




## Влияние обработки низкотемпературной атмосферной плазмы на структуру эфирномасличного сырья




Иван А. Шорсткий	<sup>1</sup>	<a href="mailto:i-shorstky@mail.ru">i-shorstky@mail.ru</a>	 0000-0001-5804-7950
Андрей Г. Шерстюков	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sherstyukov86@inbox.ru">sherstyukov86@inbox.ru</a>	 0009-0005-6318-8797
Роман С. Полищук	<sup>1</sup>	<a href="mailto:romanpolishchuk1@ya.ru">romanpolishchuk1@ya.ru</a>	 0009-0005-5269-1848

<sup>1</sup> Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, 2, Краснодар, 350072, Россия

**Аннотация.** Исследовано воздействие низкотемпературной атмосферной плазмы на микро и макроструктуру свежесобранного эфирномасличного сырья с анализом структурных изменений. В качестве объекта исследования было выбрано эфирномасличное сырье листьев лавра, лепестков розы и розмарина, содержащих целевой компонент во внутренних эфирномасличных вместилищах. Методами сканирующей электронной микроскопии показано, что поток заряженных частиц низкотемпературной плазмы позволяет сформировать развитую объемную структуру за счет электропорации растительных мембран и разрушения воскового поверхностного слоя. Целевое воздействие на мембраны эфирномасличных глобул приводит к изменению капиллярно-пористой структуры материала с формированием дополнительных, образованных плазменным разрядом пор, ориентированных вдоль направления напряженности электрического поля в объеме материала. Характерный размер формируемых электрических пор варьируется от 10-1000 мкм и зависит от влагосодержания исходного сырья и удельной интенсивности обработки. По результатам экспериментальных исследований показано, что с помощью обработки низкотемпературной плазмой существует возможность кратно ускорять массообменные процессы экстракции за счет формирования развитой структуры эфирномасличного сырья. В работе представлена экспериментальная установка для генерации низкотемпературной атмосферной плазмы на основе термоэлектронной эмиссии с использованием функционального генератора Agilent 33220A и высоковольтного усилителя Matsusada 20B20, позволяющая формировать выходное напряжение на аноде до 20 кВ. Установлено, что характер потока низкотемпературной плазмы формирует два основных эффекта: поверхностный эффект в виде «протравливания» и проникающий эффект с образованием сквозных каналов. Для листьев лавра (исходная влажность выше) диаметр плазменного канала достигал 400 мкм, тогда как для розмарина (более низкая влажность) — лишь 25 мкм, что объясняется различиями в диэлектрических свойствах и электропроводности тканей. На поверхности лепестков розы обработка приводит к сглаживанию микрорельефа (адаксиального эпидермиса, состоящего из микропапилляров), что свидетельствует о доминировании эффекта протравливания над эффектом проникновения. Механизм воздействия включает окисление липидов, электропорацию мембран, денатурацию белка и деградацию хлорофилла, что подтверждается потемнением обработанных листьев лавра через час после обработки вследствие взаимодействия кислородосодержащих реактивных частиц плазмы с тканями. Полученные данные формируют гипотезу о переходе эфирного масла из связанной формы в свободную при плазменной обработке, что открывает перспективы для создания новой энергоэффективной технологии переработки эфирномасличного сырья с сокращением продолжительности экстракции и повышением выхода целевых компонентов.

**Ключевые слова:** эфирномасличное сырье; лавр, эфирномасличная роза, розмарин, низкотемпературная плазма, микроструктура, макроструктура, электропорация, развитая структура.

## Effect of Low-Temperature Atmospheric Plasma Treatment on the Structure of Essential-Oil-Bearing Plant Material

Ivan A. Shorstkiy	<sup>1</sup>	<a href="mailto:i-shorstky@mail.ru">i-shorstky@mail.ru</a>	 0000-0001-5804-7950
Andrey G. Sherstyukov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sherstyukov86@inbox.ru">sherstyukov86@inbox.ru</a>	 0009-0005-6318-8797
Roman S. Polishchuk	<sup>1</sup>	<a href="mailto:romanpolishchuk1@ya.ru">romanpolishchuk1@ya.ru</a>	 0009-0005-5269-1848

<sup>1</sup> Kuban State University of Technology, 2, Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russian Federation

