины.

2. Материалы и методы

2.1. Приготовление и обработка сока бузины

Ягоды полностью зрелой и качественной бузины черной (сорт «Багацце») были приобретены в РВП «Институт плодоводства». После промывки дистиллированной водой бузину помещали в соковыжималку MJE.1500S (MAUNFELD, Китай) примерно на 15 с для получения сока. Затем сок отфильтровывали через стерильную муслиновую ткань для получения однородной массы. Полученный свежавыжатый сок был разделен на три части: свежавыжатый сок (необработанный — № 1), пастеризованный сок (№ 2) и сок, подвергнутый термозвуковой обработке различной мощности (№ 3, № 4, № 5).

Для пастеризации 200 мл сока бузины выдержали на водяной бане BW-05B (BEING, Корея) при 65 °C в течение 30 мин. Затем сок

охлаждали на ледяной бане и хранили в холодильнике при температуре 4 °C для дальнейшего анализа.

Для термоультразвуковой обработки 200 см³ сока бузины помещали в ультразвуковой гомогенизатор Scientz-IID Ultrasonic Homogenizer (Ningbo Scientz Biotechnology Co. Ltd., Нинбо, Китай). Ультразвуковую обработку проводили при температуре 65 °C с частотой 20 кГц, рабочим циклом 50% в течение 15 мин. Обработка проводилась при трех различных мощностях — 200 Вт (образец № 3), 400 Вт (образец № 4) и 600 Вт (образец № 5).

Затем сок охлаждали на ледяной бане и хранили при температуре 4 °C до дальнейшего анализа. Параметры обработки, которые использовались в данном исследовании, представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры экспериментальных обработок сока бузины

Table 1. Parameters of the experimental treatments of elderberry juice

Номер и наименование образца объемом 200 см ³	Вид и параметры обработки	Температура обработки, °C	Время обработки, мин
№ 1 — свежесжатый сок бузины (контроль)	—	—	—
№ 2 — пастеризованный сок бузины	пастеризация	65	30
№ 3 — сок бузины, обработанный ультразвуком	TS200 Вт, 20 кГц	65	15
№ 4 — сок бузины, обработанный ультразвуком	TS400 Вт, 20 кГц	65	15
№ 5 — сок бузины, обработанный ультразвуком	TS600 Вт, 20 кГц	65	15

2.2. Реагенты

Все необходимые реактивы — натрия фосфат, катехин, галловая кислота (х. ч.), фенольный реактив Фолина, рутин (х. ч.), абсолютный этанол EMPLURA (производитель Merck), карбонат натрия, нитрит натрия, нитрат алюминия, гидроксид натрия, муравьиная кислота, метанол, салициловая кислота, 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH) — были закуплены у ЗАО «Пять океанов» (Республика Беларусь). Цианидин-3-О-самбубиозид-5-О-глюкозид (Су-3G), цианидин-3-О-самбубиозит (Су-2G), цианидин-3-О-глюкозид (Су-Г) (ч. д. а.), метанол и ацетонитрил хроматографической чистоты были закуплены ООО «Ароматик» в Румынии.

2.3. Цвет

Цветовой индекс (CD) рассчитывали по соотношению оптической плотности сока при 520 нм к оптической плотности при 420 нм. Оптическую плотность сока после предварительного разбавления в 10 раз определяли на спектрофотометре UNICO-2800 (United products and instruments, США). Колориметрический анализ цвета сока проводили на спектрофотометре CM-5 KONICA MINOLTA (Konica Minolta Sensing, Япония).

Ход исследования: образцы объемом 80 см³ были откалиброваны ($Y = 93,35$; $x = 0,3152$; $y = 0,3212$) с помощью источника света (D65) и стандартного наблюдателя (2°) для контроля изменений цвета. В соответствии с рекомендациями Международной комиссии по освещению (CIE) значения L^* (светлость/темнота), a^* (краснота/зелень) и b^* (желтизна/синева) были использованы для выражения цвета. Общие цветовые различие (ΔE), цветность C , h и YI рассчитывали с использованием уравнений (1–4) соответственно, для оценки изменений цвета после обработки [19,20].

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0)^2 + (a^* - a_0)^2 + (b^* - b_0)^2}. \quad (1)$$

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}. \quad (2)$$

$$h = b^* / a^*. \quad (3)$$

$$YI = 142,86 \times b^* / L^*. \quad (4)$$

Значения параметров a_0 , b_0 и L_0 представляют собой исходные значения необработанных образцов, a^* , b^* и L^* представляют значения обработанного сока. На основании значений ΔE можно классифицировать как существенно отличающиеся ($\Delta E > 3,5$), отличающиеся ($2 < \Delta E < 3,5$) и незначительно отличающиеся ($0 < \Delta E < 2$) [21].

2.4. Содержание антиоксидантов

2.4.1. Общее содержание фенолов (TPC)

Общее содержание фенольных соединений определяли методом Фолина-Чокальтеу [19], с незначительными изменениями. Ход исследования: образцы сока бузины объемом 1 см³, 1 см³ реагента

Фолина-Чокальтеу и 3 см³ 20% раствора карбоната натрия смешивали и объем доводили до 10 см³ дистиллированной водой. После 15-минутной выдержки в темном месте определяли оптическую плотность образца при 760 нм с помощью спектрофотометра MC-124 (SOL instrumens GmbH, Аугсбург, Германия). Калибровочный график строили с использованием стандартного раствора галловой кислоты (0–100 мкг/см³, $R^2 = 0,9979$). TPC анализируемых образцов выражали в мкг-экв галловой кислоты (GAE) на см³ сока.

2.4.2. Общее содержание флавоноидов (TFC)

Общее содержание флавоноидов определяли спектрофотометрическим методом. Ход исследования: образцы сока бузины 1 см³ смешивали с 0,2 см³ 5% раствора нитрата натрия. Смесь оставляли на 6 мин. После этого в смесь добавляли 0,2 см³ 10% раствора нитрата алюминия и оставляли еще на 6 мин. Затем добавляли 4,0 см³ 4% раствора гидроксида натрия и оставляли на 15 мин. Оптическую плотность образца определяли с помощью спектрофотометра MC-124 (SOL instrumens GmbH, Аугсбург, Германия) при 500 нм. В качестве стандартного раствора использовался рутин, калибровочный график (0,1–0,8 мг/см³, $R^2 = 0,9991$), результаты выражали в мг-экв рутина (RE) на см³ сока.

