

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГА СПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ
PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTS

УДК 664.68.022.33.061.3
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-4-335-352>

Поступила в редакцию 16.05.2024
Received 16.05.2024

**О. А. Суворов^{1,2}, В. В. Каширская¹, А. С. Власенко¹, М. С. Сафонов^{1,2},
А. Л. Кузнецов², М. А. Погорелова²**

¹Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Российская Федерация
²Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, Пущино, Российская Федерация

**ПРИМЕНЕНИЕ В КОНДИТЕРСКИХ КРЕМАХ ЭКСТРАКТОВ
ИЗ СВЕКЛЫ СТОЛОВОЙ (*BETA VULGARIS L.*),
ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ**

Аннотация. В современном мире наблюдается тенденция к внедрению здоровых привычек питания – потребители предпочитают натуральные ингредиенты, выделенные из растительного сырья. Традиционные технологии, используемые для получения пищевых красителей, обладают рядом недостатков, поэтому разрабатываются новые способы – высокоэффективные, безопасные, ресурсосберегающие. Инновационным подходом выделения пигментов является ультразвуковая экстракция (УЗЭ) в среде электрохимически активированного водного раствора (ЭХАР). Особый интерес представляет использование вторичных сырьевых ресурсов в виде отходов производства, например кожуры корнеплодов. Цель работы состояла в извлечении из свеклы столовой посредством УЗЭ в среде метастабильных фракций ЭХАР натуральных красителей и изучении возможности их внесения в пищевую систему кондитерского крема. Красящие вещества из кожуры свеклы столовой (*Beta vulgaris L.*) извлекали посредством УЗЭ (мощность 24 Вт, частота ультразвука (УЗ) 1,7 МГц, продолжительность – 60 мин). Для экстракции пигмента использовали растворители: питьевую воду, окисленную (анолит) и восстановленную (католит) фракции ЭХАР; соотношение сырья и растворителя в пропорции 1 : 3 (по массе). Получены водные растворы красящих веществ, извлеченных из кожуры свеклы столовой. Изучено влияние растворителя на физико-химические показатели качества экстракта и органолептические свойства готового крема. Показано, что УЗЭ в окисленной фракции ЭХАР влияет на массовую долю сухих веществ в экстракте, а добавление их в крем для мучных кондитерских изделий в пропорции 1 : 6 (мл/г) обеспечивает желаемые органолептические показатели. Вид растворителя (вода, анолит, католит) влияет на содержание в экстракте растворимых сухих веществ, степень экстракции и качество готового кондитерского крема. Перспективы использования результатов исследования связаны с разработкой технологии экстракции натуральных красителей в щадящих условиях, а также применением растительных экстрактов в эмульсионных пищевых системах с целью повышения их пищевой ценности, привлекательности и замены синтетических красителей.

Ключевые слова: натуральные красители, беталаин, свекла столовая (*Beta vulgaris L.*), вторичные сырьевые ресурсы, ультразвуковая экстракция, сканирующая электронная микроскопия, микровзвешивание сухого остатка

Для цитирования: Применение в кондитерских кремах экстрактов из свеклы столовой (*Beta vulgaris L.*), полученных с использованием ультразвуковой обработки / О. А. Суворов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2024. – Т. 62, № 4. – С. 335–352. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-4-335-352>

**Oleg A. Suvorov^{1,2}, Vasilina V. Kashirskaya¹, Alexey S. Vlasenko¹, Maxim S. Safonov^{1,2},
Alexander L. Kuznetsov², Maria A. Pogorelova²**

¹Russian Biotechnology University, Moscow, Russian Federation

²Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russian Federation

**APPLICATION IN CONFECTIONERY CREAMS OF TABLE BEET EXTRACTS (*BETA VULGARIS L.*)
OBTAINED USING ULTRASONIC TREATMENT**

Abstract. There is a trend towards healthy nutrition in the modern world, which causes consumers to favor natural ingredients isolated from plant raw materials. Traditional technologies used for obtaining food colorants have a number of disadvantages, so new methods are being developed – highly efficient, safe, and resource-saving. An innovative approach to the

extraction of pigments is ultrasonic extraction (USE) in the medium of electrochemically activated aqueous solution (ECAS). Utilization of secondary raw materials in the form of production waste, such as root vegetable peels, is of particular interest. The aim of the work was to extract natural colorants from table beetroot by means of USE in metastable fractions of ECAS and to study the possibility of their introduction into the food system of confectionery cream. The coloring substances from table beet (*Beta vulgaris* L.) peel were extracted by ultrasound (power 24 W, ultrasound frequency 1.7 MHz, duration 60 min). The solvents used for pigment extraction were drinking water, oxidized (anolyte) and reduced (catholyte) fractions of ECAS; at the ratio of raw materials and solvent of 1 : 3 (by weight). Aqueous solutions of coloring substances extracted from table beet peel were obtained. The influence of the solvent on physicochemical indicators of the extract quality and organoleptic properties of the finished cream was studied. It is shown that USE in the oxidized fraction of ECAS affects the mass fraction of dry substances in the extract, and their addition to the cream for flour confectionery products at the ratio of 1 : 6 (ml/g) ensures the desired organoleptic indicators. The type of solvent (water, anolyte, catholyte) affects the content of soluble solids in the extract, the degree of extraction and the quality of the finished confectionery cream. Prospects of practical use of the research results are connected with the development of technology of extraction of natural coloring agents under gentle conditions, as well as the use of plant extracts in emulsion food systems in order to increase their nutritional value, attractiveness and replacement of synthetic colorants.

Keywords: natural colorants, betalain, table beet (*Beta vulgaris* L.), secondary raw materials, ultrasonic extraction, scanning electron microscopy, micro-weighing of dry residue

For citation: Suvorov O. A., Kashirskaya V. V., Vlasenko A. S., Safonov M. S., Kuznetsov A. L., Pogorelova M. A. Application in confectionery creams of table beet extracts (*Beta vulgaris* L.) obtained using ultrasonic treatment. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 4, pp. 335–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-4-335-352>

Введение. Цвет – значимый параметр, по которому оценивают потребительское качество пищевых продуктов [1]. Визуальная характеристика оказывает непосредственное влияние на первичное восприятие, выбор и потребление пищи человеком [2]. Пищевые красители используют для придания продуктам более привлекательного вида и, следовательно, улучшения перспективы их реализации [3]. В пищевой промышленности используются синтетические и натуральные красители. Синтетические пигменты характеризует низкая себестоимость, широкая цветовая гамма и стойкость к внешнему воздействию, однако они могут вызывать аллергию и даже быть токсичными для человека [4], а их в производство сопряжено с загрязнением окружающей среды [5].

Поскольку синтетические добавки обладают нежелательными побочными свойствами, в качестве их заменителя используют натуральные пищевые красители [6]. Натуральные красители из растительного сырья, как и другие натуральные пищевые ингредиенты, применяются при разработке функциональных продуктов питания, обладающих повышенной пищевой ценностью [7, 8]. Распространение научных знаний о питании, составе и пищевой ценности продуктов обусловили значительное повышение спроса на функциональные пищевые продукты, натуральные пищевые добавки и в целом на экологически чистые процессы [9–11]. Современные потребители рассматривают пищевые продукты, не содержащие искусственных красителей, антиоксидантов, консервантов или других добавок как «здоровые» продукты [12–15].

Красители природного происхождения не только улучшают внешний вид продуктов питания, но и оказывают благоприятное воздействие на организм человека [16]. Например, пигменты группы бетаина, содержащиеся в свекле столовой, обладают антиоксидантным, противовоспалительным и противоопухолевым действием [17–19]. Сообщалось также, что диеты, богатые указанным пигментом, могут использоваться в качестве дополнения к терапии заболеваний, связанных с окислительным стрессом, воспалением и дислипидемией [20, 21, 13]. В условиях органического земледелия ключевым направлением агропромышленного комплекса и индустрии питания является выращивание свеклы столовой без применения защитных препаратов, что становится дополнительным преимуществом с точки зрения здорового питания [22, 23].

Источником бетаина кроме красной свеклы, листьев корнеплода и свекольных выжимок являются питая желтая, шелуха хлебной зерновой культуры киноа, семена чиа, листья амаранта [6]. Бетаины представляют собой водорастворимые азотистые растительные пигменты, производные тирозина. Данные пигменты можно разделить на два основных класса: желто-оранжевый бетаксантин и красно-фиолетовый бетацианин [1, 20]. Фенольные и аминные группы придают этим пигментам восстанавливающие и стабилизирующие свойства. Пигменты бетаины

более стабильны, чем антоцианы, их цвет устойчив в широком диапазоне pH (от 3 до 7) [24]. В щелочной среде (pH 8–9) цвет беталаинов меняется на оранжевый, а при pH 10–12 становится желтым [21]. Изменяя молекулярную структуру, температура также действует на беталаины [8]. На стабильность пигмента оказывает влияние его концентрация, кислород, свет, хелатирующие агенты, условия хранения и обработки. Воздействие дневного света при температуре 15 °C приводит к деградации пигмента до 15,6 % [9].

Растущая популярность натуральных ингредиентов стимулирует поиск новых источников природных пигментов и развитие инновационных методов их извлечения. Традиционная экстракция многими исследователями не считается экологически безопасной технологией, так как предусматривает использование летучих, легковоспламеняющихся и токсичных органических растворителей, негативно влияющих на безопасность производства и окружающую среду [12, 13, 25–27].

Процесс экстракции с помощью ультразвуковой обработки в литературе представлен как новая зеленая стратегия, предусматривающая производство целевого продукта максимально щадящим способом. Для зеленого технологического процесса характерны минимальное количество безопасных реагентов из возобновляемого сырья, небольшая длительность и малое число стадий получения экстракта, отсутствие или минимальное количество побочных продуктов и токсичных отходов [7, 25, 28]. Перспективность применения ультразвуковой экстракции (УЗЭ) связана со следующими достоинствами: использованием несложного технологического оборудования, оперативностью процесса экстракции, щадящими условиями извлечения веществ. Последнее преимущество означает отсутствие деструкции целевого продукта и снижение его потерь во время процесса экстракции, а также полноту разделения и концентрирования экстрагированных веществ [29].

