

Оптимизация сушки выжимок черной смородины с использованием метода поверхности отклика

¹ Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Российская Федерация

² Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур, Орловская область, Орловский МО, Российская Федерация

Ю. В. Анохин¹, О. Ю. Еремина¹, Е. С. Салина²,
Н. С. Левгерова², И. А. Сидорова²

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Юрий Владимирович Анохин
E-mail: yura.anohin69@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Анохин, Ю.В., Еремина, О.Ю., Салина, Е.С., Левгерова, Н.С., & Сидорова, И.А. (2025). Оптимизация сушки выжимок черной смородины с использованием метода поверхности отклика. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 143-168.
<https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.682>

ПОСТУПИЛА: 09.08.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



АННОТАЦИЯ

Введение: Выжимки черной смородины используются достаточно ограниченно в пищевой промышленности. Доступным способом их переработки является ИК-сушка, однако длительный нагрев способствует окислению и разрушению биологически активных веществ, что обуславливает необходимость подбора оптимальных параметров проведения ИК-сушки выжимок черной смородины для максимально возможного сохранения биологически активных веществ.

Цель: Математическое моделирование и расчет оптимальных параметров проведения процесса ИК-сушки выжимок черной смородины, обеспечивающих максимально возможное сохранение БАВ в рамках предложенной модели.

Материалы и методы: Для определения значений оптимальных параметров, при которых достигается максимальное сохранение биологически активных веществ в выжимках черной смородины, был использован трехуровневый трехфакторный метод поверхностного отклика в сочетании с планом Бокса – Бенкена. Сушку проводили в универсальном инфракрасном шкафу серии «Универсал-СД-2П», в котором реализован комбинированный радиационно-конвективный способ сушки продуктов.

Результаты: В результате анализа экспериментальных данных с использованием метода поверхности отклика и плана Бокса – Бенкена были построены математические модели, описывающие влияние параметров ИК-сушки на сохранность аскорбиновой кислоты, катехинов, антоцианов и выход сухих веществ в выжимках черной смородины. На основе этих моделей рассчитаны оптимальные параметры процесса: продолжительность – 4 ч, температура – 60 °С, толщина слоя – 6,2 мм. Прогнозируемое содержание БАВ в сухих выжимках при оптимальных условиях составляет: аскорбиновой кислоты – 122,47 мг/100 г, катехинов – 2568,1 мг/100 г, антоцианов – 540,65 мг/100 г. При содержании сухих веществ 93,6 % полученный продукт обладает достаточной микробиологической стабильностью и пригоден к длительному хранению. Сопоставление расчетных оптимальных параметров сушки выжимок черной смородины (4 ч, 60 °С, толщина слоя 6,2 мм), определенных методом поверхности отклика, с фактическими данными, полученными ранее при сушке в режиме 4 ч, 60 °С и толщине слоя 3,8 мм, показывает частичное соответствие модельных прогнозов и экспериментальных результатов.

Выводы: Разработанные в ходе исследования математические модели и оптимизированные параметры сушки (продолжительность, температура и толщина слоя) позволяют целенаправленно получать сушеные выжимки черной смородины с заданным химическим составом, что в дальнейшем открывает возможность их использования в качестве пищевого ингредиента-обогапителя.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

побочные продукты переработки; пищевые ингредиенты; математическая модель ИК-сушки; оптимизация параметров ИК-сушки; аскорбиновая кислота; катехины; антоцианы

Optimization of Drying Parameters for Blackcurrant Pomace Using Response Surface Methodology

¹ Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russian Federation

² Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding, Orel M. D., Orel Region, Russian Federation

Yuri V. Anokhin¹, Olga Yu. Eremina¹, Elena S. Salina²,
Nadezhda S. Levgerova², Irina A. Sidorova²

CORRESPONDENCE:

Yuri V. Anokhin

E-mail: yura.anohin69@gmail.com

FOR CITATIONS:

Anokhin, Yu.V., Eremina, O.Yu., Salina, E.S., Levgerova, N.S., & Sidorova, I.A. (2025). Optimization of drying parameters for blackcurrant pomace using response surface methodology. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 143-168. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.682>

RECEIVED: 09.08.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.



ABSTRACT

Introduction: Blackcurrant pomace is utilized only to a limited extent in the food industry. One accessible method for its processing is infrared (IR) drying; however, prolonged thermal exposure promotes oxidation and degradation of biologically active compounds. This necessitates the determination of optimal IR drying parameters that enable the maximum possible preservation of bioactive constituents in blackcurrant pomace.

Purpose: To develop a mathematical model and determine the optimal operational parameters of the IR drying process for blackcurrant pomace that ensure maximal retention of bioactive compounds within the proposed modeling framework.

Materials and Methods: To identify the optimal parameter values that maximize the preservation of biologically active compounds in blackcurrant pomace, a three-level, three-factor response surface methodology (RSM) was applied using a Box–Behnken experimental design. Drying was carried out in a universal infrared drying chamber of the “Universal-SD-2P” series, which implements a combined radiation–convection drying mechanism.

Results: Based on the experimental data analyzed using response surface methodology and the Box–Behnken design, mathematical models were developed to describe the influence of IR drying parameters on the retention of ascorbic acid, catechins, anthocyanins, and on the yield of dry matter in blackcurrant pomace. Using these models, the optimal drying parameters were calculated as follows: drying time – 4 h, temperature – 60 °C, and layer thickness – 6.2 mm. Under these optimal conditions, the predicted concentrations of bioactive compounds in the dried pomace were: ascorbic acid – 122.47 mg/100 g, catechins – 2568.1 mg/100 g, and anthocyanins – 540.65 mg/100 g. With a dry matter content of 93.6%, the resulting product exhibits sufficient microbiological stability and is suitable for long-term storage. A comparison between the calculated optimal drying parameters (4 h, 60 °C, layer thickness 6.2 mm) and previously obtained experimental data from drying performed at 4 h, 60 °C, and a layer thickness of 3.8 mm indicates partial agreement between the model predictions and empirical observations.

Conclusion: The mathematical models developed in this study, together with the optimized drying parameters (time, temperature, and layer thickness), enable the targeted production of dried blackcurrant pomace with a specified chemical composition. This creates opportunities for its subsequent use as a functional food enrichment ingredient.

KEYWORDS

fruit processing by-products; food ingredients; infrared drying mathematical model; optimization of IR drying parameters; ascorbic acid; catechins; anthocyanins

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития общества одной из основных задач пищевой и перерабатывающей промышленности является расширение ассортимента продуктов питания, обогащенных за счет использования побочных продуктов переработки. Исследования подтверждают, что остатки плодов и ягод, в том числе выжимки и кожура, являются отличным источником ценных компонентов, таких как макронутриенты (белки и углеводы) и фитохимические вещества (полифенолы и каротиноиды). Плодовые и ягодные выжимки — это твердый побочный продукт, остающийся после отжима сока или концентрата, который представляют собой значительную и часто недоиспользуемую фракцию. При производстве сока и пюре 10–35 % сырой фруктовой массы превращается в выжимки, которые обычно выбрасывают, несмотря на их богатый нутриентный состав. Их использование открывает широкие перспективы в пищевой, фармацевтической и косметической отраслях. В последние годы большое внимание уделяется сельскохозяйственным отходам как сырью для получения антиоксидантов и пищевых волокон (Tama, & Karaś, 2025; Ritika et al., 2023; Sha et al., 2023; Lustenberger et al., 2022; Coman et al., 2019; Ibrahim et al., 2017; Asif et al., 2016).

С другой стороны, разработка технологий переработки таких побочных продуктов может значительно повысить конкурентоспособность мировой пищевой промышленности при минимальном воздействии на окружающую среду (Mildner-Szkudlarz et al., 2016). В рамках этой тенденции фруктовые выжимки выделяются как перспективные ингредиенты для переработки, обладающие двойным преимуществом: они способствуют сокращению отходов и придают пищевым продуктам функциональные свойства (Blicharz-Kania et al., 2025; Ciurlă et al., 2024; Szymanowska et al., 2021; Mildner-Szkudlarz et al., 2016).

Выжимки черной смородины, представляющие собой побочные продукты производства сока черной смородины, содержат пищевые волокна, аскорбиновую кислоту (АК), полифенолы, антоцианы, флавоноиды и фенольные кислоты, обладающие антиоксидантными свойствами (Ritika et al., 2023; Coman et al., 2019; Vagiri et al., 2011; Szajdek et al., 2008;).

Основной проблемой при переработке выжимок черной смородины, является их быстрая порча в связи с высокой начальной влажностью сырья (около 70 %). Инфракрасная сушка (ИК-сушка) выжимок считается одним из наиболее доступных способов устранения данной проблемы (Еремина и соавт., 2024). Однако при термической обработке существует риск окисления и разрушения соединений, обладающих антиоксидантной активностью. В связи с этим ключевой задачей при проведении сушки влажных выжимок является максимальное возможное сохранение биологически активных веществ. Анализ научной литературы показывает, что наиболее важными параметрами при ИК-сушке являются: продолжительность сушки, температура и толщина слоя. Так, Акулич А. В. с соавт. предлагают сушить ягоды, используя режим конвективной и комбинированной сушки с ИК-нагревом при температуре 60–70 °С (Акулич & Гостинщикова, 2017).

Группа ученых под руководством Michalska A. сушили выжимки черной смородины конвективным способом при температуре от 50 до 90 °С (Michalska et al., 2017), а Blicharz-Kania с соавт. использовали конвекционную печь для высушивания выжимок красной смородины, малины, черноплодной рябины и яблок. Сушка проводилась при температуре 60 °С до содержания влаги менее 10 % (Blicharz-Kania et al., 2025).

Кольман О. Я. с соавт. предлагают сушить выжимки ягод при равномерном слое толщиной 10 мм на сетчатых противнях, используя радиационно-конвективный способ сушки при температуре 70 °С в течение 4 ч до остаточной влажности 20–17 % (Кольман и соавт., 2015). Однако такие параметры проведения сушки не могут обеспечить микробиологической стабильности сушеных выжимок, что связано с их относительно высокой остаточной влажностью, наличием высоких потерь при измельчении высоковязкого влажного материала и невозможностью использования порошков в составе комплексных функциональных пищевых смесей, для которых остаточное содержание влаги регламентируется на уровне не более 12 %.

Для снижения влажности различных видов сушеных фруктов и ягод Ермолаев В. А. с соавт. предлагают способ сушки при толщине слоя 5–7 мм и температуре 70–80 °С, обеспечивая остаточную влажность сырья 2,8–4 % (Ермолаев и соавт., 2015).

Галиакберова Н. З. с соавт. предлагают способ сушки при схожих параметрах, однако предлагается снизить толщину слоя до 3–5 мм для достижения остаточной влажности сырья не более 6% (Галиакберова и соавт., 1996).

На основе анализа научной литературы и патентной документации в качестве исследуемых параметров процесса ИК-сушки были выбраны такие параметры, как температура, толщина слоя и продолжительность проведения процесса. Интервалы варьирования исследуемых параметров были определены следующим образом: температура — 60–70 °С с шагом 5 °С; продолжительность 4–6 часов с шагом 1 ч; толщина слоя — 3–7 мм с шагом 2 мм.

Для подбора оптимальных параметров проведения процесса в настоящее время применяется методология поверхностного отклика (RSM), которая представляет собой набор математических и статистических методов, используемых для моделирования и последующего анализа сложных взаимосвязей между несколькими независимыми переменными и реакциями, которые они производят на зависимую переменную Y . Важным шагом при планировании эксперимента RSM является выбор подходящего плана эксперимента, который оптимально использует ресурсы и обеспечивает надежную информацию. К распространенным и наиболее часто используемым планам относятся факторный эксперимент, центральный композитный план (CCD) и план Бокса — Бенкена (BBD) (Eremina et al., 2021; Vetrova et al., 2021; Hussain et al., 2021). Данные методики активно применяются в пищевой промышленности для повышения эффективности параметров и нахождения оптимума (Цыганов, Никитина, 2024; Дерканосова и соавт., 2015; Анохин и соавт., 2025; Kumar et al., 2020). Нами был выбран план Бокса — Бенкена (BBD), так как он позволяет быстро и с минимальными затратами построить точную модель второго порядка именно вблизи предполагаемой области оптимума.

Целью данного исследования является математическое моделирование и расчет оптимальных параметров процесса ИК-сушки выжимок черной смородины, направленные на максимально возможное сохранение БАВ в рамках предложенной модели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы

В качестве объектов исследования были использованы свежесвыработанные выжимки ягод черной смородины смеси сортов Орловская серенада (50%) и отборного сеянца 3556-16-81 (50%) с начальной средней влажностью $67,01 \pm 2,12\%$.

Данные сорта черной смородины произрастают в Орловской области и используются в вышеприведенном соотношении сортовых смесей при производстве соков.

Оборудование

Сушку проводили в универсальном инфракрасном шкафу серии «Универсал-СД-2П», предназначенном для комбинированного радиационно-конвективного способа сушки продуктов.

Инструменты

Обработка результатов производилась в программах Microsoft Excel и Design-Expert 13.

Методы

Отбор проб производили в соответствии с ГОСТ 34125-2017.

Содержание сухих веществ определяли термogrавиметрическим методом согласно ГОСТ 33977.