2.4.3. Общее содержание антоцианов (TAC)

Экстракты готовили смешиванием 2 см³ сока бузины и 2 см³ безводного спирта, затем на водяной бане при 40 °C добавляли 4 см³ фосфатного буферного раствора (pH = 1,0) и 4 см³ фосфатного буферного раствора (pH = 4,0). Измерение проводили спектрофотометром MC-124 (SOL instrumens GmbH, Аугсбург, Германия), определяя поглощение при 520 и 700 нм с использованием дистиллированной воды в качестве раствора сравнения. Содержание антоцианов (с) рассчитывали по формуле (уравнения 5 и 6):

$$\Delta A = (A_{520} - A_{700})_{pH=1} - (A_{520} - A_{700})_{pH=4,5}, \quad (5)$$

$$C = \frac{\Delta A \times V \times DF \times M}{\epsilon m L} \times 100\%, \quad (6)$$

где V — общий объем экстракта;
 DF — коэффициент разбавления;
 M — масса образца;
 m — молекулярная масса цианидин-3-О-глюкозида (449,2 г/моль);
 ϵ — коэффициент экстинкции цианидин-3-О-глюкозида (29 600 дм³/моль·см);
 L — длина пути светового пучка в растворе.

2.5. Антиоксидантная активность

2.5.1. Способность связывать радикалы DPPH

Антиоксидантную активность образцов сока определяли по активности поглощения радикалов DPPH в соответствии с методами, применяемыми в исследовании Qiu, X. et al. [22], с некоторыми изменениями. Ход исследования: реакционную и контрольную смесь готовили путем добавления либо 1 см³ образцов сока, либо 1 см³ воды соответственно к 4 см³ раствора DPPH (безводный спирт в качестве растворителя). Затем смесь инкубировали при комнатной температуре в течение 20 мин в темном месте. Изменения цвета анализировали при 517 нм с помощью спектрофотометра MC-124 (SOL instrumens GmbH, Аугсбург, Германия). Активность ингибирования радикалов рассчитывали по уравнению (7):

$$DPPH = (A_0 - A_i) / A_0 \times 100, \quad (7)$$

где A_0 и A_i — значения оптической плотности контрольных образцов и образцов сока соответственно.

2.5.2. Способность связывать гидроксильные радикалы (•OH)

Также была определена способность образцов сока связывать радикалы •OH, следуя описанному методу [22], с некоторыми модификациями. Реакционную и контрольную смесь готовили путем добавления 1 см³ проб сока или воды соответственно к смеси 1 см³ раствора сульфата железа (9 ммоль/л), 1 см³ раствора салициловой кислоты (9 ммоль/л, спирт в качестве растворителя) и 2 см³ раствора перекиси водорода. Смесь выдерживали при 37 °C в течение 30 мин в термостате ТВ-80 (Государственный Рязанский приборный завод, Россия). Оптическую плотность образцов измеряли при 510 нм с помощью спектрофотометра MC-124 (SOL instrumens GmbH, Аугсбург, Германия). Результаты были рассчитаны по уравнению 8:

$$\bullet OH = (A_0 - A_i) / A_0 \times 100, \quad (8)$$

где A_0 и A_i — значения оптической плотности контрольных образцов и образцов сока соответственно.

Таблица 2. МС-спектральные данные идентифицированных антоцианов

Table 2. MS spectral data of identified anthocyanins

Название антоциана	Время удержания, мин	[МН] + m/z	Ион-продукт m/z	Уравнение регрессии	R ²
Цианидин-3-О-самбубиозид –5-О-глюкозид	25,21	465	580,229	Y = 3852,8x + 104,103	0,998
Цианидин-3-О-самбубиозит	36,78	449	287,137	Y = 9894,3x + 276,898	0,996
Цианидин-3-О-глюкозид	38,76	319	287,214	Y = 996,44x + 12,340	0,999

Примечание: R² — коэффициент вариации.**2.6. Определение антоцианов методом ВЭЖХ–МС**

Антоцианы разделяли хроматографическими методами, используя ВЭЖХ хроматограф Agilent 1200 Infinity (Agilent Technologies, Германия) с диодно-матричным и масс-спектрометрическим детекторами [23]. Разделение достигалось с использованием колонки TSK gel ODS-100Z (150 × 4,6 мм, 2 мкм, Tosoh), поддерживаемой при 25 °С, с использованием смеси муравьиной кислоты и метанола (0,1%, по объему) в качестве подвижной фазы А, и муравьиной кислоты и ацетонитрила (0,1%, об./об.) в качестве подвижной фазы Б. Использовали следующую градиентную программу: 8–12% Б (0–2 мин), 12–18% Б (2–5 мин), 18–20% Б (5–10 мин), 20–25% Б (10–12 мин), 25–30% Б (12–15 мин), 30–45% Б (15–18 мин), 45–80% Б (18–20 мин) и 80–2% Б (20–25 мин). Объем инъекции составлял 5,0 мм³, скорость потока — 0,3 см³/мин. Анализ методом ионизации электрораспылением проводили в режиме положительных ионов, используя азот как газ. Были обеспечены следующие настройки прибора: напряжение капилляра — 4500 В, напряжение конуса — 25 В, температура источника — 400 °С, температура десольватации — 320 °С, скорость потока элюирующего растворителя — 220 мм³/мин. Спектральные данные МС представлены в Таблице 2.

2.7. Микробиологический анализ

Общее количество мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ), плесневых грибов и дрожжей определяли количественным методом, путем прямого посева в микробиологические среды. Агаровая Среда № 1 (NAHRAGAR DEV — Agar, производства компании Doehler GmbH (Германия) в соответствии с ГОСТ Р 52711–2007¹). Результаты выражали в виде логарифма колониеобразующих единиц (КОЕ) на см³ образца сока. Все анализы проводились в трех повторностях.

2.8. Статистический анализ

Все экспериментальные обработки были выполнены три раза, и были получены средние результаты, выраженные как среднее значение ± стандартное отклонение. Данные изучались с помощью однофакторного дисперсионного анализа ANOVA, а для подтверждения значимости между обработками использовался критерий множественного диапазона Дункана ($p < 0,05$). Анализы проводили с использованием программного обеспечения SPSS25. Изображения были проанализированы с помощью MATLAB2016b для получения красного, зеленого и синего (RGB) цветов.

3. Результаты и обсуждения**3.1. Влияние термозвуковой обработки (TS) на цвет сока бузины****3.1.1. Цветовой индекс**

Как показано на Рисунке 1, значения цветового индекса (CD) в каждой группе обработки увеличились по сравнению с образцом № 1. Кроме того, в образцах № 3–5 значения CD значительно возрастали с повышением мощности ультразвука и были максимальными при мощности 600 Вт (65 °С, в течение 15 мин). Увеличение цветового индекса в образцах № 3–5 может быть связано с растворением антоцианов, которому способствует обработка TS, что приводит к увеличению видимого спектра, особенно при поглощении 420 нм и 510 нм [24].