Ультразвуковая экстракция показала себя одним из наиболее эффективных, экологических и ресурсосберегающих способов извлечения целевых веществ из свеклы [13, 30] и побочных продуктов ее переработки (кожуры, порошка кожуры [12], стеблей [30], листьев [31]). Для повышения выхода беталаинов проводят оптимизацию условий экстракции по показателям мощности, частоты УЗ, продолжительности обработки, соотношения масс сырья и растворителя [13, 30, 31]. В дополнение к УЗ в качестве растворителя применяют водно-спиртовые смеси [32], а также воду [30, 31].

УЗЭ сочетается с другими физико-химическими методами выделения и очистки [29]. Большой интерес представляет включение в способ УЗЭ электрохимически активированных растворов (ЭХАР) в качестве растворителя. ЭХАР получают посредством униполярной обработки воды в анодной и катодной камерах диафрагменного электролизера под действием постоянного электрического тока. Окисленная и восстановленная фракции ЭХАР (анолит и католит соответственно) находятся в метастабильном состоянии, характеризующимся процессами релаксации в течение определенного времени. В этот период растворы обладают повышенной реакционной способностью, однако с течением времени физико-химические показатели постепенно возвращаются к исходным величинам.

Электрохимическая активация позволяет регулировать основные физико-химические параметры водных растворов (pH, окислительно-восстановительный потенциал – ОВП, состав ионов и пузырьков газа) [33, 34]. ЭХАР в полной мере можно отнести к «зеленым» растворителям, безопасным для людей и окружающей среды, которые обладают высокой биоразлагаемостью, не вызывают токсичных выбросов в атмосферу в процессе производства [7, 25].

Электрохимически активированная (ЭХА) деионизированная вода рассматривается в качестве зеленой альтернативы органическим растворителям в процессе экстракции полифенолов и проантоцианидинов из коры ольхи черной. Одностадийная водная экстракция позволяет выделить до 90 % от массы веществ и показателей антиоксидантной активности, традиционно выделяемых методом последовательной экстракции 40%-ной (об. : об.) водно-спиртовой смесью [35]. Обработка свекольного сока в анодной камере электрохимического реактора при силе тока 100–300 мА в течение 120 мин перспективна как способ нетермической стабилизации сока красной

свеклы. Полученный кислый сок имел pH 4 и 5, ОВП $\approx +300$ мВ. При этом существенно не изменились цвет, содержание сухих веществ и фенольных соединений, степень Брикса. Анодная обработка позволила повысить антиоксидантную способность сока, уменьшить потери беталаиновых пигментов. Предложено использовать электроактивированный свекольный сок в качестве стабилизирующей добавки при производстве концентрированного свекольного сока с целью сохранения красящих веществ [36].

Предполагается, что сочетанное действие ультразвука и уникальных свойств фракций ЭХАР окажет синергетический эффект на степень экстракции пигмента из растительной клетки. Комбинирование ультразвука и различных видов ЭХА воды (кислотной, основной и слабокислой, АEW, BEW и SAEW соответственно) в качестве растворителя представлено как новая методология извлечения биоактивных веществ (БАВ) из кожуры мандарина *Citrus reticulata*. Экстракт, полученный с помощью УЗЭ + SAEW, показал максимальные значения общих фенолов и антиоксидантной активности. Наибольшее содержание общих флавоноидов наблюдалось после обработки УЗЭ + АEW. При оптимальных условиях УЗЭ время обработки сократилось на 87,5 %. Экстракт в составе пищевых продуктов может повысить их пищевую ценность и усилить антиоксидантные свойства. По мнению авторов, разработанный метод рационального использования отходов переработки фруктов является экологически чистым, отличается низким уровнем потребления энергии, невысокой стоимостью после покупки соответствующего оборудования и легко внедряется на промышленном уровне [37].

Цель настоящего исследования состояла в извлечении из свеклы столовой (*Beta vulgaris* L.) посредством УЗЭ в среде фракций ЭХАР натуральных красителей, а также изучение возможности внесения полученных экстрактов в пищевую систему кондитерского крема.

Выбор свеклы в качестве объекта исследования обусловлен ее широким распространением в отечественном пищевом производстве и важной ролью в рационе питания отечественных потребителей [13, 38].

Материалы и методы исследований. Исследовали натуральные красители, полученные из свежей очищенной свеклы столовой и из очистков свеклы столовой (*Beta vulgaris* L.) методом УЗЭ, для чего использовали генератор SOBO M-01 (Китай) мощностью 24 Вт и частотой 1,7 МГц. Продолжительность экстракции 60 мин. В качестве среды для экстракции применяли питьевую воду или фракции (анодит и католит) ЭХАР, полученные из этой воды в электролизере «Супер-Плюс» (ООО «ЭкоДом», Россия) при мощности 7–14 Вт (эксперимент 1) и мощности 21–29 Вт (эксперимент 2), при соотношении сырья и растворителя 1 : 3 г на мл.

Контрольные образцы получали традиционной экстракцией методом мацерации (настаиванием сырья в воде без нагревания) при соотношении образец и растворитель в пропорции 1 : 3 по массе (при гидромодуле 3).

Рефрактометрический анализ экстрактов выполнен по ГОСТ ISO 2173-2013 «Продукты переработки фруктов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ» на рефрактометре ИРФ-454Б2М (Россия). Кислотность водной среды (pH), ОВП и температуру образцов определяли с помощью милливольтметра pH-420 (ООО «НПО Аквилон», Россия). Опыты выполняли в трех повторностях.

Микроскопические исследования образцов проводили в проходящем свете с помощью оптического микроскопа «Микромед 2» (Россия), изображения обрабатывали в программе ImageJ.

Анализ тонкой структуры поверхности объектов изучали в сканирующем электронном микроскопе (JSM-6390A, Япония), используя режим вторичных электронов.

Метод микровзвешивания сухого остатка реализован с помощью кварцевого резонатора (Quartz Crystal Microbalance – QCM). Измеряли сдвиг резонансной частоты кварцевого кристалла после высыхания капли раствора, нанесенной на его поверхность. Методом микровзвешивания сухого остатка определяли суммарное содержание (г/л) растворимых веществ в экстракте очищенной и натертой свеклы, взятом в объеме 2 μ L.

Результаты и их обсуждение. В работе рассмотрена возможность применения метода ультразвуковой экстракции пигментов из продуктов переработки свеклы столовой (*Beta vulgaris* L.)

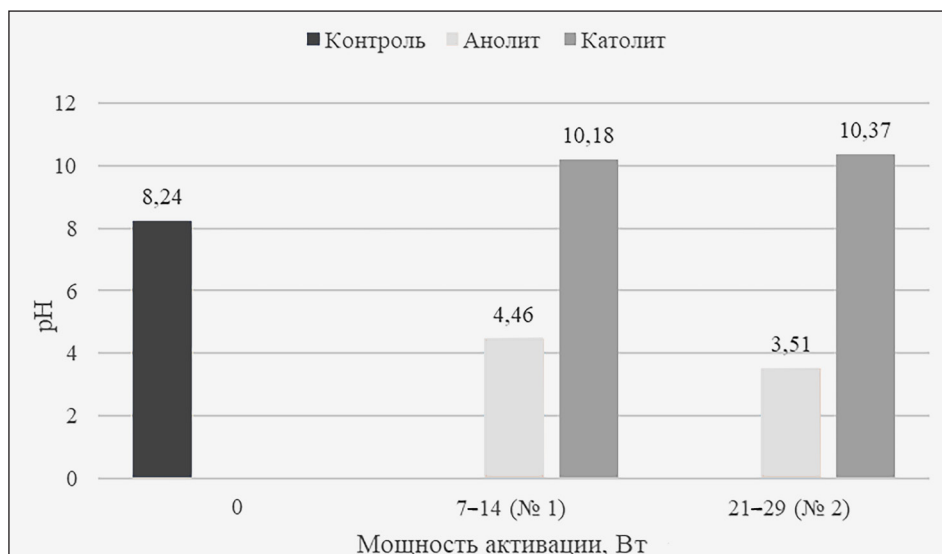


Рис. 1. Зависимость pH питьевой воды (контроль) и фракций ЭХАР (анолит, католит) от мощности при 30 мин электроактивации

Fig. 1. Dependence of pH of drinking water (control) and ECAS fractions (anolyte, catholyte) on power at 30 minutes of electrical activation

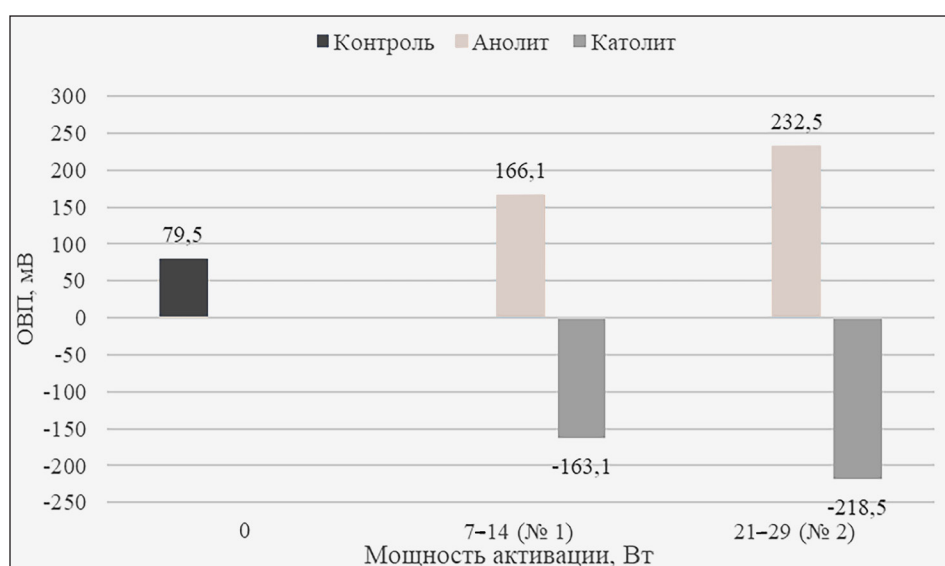


Рис. 2. Зависимость ОВП питьевой воды (контроль) и фракций ЭХАР (анолит, католит) от мощности при 30 мин электроактивации

Fig. 2. Dependence of ORP of drinking water (control) and ECAS fractions (anolyte, catholyte) on power at 30 minutes of electrical activation

для их использования в пищевых модельных системах на примере крема для мучных кондитерских изделий. Электрохимическую активацию питьевой воды для повышения эффективности последующей УЗЭ проводили в течение 30 мин при мощности 7–14 Вт (эксперимент 1) и мощности 21–29 Вт (эксперимент 2) – двух режимах, предназначенных для обработки питьевой водопроводной воды в указанном электроактиваторе. Полученные зависимости параметров (pH и ОВП) питьевой воды от условий электроактивации приведены на рис. 1 и 2. На них продемонстрирован результат электролитического разделения воды на две метастабильные фракции (анолит и католит), которые накапливаются в анодной или катодной камере диафрагменного

электролизера [33]. Подкисление и подщелачивание фракций воды происходит в результате воздействия электрического тока без добавления в воду дополнительных кислот или оснований.