Содержание АК определяли йодометрическим методом в соответствии с требованиями ГОСТ 24556.

Фенольные соединения (катехины и антоцианы) определяли фотометрическим методом с использованием фотоколориметра КФК-3-01-«ЗОМЗ» при длине волны 540 нм. Замеры осуществляли в двух повторностях.

Процедура исследования

Для определения значений оптимальных параметров, обеспечивающих максимальное сохранение биологически активных веществ в выжимках черной смородины, был использован трехуровневый трехфакторный метод поверхностного отклика в сочетании с планом Бокса — Бенкена. В Таблице 1 указаны уровни, диапазон независимых переменных, а также параметры, включающие продолжительность сушки (час), температуру сушки (°C) и толщину слоя (мм).

В контексте трехфакторной трехуровневой экспериментальной схемы, выполненной по принципу Бокса — Бенкена, уравнение, описывающее взаимосвязь между независимыми переменными (факторами) и зависимой переменной (результатом) может быть представлено в виде полинома второго порядка (1):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 C + \beta_{12} AB + \beta_{13} AC + \beta_{23} BC + \beta_{11} A^2 + \beta_{22} B^2 + \beta_{33} C^2, \quad (1)$$

где Y — зависимая переменная;
 A, B, C — независимые переменные (факторы);
 β_0 — свободный член;
 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — коэффициенты для линейных членов;
 $\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$ — коэффициенты для взаимодействий между факторами;
 $\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$ — коэффициенты для квадратичных членов.

Свободный член является расчетным значением отклика в условном центре эксперимента.

Линейные коэффициенты показывают направление и силу линейного влияния фактора на отклик

(зависимую переменную). Отрицательный знак указывает на обратную зависимость: при увеличении фактора значение отклика уменьшается, и наоборот. Чем больше абсолютное значение коэффициента, тем сильнее влияние.

Коэффициенты взаимодействия показывают, как совместное изменение двух факторов влияет на отклик. Это нелинейный эффект. Если коэффициент положительный, то одновременное увеличение (или уменьшение) обоих факторов приводит к росту отклика сверх того, что можно ожидать от их простого суммирования. Отрицательный знак свидетельствует об ослаблении эффекта.

Квадратичные коэффициенты описывают нелинейность влияния фактора. Отрицательный коэффициент указывает на наличие максимума кривой отклика (оптимума), положительный — на наличие минимума. Это ключевые коэффициенты для поиска оптимальных условий.

ИК-сушка выжимок черной смородины и исследование содержания сухих веществ (Y_1), аскорбиновой кислоты (Y_2), катехинов (Y_3), антоцианов (Y_4) производилась на базе ФГБНУ ВНИИСПК д. Жилина Орловского муниципального округа Орловской области.

Каждая комбинация факторов была выполнена в двух независимых повторностях, представляющих собой отдельные циклы сушки с использованием нового образца сырья, что позволило оценить воспроизводимость процесса.

Для исключения систематических погрешностей, связанных с дрейфом условий, порядок проведения опытов был рандомизирован с помощью генератора случайных чисел.

Таблица 1

Пределы изменения экспериментальных факторов

Table 1

Limits of Change of Experimental Factors

| Характеристика | Уровни факторов эксперимента | | |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| | A, Продолжительность, ч | B, Температура, °C | C, Толщина слоя, мм |
| Основной уровень (0) | 5 | 65 | 5 |
| Интервал варьирования | 1 | 5 | 2 |
| Верхний уровень (+1) | 6 | 70 | 7 |
| Нижний уровень (-1) | 4 | 60 | 3 |

В процессе подготовки сырья проводили тщательное перемешивание партии выжимок черной смородины с последующим контролем начальной влажности ($67,01 \pm 2,12\%$) перед каждой сушкой для обеспечения однородности исходных условий.

Оборудование (ИК-шкаф «Универсал-СД-2П») калибровали перед началом серии экспериментов.

Трёхмерные (3D) графики поверхностей отклика были созданы с помощью программы Design-Expert 13, чтобы наглядно продемонстрировать влияние экспериментальных уровней переменных на отклик, взаимосвязь или взаимодействие между двумя независимыми переменными, а также оценить уровень переменных для оптимизации сохранения биологически активных веществ в выжимках черной смородины. На каждой поверхности 3D-графика представлены две переменные, при этом третья переменная зафиксирована на уровне 0. На поверхностях отклика синий цвет указывает на наименьшее содержание (мг/100 г) биологически активных веществ, а красный — на наибольшее.

Таблица 2

План и выходные значения эксперимента

Table 2

Experimental Design and Output Values

| Номер опыта | A | B | C | $Y_1, \%$ | $Y_2, \text{мг/100 г}$ | $Y_3, \text{мг/100 г}$ | $Y_4, \text{мг/100 г}$ |
|------------------------|------|-------|------|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 4,00 | 60,00 | 5,00 | 94,54 | 128,48 | 2545,5 | 522,5 |
| 2 | 6,00 | 60,00 | 5,00 | 95,68 | 98,8 | 2288 | 480 |
| 3 | 4,00 | 70,00 | 5,00 | 95,02 | 81,72 | 833,07 | 285,8 |
| 4 | 6,00 | 70,00 | 5,00 | 98,96 | 52,8 | 545,75 | 240,5 |
| 5 | 4,00 | 65,00 | 3,00 | 94,83 | 95,16 | 2231,25 | 380 |
| 6 | 6,00 | 65,00 | 3,00 | 97,03 | 75,4 | 1787,5 | 347,5 |
| 7 | 4,00 | 65,00 | 7,00 | 93,36 | 85,08 | 2293,75 | 422,5 |
| 8 | 6,00 | 65,00 | 7,00 | 94,51 | 65,6 | 1804,67 | 393,3 |
| 9 | 5,00 | 60,00 | 3,00 | 95,87 | 116,72 | 2568,17 | 465,8 |
| 10 | 5,00 | 70,00 | 3,00 | 96,25 | 81,04 | 726,5 | 265 |
| 11 | 5,00 | 60,00 | 7,00 | 92,35 | 115,28 | 2154 | 540 |
| 12 | 5,00 | 70,00 | 7,00 | 95,87 | 70,4 | 850,75 | 300 |
| 13 | 5,00 | 65,00 | 5,00 | 95,86 | 89,3 | 1449,33 | 358 |
| 14 | 5,00 | 65,00 | 5,00 | 95,63 | 95,1 | 1595,83 | 352,8 |
| 15 | 5,00 | 65,00 | 5,00 | 94,94 | 91,11 | 1334,75 | 1334,75 |
| Среднее значение | | | | 95,38 | 89,5 | 1667,3 | 381,3 |
| Стандартное отклонение | | | | 1,52 | 20,20 | 687,52 | 90,89 |
| Минимальное значение | | | | 92,35 | 52,8 | 545,75 | 240,5 |
| Максимальное значение | | | | 98,96 | 128,48 | 2568,17 | 540 |

Анализ данных

Для подтверждения значимости модели и оценки силы влияния каждого фактора, а также их взаимодействий, использовался дисперсионный анализ (ANOVA). Достоверность результатов оценивалась по t-критерию Стьюдента при $p \leq 0,05$.

Для проверки предпосылок регрессионного анализа выполнена диагностика остатков: построены графики остатков и прогнозируемых значений. Результаты диагностики подтвердили нормальность распределения остатков, их гомоскедастичность и отсутствие автокорреляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для изучения совместного влияния параметров сушки на сохранность биологически активных веществ был реализован план Бокса–Бенкена, включающий 15 опытов. Полная матрица планирования эксперимента с кодированными значениями независимых и зависимых переменных представлена в Таблице 2.

Оценка содержания сухих веществ

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) влияния факторов на содержание сухих веществ представлены в Таблице 3. Общая модель оказалась высокозначимой ($p < 0,0001$), $R^2 = 0,9743$, а тест на отсутствие адекватности (Lack of Fit) не показал значимых результатов ($p = 0,55$). Установлено, что модель с высокой точностью соответствует экспериментальным данным и может быть использована для определения оптимальных параметров проведения процесса ИК-сушки. Скорректированный R^2 (Adjusted R^2) = 0,928 указывает на высокую надежность и адекватность модели. Адекватность модели так же подтверждалась методом анализа остатков. На графике зависимости остатков от предсказанных значений (Рисунок 1) наблюдается их случайное распределение вблизи нулевой линии без выраженных паттернов, что свидетельствует о линейности подобранной модели и гомоскедастичности (постоянстве дисперсии) ошибок.

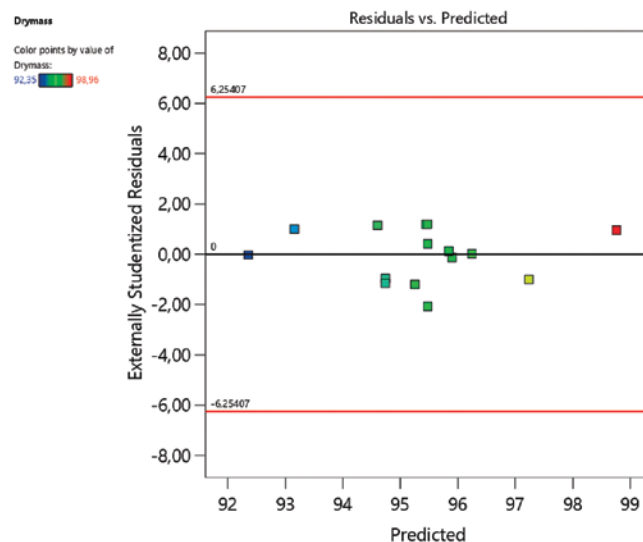
Факторы *A* (продолжительность), *B* (температура) и *C* (толщина слоя), влияющие на отклик (Drymass), являются высокозначимыми ($p < 0,05$). Также значимыми оказались факторы взаимодействия *AB*

Рисунок 1

График остаточных и предсказанных остатков (сухие вещества)

Figure 1

Plot of Residual and Predicted Residues (Dry Matter)



Примечание. Ось X (горизонтальная): предсказанные моделью значения выхода сухих веществ,%; ось Y (вертикальная): внешние стьюдентизированные остатки (стандартизованные остатки), безразмерная величина

Note. X-axis (horizontal): model-predicted dry matter yield values,%. Y-axis (vertical): external standardized residues (standardized residues), dimensionless value.

Таблица 3

Метод дисперсионного анализа поверхности отклика (сухие вещества)

Table 3

Response Surface Analysis of Variance Method (Drymass)

| Источник | Сумма квадратов | Степени свободы | Среднеквадратичное значение | F-значение | P-значение |
|---------------------|-----------------|------------------------|-----------------------------|------------|----------------|
| Модель | 31,67 | 9 | 3,52 | 21,05 | 0 |
| A-Продолжительность | 8,88 | 1 | 8,88 | 53,13 | 0 |
| B-Температура | 7,33 | 1 | 7,33 | 43,86 | 0 |
| C-Толщина слоя | 7,78 | 1 | 7,78 | 46,54 | 0 |
| AB | 1,96 | 1 | 1,96 | 11,72 | 0,02 |
| AC | 0,28 | 1 | 0,28 | 1,65 | 0,26 |
| BC | 2,46 | 1 | 2,46 | 14,74 | 0,01 |
| A ² | 0,16 | 1 | 0,16 | 0,98 | 0,37 |
| B ² | 0,49 | 1 | 0,49 | 2,91 | 0,15 |
| C ² | 2,1 | 1 | 2,1 | 12,57 | 0,02 |
| Остаток | 0,84 | 5 | 0,17 | — | — |
| Недостаток подгонки | 0,38 | 3 | 0,13 | 0,55 | 0,7 |
| Чистая ошибка | 0,46 | 2 | 0,23 | — | — |
| Общее количество | 32,51 | 14 | — | — | — |
| | $R^2 = 0,9743$ | Adjusted $R^2 = 0,928$ | Adeq Precision = 19,1839 | | C.V.% = 0,4287 |

и BC , а также квадратичный член C^2 . Факторы взаимодействия AC и квадратичные члены A^2 и B^2 были статистически незначимы ($p > 0,05$).

Согласно F -значению, которое отражает силу влияния фактора, порядок значимости линейных факторов следующий: B (температура) $>$ C (толщина слоя) $>$ A (продолжительность). Это означает, что среди линейных эффектов температура оказывает наибольшее влияние на отклик, следующими по значимости факторами являются толщина слоя и продолжительность. Следует отметить, что F -значения факторов C и A очень близки, что указывает на сопоставимую силу их влияния.

Содержание сухих веществ в сухих выжимках черной смородины, в зависимости от параметров ИК-сушки, варьировалось от 92,35% до 98,96%. Взаимосвязь между исследуемыми параметрами и содержанием сухих веществ представлена в виде поверхностей отклика и их проекций на Рисунке 2.

Как следует из 3D-графика (Рисунок 2), минимальное содержание сухих веществ (92,35) в выжимках черной смородины получено во временном диапазоне от 4 до 4,5 ч при температуре от 60 до 62 °С. Наибольшее содержание сухих веществ (98,96)

было достигнуто во временном диапазоне от 5,5 до 6 ч при температуре от 68 до 70 °С.