3.1.2. Определение цвета

Цветовые показатели (L^* , C , h) образцов № 1 (21,19; 4,86; 22,88) и № 2 (21,54; 4,26; 21,26) не имеет существенных различий (Таблица 3). Однако термозвуковая обработка увеличила значение L^* и значительно уменьшила значения C и h по сравнению с образцами № 1 и № 2. Наибольшая яркость (L^*) наблюдалась у образца № 3. Хотя дальнейшее увеличение мощности ультразвука (400 и 600 Вт) имело тенденцию к уменьшению значений L^* , это снижение было незначительным по сравнению с тем, которое наблюдалось при мощности

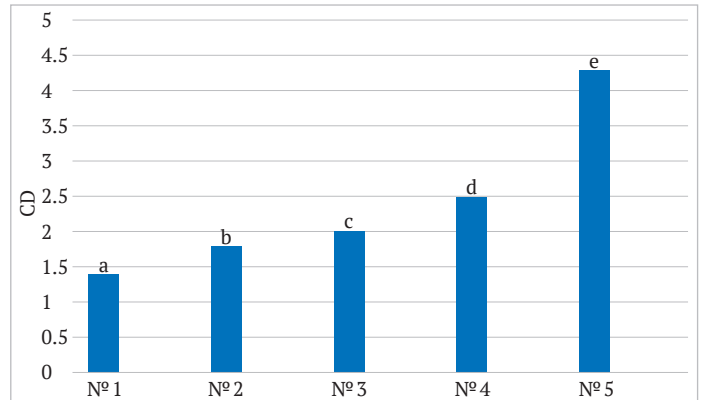


Рисунок 1. Влияние термозвуковой обработки (TS) на цветовой индекс (CD) сока бузины

Разные буквы a, b, c, d, e в одном столбце указывают на значительное расхождение между данными ($p < 0,05$).

Figure 1. Effect of thermosonic treatment (TS) on the color index (CD) of elderberry juice

Different letters a, b, c, d, e in the same column indicate significant differences between data ($p < 0,05$).

200 Вт. Аналогичные результаты отрицательной корреляции между L^* и содержанием пигмента были также получены для соков манго и клубники [24]. Кроме того, значения C и h значительно снизились во всех образцах, обработанных TS (при мощности 200, 400 и 600 Вт) по сравнению с образцами № 1 и № 2. Уменьшение оттенка сока после обработки TS может быть связано с гидроксигированием ароматического кольца фенолов, приводящим к увеличению интенсивности красного цвета [19].

Значение YI не имело существенных различий между образцами № 1 и № 2, тогда как в образцах № 3–5 оно значительно возросло. Кроме того, меньшее значение ΔE (< 2) в образце № 2 (0,7), как показано в Таблице 3, указывает на то, что пастеризация (60 °С, 30 мин) сока бузины незначительно повлияла на цвет. В то же время значение ΔE в образце № 5 составляло 35,17, что намного больше, чем для образца № 2. Это указывает на значительное влияние ультразвуковой обработки на цвет сока бузины. Данные результаты соответствовали значениям цветового индекса C . Вместе с тем понимание основного механизма изменения цвета и его влияния на качество сока требует дальнейшего изучения.

Таблица 3. Изменение цветовых показателей сока из бузины ($p < 0,05$)Table 3. Changes in the color indicators of elderberry juice ($p < 0,05$)

Образец	L^*	C	h	YI	ΔE
№ 1	21,19 ± 2,57 ^a	4,86 ± 2,98 ^b	22,88 ± 4,84 ^d	–12,26 ± 7,17 ^a	–
№ 2	21,54 ± 0,20 ^a	4,26 ± 0,17 ^b	21,26 ± 0,70 ^d	–10,24 ± 0,81 ^a	0,70 ± 0,24 ^a
№ 3	27,77 ± 1,37 ^b	0,80 ± 0,03 ^a	–50,12 ± 1,91 ^a	–3,16 ± 0,20 ^b	30,83 ± 4,11 ^c
№ 4	27,12 ± 1,36 ^b	1,15 ± 0,39 ^a	–36,17 ± 6,56 ^b	–3,05 ± 0,68 ^b	21,30 ± 0,81 ^b
№ 5	25,65 ± 0,60 ^b	0,98 ± 0,21 ^a	–28,61 ± 1,97 ^c	–2,61 ± 0,49 ^b	35,17 ± 2,41 ^c

Примечание: разные буквы a, b, c, d в одном столбце указывают на значительное расхождение между данными ($p < 0,05$).

3.2. Влияние термозвуковой обработки на общее количество антиоксидантных соединений

Установлено, что цветовые характеристики связаны с содержанием и активностью биологически активных соединений и антиоксидантных веществ [19]. Поэтому мы проанализировали содержание антиоксидантов (TPC, TFC и TAC) и способность к ингибированию радикалов в образцах сока при разных параметрах обработки.

¹ ГОСТ Р 52711–2007 «Производство соковой продукции. Методы микробиологического анализа с применением специальных микробиологических сред». М.: Стандартинформ, 2007. — 19 с.

3.2.1. Общее содержание фенолов

Фенольные соединения оказывают влияние на здоровье человека, препятствуя развитию различных заболеваний. Более того, они также играют значительную роль в формировании вкуса и цвета продукта. Результаты изменения содержания биологически активных веществ и антиоксидантной активности сока бузины в зависимости от параметров и способа обработки представлены в Таблице 4. В данном исследовании TPC в образцах № 1 и № 2 составлял 3,56 и 4,37 GAE мг/см³ соответственно, как показано в Таблице 4, и был значительно выше в образцах № 3–5 ($p < 0,05$). Следует отметить, что увеличение интенсивности ультразвука увеличивает TPC образцов. Кроме того, TPC в образце № 5 (8,52 GAE мг/см³) превышало на 94,97% значение в образце № 2 (4,37 GAE мг/см³). Более высокий TPC в образцах № 3–5, чем в образце № 2, может быть обусловлен более значительным высвобождением фенольных соединений в результате высокоинтенсивной ультразвуковой обработки, вызывающей разрушение клеток [25]. Кроме того, увеличение содержания фенольных соединений в образцах № 3–5 также можно объяснить образованием микрополостей во время процесса термозвуковой обработки, что увеличивает скорость массопереноса. Аналогичные результаты термозвуковой обработки на TPC были зарегистрированы в черничном вине [26], в соке карамболы [5] и черной смородины [25].