**Abstract.** The effect of cold atmospheric plasma on the micro and macrostructure of freshly harvested essential oil raw materials with the analysis of structural changes has been studied. The essential oil raw materials of laurel leaves, rose petals and rosemary containing the target component in internal essential oil receptacles were chosen as the object of the study. Scanning electron microscopy has shown that the flow of charged particles in a low-temperature plasma makes it possible to form a developed volumetric structure due to electroporation of plant membranes and destruction of the wax surface layer. The targeted effect on the membranes of essential oil globules leads to a change in the capillary-porous structure of the material with the formation of additional pores formed by plasma discharge, oriented along the direction of the electric field strength in the volume of the material. The characteristic size of the formed electrical pores varies from 10-1000 microns and depends on the moisture content of the feedstock and the specific intensity of processing. According to the results of experimental studies, it has been shown that using low-temperature plasma treatment, it is possible to multiply the mass-exchange extraction processes by forming a developed structure of essential oil raw materials. The paper presents an experimental setup for generating low-temperature atmospheric plasma based on thermionic emission using an Agilent 33220A functional generator and a Matsusada 20B20 high-voltage amplifier, which allows generating an output voltage at the anode up to 20 kV. It is established that the nature of the low-temperature plasma flow forms two main effects: the surface effect in the form of "etching" and the penetrating effect with the formation of through channels. For labra leaves (the initial humidity is higher), the diameter of the plasma channel reached 400 microns, whereas for rosemary (lower humidity) it was only 25 microns, which is explained by differences in the dielectric properties and electrical conductivity of the tissues. On the surface of the rose petals, the treatment leads to a smoothing of the microrelief (adaxial epidermis consisting of micropapillaries), which indicates the dominance of the etching effect over the penetration effect. The mechanism of action includes lipid oxidation, membrane electroporation, protein denaturation, and chlorophyll degradation, which is confirmed by the darkening of treated laurel leaves an hour after treatment due to the interaction of oxygen-containing reactive plasma particles with tissues. The data obtained form a hypothesis about the transition of essential oil from a bound form to a free one during plasma treatment, which opens up prospects for creating a new energy-efficient technology for processing essential oil raw materials with a shorter extraction time and an increased yield of target components.

**Keywords:** essential oil; laurel essential oil, rose essential oil, rosemary essential oil, cold plasma, microstructure, macrostructure, electroporation, developed structure.

Для цитирования

Шорсткий И.А., Шерстюков А.Г., Полищук Р.С. Влияние обработки низкотемпературной атмосферной плазмы на структуру эфирномасличного сырья // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 44–51. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-44-51

For citation

Shorstkiy I.A., Sherstyukov A.G., Polishchuk R.S. Effect of Low-Temperature Atmospheric Plasma Treatment on the Structure of Essential-Oil-Bearing Plant Material. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 44–51. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-44-51

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Введение

Основой создания новых технологий переработки эфирномасличных культур является использование сведений о строениях капиллярно-пористой структуры, знание общих закономерностей воздействия технологических факторов в процессах переработки (температуры, механики, давления, влаги и пр.) [1]. Влияние традиционных технологических факторов на морфологию и структуру эфирномасличного сырья широко представлено в обзорах [2, 3].

Подготовительные процессы капиллярно-пористой структуры эфирномасличного сырья к массообменным процессам напрямую влияют на эффективность и глубину экстрагирования [1, 4]. Особое значение это имеет для эфирномасличного сырья, у которого эфирное масло содержится во внутренних вместилищах (лавр, аир, эвкалипт, герань, розмарин и т. д.). Так, к примеру, для подготовки капиллярно-пористой структуры в промышленности проводят процессы влаготепловой подготовки (бланширование, жарка и пр.), процессы механической подготовки (плющение, сжатие). Однако представленные процессы являются устаревшими и требуют принципиально нового подхода к подготовке эфирномасличного сырья и реализации высокоэффективного процесса переработки.

Альтернативными методами подготовки анатомической целостности капиллярно-пористой структуры растительного сырья являются электрофизические методы воздействия [5–7]. Известно, что при работе с термолабильными эфирномасличными материалами необходимо учитывать фактор термического воздействия [8]. Такой подход требует контроля температурного уровня обработки, возникающего вследствие джоулева тепла [9]. В связи с этим широкое распространение в этом направлении приобрела обработка импульсным электрическим полем и обработки низкотемпературной плазмой [10, 11]. С точки зрения получаемого эффекта, указанные технологии отличаются характером воздействия. Так, например, в технологии воздействия импульсным электрическим полем обработка происходит в жидкой проводящей среде в объеме материала, а в случае с обработкой низкотемпературной плазмой происходит эффект прохождения потока заряженных частиц плазмы через структуру материала с формированием дополнительных континуумов в атмосферной среде. Наличие развитой капиллярно-пористой структуры от прохождения потока заряженных частиц реактивной плазмы снижает сопротивление среды для прохождения экстрагента или пара на этапах переработки эфирномасличного сырья [12].

Благодаря этому метод обработки низкотемпературной плазмой обладает перспективами использования в пищевой, химической и агропромышленной отрасли, где процесс обработки исходного сырья в объеме жидкости не всегда возможен.

Таким образом, цель данной статьи – способствовать более глубокому пониманию применения обработки низкотемпературной плазмой при переработке эфирномасличного сырья. Для этого исследуется влияние обработки на изменения поверхностной и внутренней структуры свежесобранного эфирномасличного сырья.

## Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали свежесобранное эфирномасличное сырьё листьев лавра благородного, лепестков эфирномасличной розы и листьев розмарина, в которых целевые компоненты локализованы во внутренних эфирномасличных вместилищах. Лавр выращен на южном берегу Крыма. Роза и розмарин выращены на предприятии Алуштинского эфирномасличного завода в Крыму. Для обеспечения сопоставимости результатов по каждому виду растительного материала отбирали однородные по степени зрелости и внешнему состоянию фрагменты сырья, исключая образцы с выраженными механическими повреждениями и посторонними включениями.