Полученные результаты содержания сухих веществ согласуются с данными исследования Blejan et al. (2023): было зафиксировано содержание сухих веществ $89,71 \pm 0,78\%$ при температуре 57 °С и продолжительности сушки 6–7 ч. В свою очередь, Sójka & Król (2009) сообщили о содержании сухих веществ в диапазоне от $94,0 \pm 0,2$ до $96,8 \pm 0,6\%$.

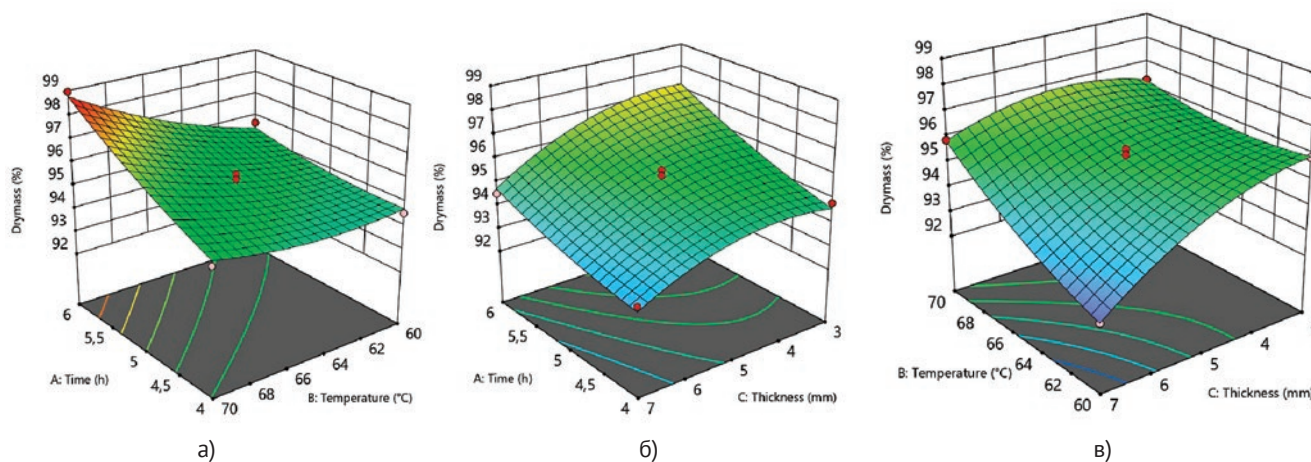
Анализ показателя сухой массы демонстрирует, что наибольшее положительное влияние на величину этого параметра оказывает повышение температуры процесса. Наибольшие значения сухой массы (до 98,96%) наблюдаются при комбинации высокой температуры (70 °С) и увеличенной продолжительности сушки (6 ч) при средней толщине слоя (5 мм). Это указывает на более полное удаление влаги в данных условиях. Вторым значимым фактором является время сушки: увеличение продолжительности с 4 до 6 ч при прочих равных условиях закономерно приводит к росту выхода сухого вещества. Толщина слоя проявляет обратную зависимость: увеличение толщины с 3 до 7 мм негативно сказывается на эффективности удаления влаги, что наиболее ярко видно при низких температурах

Рисунок 2

Трехмерные (3D) графики поверхности отклика содержания сухих веществ в сушеных выжимках черной смородины

Figure 2

Three-Dimensional (3D) Response Surface Plots of Dry Matter Content in Dried Blackcurrant Pomace



Примечание. а – влияние продолжительности ИК-сушки и температуры; б – влияние продолжительности ИК-сушки и толщины слоя; в – влияние температуры и толщины слоя

Note. а – influence of IR drying duration and temperature; б – influence of IR drying duration and layer thickness; в – influence of temperature and layer thickness

и коротком времени сушки, где зафиксирован минимальный выход сухой массы (92,35 %).

Таким образом, для максимизации выхода сухих веществ необходимо применять высокие температуры и достаточную продолжительность сушки при минимально возможной толщине слоя, обеспечивающей при этом экономическую эффективность процесса.

Содержание сухих веществ в сушеных выжимках может быть описано следующим уравнением квадратичной полиномиальной регрессии (2):

$$Y_1 = 95,48 + 1,05 \cdot A + 0,9575 \cdot B - 0,9863 \cdot C + 0,7 \cdot AB - 0,2625 \cdot AC + 0,7850 \cdot BC + 0,2104 \cdot A^2 + 0,3629 \cdot B^2 - 0,7546 \cdot C^2, \quad (2)$$

где Y_1 — содержание сухих веществ в сушеных выжимках;
 A — продолжительность сушки, ч;
 B — температура проведения сушки, °С;
 C — толщина слоя, мм.

Полученное уравнение позволяет рассчитать в сухих выжимках содержание сухих веществ при заданных значениях параметров и проанализировать как влияние каждого параметра в отдельности, так и эффект взаимодействия.

В уравнении, описывающем выход сухих веществ, положительные линейные коэффициенты времени (A , +1,05) и температуры (B , +0,9575) свидетельствуют о том, что увеличение этих параметров в исследованном диапазоне способствует росту выхода сухой массы. Отрицательный коэффициент толщины слоя (C , -0,9863) показывает, что увеличение этого параметра существенно снижает эффективность сушки, вероятно, из-за ухудшения тепло- и массообмена. Положительные коэффициенты взаимодействия AB (+0,7) и BC (+0,7850) означают, что совместное увеличение продолжительности и температуры сушки, а также температуры и толщины слоя (несмотря на отрицательное влияние толщины в отдельности) дает синергетический эффект, дополнительно повышая выход. Квадратичные члены, особенно значительный отрицательный коэффициент при C^2 (-0,7546), указывают на наличие нелинейных эффектов и возможное существование оптимальной точки по толщине слоя, отклонение от которой ведет к снижению эффективности.

Оценка содержания аскорбиновой кислоты

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) влияния факторов на содержание аскорбиновой кислоты представлены в Таблице 4. Общая модель оказалась высокозначимой ($p < 0,0001$), $R^2 = 0,9841$, а тест

Таблица 4

Метод дисперсионного анализа поверхности отклика (аскорбиновая кислота)

Table 4

Response Surface Analysis of Variance Method (Ascorbic Acid)

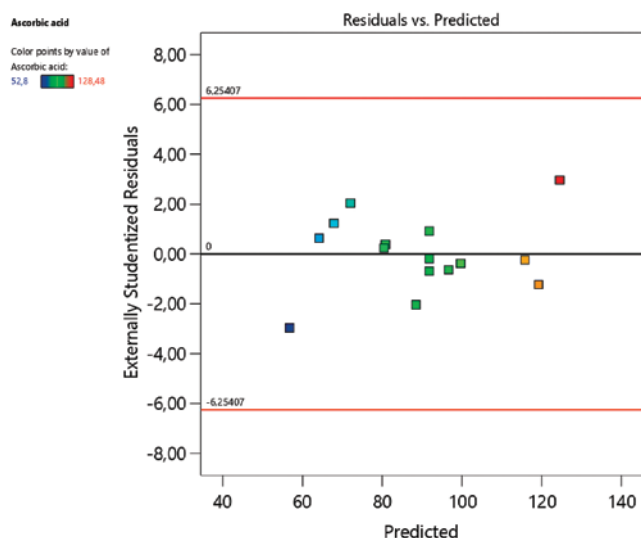
| Источник | Сумма квадратов | Степени свободы | Среднеквадратичное значение | F-значение | P-значение |
|---------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|------------|--------------|
| Модель | 5620,16 | 9 | 624,46 | 34,43 | 0 |
| A-Продолжительность | 1196,58 | 1 | 1196,58 | 65,98 | 0 |
| B-Температура | 3754,98 | 1 | 3754,98 | 207,06 | < 0.0001 |
| C-Толщина слоя | 127,68 | 1 | 127,68 | 7,04 | 0,05 |
| AB | 0,14 | 1 | 0,14 | 0,01 | 0,93 |
| AC | 0,02 | 1 | 0,02 | 0 | 0,98 |
| BC | 21,16 | 1 | 21,16 | 1,17 | 0,33 |
| A ² | 264,79 | 1 | 264,79 | 14,6 | 0,01 |
| B ² | 185,17 | 1 | 185,17 | 10,21 | 0,02 |
| C ² | 34,54 | 1 | 34,54 | 1,9 | 0,23 |
| Остаток | 90,67 | 5 | 18,13 | — | — |
| Недостаток подгонки | 73,06 | 3 | 24,35 | 2,77 | 0,28 |
| Чистая ошибка | 17,61 | 2 | 8,81 | — | — |
| Общее количество | 5710,83 | 14 | — | — | — |
| | $R^2 = 0,9841$ | Adjusted $R^2 = 0,9555$ | Adeq Precision = 19,4965 | | C.V.% = 4,76 |

Рисунок 3

График остаточных и предсказанных остатков (аскорбиновая кислота)

Figure 3

Plot of Residual and Predicted Residues (Ascorbic Acid)



Примечание. Ось X (горизонтальная): предсказанные моделью значения выхода аскорбиновой кислоты,%; ось Y (вертикальная): внешние студентизированные остатки (стандартизованные остатки), безразмерная величина

Note. X-axis (horizontal): model-predicted ascorbic acid yield values,%. Y-axis (vertical): external studentized residuals (standardized residuals), dimensionless value.

на отсутствие соответствия (Lack of Fit) — незначимым ($p = 0,28$). Таким образом, модель с высокой точностью соответствует экспериментальным данным и может быть использована для определения оптимальных параметров проведения процесса ИК-сушки. Скорректированный R^2 (Adjusted R^2) = 0,9555 указывает на высокую надежность и адекватность модели. Для подтверждения адекватности полученной математической модели был проведен анализ остатков. Визуальный анализ графика остатков в зависимости от предсказанных значений (Рисунок 3) не выявил систематических паттернов (воронкообразной или дугообразной формы), что указывает на выполнение условия гомоскедастичности.

Факторы B (температура), A (продолжительность), A^2 и B^2 , влияющие на отклик, были высокозначимыми ($p < 0,05$). Фактор C (Толщина слоя) оказался значимым на границе ($p = 0,05$), в то время как все факторы взаимодействия (AB, AC, BC) и квадратичный член C^2 были статистически незначимы ($p > 0,05$).

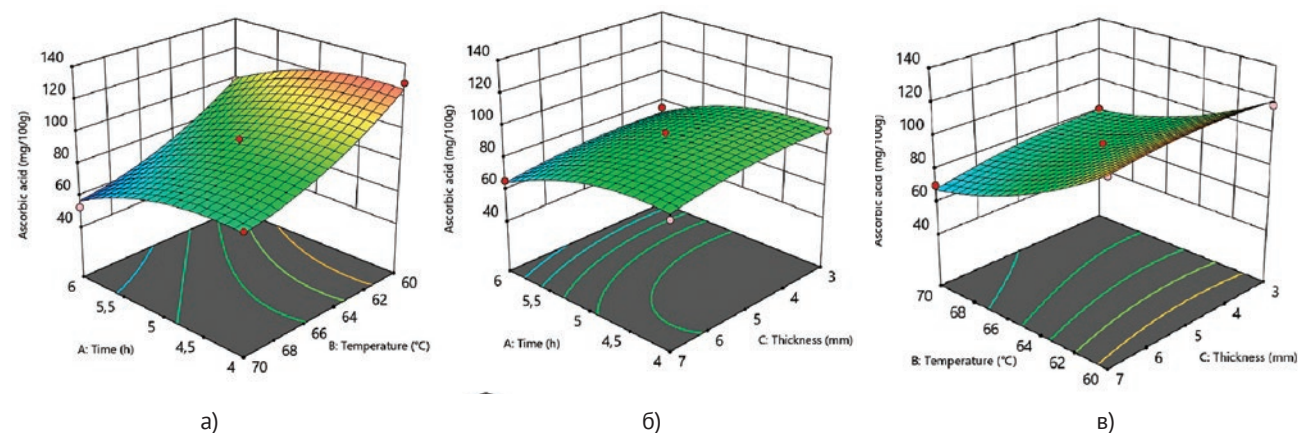
Согласно F -значению, которое отражает силу влияния фактора, порядок значимости линейных факторов следующий: B (температура) > A (продолжительность) > C (толщина слоя). Среди исследуемых факторов температура демонстрирует наибольшее

Рисунок 4

Трехмерные (3D) графики поверхности отклика содержания АК в сушеных выжимках черной смородины

Figure 4

Three-Dimensional (3D) Response Surface Plots of Ascorbic Acid Content in Dried Blackcurrant Pomace



Примечание. а — влияние продолжительности ИК-сушки и температуры, б — влияние продолжительности ИК-сушки и толщины слоя, в — влияние температуры и толщины слоя

Note. а — the effect of IR drying duration and temperature, б — the effect of IR drying duration and layer thickness, в — the effect of temperature and layer thickness

влияние на отклик, за ней по убыванию располагаются продолжительность и толщина слоя.

Содержание АК в сухих выжимках черной смородины, в зависимости от параметров ИК-сушки, варьировалось от 52,8 до 128,48 мг/100 г. Взаимосвязь между исследуемыми параметрами и содержанием АК представлена в виде поверхностей отклика и их проекций на Рисунке 4.