Таблица 4. Изменение содержания биологически активных веществ и антиоксидантной способности сока бузины

Table 4. Changes in the content of biologically active substances and antioxidant capacity of elderberry juice

Образец	TPC (GAE мг/см ³)	TFC (RE мг/см ³)	TAC (Сус мг/см ³)	DPPH (% ингибирования)	ОН (% ингибирования)
№ 1	4,31 ± 0,15 ^a	0,47 ± 0,01 ^a	1,29 ± 0,13 ^a	47,80 ± 1,01 ^a	51,68 ± 0,41 ^a
№ 2	4,14 ± 0,56 ^b	0,61 ± 0,02 ^b	1,44 ± 0,12 ^b	50,37 ± 0,98 ^b	50,76 ± 0,62 ^b
№ 3	4,28 ± 0,12 ^c	0,62 ± 0,01 ^c	1,76 ± 0,14 ^b	51,71 ± 0,63 ^b	52,69 ± 0,67 ^b
№ 4	4,49 ± 0,09 ^d	0,88 ± 0,01 ^d	1,93 ± 0,21 ^c	59,56 ± 0,80 ^c	53,63 ± 0,58 ^b
№ 5	7,84 ± 0,19 ^e	1,84 ± 0,02 ^e	2,15 ± 0,04 ^d	70,22 ± 0,86 ^d	56,13 ± 0,23 ^c

Примечание: разные буквы a, b, c, d в одном столбце указывают на значительное расхождение между данными ($p < 0,05$).

3.2.2. Общее содержание флавоноидов

Как показано в Таблице 4, изменения TFC следовали той же тенденции, что и изменения TPC в соке бузины. TFC в образцах № 1 и № 2 составляло 0,47 и 0,61 RE мг/см³ соответственно, в образцах № 3–5 оно увеличивалось ($p < 0,05$). Самое высокое TFC зафиксировано в образце № 5 (1,84 RE мг/см³), что в три раза выше, чем в образце № 2 (0,61 RE мг/см³), и в четыре раза выше, чем в образце № 1 (0,47 RE мг/см³). Результаты этого исследования были аналогичны результатам предыдущих исследований свиной сливы [4], яблочного и виноградного сока [27].

Результаты влияния обработки TS на TPC и TFC показали, что пастеризация в сочетании с ультразвуком была эффективнее, по сравнению с традиционной пастеризацией. В ранее проведенных исследованиях [28] было установлено, что термическая обработка снижает содержание TPC в яблочном соке. Более того, авторы исследования Abid et al. сообщили, что образцы, обработанные при 60 °C, имели более высокое сохранение TPC и TFC, чем образцы при более низких температурах (20 °C или 40 °C) [28]. В нашем исследовании более низкая мощность ультразвука от 200 до 400 Вт оказала незначительное влияние на TFC и TPC, чем TS мощностью 600 Вт. В совокупности эти результаты указывают на более высокую эффективность TS, чем пастеризация, по увеличению содержания TPC и TFC сока бузины.

3.3. Общее содержание антоцианов

Антоцианы — наиболее значимые биологически активные соединения, содержащиеся в ягодах бузины. Как показано в Таблице 4, TAC в образцах № 1 и № 2 составлял 1,29 и 1,44 Сус мг/см³ соответственно. Однако обработка TS увеличила TAC по сравнению с обработкой пастеризацией. Наибольшее содержание антоцианов установлено в образце № 5 (1,55 Сус мг/100 см³).

Следует отметить, что в некоторых исследованиях было установлено негативное влияние ультразвука. Например, содержание антоцианов снизилось после ультразвуковой обработки в клубничном соке [29]. Причиной была названа деградация антоцианов, вызванная образованием перекиси водорода во время окисления аскорбиновой кислоты из-за нестабильности и легкого распада аскорбиновой кислоты при высоких температурах.

Вместе с тем, в совокупности, полученные нами результаты позволяют предположить, что TS увеличивает общее содержание антиоксидантов, включая TPC, TFC и TAC, в соке бузины.

3.4. Влияние ТС на антиоксидантную активность сока бузины

3.4.1. Способность связывать радикалы DPPH

Способность к связыванию радикалов DPPH образцов, полученных при различных обработках, показана в Таблице 4. Способность образцов № 1 и № 2 к улавливанию радикалов DPPH составляла 47,8% и 50,4% соответственно. В то же время в образце № 5 наблюдалась самая высокая активность ингибирования DPPH (70,22%), что в 1,5 и 1,4 раза превышало значения для образцов № 1 и № 2 соответственно. Однако существенных изменений между образцами № 2 и № 3 не установлено. Аналогичные результаты были получены при исследовании клубничного сока [24]. Ранее сообщалось об улучшенной стабильности фенольных соединений и повышении антиоксидантной активности морковного сока, обработанного термозвуком (40–60 °C, 110 Вт, 40 кГц) [30]. Увеличение может быть связано с высоким содержанием фенольных соединений в соке после ультразвуковой обработки более высокой интенсивности, вызванной кавитацией. Она возникает во время обработки ультразвуком, что повышает эффективность извлечения и доступность этих соединений [31].

3.4.2. Способность связывать гидроксильные радикалы (•ОН)

Как показано в Таблице 4, способность к связыванию •ОН в свежем выжатом и пастеризованном соке составляла 51,68% и 50,76% соответственно, а в соке, обработанном TS, значительно возрастала ($p < 0,05$). Более того, способность к улавливанию •ОН в образце № 5 (56,13%) была значительно выше, чем в образце № 2, что указывает на то, что обработка TS низкой интенсивности не приводила к значительному увеличению этой способности.

Полученные результаты позволяют предполагать, что повышенные антиоксидантные способности сока, обработанного TS, могут быть связаны с увеличением содержания антиоксидантных соединений. TS может изменить структуру сока бузины, разрушив клеточную стенку и способствуя увеличению высвобождения связывающих фенольных кислот, что приведет к улучшению антиоксидантной способности [26].