После **катодной** обработки пресная вода приобретает щелочную реакцию из-за превращения некоторой части растворенных солей в гидроксиды. Снижается величина ОВП, поверхностное натяжение, содержание растворенного кислорода, электропроводность, в то же время возрастает концентрация водорода, свободных гидроксильных групп. Катодит приобретает восстановительную способность.

В результате **анодной** электрохимической обработки увеличиваются ОВП и кислотность воды, содержание растворенных газов, электропроводность. Анолит обладает окислительными свойствами [33]. Видно, что отклонения величин показателей рН и ОВП от исходного уровня напрямую зависят от мощности обработки.

На первом этапе исследований для **экстракции использовали свежую свеклу, очищенную и натертую**. Режим электрохимической активации: мощность 7–14 Вт, 30 мин. Органолептические показатели каждого образца оказались одинаковыми: темно-красный жидкий раствор со слегка различимым запахом и вкусом свеклы. В полученных экстрактах было установлено содержание сухих веществ и рН.

В соответствии с ГОСТ ISO 2173-2013 содержание растворимых сухих веществ определяется рефрактометрическим методом как концентрация сахарозы в водном растворе с показателем преломления, равным показателю преломления исследуемого раствора при установленной температуре и установленных условиях определения. Метод применим для густых продуктов, для продуктов, содержащих взвешенные частицы, и для продуктов с большим содержанием сахара. Применительно к продуктам, содержащим другие растворенные вещества помимо сахара, результат испытания, полученный данным методом, представляет собой условную величину, для удобства принимаемую за содержание растворимых сухих веществ. Показатель преломления анализируемого раствора измеряли при температуре $(20,0 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$ на рефрактометре. Массовую долю растворимых сухих веществ (в пересчете на сахарозу), соответствующую найденному показателю преломления раствора, находили по таблицам (ГОСТ ISO 2173-2013). Параметры экстракции и полученные физико-химические характеристики экстрактов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты физико-химических испытаний экстрактов, полученных из очищенной свежей свеклы (эксперимент 1)

Table 1. Results of physicochemical tests of extracts obtained from purified fresh beets (experiment 1)

Растворитель	Параметр экстракции	Объем экстракта, мл	рН	ОВП, мВ	Температура, °С	Показатель преломления	Массовая доля растворимых сухих веществ, %
Вода	–	–	7,2	80,0	23,0	–	–
Катодит	–	–	10,18	–163,1	23,0	–	–
Анолит	–	–	4,46	166,1	23,0	–	–
Вода (Контроль, экстракт)	Экстракция методом мацерации в воде, температура 22 °С; время 1 ч	150	7,48	49,3	23,0	1,3351	1,4
Вода (УЗЭ)	Соотношение сырье/растворитель в пропорции 1 : 3 Время 1 ч Мощность УЗ 24 Вт, частота УЗ 1,7 МГц, температура в начале экстракции 22 °С, по завершении 52 °С	141	7,41	50,4	23,0	1,3354	1,7
Катодит (УЗЭ)		142	7,77	12,9	23,0	1,3363	2,3
Анолит (УЗЭ)		140	6,53	87,4	23,0	1,3369	2,7

Общее уменьшение объема экстракта по сравнению с контролем может быть связано с тем, что под действием УЗ произошло связывание воды биополимерами свеклы (главным образом пектином, которого в свекле содержится 2,5 %), часть жидкости осталась в осадке. Незначительное различие объемов экстракта на основе воды и ЭХАР свидетельствует о том, что наибольший вклад в уменьшение объема вносит именно УЗ. Вероятно, под действием УЗ и повышения температуры во время экстракции происходит выравнивание рН смеси в области нейтральных значений. Показатели ОВП также свидетельствуют о процессах релаксации. ОВП католита, равное -163 мВ, после экстракции сдвигается в сторону положительных значений и равно $12,9$. ОВП анолита, напротив, снижается со $166,1$ до $87,4$ мВ. В то же время ОВП контрольного образца экстракта, полученного методом мацерации в необработанной воде, также снижается с 80 до $50,4$ мВ. Можно предположить, что такой характер изменения обусловлен антиоксидантными свойствами беталаинов свеклы [19]. Существенная разница наблюдается между массовой долей растворенных сухих веществ (СВ) в контрольном и опытных образцах. Обработка УЗЭ в водной среде приводит к повышению массовой доли СВ на $21,4$ % по сравнению с мацерацией без использования УЗ. В экстрактах на основе католита и анолита превышение составляет $64,3$ и $92,9$ %.

При сравнении показателей СВ опытных образцов между собой можно отметить максимальное содержание в экстракте на основе анолита, превышающее содержание СВ в экстракте на католите на $17,4$ %, а в экстракте на воде на $58,8$ %. При УЗЭ в среде анолита отмечается также наименьший объем экстракта, что может косвенно свидетельствовать о более выраженной вододерживающей способности пектина.

Эффективность экстракции веществ из растительной клетки обусловлена разрушением ее целлюлозной оболочки. Влияние воздействия УЗ на свеклу изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии, исследуя поверхность образца после 40 мин экстракции в воду или фракции ЭХАР (рис. 3).

Визуальный анализ микрофотографий показывает, что для всех образцов характерны грубые дефекты, вызванные повреждением ткани корнеплода при его натирании на терке. Видимых различий между образцами, подвергнутыми первичной механической подготовке проб, после УЗ-обработки не обнаружено.

Эффективность ультразвуковой экстракции можно оценить по весу растворенной компоненты в известном объеме экстрагирующей жидкости, в нашем случае это вода или фракции ЭХАР. Для определения этого показателя использовали метод микровзвешивания сухого остатка в объеме 2 μL с помощью кварцевого резонатора. Блок-схема и результаты измерения данным методом суммарного содержания (г/л) в экстракте свеклы приведены на рис. 4.

Используемый метод микровзвешивания очень перспективен при определении веса сухого остатка в растворе для объема несколько микролитров (μL). Опыт применения микровзвешивания был накоплен для капли (2 μL) и детально описан ранее [34, 39]. В основе лежит регистрация изменения резонансной частоты кварцевого кристалла после нанесения на его поверхность пленки вещества. Особенности анализа веса с помощью данного гравиметрического подхода поясняет представленный рисунок. Видно, что масса экстрагированного в католит вещества в разы превышает результат воды или анолита. Такое расхождение можно объяснить тем, что вес сухого остатка включает в себя вклад всех экстрагируемых компонент. Таким образом, для очищенной и натертой столовой свеклы наиболее эффективной водной средой, наиболее полной экстрагирующей компоненты клеточного состава, является католит.

На втором этапе исследований использовали **измельченную кожуру свежей свеклы**. С учетом высокой плотности и прочности кожуры, способных затруднить экстракцию, применяли анолит и католит, полученные в режиме электрохимической активации при мощности 21 – 29 Вт в течение 30 мин. Полученные результаты УЗЭ приведены в табл. 2.

Опытные образцы экстрактов из свекольной кожуры имели слабокислую реакцию среды. При этом величина рН экстракта на католите снизилась (от $10,37$ до $6,83$), а на анолите – повысилась (от $3,51$ до $5,53$) по сравнению с первоначальными значениями. Вероятно, в процессе экстракции происходит релаксация ЭХАР и изменение показателей в сторону нейтральных значений,