Анализ 3D-графика (Рисунок 4) показывает, что наименьшее содержание АК (52,8) в выжимках черной смородины было получено во временном диапазоне от 5,5 до 6 ч при температуре от 66 до 70 °С. Влияние толщины слоя носит нелинейный характер: при тонком слое разрушение АК происходит быстрее, тогда как при очень толстом слое возможна неравномерная сушка. Наибольшее содержание АК (128,48) было зафиксировано во временном диапазоне от 4 до 5,5 часов при температуре от 60 до 62 °С.

Представленные результаты указывает на высокую чувствительность АК к параметрам сушки. В аналогичных исследованиях, посвященных сушке выжимок черной смородины, Василенко З. В. с соавт. отмечают, что потери АК составляют почти 50% по сравнению с сырыми выжимками (Василенко и соавт., 2016).

Результаты определения содержания АК в выжимках черной смородины согласуются по нижней границе с данным группы исследователей под руководством Rubinskienė M., однако диапазон результатов их исследования по содержанию АК оказался значительно шире — от $129,9 \pm 16,5$ до $220,5 \pm 8,8$ мг/100 г (Rubinskienė et al., 2005).

На основании результатов, представленных в Таблице 4 и на Рисунке 4, можно сделать следующие выводы. Важным фактором, влияющим на сохранность АК, является температура: при повышении температуры с 60 °С до 70 °С содержание АК падает приблизительно на 30–45 мг. Так, при продолжительности сушки 5 ч и толщине слоя 3 мм (опыты 9 и 10) повышение температуры на 10 °С приводит к падению АК с 116,72 до 81,04 мг/100 г. В ходе дисперсионного анализа (Таблица 4) определено, что вторым по значимости фактором, влияющим на сохранность АК, является продолжительность сушки. Например, увеличение продолительно-

сти сушки с 4 до 6 ч при прочих равных условиях также приводит к значительным потерям АК (опыты 1–8). Наименее выраженным является влияние толщины слоя, эффект носит нелинейный характер и зависит от взаимодействия с другими параметрами. При низкой температуре (60 °С) и увеличении толщины с 3 до 7 мм содержание АК составляет 116,72 и 115,28 мг/100 г соответственно.

Таким образом, АК является высокочувствительным индикатором режима сушки. Основным деструктурирующим фактором является высокая температура. Для максимального сохранения АК необходимо использовать щадящие режимы сушки при минимальной температуре (60 °С) и продолжительности (4 ч). Толщина слоя оказывает наименьшее влияние в изученных пределах, однако очень тонкий слой (3 мм) при низкотемпературных режимах, по-видимому, является предпочтительным для сохранения АК.

Содержание АК в сушеных выжимках может быть описано следующим уравнением квадратичной полиномиальной регрессии (3):

$$Y_2 = 91,84 - 12,23 \cdot A - 21,67 \cdot B - 4 \cdot C + 0,19 \cdot AB + 0,07 \cdot AC - 2,30 \cdot BC - 8,47 \cdot A^2 + 7,08 \cdot B^2 - 3,06 \cdot C^2, \quad (3)$$

где Y_2 — содержание АК в сушеных выжимках;
 A — продолжительность сушки, ч;
 B — температура проведения сушки, °С;
 C — толщина слоя, мм.

Полученное уравнение позволяет рассчитать в сухих выжимках содержание АК при заданных значениях параметров и проанализировать влияние и взаимовлияние параметров.

Линейный коэффициент влияния продолжительности сушки на сохраняемость АК ($-12,23 \cdot A$) отрицателен. Так, увеличение продолжительности сушки приводит к значительному разрушению вещества. Величина линейного коэффициента температуры ($-21,67 \cdot B$) свидетельствует о сильном отрицательном воздействии на сохраняемость АК. Толщина слоя имеет слабое отрицательное влияние ($-4 \cdot C$), увеличение толщины слоя снижает сохраняемость АК, но незначительно. Коэффициенты взаимодействия (AB , AC и BC) также демонстрируют незначительное влияние по сравнению с линей-

ными эффектами. Наиболее заметным из них является отрицательное взаимодействие температуры и толщины слоя сушки ($-2,30 \cdot BC$), что снижает содержание АК. Квадратичные эффекты взаимодействия свидетельствуют о том, что продолжительность сушки и толщина слоя ($-8,47 \cdot A^2$ и $-3,86 \cdot C^2$) дают отрицательный эффект. Это подтверждает, что зависимость сохраняемости АК от продолжительности и толщины слоя имеет выраженный максимум (оптимум). Таким образом, длительная сушка и использование очень толстого слоя приводят к повышенным потерям АК. Положительное значение квадратичного коэффициента температуры ($+7,08 \cdot B^2$) свидетельствует о том, что кривая зависимости от температуры имеет не максимум, а минимум (вогнутая форма). Однако, учитывая очень сильное отрицательное линейное влияние температуры, на практике это может означать, что АК разрушается при любой температуре выше определенного порога, и этот процесс лишь немного замедляется в некотором диапазоне.

Следовательно, наши исследования подтверждают выводы авторов о чувствительности АК к некоторым параметрам сушки. Полученное уравнение позволяет провести оптимизацию ИК-сушки для максимизации сохранности АК.

Оценка содержания катехинов

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) влияния факторов на содержание катехинов представлены в Таблице 5. Общая модель оказалась статистически высокозначимой ($p = 0,0003$), $R^2 = 0,9876$, а тест на отсутствие соответствия (Lack of Fit) — незначимым ($p = 0,5548$). Это свидетельствует о том, что модель с высокой точностью соответствует экспериментальным данным и может быть использована для анализа и оптимизации процесса. Скорректированный R^2 (Adjusted R^2) = 0,9652 указывает на высокую надежность и адекватность модели. Адекватность подобранной модели так же проверяли методом анализа остатков. Визуальный анализ графиков остатков от предсказанных значений (Рисунок 5) не выявил систематических паттернов, что свидетельствует о выполнении допущений о линейности и постоянстве дисперсии (гомоскедастичности).

Значимыми факторами, влияющими на отклик, являются B (температура) и A^2 (квадратичный эффект продолжительности), оба фактора с чрезвычайно высокой значимостью ($p < 0,01$). A (продолжительность), B^2 (квадратичный эффект температуры) и C^2 (квадратичный эффект толщины слоя) — значимы ($p < 0,05$). Линейный эффект фактора C (толщина слоя) и все факторы взаимодействия (AB , AC , BC) оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$).

Таблица 5
Метод дисперсионного анализа поверхности отклика (катехины)

Table 5
Response Surface Analysis of Variance Method (Catechins)

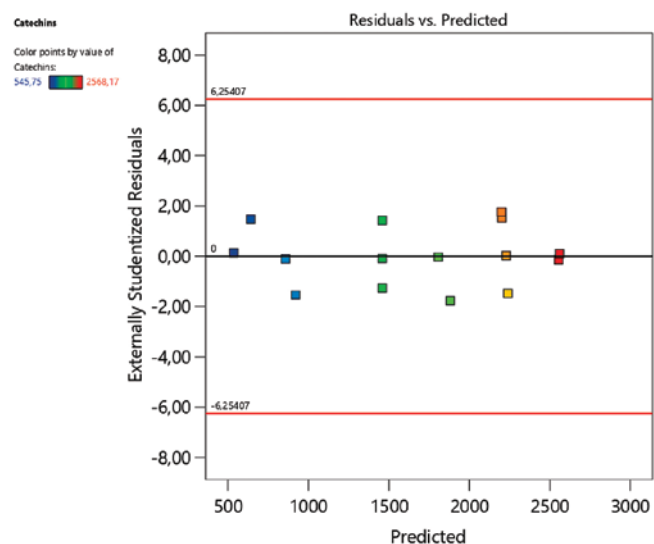
| Источник | Сумма квадратов | Степени свободы | Среднеквадратичное значение | F-значение | P-значение |
|---------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|------------|--------------|
| Модель | 6,535E + 06 | 9 | 7,262E + 05 | 44,20 | 0,0003 |
| A-Продолжительность | 2,729E + 05 | 1 | 2,729E + 05 | 16,61 | 0,0096 |
| B-Температура | 5,444E + 06 | 1 | 5,444E + 06 | 331,41 | < 0.0001 |
| C-Толщина слоя | 5525,63 | 1 | 5525,63 | 0,3364 | 0,5871 |
| AB | 222,31 | 1 | 222,31 | 0,0135 | 0,9119 |
| AC | 513,70 | 1 | 513,70 | 0,0313 | 0,8666 |
| BC | 72474,02 | 1 | 72474,02 | 4,41 | 0,0897 |
| A ² | 2,767E + 05 | 1 | 2,767E + 05 | 16,85 | 0,0093 |
| B ² | 1,205E + 05 | 1 | 1,205E + 05 | 7,34 | 0,0424 |
| C ² | 3,225E + 05 | 1 | 3,225E + 05 | 19,63 | 0,0068 |
| Остаток | 82138,67 | 5 | 16427,73 | | |
| Недостаток подгонки | 47887,47 | 3 | 15962,49 | 0,9321 | 0,5548 |
| Чистая ошибка | 34251,20 | 2 | 17125,60 | | |
| Общее количество | 6,618E + 06 | 14 | | | |
| | $R^2 = 0,9876$ | Adjusted $R^2 = 0,9652$ | Adeq Precision = 19,3474 | | C.V.% = 7,69 |

Рисунок 5

График остаточных и предсказанных остатков (катехины)

Figure 5

Plot of Residual and Predicted Residues (Catechins).



Примечание. Ось X (горизонтальная): предсказанные моделью значения выхода катехинов,%. ось Y (вертикальная): внешние студентизированные остатки (стандартизованные остатки), безразмерная величина.

Note. X-axis (horizontal): model-predicted catechin yield values,%. Y-axis (vertical): external studentized residuals (standardized residuals), dimensionless value.

Согласно *F*-значению, которое отражает силу влияния фактора, порядок значимости основных факторов следующий: *B* (температура) > *A* (продолжительность) > *C* (толщина слоя). Это означает, что температура оказывает наибольшее влияние на отклик, за которым с существенным отрывом следует продолжительность, в то время как влияние толщины слоя в его линейной форме является незначительным.

В результате исследования влияния ИК-сушки на содержание катехинов в выжимках черной смородины установлено, что их содержание варьируется от 545,75 до 2568,17 мг/100 г в зависимости от заданных параметров, что свидетельствует о крайней чувствительности полифенолов к условиям тепловой обработки.

Взаимосвязь между исследуемыми параметрами и содержанием катехинов представлена на Рисунке 6 в виде поверхностей отклика и их проекций.

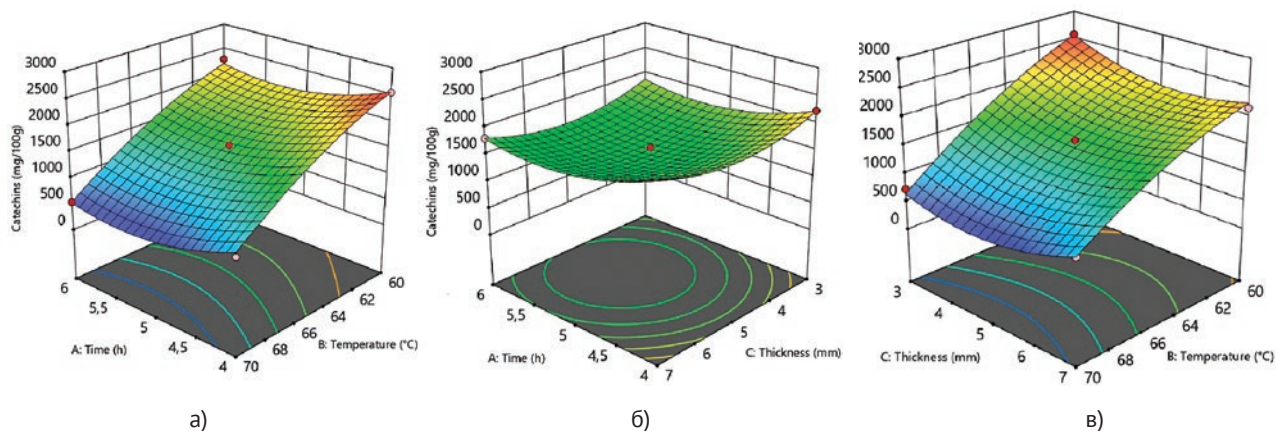
Из 3D-графика (Рисунок 6) следует, что минимальное содержание катехинов (545,75 мг/100 г) в выжимках черной смородины было получено во временном диапазоне от 4,3 до 6 ч при температуре от 68 до 70 °С. Максимальное содержание катехинов

Рисунок 6

Трехмерные (3D) графики поверхности отклика содержания катехинов в сушеных выжимках черной смородины

Figure 6

Three-Dimensional (3D) Response Surface Graphs of Catechin Content in Dried Blackcurrant Pomace



Примечание. а – влияние продолжительности ИК-сушки и температуры; б – влияние продолжительности ИК-сушки и толщины слоя; в – влияние температуры и толщины слоя

Note. а – influence of IR drying duration and temperature; б – influence of IR drying duration and layer thickness; в – influence of temperature and layer thickness

(2568,17 мг/100 г) было получено во временном диапазоне от 4,5 до 5 ч при температуре от 60 до 62 °С.