Эфирномасличное сырьё обрабатывали низкотемпературной атмосферной плазмой на экспериментальной установке, представленной на рисунке 1.

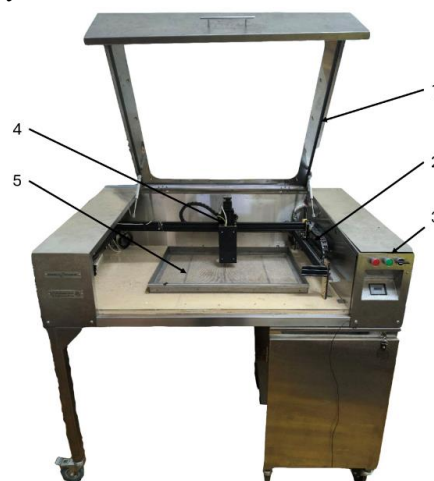


Рисунок 1. Экспериментальная установка для обработки низкотемпературной атмосферной плазмой: 1 – верхняя дверца; 2 – позиционная платформа; 3 – программируемый блок управления; 4 – катодный узел; 5 – анод

Figure 1. Experimental setup for cold atmospheric plasma treatment: 1 – upper door; 2 – positioning stage; 3 – programmable control unit; 4 – cathode assembly; 5 – anode

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2. В качестве энергетической части была использована схема подачи положительных импульсов от функционального генератора Agilent 33220A (Agilent Technologies, США) с последующим усилением сигнала по напряжению в высоковольтном усилителе Matsusada 20-B-20. (Matsusada Precision Inc, Япония). Такая схема позволяла формировать выходное напряжение на аноде до 20 кВ. В качестве катода выступал источник термоэлектронной эмиссии в виде нити накала (значение активного сопротивления  $R_e = 2 \text{ Ом}$ ,  $V = 1,0 \text{ В}$ ). Контроль параметром амплитуды сигнала, частоты и формы осуществляли с использованием осциллографа Tektronix TDS 220.

Была рассмотрена следующая постановка эксперимента. Свежеубранное эфиромасличное сырье размещали на аноде. В межэлектродном пространстве через сырье генерировали поток заряженных частиц плазмы. Канал потока разряда располагался перпендикулярно поверхности эфиромасличного сырья, как показано на рисунке 2.

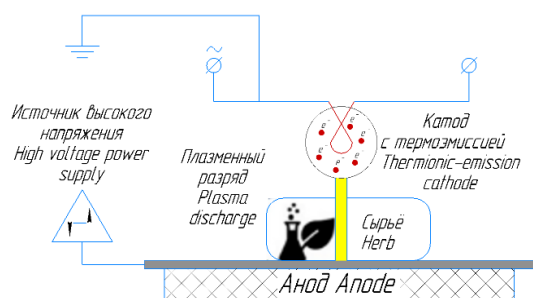


Рисунок 2. Схема экспериментальной установки  
Figure 2. Schematic diagram of the experimental setup.

Оценку структурных изменений эфиромасличного сырья проводили с использованием методов оптической и растровой электронной микроскопии на EVO HD 15 (Zeiss, Великобритания). Режим работы растровой электронной микроскопии: ускоряющее напряжение 10,0 кВ и 15,0 кВ. Для наблюдения морфологических особенностей и изменений поверхности после плазменной обработки образец эфиромасличного сырья подвергали крио заморозке с последующих отводом влаги методом сублимации.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 3 показан процесс обработки листьев лавра. Плазменный канал бледно-фиолетового свечения формируется в межэлектродном промежутке при подаче на анод импульса напряжения амплитудой 5 кВ. Поток заряженных частиц проходит через структуру материала и замыкается на катоде. Характер потока низкотемпературной плазмы формирует два основных эффекта: поверхностный эффект

в виде «протравливания» и проникающий эффект с формированием сквозных каналов.



Рисунок 3. Процесс обработки лавровых листьев низкотемпературной плазмой при амплитуде напряжения 5 кВ

Figure 3. Process of treating bay leaves with cold plasma at a voltage amplitude of 5 kV

Эфирное масло в связанном состоянии обычно распределяется равномерно по тканям промышленной части сырья и не имеет строго ограниченной локализации. Свободное эфирное масло и смолистые вещества находятся в специальных выделительных структурах, в эфиромасличных вместилищах на поверхности или внутри растительных тканей [13].

На рисунке 4 представлен поперечный срез листа лавра. В мезофилле лавра расположены несколько секреторных идиобластов, содержащих вместилища эфирного масла ЭМ (рисунке 4). Эти вместилища имеют сферическую форму и размеры, со средним диаметром  $12,3 \pm 4 \text{ мкм}$  ( $n = 12$ ).