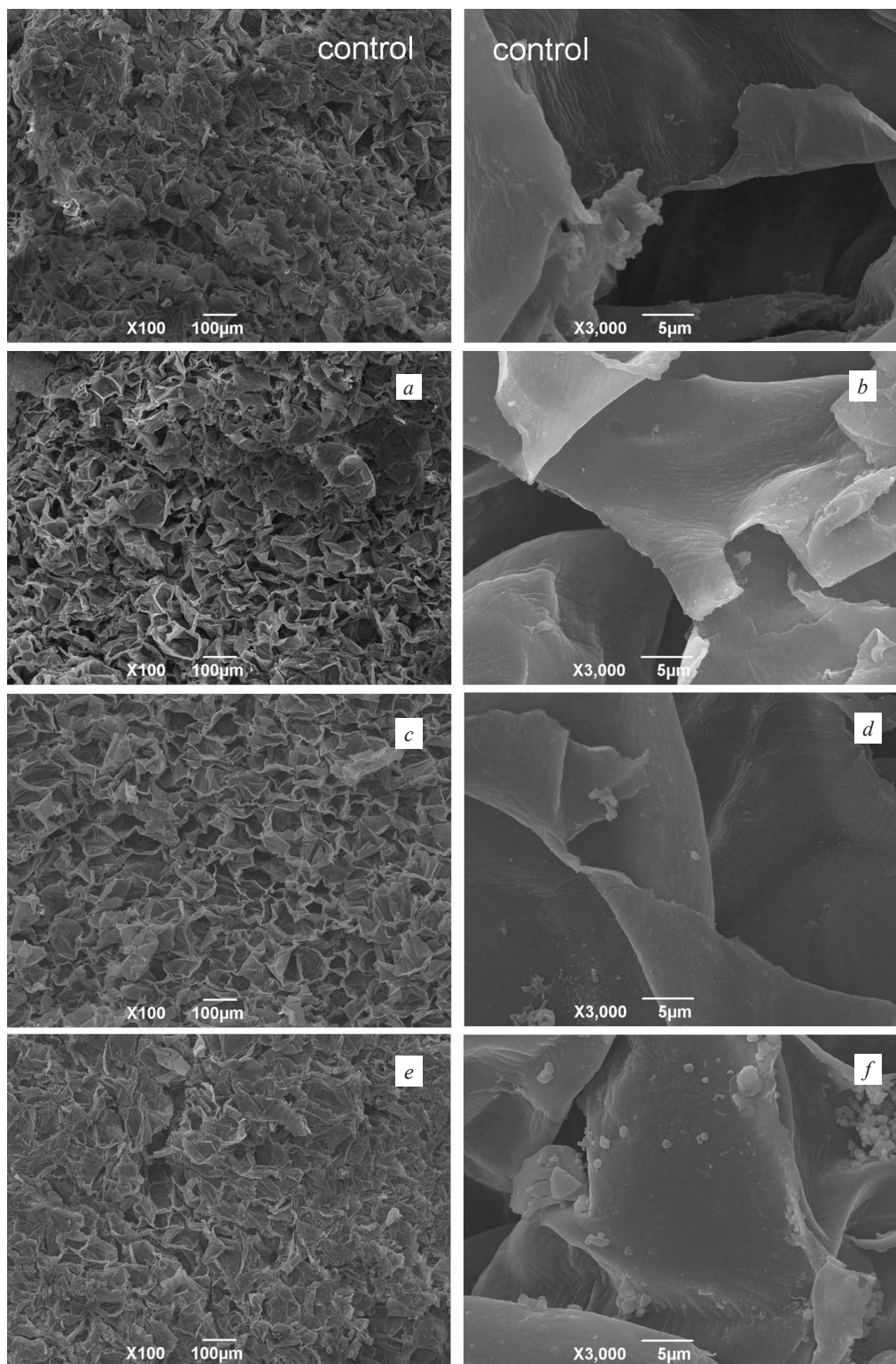


Рис. 3. Микрофотографии поверхности образца очищенной и натертой свеклы после 60 мин обработки в водном растворе. Изображение получено посредством сканирующей электронной микроскопии в режиме вторичных электронов, где: control – образец выдержан в воде без УЗЭ; *a, b* – УЗЭ в воде; *c, d* – УЗЭ в анолите; *e, f* – УЗЭ в катодите

Fig. 3. Microphotographs of the surface of a peeled and grated beet sample after 60 minutes of treatment in an aqueous solution. The image was obtained by scanning electron microscopy in secondary electron mode, where: control – sample is kept in water without ultrasonic electrons; *a, b* – ultrasonic electrons in water; *c, d* – ultrasonic electrons in anolyte; *e, f* – ultrasonic electrons in catholyte

приближаясь к исходным данным воды. Экстракт также может проявлять свойства буферной смеси, усиливающей этот процесс. О процессе релаксации свидетельствует и такой же характер изменения ОВП. Во всех опытных образцах отмечали кратное увеличение (в 3,5–5,0 раза) массовой доли СВ при УЗЭ по сравнению с контролем в условиях мацерации. Максимальная эффективность УЗЭ наблюдалась в среде с анолитом: наибольшее содержание СВ в экстракте

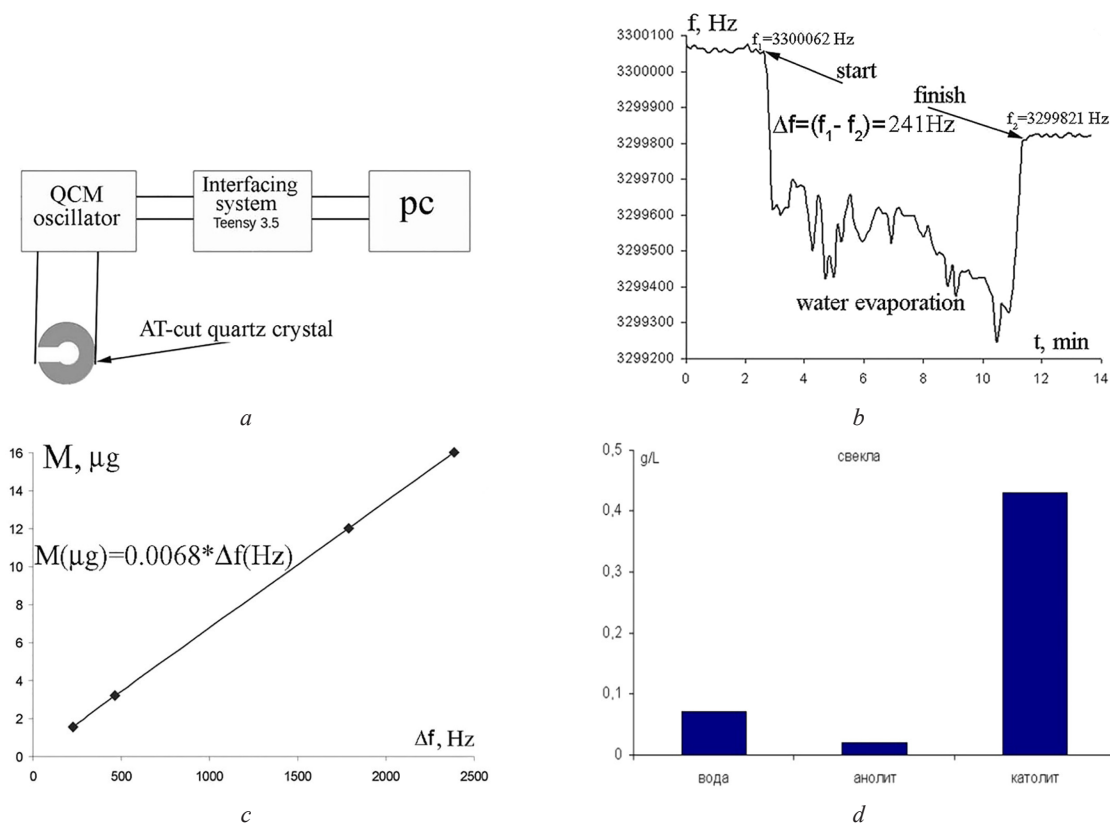


Рис. 4. Метод микровзвешивания кварцевым резонатором (QCM) сухого остатка в капле (2 μL) водного экстракта очищенной и натертой свеклы: блок-схема QCM прибора (a); пример изменения во времени резонансной частоты кварцевого кристалла при высыхании капли водного раствора, нанесенной на его поверхность, показаны начало и завершение испарения воды (b); калибровочная линия зависимости смещения (Δf , Hz) резонансной частоты кварцевого кристалла от веса сухого остатка, содержащегося в капле эталонного водного раствора (c); суммарная концентрация (г/л) веществ в экстракте свеклы после 60 мин УЗ-обработки, с использованием в качестве экстрагирующей жидкости воды или фракций ЭХАР (d). Разброс значений для каждого варианта не превышает 5 % в группе из трех измерений

Fig. 4. Method of micro-weighing with a quartz resonator (QCM) of the dry residue in a drop (2 μL) of an aqueous extract of peeled and grated beet: a – block diagram of the QCM device; b – an example of the change in time of the resonant frequency of a quartz crystal when a drop of an aqueous solution applied to its surface dries, showing the beginning and end of the evaporation of water; c – calibration line of the dependence of the displacement (Δf , Hz) of the resonant frequency of a quartz crystal on the weight of the dry residue contained in a drop of a reference aqueous solution; d – total concentration (g/L) of substances in the beet extract after 60 minutes of ultrasonic treatment, using water or ECAS fractions as the extracting liquid. The spread of values for each option does not exceed 5 % in a group of three measurements

Таблица 2. Результаты физико-химических испытаний экстрактов, полученных из кожуры свежей свеклы (эксперимент 2)

Table 2. Results of physicochemical tests of extracts obtained from fresh beet peel (experiment 2)

Растворитель	Параметры экстракции	Объем экстракта, мл	pH	ОВП, мВ	Температура, °C	Показатель преломления	Массовая доля растворимых сухих веществ, %
Вода	–	–	7,2	80,0	–	–	–
Католит	–	–	10,37	–218,5	22,5	–	–

Окончание табл. 2

Растворитель	Параметры экстракции	Объем экстракта, мл	pH	ОВП, мВ	Температура, °С	Показатель преломления	Массовая доля растворимых сухих веществ, %
Анолит	–	–	3,51	232,5	22,7	–	–
Вода (Контроль, экстракт)	Экстракция методом мацерации в воде, температура 22°С; время 1 ч	140	6,2	60,25	23,0	1,3335	0,4
Вода (УЗЭ)	Соотношение сырье/растворитель 1 г на мл Время 1 ч Мощность УЗ 24 Вт, частота УЗ 1,7 МГц, температура в начале экстракции 22 °С, по завершении 52 °С	145	7,01	53,15	22,9	1,3356	1,8
Католит (УЗЭ)		140	6,83	26,05	22,6	1,3350	1,4
Анолит (УЗЭ)		135	5,53	100,15	23,0	1,3358	2,0

при минимальном объеме. Общая масса СВ, выделенных из кожуры, была, ожидаемо, ниже, чем в экстрактах из очищенной свеклы. Учитывая более выраженные органолептические показатели, для введения в кондитерский крем были выбраны экстракты из очищенной свеклы (эксперимент 1). Экстракты использовали для приготовления крема в течение одних суток. Для оценки сроков хранения экстракты выдерживали при температуре (4 ± 2) °С в течение 10 сут. По окончании указанного срока у образцов на основе воды отмечено изменение цвета от темно-красного до коричневого (рис. 5, *a*). УЗ-экстракты на основе католита и анолита сохраняли темно-красный цвет (рис. 5, *b*, *c*). В экстрактах на основе воды и католита наблюдали повышение вязкости до желеобразной консистенции, по-видимому, по причине экстракции части пектина из исследуемого образца (рис. 5, *b*). В экстракте, где в качестве растворителя использовали анолит, образовался осадок в виде хлопьев (рис. 5, *c*).

Полученные УЗ-экстракты были использованы для приготовления крема для мучных кондитерских изделий, а именно эклеров, по авторской рецептуре крема «Пломбир» (табл. 3).