Исследование влияния температуры на содержание катехинов в выжимках черной смородины проводили З. В. Василенко с соавт. Ими было установлено, что содержание катехинов в экстрактах, полученных при температуре 50 °С, составляет $707,00 \pm 6,5$ мг/100 г. Исследователи также приводят данные о деградации катехинов, согласно которым экстракты, полученные при 70 °С, не содержали катехинов (Василенко и соавт., 2020).

Стоит отметить, что в научной литературе встречается очень большой разброс данных по содержанию катехинов в выжимках черной смородины, что указывает на высокую лабильность данного показателя. Так, Untea A. E. с соавт. приводят довольно низкие значения содержания катехинов — 25,3 мг/100 г (Untea et al., 2024), в то время как в работе Громовой И. А. приводятся значительно более высокие показатели содержания катехинов — 382 мг/100 г (Громова и соавт., 2021). В работе Blejan . М., содержание катехинов в выжимках черной смородины составило 1253 ± 1 мг/100 г (Blejan et al., 2023).

Полученные результаты показывают важность температуры сушки как фактора, влияющего на содержание катехинов в выжимках. Причем эту зависимость можно охарактеризовать как значительную отрицательную, что было подтверждено в ходе дисперсионного анализа (Таблица 5). Например, при продолжительности сушки 4 ч и толщине слоя 5 мм (опыты 1 и 3) рост температуры с 60 °С до 70 °С приводит к падению содержания с 2545,5 до 833,07 мг/100 г. Это связано с термическим разложением и окислением полифенолов. На содержание катехинов влияет и продолжительность сушки: увеличение времени сушки усугубляет их деградацию. Влияние толщины слоя носит опосредованный характер взаимодействия температуры и времени. При низкой температуре (60 °С) более тонкий слой (3 мм, опыт 9) показывает лучшее сохранение катехинов по сравнению с толстым (7 мм, опыт 11) — 2568,17 и 2154 мг/100 г соответственно. Однако при высокой температуре картина может меняться. Толстый слой может замедлять как прогрев, так и удаление влаги, продлевая время окислительных процессов. Оптимальными условиями для сохранения катехинов является температура 60 °С, продолжительность ИК-сушки до 4 ч, толщина слоя около 3 мм.

Содержание катехинов в сушеных выжимках может быть описано следующим уравнением квадратичной полиномиальной регрессии (4):

$$Y_3 = 1459,97 - 184,71 \cdot A - 824,95 \cdot B - 26,28 \cdot C - 7,46 \cdot AB - 11,33 \cdot AC + 134,6 \cdot BC + 273,77 \cdot A^2 - 180,66 \cdot B^2 + 295,55 \cdot C^2, \quad (4)$$

где Y_3 — содержание катехинов в сушеных выжимках;

A — продолжительность сушки, ч;

B — температура проведения сушки, °С;

C — толщина слоя, мм.

Полученное уравнение позволяет рассчитать в сухих выжимках содержание катехинов при заданных значениях параметров.

Линейные коэффициенты исследуемых факторов имеют отрицательные значения (4). Исходя из представленного уравнения, наибольшее негативное влияние на сохраняемость катехинов оказывает повышение температуры сушки ($-824,95 \cdot B$), наименьшее — изменение толщины слоя ($-26,28 \cdot C$).

Коэффициент взаимодействия температуры и толщины слоя ($+134,6 \cdot BC$) свидетельствует о сильном положительном влиянии. Несмотря на то, что увеличение температуры и толщины слоя по отдельности разрушают катехины, их совместное увеличение частично компенсирует этот негативный эффект. Вероятно, в толстом слое при высокой температуре процессы идут несколько иначе, в частности, доступ кислорода может быть ограничен. Взаимодействие продолжительности сушки и температуры ($-7,46 \cdot AB$), а также продолжительности сушки и толщины слоя ($-11,33 \cdot AC$) проявляется как слабый отрицательный эффект.

Квадратичные эффекты взаимодействия продолжительности сушки ($+273,77 \cdot A^2$) и толщины слоя ($+295,55 \cdot C^2$) оказывают сильное положительное влияние. Это указывает на сложную, выпуклую форму зависимости с минимумом. Однако в контексте сильных отрицательных линейных эффектов это, скорее всего, означает, что после определенной точки падения содержание катехинов может немного возрастать благодаря деполимеризации и высвобождению мономеров, но их общий уровень остается низким. Эффект увеличения температуры ($-180,66 \cdot B^2$) является отрицательным,

что в сочетании с сильным отрицательным линейным эффектом подтверждает наличие ярко выраженного максимума (оптимума) по температуре.

Таким образом, катехины так же, как и АК, сильно зависят от температурного режима, что обуславливает необходимость использования низкотемпературных режимов сушки.

Оценка содержания антоцианов

Результаты дисперсионного анализа (ANOVA) влияния факторов на содержание антоцианов представлены в Таблице 6. Общая модель оказалась высокозначимой ($p < 0,0001$), $R^2 = 0,9966$, а отсутствие соответствия (Lack of Fit) незначимо ($p = 0,34 > 0,05$). Результаты показывают, что модель статистически значима и с высокой точностью соответствует экспериментальным данным, что позволяет использовать ее для определения оптимальных условий процесса. Скорректированный R^2 (Adjusted R^2) = 0,9906 указывает на исключительную надежность и высокую точность модели. На Рисунке 7 представлен график зависимости остатков от предсказанных значений. Визуальный анализ показывает, что точки располагаются случайным образом без выраженной тенденции, дисперсия остатков постоянна (гомоскедастичность).

Таблица 6

Метод дисперсионного анализа поверхности отклика (антоцианы).

Table 6

Response Surface Analysis of Variance Method (Anthocyanins)

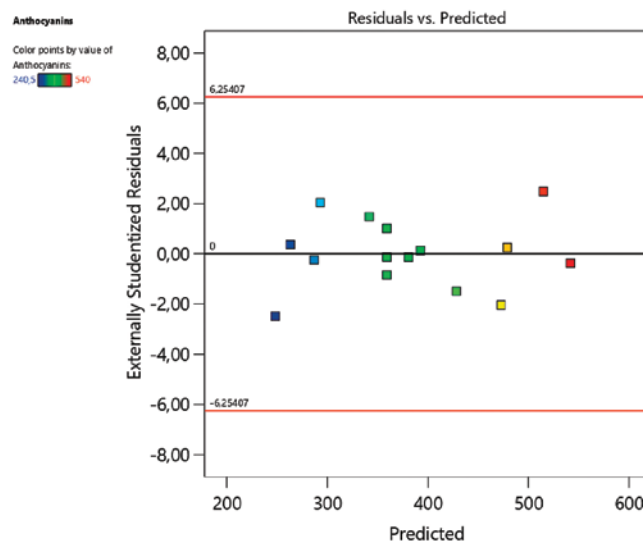
| Источник | Сумма квадратов | Степени свободы | Среднеквадратичное значение | F-значение | P-значение |
|---------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------|------------|----------------|
| Модель | 1,15E + 05 | 9 | 12806,88 | 164,56 | < 0,0001 |
| A-Продолжительность | 2793,78 | 1 | 2793,78 | 35,9 | 0 |
| B-Температура | 1,05E + 05 | 1 | 1,05E + 05 | 1350,61 | < 0,0001 |
| C-Толщина слоя | 4875,78 | 1 | 4875,78 | 62,65 | 0 |
| AB | 1,96 | 1 | 1,96 | 0,03 | 0,88 |
| AC | 2,72 | 1 | 2,72 | 0,04 | 0,86 |
| BC | 384,16 | 1 | 384,16 | 4,94 | 0,08 |
| A ² | 245 | 1 | 245 | 3,15 | 0,14 |
| B ² | 833,08 | 1 | 833,08 | 10,7 | 0,02 |
| C ² | 1283,69 | 1 | 1283,69 | 16,49 | 0,01 |
| Остаток | 389,12 | 5 | 77,82 | - | - |
| Недостаток подгонки | 296,4 | 3 | 98,8 | 2,13 | 0,34 |
| Чистая ошибка | 92,73 | 2 | 46,36 | - | - |
| Общее количество | 1,16E + 05 | 14 | - | - | - |
| | $R^2 = 0,9966$ | Adjusted $R^2 = 0,9906$ | Adeq Precision = 40,7643 | | C. V. % = 2,31 |

Рисунок 7

График остаточных и предсказанных остатков (антоцианы)

Figure 7

Plot of Residual and Predicted Residues (Anthocyanins)



Примечание. Ось X (горизонтальная): предсказанные моделью значения выхода антоцианов,%; ось Y (вертикальная): внешние студентизированные остатки (стандартизованные остатки), безразмерная величина

Note. X-axis (horizontal): model-predicted anthocyanin yield values,%. Y-axis (vertical): external studentized residuals (standardized residuals), dimensionless value.

Значимыми факторами, влияющими на отклик, являются: *B* (температура), *A* (продолжительность) и *C* (толщина слоя) — все три фактора чрезвычайно значимы ($p < 0,01$); B^2 (квадратичный эффект температуры) и C^2 (квадратичный эффект толщины слоя) — значимы на уровне $p < 0,05$; факторы взаимодействия (*AB*, *AC*, *BC*) и квадратичный эффект A^2 оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$).

Согласно *F*-значению, которое отражает силу влияния факторов, порядок их значимости следующий: *B* (температура) > *C* (толщина слоя) > *A* (продолжительность). Это указывает на то, что температура оказывает наибольшее и доминирующее влияние на отклик, в то время как толщина слоя и продолжительность имеют умеренное, но существенное воздействие.

В результате исследования влияния сушки выжимок черной смородины на сохраняемость антоцианов, установлено, что содержание антоцианов варьировалось от 240,5 до 540 мг/100 г в зависимости от параметров ИК-сушки. Взаимосвязь между исследуемыми параметрами и содержанием антоцианов представлена на Рисунке 8 в виде поверхностей отклика и их проекций.

3D-график (Рисунок 8) демонстрирует, что наименьшее содержание антоцианов (240,5 мг/100 г)

в выжимках черной смородины было получено во временном диапазоне от 5 до 6 часов и температуре от 68 до 70 °С. Наибольшее содержание антоцианов (540 мг/100 г) было получено во временном диапазоне от 4 до 4,5 часов и при температуре от 60 до 62 °С.

Влияние температуры на сохраняемость антоцианов в выжимках черной смородины проводили Василенко З. В. с соавт., которыми было установлено, что содержание антоцианов в экстрактах, полученных при температуре 50 °С составляет $41,00 \pm 0,2$ мг/100 г, при повышении температуры до 70 °С выход антоцианов снижается (Василенко и соавт., 2020).

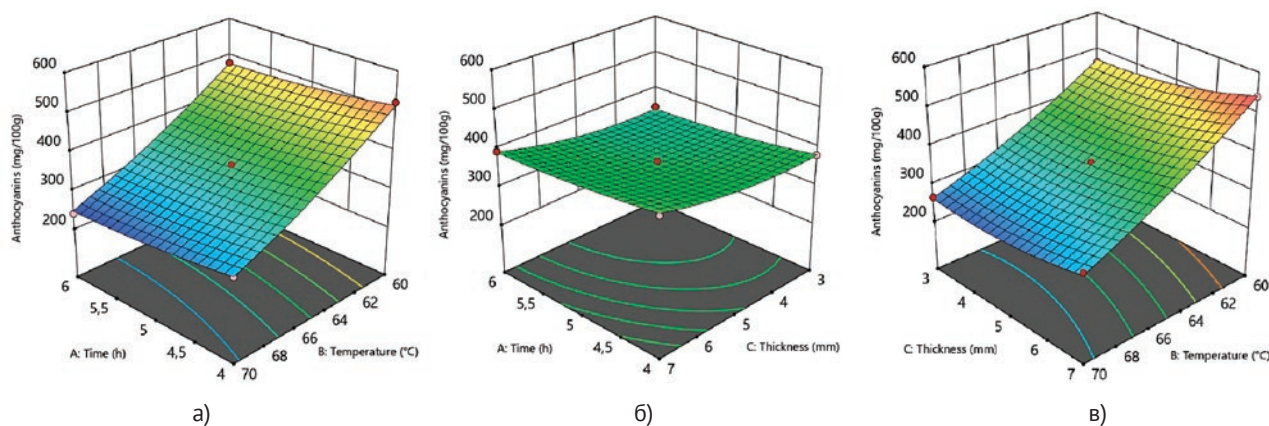
Представленные экспериментальные результаты согласуются с данными исследований группы ученых под руководством Syjka M. ($344,6-1046,1$ мг/100 г) (Syjka et al., 2009), Blejan A. M. (368 ± 7 мг/100 г) (Blejan et al., 2023). Rubinskienė M. и соавт. приводят более высокие значения содержания антоцианов в выжимках черной смородины ($745-1542$ мг/100 г) (Rubinskienė et al., 2005), что согласуется с результатами исследований под руководством Громовой И. ($777,52$ мг/100 г) (Громова и соавт., 2021). Группа польских ученых в своих работах указывает на более низкое содержание антоцианов — $113,78 \pm 4,55$ мг/100 г (Pieszka et al., 2015).