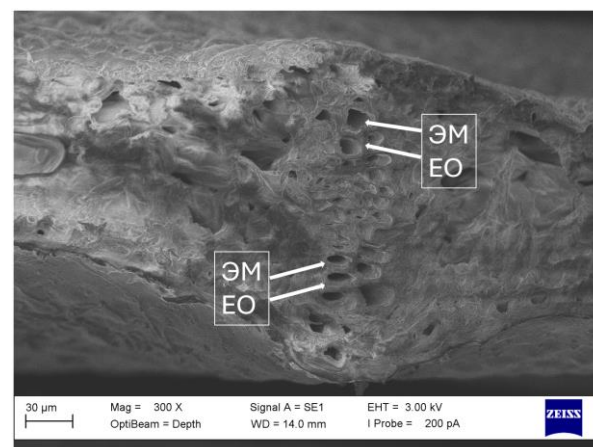


Рисунок 4. Поперечный срез листа лавра с указанием на внутренние эфиромасличные вместилища: ЭМ – эфиромасличные вместилища  
Figure 4. Cross-section of a bay leaf indicating internal essential-oil cavities: EO – essential-oil cavities

Микроморфологический анализ структуры листа лавра после обработки низкотемпературной плазмой основан на структурных изменениях.

Обработки НП с объемной областью проникновения диаметром ~400 мкм. На поверхности материала сформирован кратер с углублением от прохождения разряда низкотемпературной плазмы. В область потока заряженных частиц попадают основные эфирномасличные вместилища, выход целевого компонента из которых на этапах экстрагирования будет проводиться в сформированный электрическим разрядом канал.

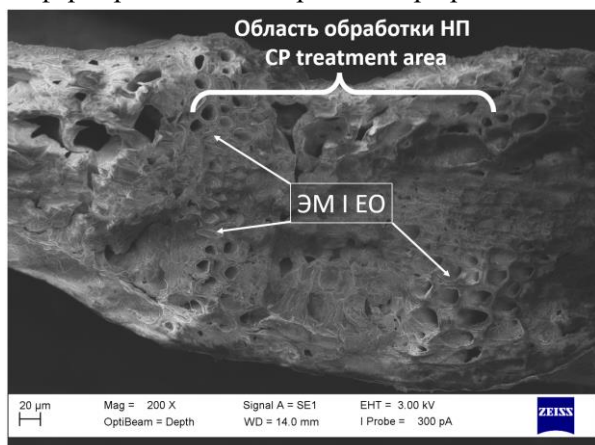


Рисунок 5. Поперечный срез листа лавра после обработки низкотемпературной плазмой с указанием зоны обработки и эфирномасличных вместилищ: НП – низкотемпературная плазма; ЭМ – эфирномасличные вместилища

Figure 5. Cross-section of a bay leaf after cold plasma treatment, showing the treatment zone and essential-oil cavities: CP – cold plasma; EO – essential-oil cavities

Механизм воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность растительного сырья основан на бомбардировке и взаимодействии реактивных частиц плазмы с поверхностью эфирномасличного сырья. На сегодняшний день существует несколько основных направлений объяснения механизма взаимодействия реактивных частиц с компонентами растительных тканей: процессы окисления липидов, электропорация мембран, денатурация белка и расщепление нуклеиновых кислот [14]. В основном, большинство работ описывает механизм взаимодействия через эффект «травления», который связан с декомпозицией восковой оболочки [15] и дезинтеграцией мембран растительных клеток [16]. Для остальных методов требуется высокоточная аппаратура и наличие полного спектра анализа, от данных реактивных частиц плазмы до параметров биологически активных соединений. Проникающий характер обработки низкотемпературной плазмой был установлен при обработке листьев табака.

Формируемые сквозные отверстия в пластине листа достигали 40–50 мкм [17].

Интересно отметить работы, где при малых токах разряда, порядка 5 мА клеточная структура лавра сразу после обработки приобретает более светлый окрас, без ярко выраженных клеточных структур на поверхности листа (рисунок 6). При этом через час после обработки начинается процесс потемнения листа, связанный с возникающими процессами окисления. Данный факт является следствием интенсивного воздействия кислородосодержащих реактивных частиц в составе плазмы (рисунок 6) с тканями лаврового листа. Увеличение тока разряда приводит к возникновению сквозных отверстий на поверхности лаврового листа.



Рисунок 6. Клеточная структура обработанного и контрольного лаврового листа

Figure 6. Cellular structure of the treated and control bay leaf

Объяснение изменения цветового окраса можно охарактеризовать деградацией хлорофилла. В работе [18] отмечена деградация хлорофилла и изменения фенольных компонентов при воздействии низкотемпературной плазмы на листья мяты перечной, крапивы жгучей и лимонника, при использовании диэлектрического барьерного разряда. Однако корректного механизма взаимодействия НП на биологические активные компоненты сырья до сих пор нет.

Микротомографический анализ влияния обработки низкотемпературной плазмой на эфирномасличное сырье розмарина представлено на рисунке 7. Воздействие НП приводит к образованию кратера диаметром ~25 мкм на поверхности ткани розмарина. Снижение величины кратера от прохождения потока заряженных частиц связан с более низким показателем влажности розмарина по сравнению с листьями лавра.