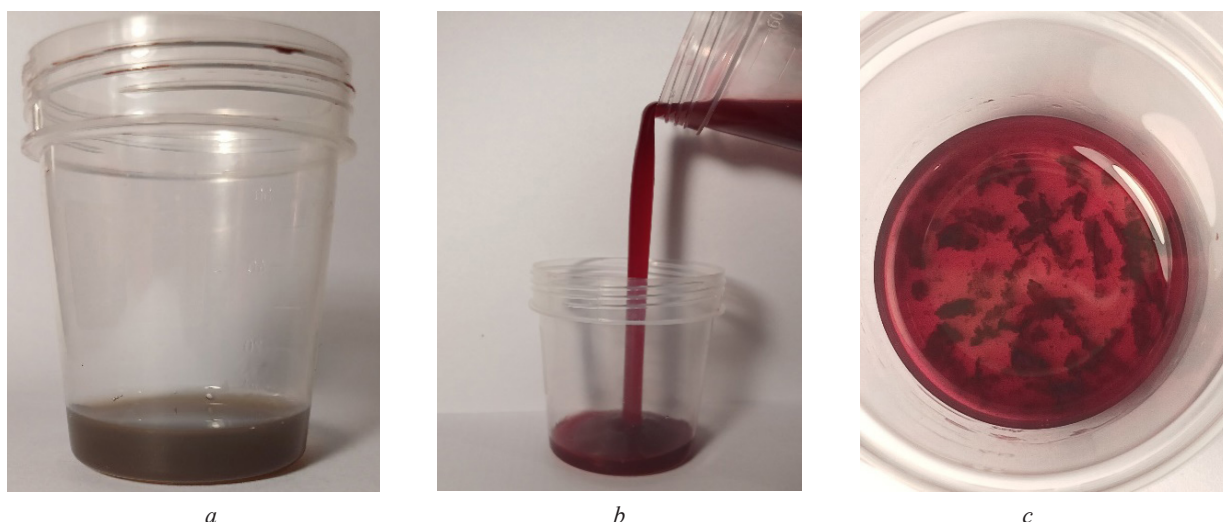


Рис. 5. Внешний вид экстрактов из очищенной свеклы (эксперимент 1) после хранения в течение 10 сут при температуре (4 ± 2) °С: экстракт на основе воды (*a*); экстракт на основе католита (*b*); экстракт на основе анолита (*c*)

Fig. 5. Appearance of peeling beet extracts (experiment 1) after storage for 10 days at a temperature of (4 ± 2) °С: extract based on water (*a*); extract based on catholyte (*b*); extract based on anolyte (*c*)

Таблица 3. Рецепт крема «Пломбир»

Table 3. Recipe for cream “Ice cream”

Наименование сырья и пищевых продуктов	Расход сырья на 1 кг, г
	Масса нетто
Молоко 3,5 %	400
Масло сливочное 82,5 %	150
Сахар	200
Желток	20
Ванилин	10
Крахмал кукурузный	40
Сливки 33 %	250
Выход	1000

Технология включает приготовление заварного крема на основе молока, желтков и крахмала, введение масла сливочного с сахаром и взбивание массы. По окончании в крем вводят взбитые сливки и перемешивают. С учетом того, что беталаины являются водорастворимыми пигментами, добавление их непосредственно в крем вызывает расслоение – отделение водной фазы, что ухудшает органолептические показатели готового изделия. Целесообразным является добавление экстрактов в жидкие продукты (молоко) на начальных этапах приготовления. При этом последующие технологические операции, такие как нагревание и взбивание, не вызвали появления дефектов крема, пигмент сохранялся.

Вначале исследовали 3 образца крема с водными экстрактами, добавленными в наилучших (по качеству готового крема) соотношениях: 1 : 6 мл/г (1 мл экстракта на 6 г крема), 1 : 9, 1 : 18 мл/г. В первом случае цвет образца получился персиковый, в остальных – практически не отличающийся друг от друга розовый. Во всех образцах сохранилась однородная взбитая, воздушная, гладкая, блестящая, плотная кремообразная консистенция, образцы крема сохраняли форму. Отмечали вкус и аромат образцов, свойственные данному виду изделий, без посторонних составляющих.

С учетом выполненных исследований по определению рационального соотношения экстракт : крем на основе воды (1 : 6, 1 : 9 и 1 : 18) было предложено использовать рабочее соотношение 1 : 6 для образцов, приготовленных на католите и анолите.

Органолептический профиль контрольных и опытных образцов составляли, оценивая по пятибалльной системе внешний вид, цвет, вкус, запах и консистенцию крема (рис. 6).

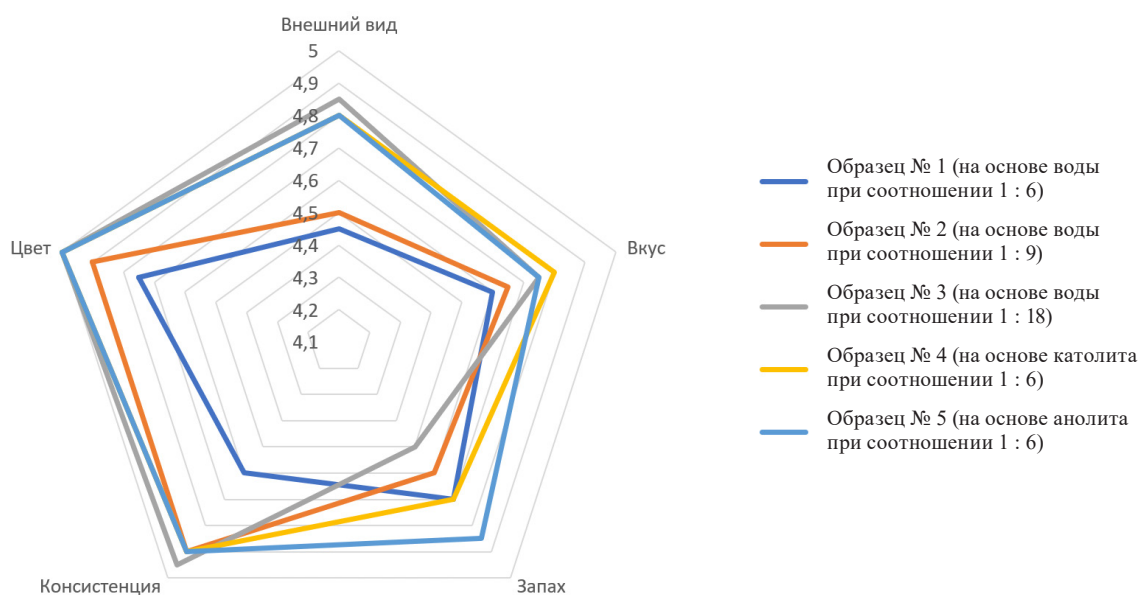


Рис. 6. Профилграмма результатов органолептической оценки

Fig. 6. Profilogram of organoleptic evaluation results

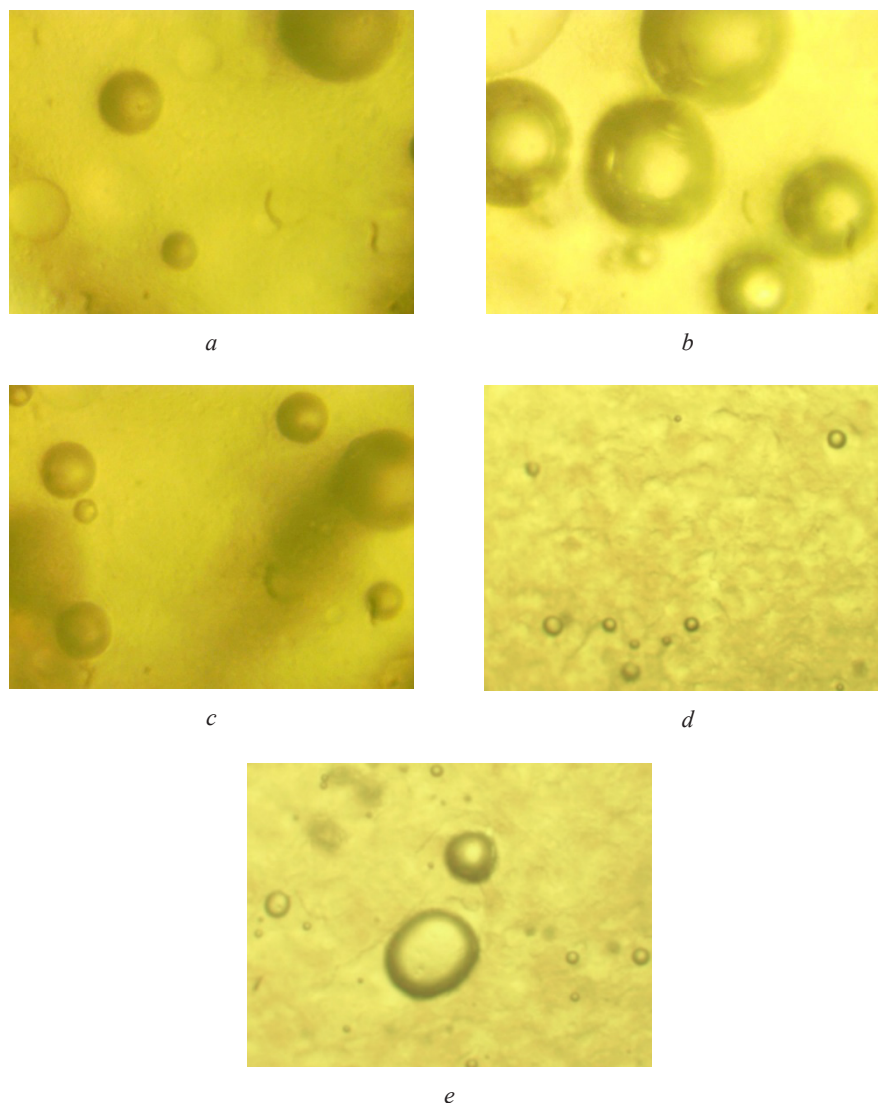


Рис. 7. Микроскопический анализ образцов кремов, содержащих экстракты на основе воды (*a, b, c*); католита (*d*) и анолита (*e*)

Fig. 7. Microscopic analysis of samples of creams containing extracts based on water (*a, b, c*); catholyte (*d*) and anolyte (*e*)

Таким образом, желаемыми органолептическими характеристиками обладал крем с экстрактом, полученным ультразвуковой обработкой в среде анолита. Экстракт был добавлен в соотношениях 1 : 6 и 1 : 9 мл/г изделия.