3.5. Состав антоцианов

Как показано в Таблице 5, основными антоцианами с наибольшим содержанием в соке бузины были идентифицированы: цианидин-3-О-самбубиозид-5-О-глюкозид, цианидин-3-О-самбубиозит и цианидин-3-О-глюкозид. Образец № 2 содержал меньшее количество Су-2G и Су3G по сравнению с образцом № 1. Содержание Су-2G снизилось на 14% или на 78,2 мг/дм³, а содержание Су-3G снизилось на 28,3 мг/дм³ или 20% соответственно. Результаты других исследований показали, что длительное воздействие на антоцианы при высоких температурах ускоряет образование халконов, что приводит к деградации антоцианов [32]. Таким образом, можно сделать вывод, что воздействие высокой температуры во время пастеризации могло привести к деградации этих двух антоцианов, тем самым уменьшив их содержание. Напротив, содержание антоциана Су-G в образце № 2 увеличилось по сравнению с образцом № 1. Следует отметить, что в образцах № 3, № 4 и № 5 содержание Су-G, Су-2G значительно увеличилось по сравнению с образцами № 1 и № 2, тогда как увеличение содержания Су-3G было менее значительным. Из трех идентифицированных антоцианов цианидин-3-О-глюкозид был наиболее изменяемым антоцианом, и его содержание значительно возрастало с увеличением интенсивности обработки ультразвуком (в образцах № 4 и № 5 установлено значительно большее количество Су-G, чем в образцах № 1 и № 2). Кроме того, содержание двух других в процессе термозвуковой обработки также увеличилось. Так, например, по сравнению с образцом № 1 содержание цианидин-3-О-самбубиозита в образцах № 3, № 4 и № 5 выросло на 15,8%, 53% и 77,2% соответственно. Результаты нескольких исследований показали, что экстракция с помощью ультразвука способствовала повышению эффективности извлечения антоцианов. Результаты данного исследования подтверждают, что ультразвуковая обработка не разрушает антоцианы. Кроме того, при более высокой интенсивности ультразвуковой обработки это может вызвать значительное разрушение клеточных стенок, что приведет к миграции антоцианов в сок. Также ранее было установлено, что мощность ультразвука высокой интенсивности существенно снижает активность пероксидазы (ПОД) и полифенолоксидазы (ПФО), которые в основном ответственны за ферментативную деградацию антоцианов и за потемнение сока [33].

Таблица 5. Содержание основных антоцианов в образцах сока бузины

Table 5. Content of the main anthocyanins in the samples of elderberry juice

Образец	Су-Г — Цианидин-3-О-глюкозид (мг/дм ³)	Су-2Г — Цианидин-3-О-самбубиозит (мг/дм ³)	Су-3Г — Цианидин-3-О-самбубиозид-5-О-глюкозид (мг/дм ³)
№ 1	396,2 ± 31,4 ^b	557,4 ± 46,3 ^a	141,5 ± 21,1 ^a
№ 2	441,9 ± 11,8 ^a	479,2 ± 11,6 ^{ab}	113,2 ± 12,3 ^a
№ 3	517,6 ± 33,5 ^b	645,2 ± 43,6 ^{bc}	148,6 ± 15,5 ^a
№ 4	729,2 ± 56,4 ^c	853,3 ± 52,0 ^c	178,7 ± 14,7 ^a
№ 5	752,4 ± 60,4 ^d	987,5 ± 17,8 ^c	191,4 ± 23,8 ^a

Примечание: разные буквы a, b, c, d в одном столбце указывают на значительное расхождение между данными ($p < 0,05$)

3.6. Корреляция между содержанием антиоксидантов и антиоксидантной активностью

Неоднократно доказано, что на антиоксидантную активность оказывает влияние состав и количество биологически активных соединений и антиоксидантных веществ. Установлена корреляция между ТРС, ТРС, ТАС, отдельными антоцианами и антиоксидантной активностью. Коэффициент корреляции между ТРС, ТРС, ТАС, отдельными антоцианами и антиоксидантной способностью был выше 0,9, что указывает на наличие значимой положительной корреляции между антиоксидантами и антиоксидантной активностью. Среди трех типов антоциановых пигментов Су-Г, способный связывать радикалы DPPH и •ОН, показал самый высокий коэффициент корреляции ($R^2 = 0,98; 0,96$). Это свидетельствует о том, что антоциан цианидин-3-О-глюкозид оказывает значительное влияние на улучшение антиоксидантной активности.

Исследования гранатового и виноградного соков [34] и клубничного сока [24] показали, что цветовые характеристики и ТАС играют важную роль в улучшении антиоксидантной активности. В ходе данного исследования установлена заметная положительная корреляция между антиоксидантной активностью и ТРС, ТРС и ТАС. Аналогичные результаты были получены при исследовании клубничного сока [24] и томатного сока [35]. Результаты, полученные в ходе нашего исследования, подтвердили, что антиоксидантные компоненты оказывают значительное влияние на повышение общей антиоксидантной активности сока. Однако значимой корреляции между цветовыми характеристиками (L^* , YI , CI и TCD) и антиоксидантной способностью, за исключением цветового индекса, не наблюдалось. Коэффициент корреляции между цветовым индексом и антиоксидантной способностью был выше 0,9, что указывает на то, что значение цветового индекса может играть ключевую роль в улучшении общей антиоксидантной активности сока бузины.

Антоцианы — это пигменты, которые придают окраску цветам, фруктам и овощам. Цветовые характеристики антоцианов варьируются в зависимости от типа пигментов. Установлена значительная положительная корреляция между тремя типами антоциановых пигментов и CD , YI и TCD . Цветовой индекс CD показал самый вы-

сокий коэффициент корреляции с содержанием антоцианов Су-Г, Су-2Г и Су-3Г ($R^2 = 1; 0,98; 0,84$ соответственно), за ним следовали TCD ($R^2 = 0,85; 0,74; 0,68$) и YI ($R^2 = 0,89; 0,69; 0,55$). Эти результаты показали, что все три типа антоцианов играют значительную роль в изменении цветового индекса сока бузины. Между Су-Г и C и h установлена отрицательная корреляция. Напротив, между L^* и Су-Г существовала значительная положительная корреляция, позволяющая предположить, что яркость или темнота сока определялась содержанием антоциана Су-Г. Влияние содержания основных антоцианов на цвет сока бузины показано на Рисунке 2.

В предыдущих исследованиях других авторов было показано, что ультразвуковая обработка, играющая важную роль в определении цвета фруктовых вин, может влиять на стабильность активных компонентов и ускорять деградацию, конденсацию или полимеризацию антоцианов. Li и соавторы указали, что изменение содержания цианидин-3,5-диглюкозида, петунидин-3,5-диглюкозида, пеониин-3,5-диглюкозида, мальвидин-3,5-диглюкозида, петунидин-3-кумароил-5-глюкозида и мальвидин-3-(п-кумароил)-утионид-5-глюкозида при умеренной ультразвуковой обработке было основным фактором, определяющим изменение цвета черничного вина [26]. В данном исследовании установлено, что содержание трех антоциановых пигментов Су-Г, Су-2Г и Су-3Г является основными детерминантами цвета сока бузины.

3.7. Микробиологические показатели безопасности

Результаты микробиологических исследований соков представлены в Таблице 6.