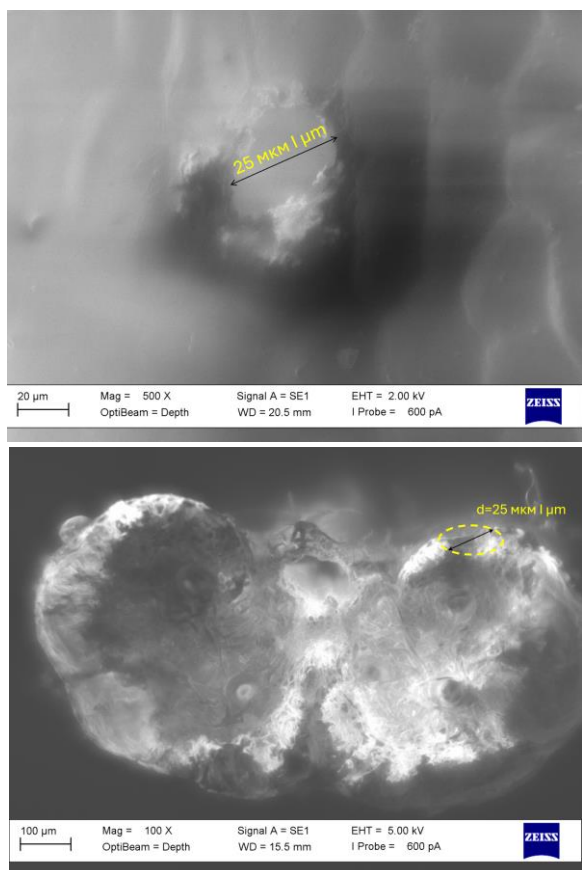


Рисунок 7. Поверхность тканей розмарина с отверстием от прохождения разряда НП и поперечный срез листа розмарина после обработки низкотемпературной плазмой с указанием зоны обработки (желтая штрих пунктирная линия)

Figure 7. Surface of rosemary tissues with a hole formed by the passage of a cold plasma discharge, and a cross-section of a rosemary leaf after low-temperature plasma treatment, indicating the treatment zone (yellow dash-dot line)

С точки зрения сложности переработки эфирномасличного сырья лепестков розы являются наиболее трудоёмкой. Так как основная часть эфирного масла находится в связанной форме, то предварительная подготовка такого сырья является обязательным технологическим этапом. На сегодняшний день в качестве методов подготовки в основном используют ферментацию [19].

Микротомографический анализ влияния обработки низкотемпературной плазмой на эфирномасличное сырье лепестков розы представлено на рисунке 8. Поверхность лепестка (адаксиальный эпидермис) состоит из плотно упакованного множества микропузырьков (микропапилляров; рис. 8) с наноразмерными бороздками (морщинистыми складками) в верхней части каждого микропапилляра. Толщина листа розы по данным электронного микроскопа составляет 45 мкм. Для лепестков розы при обработке низкотемпературной плазмой на поверхности реализуется эффект протравливания.

Как видно на рисунке 8 область обработки сгладила поверхность лепестка розы. Аналогичные наблюдения с СВЧ-плазменным свечением было отмечено в работе [20].

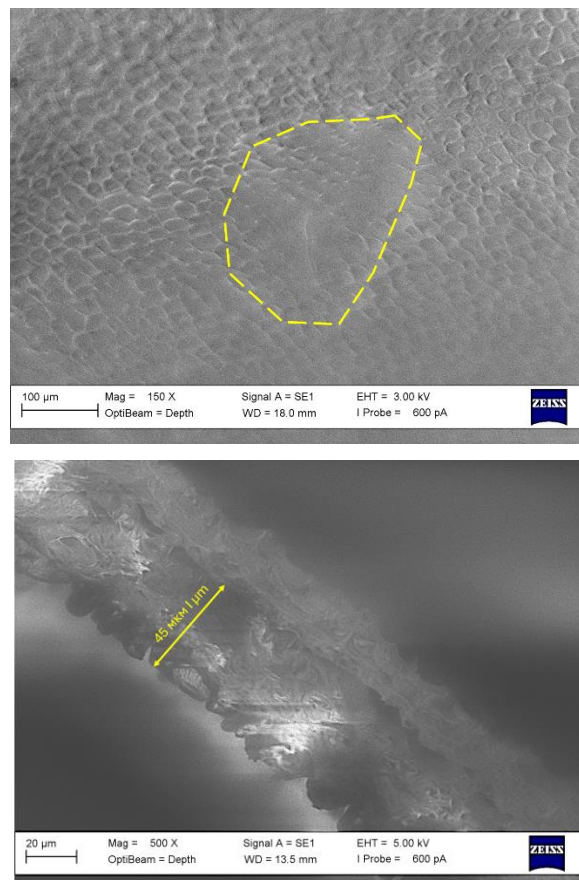


Рисунок 8. Поверхность и поперечный срез лепестка розы с указанием зоны обработки (желтая штрих пунктирная линия)

Figure 8. Surface and cross-section of a rose petal indicating the treatment zone (yellow dash-dot line)

### Обсуждение

Проведено исследование влияния низкотемпературной атмосферной плазмы на микро- и макроструктуру свежесобранного эфирномасличного сырья лавра, лепестков розы эфирномасличной и розмарина. В качестве метода обработки использована методика генерации низкотемпературной атмосферной плазмы при поддержке термоэлектронной эмиссии. Для оценки воздействия применяли методы оптической и растровой электронной микроскопии. Эффекты протравливания поверхности и формирования сквозных электрических пор наблюдались при обработке свежесобранного эфирномасличного сырья. При анализе тканей лавра показано, что формируется развитая капиллярно-пористая структура со столбом электрически сформированного канала диаметром 400 мкм. При обработке розмарина в схожих электрических параметрах размер канала находился на уровне 25 мкм.