Данные микроскопического анализа образцов кремов, содержащих экстракты на основе воды: при соотношении 1 : 6 (рис. 7, *a*), 1 : 9 (рис. 7, *b*), 1 : 18 (рис. 7, *c*); католита: при соотношении 1 : 6 (рис. 7, *d*) и анолита: при соотношении 1 : 6 (рис. 7, *e*). Микрофотографии выполнены при увеличении $\times 100$.

Размер микрообъектов варьируется от 10 до 70 мкм, что соответствует размерам дисперсной фазы для эмульсий (грубодисперсная система). При этом жировые «шарики» имеют разную степень окраски – от прозрачных до темных, что может являться показателем наличия пигмента в креме.

Полученные результаты коррелируют с опубликованными ранее данными [8, 40–44]. В цитируемых работах использовали ультразвук для получения натуральных красящих веществ из растительного сырья. При этом отмечалось, что ультразвуковой экстракции подвергалась как мякоть овощей, так и вторичные сырьевые ресурсы – кожа, стебли.

Следует отметить, что применение полученных красителей в пищевых системах возможно как в виде порошков, так и в виде гелей или жидких растворов. В первом случае увеличивается количество технологических операций, что обусловлено необходимостью сублимационной сушки в вакууме, капсулирования пигментов и др. Данные процессы приводят к увеличению стабильности и расширению возможностей использования красителей, но растут продолжительность и стоимость процесса производства. Во втором случае раствор используется для введения в различные продукты сразу после получения, благодаря чему сокращается цепь производственных операций и, следовательно, время и затраты. Полученные экстракты из свеклы столовой могут применяться в жидкой форме непосредственно после изготовления, но так же, как и другие экстракты из свеклы, могут быть сконцентрированы или высушены в подходящих условиях, обеспечивающих сохранность беталаинов в течение длительного срока. Положительные результаты экспериментов по введению УЗ-экстрактов на основе ЭХАР в эмульсионную систему крема для эклеров позволяют предположить, что различные эмульсионные продукты сложного состава, включающие гидрофильную фазу, могут быть окрашены таким образом. Изучение влияния полученных экстрактов на свойства различных пищевых систем, разработка жидких и сухих товарных форм, подбор оптимальных условий хранения экстрактов являются перспективным направлением в области глубокой переработки свеклы.

К преимуществам представленного технологического решения – УЗЭ в среде ЭХАР относятся: проведение экстракции без использования кислот, щелочей, этанола или иных растворителей; существенное повышение выхода пигментов в экстрагирующий раствор по сравнению с традиционным способом мацерации, экологическая безопасность, и в перспективе, после проведения оптимизации технологического процесса, возможность внедрения на производстве.

Выводы. По полученным данным можно сделать следующие выводы. 1. Показана эффективность метода УЗЭ в среде ЭХА-растворов из пресной воды для экстрагирования натуральных красителей из очищенного корнеплода и кожуры свеклы столовой (*Beta vulgaris* L.). По сравнению с контрольными образцами, полученными методом водной мацерации без УЗ, массовая доля СВ в опытных образцах экстрактов из очищенного корнеплода увеличилась на 21,4; 64,3 и 92,9 % в среде воды, католита и анолита соответственно, а в экстрактах из кожуры – в 4,5; 3,5 и в 5,0 раза в среде воды, католита и анолита соответственно.

2. Отмечены различия физико-химических и органолептических свойств экстрактов, полученных методом УЗЭ в среде анолита и католита из пресной воды. В процессе экстракции в образцах на католите и анолите происходит изменение показателей рН и ОВП в сторону нейтральных значений. После хранения при температуре (4 ± 2) °С в течение 10 сут у опытных образцов на основе воды отмечали изменение цвета – от темно-красного до коричневого, в то время как УЗ-экстракты на основе католита и анолита сохраняли темно-красный цвет.

3. Методом сканирующей электронной микроскопии показана идентичность микроструктуры контрольного и опытных образцов очищенной и натертой свеклы после экстракции. УЗ не оказывает заметного воздействия на микрорельеф свеклы на фоне механического нарушения структуры ткани корнеплода при механической обработке.

4. Показана возможность использования натуральных красителей из свеклы столовой и продуктов ее переработки, полученных методом УЗЭ в среде ЭХАР без дополнительных производственных операций. Добавление УЗ-экстрактов на основе анолита в крем для мучных кондитерских изделий в соотношении 1 : 6 (мл/г) обеспечивает желаемые органолептические показатели готового продукта.

5. Перспективы развития данного исследования связаны с сочетанным применением фракций ЭХАР и УЗЭ для получения растительных водных экстрактов с целью замены синтетических красителей в эмульсионных пищевых системах.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-16-00019.

Acknowledgments. The research was supported by Russian Science Foundation grant No. 20-16-00019.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Natural colorants from plant pigments and their encapsulation: an emerging window for the food industry / S. Ghosh [et al.] // *LWT – Food Sci. Technol.* – 2022. – Vol. 153. – Art. 112527. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112527>
2. Betalain plant sources, biosynthesis, extraction, stability enhancement methods, bioactivity, and applications / J. P. Carreón-Hidalgo [et al.] // *Food Res. Int.* – 2022. – Vol. 151. – Art. 110821. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110821>
3. Sources, stability, encapsulation and application of natural pigments in foods / S. Jurić [et al.] // *Food Rev. Int.* – 2022. – Vol. 38, № 8. – P. 1735–1790. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1837862>
4. Ultrasonic-assisted sustainable extraction and dyeing of organic cotton fabric using natural dyes from *Dillenia indica* leaf / B. U. Banna [et al.] // *Heliyon.* – 2023. – Vol. 9, № 8. – P. e18702. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18702>
5. Ultrasonic extraction of natural dye from *Rubia Cordifolia*, optimisation using response surface methodology (RSM) & comparison with artificial neural network (ANN) model and its dyeing properties on different substrates / N. Vedaraman [et al.] // *Chem. Eng. Process.: Process Intensif.* – 2017. – Vol. 114. – P. 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.01.008>
6. Prajapati, R. A. Natural food colorants: extraction and stability study / R. A. Prajapati, G. C. Jadeja // *Mater. Today: Proc.* – 2022. – Vol. 57, pt. 6. – P. 2381–2395. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.151>
7. Das, P. Ultrasound assisted extraction of food colorants: principle, mechanism, extraction technique and applications: a review on recent progress / P. Das, P. Kumar Nayak, R. K. Kesavan // *Food Chem. Adv.* – 2022. – Vol. 1. – Art. 100144. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100144>
8. Relationship between color and betalain content in different thermally treated beetroot products / V. Prieto-Santiago [et al.] // *J. Food Sci. Technol.* – 2020. – Vol. 57, № 9. – P. 3305–3313. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04363-z>
9. Hussain Akbar, E. Betalains as colorants and pigments / E. Akbar Hussain, Z. Sadiq, M. Zia-Ul-Haq // *Betalains: biomolecular aspects* / E. Akbar Hussain, Z. Sadiq, M. Zia-Ul-Haq. – Cham, 2018. – P. 125–137. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95624-4_7
10. Extraction of carotenoids from agro-industrial waste / S. A. Mir [et al.] // *Extraction of natural products from agro-industrial wastes: a green and sustainable approach* / ed.: S. A. Bhawani, A. Khan, F. B. Ahmad. – Amsterdam, 2023. – P. 157–178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823349-8.00016-2>
11. Stability of natural food colorants derived from onion leaf wastes / P. Prodromidis [et al.] // *Food Chem.* – 2022. – Vol. 386. – Art. 132750. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132750>
12. A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: principles, advantages, equipment, and combined technologies / L. Shen [et al.] // *Ultrason. Sonochem.* – 2023. – Vol. 101. – Art. 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>
13. Nirmal, N. P. Recent developments in emerging technologies for beetroot pigment extraction and its food applications / N. P. Nirmal, R. Mereddy, S. Maqsood // *Food Chem.* – 2021. – Vol. 356. – Art. 129611. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129611>
14. Панасюк, А. Л. Производство и применение натуральных антоциановых пищевых красителей (обзор) / А. Л. Панасюк, Е. И. Кузьмина, О. С. Егорова // *Пищевая пром-сть.* – 2021. – № 10. – С. 13–19. <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.10.10.017>
15. Linares, G. Ultrasound-assisted extraction of natural pigments from food processing by-products: a review / G. Linares, M. L. Rojas // *Front. Nutr.* – 2022. – Vol. 9. – Art. 891462. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.891462>
16. Влияние предварительной обработки ягод клюквы на экстракцию антоциановых пигментов, выход сока и его антиоксидантную активность / Е. В. Алексеевко [и др.] // *Хранение и перераб. сельхозсырья.* – 2019. – № 4. – С. 10–27. <https://doi.org/10.36107/spfr.2019.200>
17. Антиоксидантная активность новых сортов пряно-ароматических и эфирно-масличных культур / Т. В. Сачивко [и др.] // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук.* – 2023. – Т. 61, № 4. – С. 282–290. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-4-282-290>
18. Health-promoting potential of betalains in vivo and their relevance as functional ingredients: a review / P. Martínez-Rodríguez [et al.] // *Trends Food Sci. & Technol.* – 2022. – Vol. 122. – P. 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.020>
19. Beetroot as a functional food with huge health benefits: antioxidant, antitumor, physical function, and chronic metabolomics activity / L. Chen [et al.] // *Food Sci. Nutr.* – 2021. – Vol. 9, № 11. – P. 6406–6420. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2577>
20. Ghosh, S. Underutilized plant sources: a hidden treasure of natural colors / S. Ghosh, T. Sarkar, R. Chakraborty // *Food Biosci.* – 2023. – Vol. 52. – Art. 102361. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102361>
21. Recent advancements in natural colorants and their application as coloring in food and in intelligent food packaging / N. Echegaray [et al.] // *Food Chem.* – 2023. – Vol. 404. – Art. 134453. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134453>
22. Зависимость урожайности свеклы столовой от различных доз компоста в органическом земледелии / А. М. Захаров [и др.] // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук.* – 2024. – Т. 62, № 1. – С. 37–44. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-1-37-44>
23. Zin, M. M. Emerging technology approach for extractability and stability of betalains from the peel of beetroot (*Beta vulgaris* L.) / M. M. Zin, S. Bánvölgyi // *Biomass Conv. Bioref.* – 2023. – Vol. 13. – P. 10759–10769. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01975-z>
24. Natural pigments: anthocyanins, carotenoids, chlorophylls, and betalains as colorants in food products / B. G. Nabi [et al.] // *Food Biosci.* – 2023. – Vol. 52. – Art. 102403. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102403>
25. Lianza, M. The greening of anthocyanins: eco-friendly techniques for their recovery from agri-food by-products / M. Lianza, L. Marincich, F. Antognoni // *Antioxidants.* – 2022. – Vol. 11. – Art. 2169. <https://doi.org/10.3390/antiox11112169>