Рисунок 8

Трехмерные (3D) графики поверхности отклика содержания антоцианов в сушеных выжимках черной смородины

Figure 8

Three-Dimensional (3D) Response Surface Plots of Anthocyanin Content in Dried Blackcurrant Pomace



Примечание. а — влияние продолжительности сушки и температуры, б — влияние продолжительности сушки и толщины слоя, в — влияние температуры и толщины слоя

Note. а — effect of drying time and temperature, b — effect of drying time and layer thickness, c — effect of temperature and layer thickness

Результаты, представленные в Таблице 6 и на Рисунке 8, свидетельствуют о сильном отрицательном влиянии температуры на сохраняемость антоцианов, т. е. повышение температуры ведет к снижению содержания антоцианов (опыты 1, 3, 9–12). В ходе дисперсионного анализа было определено, что вторым по значимости фактором является толщина слоя (Таблица 6). При низкой температуре (60 °С) увеличение толщины слоя с 3 до 7 мм (опыты 9 и 11) приводит не к падению, а к росту содержания антоцианов (465,8 и 540 мг/100 г соответственно). С одной стороны, в более толстом слое создаются условия (меньший доступ кислорода, более мягкий тепловой режим в глубине слоя), которые благоприятствуют сохранению этих веществ, с другой стороны, термическое разрушение клеточных стенок при нагреве обеспечивает увеличение содержания антоцианов, что отмечается некоторыми авторами (Алексеевко и соавт., 2019; Макаров и соавт., 2018). Этот эффект исчезает при высокой температуре (70 °С), где разрушительное действие тепла превалирует. Продолжительность сушки является третьим по значимости фактором. Увеличение времени сушки при той же температуре снижает выход антоцианов (опыты 1–4).

Антоцианы демонстрируют промежуточную стабильность между АК и катехинами. Для их сохранения также предпочтительны низкие температуры (60 °С) и непродолжительное время сушки (4 ч). Ключевой находкой является положительное влияние увеличения толщины слоя до 7 мм на сохранность антоцианов в щадящем температурном режиме. Это позволяет рекомендовать более толстый слой (7 мм) для максимизации сохраняемости данной группы веществ.

Содержание антоцианов в сушеных выжимках может быть описано следующим уравнением квадратичной полиномиальной регрессии (5):

$$Y_4 = 359,03 - 18,69 \cdot A - 114,62 \cdot B + 24,69 \cdot C - 0,7 \cdot AB + 0,825 \cdot AC - 9,8 \cdot BC + 8,15 \cdot A^2 + 15,02 \cdot B^2 + 18,65 \cdot C^2, \quad (5)$$

где Y_4 — содержание антоцианов в сушеных выжимках;

A — продолжительность сушки, ч;

B — температура проведения сушки, °С;

C — толщина слоя, мм.

Полученное уравнение позволяет рассчитать в сухих выжимках содержание антоцианов при заданных значениях параметров.

Линейный коэффициент влияния продолжительности сушки ($-18,69 \cdot A$) носит отрицательный характер, т. е. увеличение времени высушивания незначительно снижает содержание антоцианов. Линейный коэффициент влияния температуры ($-114,62 \cdot B$) характеризуется значительным отрицательным эффектом: повышение температуры снижает выход антоцианов. В свою очередь, линейный коэффициент влияния толщины слоя ($+24,69 \cdot C$) характеризуется положительным эффектом, следовательно, увеличение толщины слоя способствует сохранению антоцианов.

Коэффициенты взаимодействия между продолжительностью и температурой ($-0,7 \cdot AB$), продолжительностью и толщиной слоя ($0,825 \cdot AC$) отличаются слабым взаимодействием друг с другом. Наиболее заметным является взаимодействие температуры и толщины слоя ($-9,8 \cdot BC$), которое носит отрицательный характер, что несколько ослабляет положительный эффект от толщины при высоких температурах.

Все квадратичные эффекты взаимодействия характеризуются положительным влиянием ($+8,15 \cdot A^2$), ($+15,02 \cdot B^2$), ($+18,65 \cdot C^2$). Это указывает на то, что зависимости имеют U -образную форму (выпуклые с минимумом). Для антоцианов существует комбинация факторов, при которой их потери минимальны, а после прохождения этой точки минимума выход может даже несколько увеличиваться.

Антоцианы характеризуются большей термической стабильностью, чем катехины и аскорбиновая кислота. Наиболее важно для их сохранения избегать высоких температур, при этом увеличение толщины слоя является благоприятным фактором.

Механизм деградации биологически активных веществ

Представленные данные позволяют раскрыть механизмы деградации биологически активных веществ в условиях ИК-сушки. Аскорбиновая кислота проявляет высокую чувствительность к температурно-временному фактору: её деградация проис-

ходит преимущественно за счет термического окисления и участия в реакциях неферментативного побурения. Напротив, антоцианы демонстрируют большую стабильность при увеличении толщины слоя, что связано с ограничением доступа кислорода и формированием градиента температуры в толстом слое, защищающего внутренние объемы от перегрева. Катехины, как наиболее термолабильные соединения, требуют минимально возможной температуры и времени сушки. Полученные уравнения регрессии количественно подтверждают эти закономерности, показывая, что оптимизация параметров сушки позволяет найти компромисс между скоростью процесса и сохранностью ценных компонентов.

Оптимизация сушки для максимизации выхода биологически активных веществ

Основной задачей подбора оптимальных параметров является максимизация сохранения биологически активных веществ в выжимках черной смородины, для чего была решена система уравнений (формулы 2–5).

С использованием метода поверхности отклика и плана Бокса — Бенкена были построены математические модели, описывающие влияние параметров ИК-сушки на сохранность аскорбиновой кислоты, катехинов, антоцианов и выход сухих веществ в выжимках черной смородины. На основе этих моделей были рассчитаны оптимальные параметры процесса: продолжительность — 4 ч, температура — 60 °С, толщина слоя — 6,2 мм. Прогнозируемое содержание БАВ в сухих выжимках при данных условиях составляет: аскорбиновая кислота — 122,47 мг/100 г, катехины — 2568,1 мг/100 г, антоцианы — 540,65 мг/100 г при содержании сухих веществ — 93,6 %, что обеспечивает микробиологическую стабильность и пригодность к длительному хранению полученного продукта. Полученные результаты носят модельный характер и требуют экспериментальной проверки в рамках валидационных исследований. Предложенные параметры могут служить основой для разработки технологических режимов сушки с целью получения функционального пищевого ингредиента.

Валидация данных

Сопоставление расчетных оптимальных параметров сушки выжимок черной смородины (4 ч, 60 °С, толщина слоя 6,2 мм), определенных методом поверхности отклика в исследовании, с фактически данными, полученными ранее при сушке продолжительностью 4 ч, температуре 60 °С и толщине слоя 3,8 мм (Еремина и др. 2025), показывает частичное соответствие модельных прогнозов и экспериментальных результатов. Содержание аскорбиновой кислоты в реальных образцах (126,72 мг/100 г) хорошо согласуется с прогнозируемым значением (122,47 мг/100 г), что подтверждает адекватность модели по данному параметру. Однако наблюдаются существенные расхождения для полифенольных соединений: фактическое содержание катехинов (2026,50 мг/100 г) оказалось на 21 % ниже модельного прогноза (2568,1 мг/100 г), а содержание антоцианов (315,00 мг/100 г) — на 42 % ниже расчетного уровня (540,65 мг/100 г). Эти отклонения могут быть обусловлены различием толщины слоя в экспериментах (3,8 мм против оптимизированных 6,2 мм), что значительно влияет на кинетику тепломассопереноса и, как следствие, на сохранность термолабильных антоцианов и катехинов, а также природной вариабельностью сырья по сортовому составу и исходному содержанию БАВ. Таким образом, модель достаточно точно прогнозирует сохранность аскорбиновой кислоты, но для повышения точности прогноза по полифенолам требует уточнения с учетом фактора толщины слоя и возможной нелинейности её влияния в расширенном диапазоне.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящем исследовании методом поверхности отклика (плана Бокса–Бенкена) впервые для выжимок черной смородины определены оптимальные параметры ИК-сушки, обеспечивающие компромиссное сохранение основных групп биологически активных веществ: продолжительность 4 ч, температура 60 °С, толщина слоя 6,2 мм. При данных условиях модель прогнозирует содержание сухих веществ 93,6 %, аскорбиновой кислоты — 122,47 мг/100 г, катехинов — 2568,1 мг/100 г, антоцианов — 540,65 мг/100 г. Установлено, что наибольшее деструктивное влияние на все БАВ оказывает температура; толщина слоя влияет разнонаправленно

(положительно для антоцианов, отрицательно для катехинов и аскорбиновой кислоты).

Выдвинутая гипотеза о том, что оптимизация трёх ключевых факторов (продолжительность, температура, толщина слоя) позволяет повысить сохранность БАВ, полностью подтвердилась. Полученные математические модели ($R^2 = 0,974-0,997$) подтверждают, что все исследованные отклики описываются полиномами второго порядка, причём наличие значимых квадратичных членов (C^2 для сухих веществ, A^2 и B^2 для АК, A^2 и C^2 для катехинов, B^2 и C^2 для антоцианов) указывает на существование чётко выраженных оптимумов, а не линейных трендов.

Особого внимания заслуживает разнонаправленное влияние толщины слоя. Если для аскорбиновой кислоты и катехинов увеличение толщины слоя закономерно ухудшает сохранность (замедление тепло- и массопереноса, пролонгирование термического стресса), то для антоцианов при 60 °С наблюдается обратный эффект. Мы связываем это с двумя механизмами: во-первых, ограничением доступа кислорода в глубоких слоях, что снижает скорость окислительной деградации; во-вторых, с более полной экстракцией антоцианов из разрушенных нагревом клеточных стенок при умеренных температурах, что уже отмечалось в работах Алексеенко и соавт. (2019) и Макарова и соавт. (2018). При 70 °С данный положительный эффект нивелируется термодеструкцией.

Прогнозируемое содержание АК в оптимуме (122,47 мг/100 г) хорошо согласуется с данными Василенко и Могилевчик (2016), отмечавших потери АК около 50% относительно свежего сырья, и с результатами Rubinskienė et al. (2005) для нижней границы их диапазона (129,9 мг/100 г). Валидационный эксперимент (126,72 мг/100 г) подтвердил высокую предсказательную способность модели для данного витамина.

Диапазон экспериментальных значений содержания катехинов (545–2568 мг/100 г) полностью перекрывает литературные данные: Blejan et al. (2023) — 1253 мг/100 г, Громова и соавт. (2021) — 382 мг/100 г, Untea et al. (2024) — 25,3 мг/100 г. Столь широкая вариативность, по-видимому, обусловлена сортовыми особенностями, условиями экстракции и, главное, режимами сушки. Наши данные подтверждают

вывод Василенко и соавт. (2020) о практически полной деградации катехинов при 70 °С.

Полученный максимум содержания антоцианов (540 мг/100 г) соответствует верхней границе результатов Syjka & Król (2009) — 344–1046 мг/100 г — и значениям Blejan et al. (2023) — 368 мг/100 г. Более высокие концентрации, приводимые Rubinskienė et al. (2005) и Громовой и соавт. (2021) (до 1542 мг/100 г), вероятно, относятся к образцам, не подвергавшимся сушке, либо к экстрактам, полученным в щадящих условиях. Это подчёркивает значимость правильно подобранного режима тепловой обработки.

Достигнутое остаточное влагосодержание (~6,4%) соответствует требованиям к микробиологической стабильности и согласуется с рекомендациями Ермолаева и соавт. (2015) и Галиакберовой и соавт. (1996). Полученная модель позволяет достичь содержания сухих веществ 93,6%, что выше, чем в работе Blejan et al. (89,7%), и находится в диапазоне, указанном Syjka & Król (94,0–96,8%).

Помимо контролируемых факторов (времени, температуры, толщины слоя), на сохранность БАВ могли повлиять: сортовой состав, использование смеси сортов (50% Орловская серенада + 50% сеянец 3556-16-81) обеспечило типичную для промышленного сырья вариативность исходного содержания БАВ.

Фотометрическое определение катехинов и антоцианов без разделения на индивидуальные соединения дает суммарную оценку, что затрудняет прямое сопоставление с работами, где использована ВЭЖХ.

Частичное несоответствие прогноза по полифенолам (занижение на 21–42% при толщине слоя 3,8 мм) объясняется не только разницей в толщине слоя, но и тем, что модель, построенная на диапазоне 3–7 мм, может недостаточно точно описывать нелинейные эффекты вблизи границ факторного пространства. Это указывает на необходимость дополнительных экспериментов при толщине слоя более 6 мм.

Ограничение исследования

Исследование выполнено на выжимках фиксированного сортового состава одного года урожая,

что не позволяет экстраполировать результаты на другие сорта и агроклиматические условия без дополнительной проверки.

Диапазоны факторов. Оптимум по толщине слоя (6,2 мм) находится внутри исходного интервала, однако для подтверждения воспроизводимости эффекта положительного влияния толстого слоя на антоцианы необходимы эксперименты с расширенным диапазоном (например, 5–9 мм).

Несмотря на то, что каждый опыт выполнен в двух независимых биологических повторностях, план Бокса–Бенкена с тремя центральными точками обеспечивает устойчивые оценки, однако увеличение числа повторностей в центре плана повысило бы точность оценки чистой ошибки.