Данный факт обусловлен различиями исходной влажности сырья, толщины материала и электрических характеристик обрабатываемых материалов. Результаты воздействия низкотемпературной плазмы на эфирномасличное сырье схожи с работами по применению СВЧ-излучений и коронного разряда [21].

Полученные данные о воздействии на твердую фазу капиллярно-пористого тела эфирномасличного материала формируют гипотезу о переходе эфирного масла из связанного в свободную форму связи. Для этого необходимо развить методику оценки кривых кинетики экстракции с описанием формы связи эфирного масла.

### Заключение

Технология обработки низкотемпературной атмосферной плазмы может быть использована

для подготовки эфирномасличного сырья к эффективной стадии экстрагирования или паровой гонки. Наличие развитой структуры снижает диффузный барьер для прохождения экстрагента и увеличивает площадь контакта экстрагента и целевого компонента. Полученные данные об характерных размерах формируемых электрических пор, каналов и площади протравливания будут являться основой для разработки новой технологии переработки эфирномасличного сырья.

### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № 25-16-20114 и за счет гранта Российского научного фонда № 25-16-20114, <https://rscf.ru/project/25-16-20114/>.

### Литература

- 1 Sherstyukov A.G., Shorstkiy I.A., Khudyakov D.A. et al. Recent advances in essential oil extraction using cold plasma treatment // *Foods and Raw Materials*. 2026. V. 15. № 2.
- 2 Salgueiro L., Martins A.P., Correia H. Raw materials: the importance of quality and safety. A review // *Flavour and Fragrance Journal*. 2010. V. 25. № 5. P. 253–271. doi: 10.1002/ffj.1973
- 3 Vallino M., Fusaro L., Lombardo G. et al. Impact of drying temperature on tissue anatomy and cellular ultrastructure of different aromatic plant leaves // *Plant Biosystems*. 2022. V. 156. № 4. P. 847–854. doi: 10.1080/11263504.2021.1922535
- 4 Basak S., Annapure U.S. Recent trends in the application of cold plasma for the modification of plant proteins – A review // *Future Foods*. 2022. V. 5. P. 100119. doi: 10.1016/j.fufo.2022.100119
- 5 Rathore V., Nema S.K. Methodology on Plasma-Activated Water-Assisted Extraction and Plasma Bubbling-Assisted Hydrodistillation // Srivastav P.P., Srivastava B., K.S. (eds.) *Essential Oil Extraction from Food By-Products*. New York: Springer US, 2025. P. 123–132. doi: 10.1007/978-1-0716-4634-2\_8
- 6 Шорсткий И.А. Использование электрофизических приемов при переработке масличного сырья // *Известия вузов. Пищевая технология*. 2019. № 4. С. 11–16.
- 7 Шорсткий И.А., Худяков Д.А., Шерстюков А.Г. Применение обработки низкотемпературной плазмой для увеличения глубины экстракции и качества эфирного масла лавра // Научный и инновационный потенциал развития производства, переработки и применения эфиромасличных и лекарственных растений в ЕАЭС: мат. VII Междунар. науч.-практ. конф. 2025. С. 120–125.
- 8 Das J., Bhattacharjee S., Paul T. et al. Extraction // *Chemical Engineering Essentials 1*. 2025. P. 263–302. doi: 10.1002/9781394372348.ch9
- 9 Shorstkii I.A., Zherlicin A.G., Li P. Impact of pulsed electric field and pulsed microwave treatment on morphological and structural characteristics of sunflower seed // *OCL*. 2019. V. 26. P. 47. doi: 10.1051/ocl/2019048
- 10 Shorstkii I. Application of cold filamentary microplasma pretreatment assisted by thermionic emission for potato drying // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020. V. 66. P. 102540. doi: 10.1016/j.ifset.2020.102540
- 11 Taha A., Benli B., Gokmen V. et al. Pulsed Electric Field: Fundamentals and Effects on the Structural and Techno-Functional Properties of Dairy and Plant Proteins // *Foods*. 2022. V. 11. № 11. P. 1556. doi: 10.3390/foods11111556
- 12 Шерстюков А.Г., Шорсткий И.А., Худяков Д.А. Сравнительная характеристика методов отгонки эфирного масла из соцветий лаванды с применением предварительной обработки слабым искровым разрядом // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2025. Т. 33. № 3. doi: 10.36107/spfp.2025.3.665
- 13 Konarska A. New insight in secretory structures and secretion composition in *Rhus typhina* L. – Anatomical, histochemical, and ultrastructural studies // *Micron*. 2024. V. 186. P. 103692. doi: 10.1016/j.micron.2024.103692
- 14 Du Y., Yang F., Wang L. et al. Improving food drying performance by cold plasma pretreatment: A systematic review // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022. V. 21. № 5. P. 4402–4421. doi: 10.1111/1541-4337.13027
- 15 He X., Liu Y., Zhang Z. et al. Cold plasma treatment maintains antioxidant capacity and cell membrane integrity in apricot fruit by inducing reactive oxygen species scavenging systems // *Postharvest Biology and Technology*. 2025. V. 230. P. 113815. doi: 10.1016/j.postharvbio.2025.113815
- 16 Shorstkii I., Koshevoi E. Drying Technology Assisted by Nonthermal Pulsed Filamentary Microplasma Treatment: Theory and Practice // *ChemEngineering*. 2019. V. 3. № 4. P. 91. doi: 10.3390/chemengineering3040091
- 17 Khudyakov D.A., Shorstkii I.A., Ulyanova E.G. et al. Influences of cold atmospheric plasma pretreatment on drying kinetics, structural, fractional and chemical characteristics of tobacco leaves // *Drying Technology*. 2022. V. 40. № 15. P. 3285–3291. doi: 10.1080/07373937.2021.2021230
- 18 Durek J., Soheila A., Reza E.K. et al. Effect of ultrasound-assisted cold plasma pretreatment on cell wall polysaccharides distribution and extraction of phenolic compounds from hyssop (*Hyssopus officinalis* L.) // *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2022. V. 75. doi: 10.1016/j.ifset.2022.102993