26. A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants / C. Bitwell [et al.] // *Sci. Afr.* – 2023. – Vol. 19. – P. e01585. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01585>
27. Application of ultrasound technology for extraction of color pigments from plant sources and their potential bio-functional properties: a review / G. Kumar [et al.] // *J. Food Process Eng.* – 2023. – Vol. 46, № 6. – P. e14238. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14238>
28. García, S. L. R. Green extraction techniques from fruit and vegetable waste to obtain bioactive compounds: a review / S. L. R. García, V. Raghavan // *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* – 2022. – Vol. 62, № 23. – P. 6446–6466. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1901651>
29. Горбунова, Н. В. Перспективы использования ультразвуковой обработки для извлечения антиоксидантов из вторичного растительного сырья / Н. В. Горбунова, А. В. Евтеев, А. В. Банникова // *Аграр. конф.* – 2017. – № 1. – С. 4–7.
30. Maran, J. P. Multivariate statistical analysis and optimization of ultrasound-assisted extraction of natural pigments from waste red beet stalks / J. P. Maran, B. J. Priya // *J. Food Sci. Technol.* – 2016. – Vol. 53, № 1. – P. 792–799. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1988-8>
31. Development of an aqueous ultrasound-assisted extraction process of bioactive compounds from beet leaves: a proposal for reducing losses and increasing biomass utilization / J. Nutter [et al.] // *J. Sci. Food Agric.* – 2021. – Vol. 101, № 5. – P. 1989–1997. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10815>
32. Application of an ultrasound-assisted extraction method to recover betalains and polyphenols from red beetroot waste / G. S. N. Fernando [et al.] // *ACS Sustain. Chem. Eng.* – 2021. – Vol. 9, № 26. – P. 8736–8747. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01203>
33. Dynamic nano clusters of water on waters catholyte and anolyte: electrolysis with nano membranes / I. Ignatov [et al.] // *Phys. Sci. Int. J.* – 2020. – Vol. 24, № 1. – P. 46–54. <https://doi.org/10.9734/psij/2020/v24i130173>
34. Impact of a redox balance on polysaccharides in an aqueous solution / A. G. Pogorelov [et al.] // *Phys. Wave Phenom.* – 2022. – Vol. 30, № 3. – P. 209–216. <https://doi.org/10.3103/S1541308X22030086>
35. Lauberts, M. Antioxidant activity of different extracts from black alder (*Alnus glutinosa*) bark with greener extraction alternative / M. Lauberts, M. Pals // *Plants.* – 2021. – Vol. 10, № 11. – Art. 2531. <https://doi.org/10.3390/plants10112531>
36. Duqueyroix, A. Impact of the anodic and cathodic electro-activation treatment on the physico-chemical and anti-oxidant capacity of red beetroot juice / A. Duqueyroix, F. A. Aider-Kaci, M. Aider // *ACS Omega.* – 2022. – Vol. 7, № 46. – P. 42456–42466. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05671>
37. Ultrasound extraction of bioactive compounds from Citrus reticulata peel using electrolyzed water / M. B. Soquetta [et al.] // *J. Food Proc. Preserv.* – 2019. – Vol. 43, № 12. – P. e14236. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14236>
38. Тимакова, Л. Н. Анализ производства свеклы столовой в России / Л. Н. Тимакова, Т. Н. Сурихина // *Картофель и овощи.* – 2022. – № 9. – С. 20–23. <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.94.63.002>
39. The effect of an electrochemically activated water solution on plant polysaccharides: phenomenology and spectrometry / A. G. Pogorelov [et al.] // *Biophysics.* – 2023. – Vol. 68, № 5. – P. 705–711. <https://doi.org/10.1134/S0006350923050226>
40. Process optimization of ultrasonic assisted extraction of betalains from red beet, *Beta vulgaris* L. waste stalks / S. Singh [et al.] // *Indian J. Exp. Biol.* – 2021. – Vol. 59, № 12. – P. 858–866. <https://doi.org/10.56042/ijeb.v59i12.57831>
41. Impact of ultrasonication applications on color profile of foods / N. Kutlu [et al.] // *Ultrason. Sonochem.* – 2022. – Vol. 89. – Art. 106109. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2022.106109>
42. Tiwari, S. Stability assessment of emulsion of carotenoids extracted from carrot bio-waste in flaxseed oil and its application in food model system / S. Tiwari, N. Upadhyay, A. K. Singh // *Food Biosci.* – 2022. – Vol. 47. – Art. 101631. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101631>
43. Study of heat and mass transfer processes during extraction of plant raw materials under the influence of ultrasound / I. Korobiichuk [et al.] // *Ultrason. Sonochem.* – 2023. – Vol. 98. – Art. 106512. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2023.106512>
44. Свойства и применение бетаинаового красителя, выделенного из районированного сорта свеклы столовой / Н. Ю. Чеснокова [и др.] // *Аграр. наука.* – 2023. – № 9. – С. 185–190. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-185-190>

References

1. Ghosh S., Sarkar T., Das A., Chakraborty R. Natural colorants from plant pigments and their encapsulation: an emerging window for the food industry. *LWT – Food Science and Technology*, 2022, vol. 153, art. 112527. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112527>
2. Carreón-Hidalgo J. P., Franco-Vásquez D. C., Gómez-Linton D. R., Pérez-Flores L. J. Betalain plant sources, biosynthesis, extraction, stability enhancement methods, bioactivity, and applications. *Food Research International*, 2022, vol. 151, art. 110821. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110821>
3. Jurić S., Jurić M., Król-Kilińska Ž., Vlahoviček-Kahlina K., Vinceković M., Dragović-Uzelac V., Donsì F. Sources, stability, encapsulation and application of natural pigments in foods. *Food Reviews International*, 2022, vol. 38, no. 8, pp. 1735–1790. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1837862>
4. Banna B. U., Mia R., Hasan Md. M., Ahmed B., Hasan Shibly M. A. Ultrasonic-assisted sustainable extraction and dyeing of organic cotton fabric using natural dyes from *Dillenia indica* leaf. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 8, p. e18702. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18702>
5. Vedaraman N., Sandhya K. V., Charukesh N. R. B., Venkatakrishnan B., Haribabu K., Sridharan M. R., Nagarajan R. Ultrasonic extraction of natural dye from *Rubia Cordifolia*, optimisation using response surface methodology (RSM) & com-

parison with artificial neural network (ANN) model and its dyeing properties on different substrates. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2017, vol. 114, pp. 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2017.01.008>

6. Prajapati R. A., Jadeja G. C. Natural food colorants: extraction and stability study. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 57, pt. 6, pp. 2381–2395. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.151>

7. Das P., Kumar Nayak P., Kesavan R. K. Ultrasound assisted extraction of food colorants: Principle, mechanism, extraction technique and applications: a review on recent progress. *Food Chemistry Advances*, 2022, vol. 1, art. 100144. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100144>

8. Prieto-Santiago V., Cavia M. M., Alonso-Torre S. R., Carrillo C. Relationship between color and betalain content in different thermally treated beetroot products. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, vol. 57, no. 9, pp. 3305–3313. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04363-z>

9. Hussain Akbar E., Sadiq Z., Zia-Ul-Haq M. Betalains as colorants and pigments. *Betalains: biomolecular aspects*. Cham, 2018, pp. 125–137. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95624-4_7

10. Mir S. A., Rizwan D., Bakshi R. A., Wani S. M., Masoodi F. A. Extraction of carotenoids from agro-industrial waste. *Extraction of natural products from agro-industrial wastes: a green and sustainable approach*. Amsterdam, 2023, pp. 157–178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823349-8.00016-2>

11. Prodromidis P., Mourtzinis I., Biliaderis C. G., Moschakis T. Stability of natural food colorants derived from onion leaf wastes. *Food Chemistry*, 2022, vol. 386, art. 132750. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132750>

12. Shen L., Pang S., Zhong M., Sun Y., Qayum A., Liu Y., Rashid A., Xu B., Liang Q., Ma H., Ren X. A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: principles, advantages, equipment, and combined technologies. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, vol. 101, art. 106646. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106646>

13. Nirmal N. P., Mereddy R., Maqsood S. Recent developments in emerging technologies for beetroot pigment extraction and its food applications. *Food Chemistry*, 2021, vol. 356, art. 129611. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129611>

14. Panasyuk A. L., Kuz'mina E. I., Egorova O. S. Production and use of natural anthocyanin food colors (review). *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry*, 2021, no. 10, pp. 13–19 (in Russian). <https://doi.org/10.52653/PPI.2021.10.10.017>

15. Linares G., Rojas M. L. Ultrasound-assisted extraction of natural pigments from food processing by-products: a review. *Frontiers in Nutrition*, 2022, vol. 9, art. 891462. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.891462>

16. Alekseenko E. V., Bakumenko O. E., Azarova M. M., Isabayev I. B., Kurbanov M. T. The influence of pre-processing of berries cranberries on the extraction of anthocyanin pigments, the yield of juice and its antioxidant activity. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya = Storage and Processing of Farm Products*, 2019, no. 4, pp. 10–27 (in Russian). <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.200>

17. Sachyuka T. U., Kovalenko N. A., Supichenko G. N., Bosak V. M. Antioxidant activity of new varieties spicy-aromatic and essential-oil plants. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2023, vol. 61, no. 4, pp. 282–290 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2023-61-4-282-290>