Таблица 6. Влияние обработок на микробиологическую обсемененность сока бузины

Table 6. Effect of treatments on the microbiological contamination of elderberry juice

Образец сока	КМАФАнМ (log КОЕ/см ³)
№ 1	4,38 ± 0,01
№ 2	Не обнаружены
№ 3	1,21 ± 0,09
№ 4	Не обнаружены
№ 5	Не обнаружены

Общее количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ) не обнаружены в образце № 2 сока, который подвергался пастеризации, по сравнению контрольным образцом (4,38 ± 0,01). Инактивация микроорганизмов в образце № 2 может быть связана с тепловой обработкой, поскольку высокие температуры вызывают инактивацию метаболических ферментов и денатурацию белков, что нарушает неповрежденную структуру микроорганизма и изменяет присущую морфологию определенных клеток, приводя к необратимому повреждению клеток и к гибели микроорганизма [1]. Значительное снижение микробиологической обсемененности установлено в образце № 3, после термоультразвуковой обработки при температуре 65 °C в течение 15 минут (TS200 Вт, 20 кГц), 1,21 ± 0,09 log КОЕ/см³, относительно контрольного образца

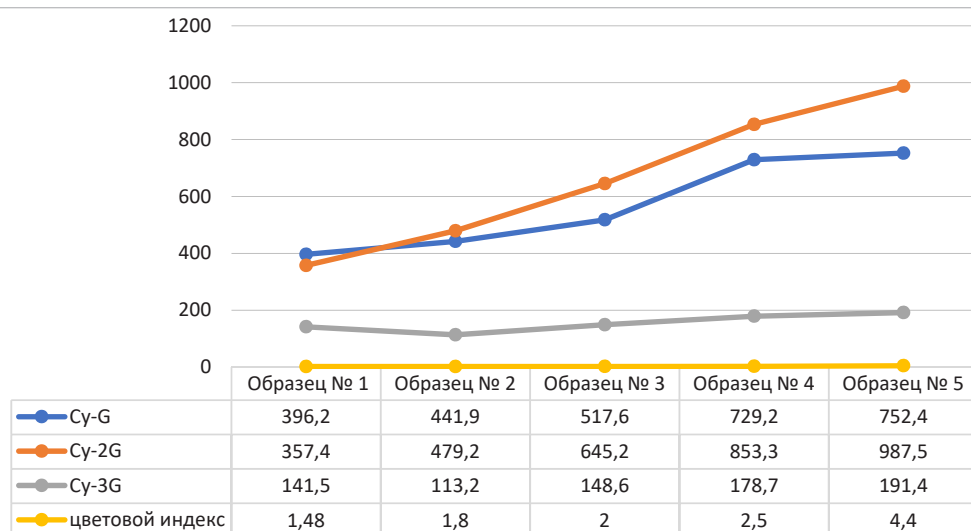


Рисунок 2. Влияние содержания основных антоцианов на цветовой индекс сока бузины

Figure 2. Effect of the content of the main anthocyanins on the color index of elderberry juice

($4,38 \pm 0,01 \log \text{КОЕ/см}^3$). Термоультразвуковая обработка сока TS400 Вт, 20 кГц (образец № 4) и TS600 Вт, 20 кГц (образец № 3) при температуре 65 °C в течение 15 минут обеспечила полную инактивацию мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (КМАФАнМ). Снижение общей микробиологической обсемененности достигается при повышении мощности ультразвука и за счет воздействия температуры обработки. Аналогичные результаты инактивации микроорганизмов под действием термоультразвуковой обработки получены и в других исследованиях [3,6].

4. Выводы

В результате проведенного исследования установлено, что термоультразвуковая обработка, в особенности обработка с высокой интенсивностью 600 Вт в течение 15 минут, способствовала значительному повышению в соке бузины содержания общих фенольных соединений, флавоноидов и антоцианов, ингибированию радикалов DPPH и •ОН, а также снижению общей микробиологической обсе-

ненности продукта. Результаты исследования также показали, что термоультразвуковая обработка способствует увеличению содержания трех антоциановых пигментов, включая цианидин-3-О-глюкозид, цианидин-3-О-самбубиозит и цианидин-3-О-самбубиозид-5-О-глюкозид, которые идентифицированы как основные антоцианы в соке бузины. Кроме того, обработка сока бузины термоультразвуком значительно улучшила его цветовые характеристики. Результаты исследования показывают, что для получения сока бузины с более высоким содержанием антиоксидантов и максимальной антиоксидантной активностью необходимо использовать термозвуковую обработку с высокой мощностью. Результаты позволяют предположить, что данный способ может быть эффективным методом пастеризации сока бузины с сохранением качественных показателей и антиоксидантной активности. Вместе с тем следует отметить, что для понимания влияния качественного и количественного состава антоцианов на цвет сока бузины и для оптимизации параметров его переработки необходимы дальнейшие исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