- 19 Karami M., Ghavami M., Tavakoli H. et al. Exploring the capacity of microorganism treatment for fermentation and glycosidic aroma bioconversion from rose oil distillation wastewater // *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2024. V. 11. № 1. P. 194. doi: 10.1186/s40538-024-00717-3
- 20 Karunanithi S., Guha P., Srivastav P.P. Cold plasma-assisted microwave pretreatment on essential oil extraction from betel leaves: Process optimization and its quality // *Food and Bioprocess Technology*. 2023. V. 16. № 3. P. 603–626. doi: 10.1007/s11947-022-02957-3
- 21 Özdemir E., Kılıç B., Çelik H. et al. Cold plasma application to fresh green leafy vegetables: Impact on microbiology and product quality // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2023. V. 22. № 6. P. 4484–4515. doi: 10.1111/1541-4337.13231

### References

- 1 Sherstyukov A.G. et al. Recent advances in essential oil extraction using cold plasma treatment. *Foods and Raw Materials*. 2027. vol. 15. no. 2.
- 2 Salgueiro L., Martins A.P., Correia H. Raw materials: the importance of quality and safety. A review. *Flavour and Fragrance Journal*. 2010. vol. 25. no. 5. pp. 253–271. doi: 10.1002/ffj.1973.
- 3 Vallino M. et al. Impact of drying temperature on tissue anatomy and cellular ultrastructure of different aromatic plant leaves. *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. 2022. vol. 156. no. 4. pp. 847–854. doi: 10.1080/11263504.2021.1922535.
- 4 Basak S., Annature U.S. Recent trends in the application of cold plasma for the modification of plant proteins – A review. *Future Foods*. 2022. vol. 5. article 100119. doi: 10.1016/j.fufo.2022.100119.
- 5 Rathore V., Nema S.K. Methodology on Plasma-Activated Water-Assisted Extraction and Plasma Bubbling-Assisted Hydrodistillation. In: Srivastav P.P., Srivastava B., K.S. (eds.) *Essential Oil Extraction from Food By-Products*. New York, NY: Springer US, 2025. pp. 123–132. doi: 10.1007/978-1-0716-4634-2\_8.
- 6 Shorstkii I.A. Use of electrophysical methods when processing oil raw materials. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Food Technology*. 2019. no. 4. pp. 11–16. (in Russian).
- 7 Shorstkii I.A., Khudyakov D.A., Sherstyukov A.G. Application of low-temperature plasma treatment to increase extraction depth and improve the quality of bay laurel essential oil. In: *Scientific and Innovative Potential for the Development of Production, Processing, and Application of Essential-Oil and Medicinal Plants in the Eurasian Economic Union: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference*. 2025. pp. 120–125. (in Russian).
- 8 Das J. et al. Extraction. In: *Chemical Engineering Essentials 1*. 2025. pp. 263–302. doi: 10.1002/9781394372348.ch9.
- 9 Shorstkii I.A., Zherlicin A.G., Li P. Impact of pulsed electric field and pulsed microwave treatment on morphological and structural characteristics of sunflower seed. *OCL*. 2019. vol. 26. article 47. doi: 10.1051/ocl/2019048.
- 10 Shorstkii I. Application of cold filamentary microplasma pretreatment assisted by thermionic emission for potato drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2020. vol. 66. article 102540. doi: 10.1016/j.ifset.2020.102540.
- 11 Taha A. et al. Pulsed Electric Field: Fundamentals and Effects on the Structural and Techno-Functional Properties of Dairy and Plant Proteins. *Foods*. 2022. vol. 11. no. 11. article 1556. doi: 10.3390/foods11111556.
- 12 Sherstyukov A.G., Shorstkiy I.A., Khudyakov D.A. Comparative Characterisation of Lavender Essential Oil Distillation Methods Using Low-Current Spark Discharge Pretreatment. *Storage and Processing of Farm Products*. 2025. vol. 33. no. 3. doi: 10.36107/spfp.2025.3.665 (in Russian).
- 13 Konarska A. New insight in secretory structures and secretion composition in *Rhus typhina* L. – Anatomical, histochemical, and ultrastructural studies. *Micron*. 2024. vol. 186. article 103692. doi: 10.1016/j.micron.2024.103692.
- 14 Du Y. et al. Improving food drying performance by cold plasma pretreatment: A systematic review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022. vol. 21. no. 5. pp. 4402–4421. doi: 10.1111/1541-4337.13027.
- 15 He X. et al. Cold plasma treatment maintains antioxidant capacity and cell membrane integrity in apricot fruit by inducing reactive oxygen species scavenging systems. *Postharvest Biology and Technology*. 2025. vol. 230. article 113815. doi: 10.1016/j.postharvbio.2025.113815.