18. Martínez-Rodríguez P., Guerrero-Rubio M. A., Henarejos-Escudero P., García-Carmona F., Gandía-Herrero F. Health-promoting potential of betalains in vivo and their relevance as functional ingredients: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, vol. 122, pp. 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.02.020>

19. Chen L., Zhu Y., Hu Z., Wu S., Jin C. Beetroot as a functional food with huge health benefits: antioxidant, antitumor, physical function, and chronic metabolomics activity. *Food Science and Nutrition*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 6406–6420. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2577>

20. Ghosh S., Sarkar T., Chakraborty R. Underutilized plant sources: a hidden treasure of natural colors. *Food Bioscience*, 2023, vol. 52, art. 102361. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102361>

21. Echegaray N., Guzel N., Kumar M., Guzel M., Hassoun A., Lorenzo J. M. Recent advancements in natural colorants and their application as coloring in food and in intelligent food packaging. *Food Chemistry*, 2023, vol. 404, art. 134453. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134453>

22. Zakharov A. M., Mishanov A. P., Murzaev E. A., Markova A. E. Dependence of table beet yield on different doses of compost in organic farming. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 1, pp. 37–44 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-1-37-44>

23. Zin M. M., Bánvölgyi S. Emerging technology approach for extractability and stability of betalains from the peel of beetroot (*Beta vulgaris* L.). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, vol. 13, pp. 10759–10769. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01975-z>

24. Nabi B. G., Mukhtar K., Ahmed W., Manzoor M. F., Nawaz Ranjha M. M. A., Kieliszek M., Bhat Z. F., Aadil R. M. Natural pigments: anthocyanins, carotenoids, chlorophylls, and betalains as colorants in food products. *Food Bioscience*, 2023, vol. 52, art. 102403. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102403>

25. Lianza M., Marincich L., Antognoni F. The greening of anthocyanins: eco-friendly techniques for their recovery from agri-food by-products. *Antioxidants*, 2022, vol. 11, art. 2169. <https://doi.org/10.3390/antiox11112169>

26. Bitwell C., Indra S. S., Lukec C., Kakoma M. K. A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants. *Scientific African*, 2023, vol. 19, p. e01585. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01585>

27. Kumar G., Upadhyay S., Yadav D. K., Malakar S., Dhurve P., Suri S. Application of ultrasound technology for extraction of color pigments from plant sources and their potential bio-functional properties: a review. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, vol. 46, no. 6, p. e14238. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14238>

28. García S. L. R., Raghavan V. Green extraction techniques from fruit and vegetable waste to obtain bioactive compounds: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, vol. 62, no. 23, pp. 6446–6466. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1901651>
29. Gorbunova N. V., Evteev A. V., Bannikova A. V. Prospects for the use of ultrasonic treatment for the extraction of antioxidants from secondary plant raw materials. *Agrarnye konferentsii = Agrarian Conferences*, 2017, no. 1, pp. 4–7 (in Russian).
30. Maran J. P., Priya B. Multivariate statistical analysis and optimization of ultrasound-assisted extraction of natural pigments from waste red beet stalks. *Journal of Food Science and Technology*, 2016, vol. 53, no. 1, pp. 792–799. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1988-8>
31. Nutter J., Fernandez M. V., Jagus R. J., Agüero M. V. Development of an aqueous ultrasound-assisted extraction process of bioactive compounds from beet leaves: A proposal for reducing losses and increasing biomass utilization. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, vol. 101, no. 5, pp. 1989–1997. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10815>
32. Fernando G. S. N., Wood K., Papaioannou E. H., Marshall L. M., Sergeeva N. N., Boesch C. Application of an ultrasound-assisted extraction method to recover betalains and polyphenols from red beetroot waste. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, vol. 9, no. 26, pp. 8736–8747. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01203>
33. Ignatov I., Gluhchev G., Karadzhov S., Yaneva I., Valcheva N., Dinkov G., Popova T., Petrova T., Mehandjiev D., Akszjonovics I. Dynamic nano clusters of water on waters catholyte and anolyte: electrolysis with nano membranes. *Physical Science International Journal*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 46–54. <https://doi.org/10.9734/psij/2020/v24i130173>
34. Pogorelov A. G., Gulin A. A., Pogorelova V. N., Panait A. I., Stankevich A. A., Pogorelova M. A. Impact of a redox balance on polysaccharides in an aqueous solution. *Physics of Wave Phenomena*, 2022, vol. 30, no. 3, pp. 209–216. <https://doi.org/10.3103/S1541308X22030086>
35. Lauberts M., Pals M. Antioxidant activity of different extracts from black alder (*Alnus glutinosa*) bark with greener extraction alternative. *Plants*, 2021, vol. 10, no. 11, art. 2531. <https://doi.org/10.3390/plants10112531>
36. Duqueyroi A., Aider-Kaci F. A., Aider M. Impact of the anodic and cathodic electro-activation treatment on the physico-chemical and antioxidant capacity of red beetroot juice. *ACS Omega*, 2022, vol. 7, no. 46, pp. 42456–42466. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05671>
37. Soquetta M. B., Tonato D., Quadros M. M., Boeira C. P., Cichoski A. J., Terra L. M., Kühn R. C. Ultrasound extraction of bioactive compounds from Citrus reticulata peel using electrolyzed water. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, vol. 43, no. 12, p. e14236. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14236>
38. Timakova L. N., Surikhina T. N. Analysis of table beet production in Russia. *Kartofel' i ovoshchi = Potato and Vegetables*, 2022, no. 9, pp. 20–23 (in Russian). <https://doi.org/10.25630/PAV.2022.94.63.002>
39. Pogorelov A. G., Ipatova L. G., Panait A. I., Pogorelova M. A., Gulin A. A., Pogorelova V. N. The effect of an electrochemically activated water solution on plant polysaccharides: phenomenology and spectrometry. *Biophysics*, 2023, vol. 68, no. 5, pp. 705–711. <https://doi.org/10.1134/S0006350923050226>
40. Singh S., Omre P. K., Chand K., Kumar A. Process optimization of ultrasonic assisted extraction of betalains from red beet, *Beta vulgaris* L. waste stalks. *Indian Journal of Experimental Biology*, 2021, vol. 59, no. 12, pp. 858–866. <https://doi.org/10.56042/ijeb.v59i12.57831>
41. Kutlu N., Pandiselvam R., Kamiloglu A., Saka I., Sruthi N. U., Kothakota A., Socol C. T., Maerescu C. M. Impact of ultrasonication applications on color profile of foods. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, vol. 89, art. 106109. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106109>
42. Tiwari S., Upadhyay N., Singh A. K. Stability assessment of emulsion of carotenoids extracted from carrot bio-waste in flaxseed oil and its application in food model system. *Food Bioscience*, 2022, vol. 47, art. 101631. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101631>
43. Korobiichuk I., Mel'nick V., Ostapenko Zh., Ruzhinska L. Study of heat and mass transfer processes during extraction of plant raw materials under the influence of ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, vol. 98, art. 106512. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106512>
44. Chesnokova N. Yu., Kuznetsova A. A., Levochkina L. V., Tarabaev M. A. Properties and application of betalaine dye isolated from regional beet variety. *Agrarnaya nauka = Agrarian Science*, 2023, no. 9, pp. 185–190 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-374-9-185-190>

Информация об авторах

Суворов Олег Александрович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) (Волоколамское шоссе, 11, 125080, Москва, Российская Федерация); ведущий научный сотрудник лаборатории функциональной микроскопии биоструктур, Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН (Институтская, 3, 142290, Пушкино, Московская область, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0003-2100-0918>. E-mail: SuvorovOA@yandex.ru

Information about the authors

Oleg A. Suvorov – D. Sc. (Engineering), Professor of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) (11, Volokolamskoe highway, 125080, Moscow, Russian Federation); Leading Researcher at the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences (3, Institutskaya, 142290, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0003-2100-0918>. E-mail: SuvorovOA@yandex.ru

Каширская Василина Вячеславовна – студент кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) (Волоколамское шоссе, 11, 125080, Москва, Российская Федерация). E-mail: kashirskaya2002@mail.ru

Власенко Алексей Сергеевич – студент кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) (Волоколамское шоссе, 11, 125080, Москва, Российская Федерация). E-mail: Aleks_volkov2020@mail.ru

Сафонов Максим Сергеевич – аспирант кафедры индустрии питания, гостиничного бизнеса и сервиса, Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ) (Волоколамское шоссе, 11, 125080, Москва, Российская Федерация); младший научный сотрудник лаборатории функциональной микроскопии биоструктур, Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН (Институтская, 3, 142290, Пушкино, Московская область, Российская Федерация). E-mail: safonovms@mgupp.ru

Кузнецов Александр Львович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории функциональной микроскопии биоструктур, Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН (Институтская, 3, 142290, Пушкино, Московская область, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0002-1447-1589>. E-mail: a.l.kuznetsov@bk.ru

Погорелова Мария Александровна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории функциональной микроскопии биоструктур, Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН (Институтская, 3, 142290, Пушкино, Московская область, Российская Федерация). E-mail: pogm2007@rambler.ru

Vasilina V. Kashirskaya – Student of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) (11, Volokolamskoe highway, 125080, Moscow, Russian Federation). E-mail: kashirskaya2002@mail.ru

Alexey S. Vlasenko – Student of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service, Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) (11, Volokolamskoe highway, 125080, Moscow, Russian Federation). E-mail: Aleks_volkov2020@mail.ru

Maxim S. Safonov – Graduate Student of the Department of Food Industry, Hotel Business and Service of the Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH) (11, Volokolamskoe highway, 125080, Moscow, Russian Federation); Junior Researcher at the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences (3, Institutskaya, 142290, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation). E-mail: safonovms@mgupp.ru

Alexander L. Kuznetsov – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher at the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences (3, Institutskaya, 142290, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0002-1447-1589>. E-mail: a.l.kuznetsov@bk.ru

Maria A. Pogorelova – Ph. D. (Biology), Senior Researcher at the Laboratory of Functional Microscopy of Biostructures, Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences (3, Institutskaya, 142290, Pushchino, Moscow Region, Russian Federation). E-mail: pogm2007@rambler.ru