Расчётный оптимум (6,2 мм) экспериментально не проверен; представленная валидация относится к иной толщине слоя (3,8 мм). Это оставляет открытым вопрос о точности модели именно в найденной оптимальной точке.

В исследовании не оценивались такие важные показатели, как антиоксидантная активность (FRAP, DPPH), содержание пищевых волокон, органолептические свойства и микробиологические показатели готового продукта. Без учёта этих характеристик рекомендации по промышленному использованию являются предварительными.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на: экспериментальную верификацию оптимума с толщиной слоя 6,2 мм; изучение кинетики деградации индивидуальных антоцианов и флавонолов методом ВЭЖХ; оценку влияния предварительной обработки сырья (бланширование, криообработка) на сохранность БАВ и продолжительность сушки; разработку рецептур пищевых продуктов с использованием полученного порошка и исследование его функциональных свойств *in vitro* и *in vivo*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования методом поверхности отклика (план Бокса–Бенкена) впервые осуществлено математическое моделирование и статистическая оптимизация параметров ИК-сушки выжимок черной смородины. Установ-

лено, что наиболее значимым фактором, определяющим сохранность аскорбиновой кислоты, катехинов и антоцианов, является температура; продолжительность сушки и толщина слоя также вносят существенный вклад, причём влияние толщины слоя на антоцианы носит положительный характер при низкотемпературных режимах.

Определены оптимальные параметры процесса, обеспечивающие максимально возможное (в рамках исследованных диапазонов) сохранение биологически активных веществ: продолжительность 4 ч, температура 60 °С, толщина слоя 6,2 мм. Прогнозируемые показатели качества продукта при данных условиях: содержание сухих веществ — 93,6 %, аскорбиновой кислоты — 122,47 мг/100 г, катехинов — 2568,1 мг/100 г, антоцианов — 540,65 мг/100 г. Полученные уравнения регрессии ($R^2 > 0,97$) обладают высокой предсказательной способностью и могут быть использованы для целенаправленного проектирования состава сушеных выжимок.

Практическая значимость исследования заключается в том, что на её основе возможна разработка импортозамещающей технологии получения отечественного функционального пищевого ингредиента с заданным содержанием природных антиоксидантов. Использование таких ингредиентов при производстве обогащенных продуктов питания позволит расширить ассортимент продукции здорового питания и снизить экологическую нагрузку за счёт вовлечения вторичных сырьевых ресурсов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с экспериментальной апробацией найденного оптимума, изучением стабильности БАВ при хранении полученного порошка, а также с разработкой рецептур и оценкой потребительских свойств обогащенных продуктов.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Анохин Юрий Владимирович: концептуализация; разработка модели исследования; проведение исследования; верификация данных; написание и редактирование рукописи.

Еремина Ольга Юрьевна: концептуализация; разработка модели исследования; методология; научное руководство исследованием; рецензирование и редактирование рукописи.

Салина Елена Сергеевна: концептуализация; методология; верификация данных; рецензирование и редактирование рукописи.

Левгерова Надежда Станиславовна: методология, научное руководство исследованием; рецензирование и редактирование рукописи.

Сидорова Ирина Анатольевна: проведение исследования; верификация данных; рецензирование и редактирование рукописи

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Yuri V. Anokhin: conceptualization; research model design; conducting the research; data verification; writing and editing the manuscript.

Olga Yu. Eremina: conceptualization; research model design; methodology; research supervision; reviewing and editing the manuscript.

Elena S. Salina: conceptualization; methodology; data verification; reviewing and editing the manuscript.

Nadezhda S. Levgerova: methodology; research supervision; reviewing and editing the manuscript.

Irina A. Sidorova: conducting the research; data verification; reviewing and editing the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА

- Акулич, А. В., & Гостинщикова, Л. А. (2017). *Способ сушки ягоды устройство для его осуществления* (Патент ВУ 20746). Национальный центр интеллектуальной собственности.
- Алексеев Е. В., Бакуменко О. Е., Азарова М. М., Исабаев И. Б., & Курбанов М. Т. (2019). Влияние предварительной обработки ягод клюквы на экстракцию антоциановых пигментов, выход сока и его антиоксидантную активность. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 10–27. <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.200>
- Анохин, Ю. В., Еремина, О. Ю., Левгерова, Н. С., Салина, Е. С., & Сидорова, И. А. (2025). Оптимизация сушки выжимок облепихи с использованием метода поверхности отклика. *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*, 5, 31–39. <https://doi.org/10.33979/2219-8466-2025-94-5-31-39>
- Василенко, З. В., & Могилевчик, Н. А. (2016). Минеральный и витаминный состав выжимок ягод. *Вестник Могилевского Государственного Университета Продовольствия*, 20(1), 20–23.
- Василенко, З. В., Омарова, Э., & Могилевчик, Н. А. (2020). Исследование влияния технологических факторов на извлечение фенольных соединений из выжимок ягод. *Потребительская кооперация*, 1, 42–46.
- Галиакберова, Н. З., Николаев, Н. А., & Галиакберов, З. К. (1996). *Способ получения порошков из растительного сырья* (Патент № 2064477). Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент).
- Громова, И. А., Воронина, М. С., & Макарова, Н. В. (2021). Исследование химических характеристик продуктов и отходов переработки ягод черники и черной смородины. *Химия растительного сырья*, 1, 251–257. <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021017020>
- Дерканосова, Н. М., Гинс, В. К., Лупанова, О. А., & Андропова, И. И. (2015). Разработка способов получения и применения натурального пищевого красителя. *Техника и технология пищевых производств*, 1(36), 18–23.
- Еремина, О. Ю., & Анохин, Ю. В. (2024). *Подбор оптимальных параметров сушки выжимок черной смородины для снижения кислотности и максимизации содержания биологически*

- активных веществ*. Потребительский рынок: проблемы качества и безопасности товаров и услуг (с. 156–162). Орёл: ОГУ имени И.С. Тургенева.
- Еремина, О.Ю., Анохин, Ю.В. (2025). Исследование биологически активных веществ и оценка функциональных свойств сушеных выжимок черной смородины и облепихи. *Индустрия питания*, 10(4), 79–89. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-4-8>
- Ермолаев, В. А., Федоров, Д. Е., Соснина, О. Б., & Лифенцева, Л. В. (2015). *Способ вакуумной сушки фруктов и ягод* (Патент № 2541395). Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент).
- Кольман, О. Я., Иванова, Г. В., & Никулина, Е. О. (2015). *Способ получения порошков из сушеных выжимок ягод брусники и клюквы* (Патент № 2555592). Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент).
- Макаров С. С., Макаров С. Ю., & Панасюк А. Л. (2018). Влияние различных технологических факторов на состав антоцианов при производстве вина из черной смородины. *Техника и технология пищевых производств*, 48(3), 72–80. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-72-80>
- Цыганов М. С., & Никитина Е. В. (2024). Оптимизация ферментной модификации крахмала для коррекции текстуры обезжиренного кисломолочного продукта. *Пищевая промышленность*, 9(1), 60–72. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-1-7>
- Asif, A., Farooq, U., Akram, K., Hayat, Z., Shafi, A., Sarfraz, F., Sidhu, M. a. I., Rehman, H., & Aftab, S. (2016). Therapeutic potentials of bioactive compounds from mango fruit wastes. *Trends in Food Science & Technology*, 53, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.05.004>
- Blejan, A. M., Nour, V., Păcularu-Burada, B., & Popescu, S. M. (2023). Wild bilberry, blackcurrant, and blackberry by-products as a source of nutritional and bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1579–1595. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2224530>
- Blicharz-Kania, A., Pecyna, A., Zdybel, B., & Andrejko, D. (2025). Physicochemical, functional and nutritional characteristics of various types of fruit Pomace. *Processes*, 13(10), 3182. <https://doi.org/10.3390/pr13103182>
- Coman, V., Teleky, B., Mitrea, L., Martău, G. A., Szabo, K., Călinoiu, L., & Vodnar, D. C. (2019). Bioactive potential of fruit and vegetable wastes. *Advances in Food and Nutrition Research*, 91, 157–225. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.07.001>
- Ciurlă, L., Enache, I., Buțerchi, I., Mihalache, G., Lipșa, F. D., & Patraș, A. (2024). A New Approach to Recover Bioactive Compounds from Apple Pomace: Healthy Jelly Candies. *Foods*, 14(1), 39. <https://doi.org/10.3390/foods14010039>
- Eremina, O. Y., Berezina, N. A., Vetrova, O. N., Seregina, N. V., & Gutsyna, A. A. (2021). Optimization of enzymatic hydrolysis of malt barley sprouts. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 640(2), 022043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022043>
- Hussain, S., Sharma, M., & Bhat, R. (2021). Valorisation of sea buckthorn pomace by optimization of Ultrasonic-Assisted extraction of soluble dietary fibre using response surface methodology. *Foods*, 10(6), 1330. <https://doi.org/10.3390/foods10061330>
- Ibrahim, U. K., Kamarrudin, N., Suzihaque, M. U. H., & Hashib, S. A. (2017). Local fruit wastes as a potential source of natural antioxidant: An overview. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 206, 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/206/1/012040>
- Kumar T., A. K., Pareek, S., Kaur, R., Sagar, N. A., Singh, L., Sami, R., Aljuraide, N. I., Elhakem, A., Alsharari, Z. D., Alruwais, R. S., Aljabri, M. D., & Rahman, M. M. (2022). Optimization of Ultrasonic-Assisted enzymatic extraction of freeze-dried sea buckthorn (*hippophae rhamnoides l.*) berry oil using response surface methodology. *Sustainability*, 14(17), 10849. <https://doi.org/10.3390/su141710849>
- Lustenberger, S., Boczkaj, G., & Castro-Muñoz, R. (2022). Cannabinoids: Challenges, opportunities and current techniques towards its extraction and purification for edibles. *Food Bioscience*, 49, 101835. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101835>
- Michalska, A., Wojdyło, A., Lech, K., Łysiak, G. P., & Figiel, A. (2016). Effect of different drying techniques on physical properties, total polyphenols and antioxidant capacity of blackcurrant pomace powders. *LWT*, 78, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.008>

- Mildner-Szkudlarz, S., Bajerska, J., Górnaś, P., Segliņa, D., Pilarska, A., & Jesionowski, T. (2016). Physical and bioactive properties of muffins enriched with raspberry and cranberry pomace powder: a promising application of fruit by-products rich in biocompounds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71(2), 165–173. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0539-4>
- Pieszka, M., Gogol, P., Pietras, M., & Pieszka, M. (2014). Valuable components of dried pomaces of chokeberry, black currant, strawberry, apple and carrot as a source of natural antioxidants and nutraceuticals in the animal diet. *Annals of Animal Science*, 15(2), 475–491. <https://doi.org/10.2478/aoas-2014-0072>
- Ritika, N., Rizwana, N., Shukla, S., Sondhi, A., Tripathi, A. D., Lee, J., Patel, S. K., & Agarwal, A. (2023). Valorisation of fruit waste for harnessing the bioactive compounds and its therapeutic application. *Trends in Food Science & Technology*, 144, 104302. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104302>
- Rubinskiene, M., Viskelis, P., Jasutiene, I., Viskeliene, R., & Bobinas, C. (2005). Impact of various factors on the composition and stability of black currant anthocyanins. *Food Research International*, 38(8–9), 867–871. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.027>
- Sha, S. P., Modak, D., Sarkar, S., Roy, S. K., Sah, S. P., Ghatani, K., & Bhattacharjee, S. (2023). Fruit waste: a current perspective for the sustainable production of pharmacological, nutraceutical, and bioactive resources. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1260071. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1260071>
- Sójka, M., & Król, B. (2009). Composition of industrial seedless black currant pomace. *European Food Research and Technology*, 228(4), 597–605. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0968-x>
- Szajdek, A., & Borowska, E. J. (2008). Bioactive compounds and health-promoting properties of berry fruits: A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 63(4), 147–156. <https://doi.org/10.1007/s11130-008-0097-5>
- Szymanowska, U., Karaś, M., & Bochnak-Niedźwiecka, J. (2021). Antioxidant and anti-inflammatory potential and consumer acceptance of wafers enriched with freeze-dried raspberry pomace. *Applied Sciences*, 11(15), 6807. <https://doi.org/10.3390/app11156807>
- Tama, A., & Karaś, M. (2025). The Health-Promoting Potential of Fruit Pomace and its application in the confectionery industry. *Applied Sciences*, 15(10), 5790. <https://doi.org/10.3390/app15105790>
- Untea, A. E., Oancea, A., Vlaicu, P. A., Varzaru, I., & Saracila, M. (2024). Blackcurrant (fruits, pomace, and leaves) phenolic characterization before and after in vitro digestion, free radical scavenger capacity, and antioxidant effects on iron-mediated lipid peroxidation. *Foods*, 13(10), 1514. <https://doi.org/10.3390/foods13101514>
- Vagiri, M., Johansson, E., & Rumpunen, K. (2012). Health promoting compounds in black currants – The start of A study concerning ontogenetic and genetic effects. *Acta Horticulturae*, 946, 427–431. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.946.71>
- Vetrova, O. N., Eremina, O. Y., Seregina, N. V., & Shuldeshova, N. V. (2021). Accumulation of dry substances in hydrolysate during the processing of barley malt sprouts with a celluloid enzyme complex. *BIO Web of Conferences*, 32, 03005. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213203005>