1. Бурак, Л. Ч. (2021). Существующие способы обработки пищевых продуктов и их влияние на пищевую ценность и химический состав. *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания*, 3, 59–73. [Burak, L. Ch. (2021). Existing food processing methods and their impact on nutritional value and chemical composition. *Technologies of the Food and Processing Industry of the Agro-industrial Complex — Healthy Food Products*, 3, 59–73. (In Russian)] <https://doi.org/10.24412/2311-6447-2021-3-59-73>
2. Anaya-Esparza, L. M., Velazquez-Estrada, R. M., Roig, A. X., Garcia-Galindo, H. S., Sayago-Ayerdi, S. G., Montalvo-Gonzalez, E. (2017). Thermosonication: An alternative processing for fruit and vegetable juices. *Trends in Food Science and Technology*, 61, 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.020>
3. Qureshi, T. M., Nadeem, M., Maken, F., Tayyaba, A., Majeed, H., Munir, M. (2020). Influence of ultrasound on the functional characteristics of indigenous varieties of mango (*Mangifera indica* L.). *Ultrasonics Sonochemistry*, 4, Article 104987. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.104987>
4. Oladunjoye, A. O., Adebeyejo, F. O., Okekunbi, T. A., Aderibigbe, O. R. (2021). Effect of thermosonication on quality attributes of hog plum (*Spondias mombin* L.) juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, Article 105316. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105316>
5. Nayak, P. K., Chandrasekar, C. M., Kesavan, R. K. (2018). Effect of thermosonication on the quality attributes of star fruit juice. *Journal of Food Process Engineering*, 41(7), Article e12857. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12857>
6. Liao, H., Jiang, L., Cheng, Y., Liao, X., Zhang, R. (2018). Application of nisin-assisted thermosonication processing for preservation and quality retention of fresh apple juice. *Ultrason Sonochem*, 42, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2017.11.020>
7. Sulaiman, A., Farid, M., Silva, F. V. (2017). Quality stability and sensory attributes of apple juice processed by thermosonication, pulsed electric field and thermal processing. *Food Science and Technology International*, 23(3), 265–276. <https://doi.org/10.1177/1082013216685484>
8. Chavan, P., Sharma, P., Sharma, S. R., Mittal, T. C., Jaiswal, A. K. (2022). Application of high-intensity ultrasound to improve food processing efficiency: A review. *Foods*, 11(1), Article 122. <https://doi.org/10.3390/foods11010122>
9. More, P. R., Jambak, A. R., Arya, S. S. (2022). Green, environment-friendly and sustainable techniques for extraction of food bioactive compounds and waste valorization *Trends in Food Science and Technology*, 128, 296–315. <http://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.08.016>
10. Fetyan, N. A. H., Salem Attia, T. M. (2020). Water purification using ultrasound waves: Application and challenges. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 27(1), 194–207. <http://doi.org/10.1080/25765299.2020.1762294>
11. Vujanović, M., Majkić, T., Zengin, G., Beara, I., Cvetanović, A., Mahomoodally, F. M. et al. (2019). Advantages of contemporary extraction techniques for the extraction of bioactive constituents from black elderberry (*Sambucus nigra* L.) flowers. *Industrial Crops and Products*, 136, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.058>
12. Gomez Mattson, M. L., Corfield, R., Bajda, L., Pérez, O. E., Schebor, C., Salvatori, D. (2021). Potential bioactive ingredient from elderberry fruit: Process optimization for a maximum phenolic recovery, physicochemical characterization, and bioaccessibility. *Journal of Berry Research*, 11, 51–68. <http://doi.org/10.3233/JBR-200629>
13. Бурак, Л. Ч., Сапач, А. Н. (2023). Биологически активные вещества бузины: свойства, методы извлечения и сохранения. *Пищевые системы*, 6(1), 80–94. [Burak, L. Ch., Sapach, A. N. (2023). Biologically active substances of elder: Properties, methods of extraction and preservation. *Food Systems*, 6(1), 80–94. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-1-80-94>
14. Najgebauer-Lejko, D., Liszka, K., Tabaszewska, M., Domagała, J. (2021). Probiotic yoghurts with sea buckthorn, elderberry, and sloe fruit purees. *Molecules*, 26(8), Article 2345. <https://doi.org/10.3390/molecules26082345>
15. Marţiş (Petruţ), G. S., Mureşan, V., Marc (Vlaic), R. M., Mureşan, C. C., Pop, C. R., Buzău, G. et al. (2021). The physicochemical and antioxidant properties of *Sambucus nigra* L. and *Sambucus nigra* Haschberg during growth phases: From buds to ripening. *Antioxidants*, 10(7), Article 1093. <https://doi.org/10.3390/antiox10071093>
16. Vujanović, M., Majkić, T., Zengin, G., Beara, I., Tomović, V., Šojić, B. et al. (2020). Elderberry (*Sambucus nigra* L.) juice as a novel functional product rich in health-promoting compounds. *RSC Advances*, 10(73), 44805–44814. <https://doi.org/10.1039/D0RA09129D>
17. Młynarczyk, Walkowiak-Tomczak, Staniek, H., Kidoń, M., Łysiak, G. P. (2020). The content of selected minerals, bioactive compounds, and the antioxidant properties of the flowers and fruit of selected cultivars and wild growing plants of *Sambucus nigra* L. *Molecules*, 25(4), Article 876. <https://doi.org/10.3390/molecules25040876>
18. Бурак, Л. Ч. (2022). Использование бузины (*Sambucus nigra* L.) в пищевой промышленности: состояние и дальнейшие перспективы (обзор). *Химия растительного сырья*, 3, 49–69. [Burak, L. Ch. (2022). Use of elderberry (*Sambucus nigra* L.) in the food industry: Status and future prospects. Overview. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 3, 49–69. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.20220310937>
19. Ordóñez-Santos, L. E., Martínez-Girón, J., Arias-Jaramillo, M. E. (2017). Effect of ultrasound treatment on visual color, vitamin C, total phenols, and carotenoids content in Cape gooseberry juice. *Food Chemistry*, 233, 96–100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.114>
20. Walkowiak-Tomczak, D., Czapski, J., Młynarczyk, K. (2017). Assessment of colour changes during storage of elderberry juice concentrate solutions using the optimization method. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 15(3), 299–309. <https://doi.org/10.17306/j.ajs.2016.3.29>
21. Suo, G., Zhou, C., Su, W., Hu, X. (2022). Effects of ultrasonic treatment on color, carotenoid content, enzyme activity, rheological properties, and microstructure of pumpkin juice during storage *Ultrasonics Sonochemistry*, 84, Article 105974. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105974>
22. Qiu, X., Su, J., Nie, J., Zhang, Z., Ren, J., Wang, S. et al. (2024). Effects of thermosonication on the antioxidant capacity and physicochemical, bioactive, microbiological, and sensory qualities of blackcurrant juice. *Foods*, 13(5), Article 809. <https://doi.org/10.3390/foods13050809>
23. Дейнека, В. И., Олейник, Е. Ю., Павлов, А. А., Михеев, А. Ю., Шелепова, О. В., Волкова, О. Д., Хлебникова, Е. И. (2020). Определение антоцианов плодов некоторых растений рода *Ribes* методами обращенно-фазовой ВЭЖХ и гидрофильной хроматографии. *Химия растительного сырья*, 1, 81–88. [Deineka, V. I., Oleinits, E. Yu., Pavlov, A. A., Mikheev, A. Yu., Shelepova, O. V., Volkova, O. D., Khlebnikova, E. I. (2020). Determination of anthocyanins of fruits of some plants of the genus *Ribes* by reversed-phase HPLC and hydrophilic interaction chromatography (HILIC). *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 1, 81–88. (In Russian)] <https://doi.org/10.14258/jcprm.2020016331>
24. Wang, J., Wang, J., Ye, J. H., Vanga, S. K., Raghavan, V. (2019). Influence of high-intensity ultrasound on bioactive compounds of strawberry juice: Profiles of ascorbic acid, phenolics, antioxidant activity and microstructure. *Food Control*, 96, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.09.007>
25. Ruiz-De Anda, D., Ventura-Lara, M. G., Rodríguez-Hernández, G., Ozuna, C. (2019). The impact of power ultrasound application on physicochemical, antioxidant, and microbiological properties of fresh orange and celery juice blend. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(4), 3140–3148. <https://doi.org/10.1007/s11694-019-00236-y>
26. Li, X. S., Zhang, L., Peng, Z. Y., Zhao, Y. Q., Wu, K. Y., Zhou, N. et al. (2020). The impact of ultrasonic treatment on blueberry wine anthocyanin color and its In-vitro anti-oxidant capacity. *Food Chemistry*, 333, Article 127455. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127455>
27. Aadil, R. M., Zeng, X. A., Zhang, Z.-H., Wang, M.-S., Han, Z., Jing, H. et al. (2015). Thermosonication: A potential technique that influences the quality of grapefruit juice. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(5), 1275–1282. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12766>
28. Abid, M., Jabbar, S., Hu, B., Hashim, M. M., Wu, T., Lei, S. C. et al. (2014). Thermosonication as a potential quality enhancement technique of apple juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(3), 984–990. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2013.12.003>
29. Xu, B., Feng, M., Chitrakar, B., Cheng, J., Wei, B., Wang, B. et al. (2023). Multi-frequency power thermosonication treatments of clear strawberry juice: Impact on color, bioactive compounds, flavor volatiles, microbial and polyphenol oxidase inactivation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 84, Article 105295. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.105295>
30. Adiamo, O. Q., Ghafoor, K., Al-Juhaimi, F., Babiker, E. E., Mohamed Ahmed, I. A. (2018). Thermosonication process for optimal functional properties in carrot juice containing orange peel and pulp extracts. *Food Chemistry*, 245, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.090>