REFERENCES

- Akulich, A. V., & Gostinshchikova, L. A. (2017). *Method for drying berries and device for its implementation* (Belarus Patent No. BY 20746). National Center of Intellectual Property. (In Russ.).
- Alekseenko E.V., Bakumenko O.E., Azarova M.M., Isabayev I.B., Kurbanov M.T. (2019). The influence of pre-processing of berries cranberries on the extraction of anthocyanin pigments, the yield of juice and its antioxidant activity. *Storage and Processing of Farm Products*, 4, 10–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.200>
- Anokhin, Yu. V., Eremina, O. Yu., Levgerova, N. S., Salina, E. S., & Sidorova, I. A. (2025). Optimization of sea buckthorn pomace drying using the response surface method. *Technology and Commodity*

- Science of Innovative Food Products*, 5, 31–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.33979/2219-8466-2025-94-5-31-39>
- Vasilenko, Z. V., & Mogilevchik, N. A. (2016). Mineral and vitamin composition of berry pomace. *Bulletin of Mogilev State University of Food Science*, 20(1), 20–23. (In Russ.).
- Vasilenko, Z. V., Omarova, E., & Mogilevchik, N. A. (2020). Study of the influence of technological factors on the extraction of phenolic compounds from berry pomace. *Consumer Cooperatives*, 1, 42–46. (In Russ.).
- Galiakberova, N. Z., Nikolaev, N. A., & Galiakberov, Z. K. (1996). *Method for Obtaining Powders from Plant Raw Materials* (Patent № 2064477). Federal Service for Intellectual Property (Rospatent). (In Russ.).
- Gromova, I. A., Voronina, M. S., & Makarova, N. V. (2021). Investigation of chemical characteristics in waste of juice production of blueberries and black currants. *Chemistry of Plant Raw Material*, 1, 251–257. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.2021017020>
- Derkanosova, N. M., Gins, V. K., Lupanova, O. A., & Andropova, I. I. (2015). Development of methods for obtaining and using natural food coloring. *Food Production Engineering and Technology*, 1(36), 18–23. (In Russ.).
- Eremina, O. Yu., & Anokhin, Yu. V. (2024). Selecting optimal drying parameters for blackcurrant pomace to reduce acidity and maximize the content of biologically active substances. *Consumer Market: Quality and Safety Issues for Goods and Services* (pp. 156–162). Orel: Orel State University named after I.S. Turgenyev. (In Russ.).
- Eremina, O.Yu., & Anokhin, Yu.V. (2025). Biologically active substances investigation and functional properties of dried pomace from black currants and sea buckthorn evaluation. *Индустрия питания*, 10(4), 79–89. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2025-10-4-8>
- Ermolaev, V. A., Fedorov, D. E., Sosnina, O. B., & Lifentseva, L. V. (2015). *Method for Vacuum Drying of Fruits and Berries* (Patent № 2541395). Federal Service for Intellectual Property (Rospatent).
- Kolman, O. Ya., Ivanova, G. V., & Nikulina, E. O. (2015). *Method for Obtaining Powders from Dried Lingonberry and Cranberry Pomace* (Patent № 2555592). Federal Service for Intellectual Property (Rospatent). (In Russ.).
- Makarov, S., Makarov, S., & Panasyuk, A. (2018). Influence of various technological factors on the composition of anthocyanins in black currant wine production. *Food Processing Techniques and Technology*, 48(3), 72–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2018-3-72-80>
- Tsyganov, M., & Nikitina, E. (2024). Starch enzyme modification optimization for the texture correction of a Low-Fat fermented milk product. *Food Industry*, 9(1), 60–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2024-9-1-7>
- Asif, A., Farooq, U., Akram, K., Hayat, Z., Shafi, A., Sarfraz, F., Sidhu, M. a. I., Rehman, H., & Aftab, S. (2016). Therapeutic potentials of bioactive compounds from mango fruit wastes. *Trends in Food Science & Technology*, 53, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.05.004>
- Blejan, A. M., Nour, V., Păcularu-Burada, B., & Popescu, S. M. (2023). Wild bilberry, blackcurrant, and blackberry by-products as a source of nutritional and bioactive compounds. *International Journal of Food Properties*, 26(1), 1579–1595. <https://doi.org/10.1080/10942912.2023.2224530>
- Blicharz-Kania, A., Pecyna, A., Zdybel, B., & Andrejko, D. (2025). Physicochemical, functional and nutritional characteristics of various types of fruit Pomace. *Processes*, 13(10), 3182. <https://doi.org/10.3390/pr13103182>
- Coman, V., Teleky, B., Mitrea, L., Martău, G. A., Szabo, K., Călinoiu, L., & Vodnar, D. C. (2019). Bioactive potential of fruit and vegetable wastes. *Advances in Food and Nutrition Research*, 91, 157–225. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.07.001>
- Ciurlă, L., Enache, I., Buțerchi, I., Mihalache, G., Lipșa, F. D., & Patraș, A. (2024). A New Approach to Recover Bioactive Compounds from Apple Pomace: Healthy Jelly Candies. *Foods*, 14(1), 39. <https://doi.org/10.3390/foods14010039>
- Eremina, O. Y., Berezina, N. A., Vetrova, O. N., Seregina, N. V., & Gutsyna, A. A. (2021). Optimization of enzymatic hydrolysis of malt barley sprouts. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 640(2), 022043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/640/2/022043>
- Hussain, S., Sharma, M., & Bhat, R. (2021). Valorisation of sea buckthorn pomace by optimization of Ultrasonic-Assisted extraction of soluble dietary fibre using response surface methodology. *Foods*, 10(6), 1330. <https://doi.org/10.3390/foods10061330>

- Ibrahim, U. K., Kamarrudin, N., Suzihaque, M. U. H., & Hashib, S. A. (2017). Local fruit wastes as a potential source of natural antioxidant: An overview. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 206, 012040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/206/1/012040>
- Kumar T., A. K., Pareek, S., Kaur, R., Sagar, N. A., Singh, L., Sami, R., Aljuraide, N. I., Elhakem, A., Alsharari, Z. D., Alruwais, R. S., Aljabri, M. D., & Rahman, M. M. (2022). Optimization of Ultrasonic-Assisted enzymatic extraction of freeze-dried sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) Berry Oil Using Response Surface Methodology. *Sustainability*, 14(17), 10849. <https://doi.org/10.3390/su141710849>
- Lustenberger, S., Boczkaj, G., & Castro-Muñoz, R. (2022). Cannabinoids: Challenges, opportunities and current techniques towards its extraction and purification for edibles. *Food Bioscience*, 49, 101835. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101835>
- Michalska, A., Wojdyło, A., Lech, K., Łysiak, G. P., & Figiel, A. (2016). Effect of different drying techniques on physical properties, total polyphenols and antioxidant capacity of blackcurrant pomace powders. *LWT*, 78, 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.12.008>
- Mildner-Szkudlarz, S., Bajerska, J., Górnaś, P., Segliņa, D., Pilarska, A., & Jesionowski, T. (2016). Physical and bioactive properties of muffins enriched with raspberry and cranberry pomace powder: a promising application of fruit by-products rich in biocompounds. *Plant Foods for Human Nutrition*, 71(2), 165–173. <https://doi.org/10.1007/s11130-016-0539-4>
- Pieszka, M., Gogol, P., Pietras, M., & Pieszka, M. (2014). Valuable components of dried pomaces of chokeberry, black currant, strawberry, apple and carrot as a source of natural antioxidants and nutraceuticals in the animal diet. *Annals of Animal Science*, 15(2), 475–491. <https://doi.org/10.2478/aoas-2014-0072>
- Ritika, N., Rizwana, N., Shukla, S., Sondhi, A., Tripathi, A. D., Lee, J., Patel, S. K., & Agarwal, A. (2023). Valorisation of fruit waste for harnessing the bioactive compounds and its therapeutic application. *Trends in Food Science & Technology*, 144, 104302. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104302>
- Rubinskiene, M., Viskelis, P., Jasutiene, I., Viskeliene, R., & Bobinas, C. (2005). Impact of various factors on the composition and stability of black currant anthocyanins. *Food Research International*, 38(8–9), 867–871. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.02.027>
- Sha, S. P., Modak, D., Sarkar, S., Roy, S. K., Sah, S. P., Ghatani, K., & Bhattacharjee, S. (2023). Fruit waste: a current perspective for the sustainable production of pharmacological, nutraceutical, and bioactive resources. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1260071. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1260071>
- Sójka, M., & Król, B. (2009). Composition of industrial seedless black currant pomace. *European Food Research and Technology*, 228(4), 597–605. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0968-x>
- Szajdek, A., & Borowska, E. J. (2008). Bioactive compounds and health-promoting properties of berry fruits: A review. *Plant Foods for Human Nutrition*, 63(4), 147–156. <https://doi.org/10.1007/s11130-008-0097-5>
- Szymanowska, U., Karaś, M., & Bochnak-Niedźwiecka, J. (2021). Antioxidant and anti-inflammatory potential and consumer acceptance of wafers enriched with freeze-dried raspberry pomace. *Applied Sciences*, 11(15), 6807. <https://doi.org/10.3390/app11156807>
- Tama, A., & Karaś, M. (2025). The health-promoting potential of fruit pomace and its application in the confectionery industry. *Applied Sciences*, 15(10), 5790. <https://doi.org/10.3390/app15105790>
- Untea, A. E., Oancea, A., Vlaicu, P. A., Varzaru, I., & Saracila, M. (2024). Blackcurrant (fruits, pomace, and leaves) phenolic characterization before and after in vitro digestion, free radical scavenger capacity, and antioxidant effects on iron-mediated lipid peroxidation. *Foods*, 13(10), 1514. <https://doi.org/10.3390/foods13101514>
- Vagiri, M., Johansson, E., & Rumpunen, K. (2012). Health promoting compounds in black currants — The start of a study concerning ontogenetic and genetic effects. *Acta Horticulturae*, 946, 427–431. <https://doi.org/10.17660/actahortic.2012.946.71>
- Vetrova, O. N., Eremina, O. Y., Seregina, N. V., & Shuldeshova, N. V. (2021). Accumulation of dry substances in hydrolysate during the processing of barley malt sprouts with a celluloid enzyme complex. *BIO Web of Conferences*, 32, 03005. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213203005>

ОБ АВТОРАХ

Юрий Владимирович Анохин, аспирант кафедры товароведения и таможенного дела Орловского государственного университета имени И.С.Тургенева (302026, Российская Федерация, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8146-8592>, yura.anohin69@gmail.com.

Ольга Юрьевна Еремина, доцент, заведующая кафедрой товароведения и таможенного дела Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева (302026, Российская Федерация, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-2829>, Scopus ID: 57195987484, SPIN-код: 3852-1552, o140170@rambler.ru.

Елена Сергеевна Салина, ведущий научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур (302530, Российская Федерация, Орловская область, Орловский МО, д. Жилина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1276-5153>, Scopus ID: 57226609973, Researcher ID: K-6015-2018, SPIN-код: 5518-7428, salina@orel.vniispk.ru.

Надежда Станиславовна Левгерова, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур (302530, Российская Федерация, Орловская область, Орловский МО, д. Жилина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9273-5658>, Scopus ID: 57226613104, Researcher ID: K-6036-2018, SPIN-код: 9062-6576, levgerova@orel.vniispk.ru.

Ирина Анатольевна Сидорова, старший научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института селекции плодовых культур (302530, Российская Федерация, Орловская область, Орловский МО, д. Жилина, д. 1), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7599-487X>, Researcher ID: K-6133-2018, SPIN-код: 3506-3203, sidorova@orel.vniispk.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Yuri Vladimirovich Anokhin, Postgraduate student of the Department of Commodity Science and Customs Affairs, Orel State University named after I.S. Turgenev (95 Komsomol'skaya St., Orel, Orel Region, 302026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-8146-8592>, yura.anohin69@gmail.com.

Olga Yurievna Eremina, Associate Professor, Head of the Department of Commodity Science and Customs Affairs, Orel State University named after I.S. Turgenev (95 Komsomol'skaya St., Orel, Orel Region, 302026, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-2829>, Scopus ID: 57195987484, SPIN-код: 3852-1552, o140170@rambler.ru.

Elena Sergeevna Salina, Leading Researcher, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (1 Zhilina, Orel Municipal District, Orel Region, 302530, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1276-5153>, Scopus ID: 57226609973, Researcher ID: K-6015-2018, SPIN-код: 5518-7428, salina@orel.vniispk.ru.

Nadezhda Stanislavovna Levgerova, Chief Researcher, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (1 Zhilina, Orel Municipal District, Orel Region, 302530, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9273-5658>, Scopus ID: 57226613104, Researcher ID: K-6036-2018, SPIN-код: 9062-6576, levgerova@orel.vniispk.ru.

Irina Anatol'evna Sidorova, Senior Researcher, Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding (1 Zhilina, Orel Municipal District, Orel Region, 302530, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7599-487X>, Researcher ID: K-6133-2018, SPIN-код: 3506-3203, sidorova@orel.vniispk.ru.