31. Adiamo, O. Q., Ghafoor, K., Al-Juhaimi, F., Mohamed Ahmed, I. A. M., Babiker, E. E. (2017). Effects of thermosonication and orange by-products extracts on quality attributes of carrot (*Daucus carota*) juice during storage. *International Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 2115–2125. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13490>

32. Thomasi, S. S., de Benedicto, D. F. C., da Conceição Alves, T., Bellele, B. S., Venâncio, T., de Andrade Mattietto, R. et al. (2024). Chemical constituents of açai berry pulp (*Euterpe oleracea* Mart.) by LC-UV-BPSU/NMR and LC-UV-SPE/NMR. *Natural Product Research*, 4, Article 2338805. <https://doi.org/10.1080/14786419.2024.2338805>

33. da Silveira, T. F. F., Cristianini, M., Kuhnle, G. G., Ribeiro, A. B., Filho, J. T., Godoy, H. T. (2019). Anthocyanins, non-anthocyanin phenolics, tocopherols and antioxidant capacity of acai juice (*Euterpe oleracea*) as affected by high pressure processing and thermal pasteurization. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 55, 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.05.001>

34. Baron, M., Prusova, B., Tomaskova, L., Kumsta, M., Sochor, J. (2017). Terpene content of wine from the aromatic grape variety 'Irsai Oliver' (*Vitis vinifera* L.) depends on maceration time. *Open Life Sciences*, 12(1), 42–50. <https://doi.org/10.1515/biol-2017-0005>

35. Lafarga, T., Ruiz-Aguirre, I., Abadias, M., Vinas, I., Bobo, G., Aguilo-Aguayo, I. (2019). Effect of thermosonication on the bioaccessibility of antioxidant compounds and the microbiological, physicochemical, and nutritional quality of an anthocyanin-enriched tomato juice. *Food and Bioprocess Technology*, 12(1), 147–157. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2191-5>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Бурак Леонид Чеславович — кандидат технических наук, директор, Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА» 220118, Республика Беларусь, Минск, ул. Шаранговича, 19, офис 718 Тел.: +375–29–646–65–25 E-mail: leonidburak@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6613-439X	Leonid Ch. Burak , Candidate of Technical Sciences, Director, BELROSAKVA Limited Liability Company 19, Sharangovich Str., Minsk, 220018, Republic of Belarus Tel.: +375–29–646–65–25 E-mail: leonidburak@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6613-439X
Завалей Андрей Петрович — начальник испытательной лаборатории, Совместное общество с ограниченной ответственностью «Ароматик» 222112, Республика Беларусь, Минская область, Дзержинск, ул. Колхозная, 1 Тел.: +375–29–129–01–98 E-mail: zavaley@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6565-5927	Andrey P. Zavaley , Head of Testing Laboratory, Joint Limited Liability Vompny “Aromatic” 1, Kolkhoznaya Str., Dzherzhinsk, Minsk Region, 222112, Republic of Belarus Tel.: +375–29–129–01–98 E-mail: zavaley@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6565-5927
Яблонская Вероника Владимировна — главный технолог, Совместное общество с ограниченной ответственностью «Ароматик» 222112, Республика Беларусь, Минская область, Дзержинск, ул. Колхозная, 1 Тел.: +375–296–30–30–67 E-mail: v_taiy@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7481-7534	Veranika V. Yablonskaya , Chief Technologist, Joint Limited Liability Vompny “Aromatic” 1, Kolkhoznaya Str, Dzherzhinsk, Minsk Region, 222112, Republic of Belarus Tel.: +375–296–30–30–67 E-mail: v_taiy@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7481-7534
Сапач Александр Николаевич — инженер-химик, Общество с ограниченной ответственностью «БЕЛРОСАКВА» 220118, Республика Беларусь, Минск, ул. Шаранговича, 19, офис 718 Тел.: +375–29–756–95–19 E-mail: aleksandr@belrosakva.by ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8579-2689 * автор для контактов	Alexander N. Sapach , Chemist, BELROSAKVA Limited Liability Company 19, Sharangovich Str., Minsk, 220018, Republic of Belarus Tel.: +375–29–756–95–19 E-mail: aleksandr@belrosakva.by ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8579-2689 * corresponding author
Критерии авторства	Contribution
Л. Ч. Бурак: концептуализация, разработка методологии исследования, научное руководство исследованием, проведение исследования, написание-рецензирование и редактирование рукописи; А. П. Завалей: проведение исследования, работа с программным обеспечением, проверка данных, написание и редактирование рукописи; В. В. Яблонская: анализ литературных источников по теме исследования, проведение исследования, написание и редактирование рукописи; А. Н. Сапач: проведение физико-химическим методов исследования образцов, работа с программным обеспечением, валидация, написание статьи.	L. Ch. Burak: conceptualization, development of research methodology, scientific supervision of the research, conducting the research, writing and reviewing, manuscript editing; A. P. Zavalei: conducting research, working with software, checking data, writing and editing the manuscript; V. V. Yablonskaya: analysis of literary sources on the research topic, conducting research, writing and editing the manuscript; A. N. Sapach: carrying out physical and chemical methods of studying samples, working with software, validation, writing an article.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.