- 16 Shorstkii I., Koshevoi E. Drying Technology Assisted by Nonthermal Pulsed Filamentary Microplasma Treatment: Theory and Practice. *ChemEngineering*. 2019. vol. 3. no. 4. article 91. doi: 10.3390/chemengineering3040091.
- 17 Khudyakov D.A., Shorstkii I.A. Influences of cold atmospheric plasma pretreatment on drying kinetics, structural, fractional and chemical characteristics of tobacco leaves. *Drying Technology*. 2022. vol. 40. no. 15. pp. 3285–3291. doi: 10.1080/07373937.2021.2021230.
- 18 Durek J. et al. Effect of ultrasound-assisted cold plasma pretreatment on cell wall polysaccharides distribution and extraction of phenolic compounds from hyssop (*Hyssopus officinalis* L.). *International Journal of Biological Macromolecules*. 2023. vol. 253. article 123557. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.123557.
- 19 Karami M. et al. Exploring the capacity of microorganism treatment for fermentation and glycosidic aroma bioconversion from rose oil distillation wastewater. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*. 2024. vol. 11. no. 1. article 194. doi: 10.1186/s40538-024-00717-3.
- 20 Karunanithi S., Guha P., Srivastav P.P. Cold plasma-assisted microwave pretreatment on essential oil extraction from betel leaves: Process optimization and its quality. *Food and Bioprocess Technology*. 2023. vol. 16. no. 3. pp. 603–626. doi: 10.1007/s11947-022-02957-3.
- 21 Özdemir E. et al. Cold plasma application to fresh green leafy vegetables: Impact on microbiology and product quality. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2023. vol. 22. no. 6. pp. 4484–4515. doi: 10.1111/1541-4337.13231.

## Сведения об авторах


**Иван А. Шорсткий** к.т.н., доцент, кафедра технологического оборудования и систем жизнеобеспечения, Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, д. 2, г. Краснодар, Краснодарский край 350072, Россия, i-shorstky@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

**Андрей Г. Шерстюков** лаборант-исследователь, лаборатория передовых электрофизических технологий и новых материалов, Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, д. 2, г. Краснодар, Краснодарский край 350072, Россия, sherstyukov86@inbox.ru

 <https://orcid.org/0009-0005-6318-8797>

**Роман С. Полищук** лаборант-исследователь, лаборатория передовых электрофизических технологий и новых материалов, Кубанский государственный технологический университет, ул. Московская, д. 2, г. Краснодар, Краснодарский край 350072, Россия, romanpolishchuk1@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0005-5269-1848>

## Вклад авторов

**Иван А. Шорсткий** обеспечение ресурсами, подготовка эксперимента, проведение экспериментов, формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов

**Андрей Г. Шерстюков** формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, проведение расчетов, испытаний образцов, формулировка выводов


**Роман С. Полищук** консультация в ходе исследования

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Information about authors


**Ivan A. Shorstkii** Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, technological equipment and life support systems department, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya Str., 350072, Krasnodar, Russia, i-shorstky@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-5804-7950>

**Andrey G. Sherstyukov** laboratory research assistant, Advanced technologies and new materials laboratory, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya Str., 350072, Krasnodar, Russia, sherstyukov86@inbox.ru

 <https://orcid.org/0009-0005-6318-8797>

**Roman S. Polishchuk** laboratory research assistant, Advanced technologies and new materials laboratory, Kuban State Technological University, 2, Moskovskaya Str., 350072, Krasnodar, Russia, romanpolishchuk1@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0005-5269-1848>

## Contribution

**Ivan A. Shorstkii** provision of the resources, preparation and management of the experiments, conducting the experiments, formation of the main concept, goal and objectives of the study; writing the text, formulation of the conclusions.

**Andrey G. Sherstyukov** formation of the main concept, goal and objectives of the study; writing the text, conducting the calculations, testing the samples, formulation of the conclusions

**Roman S. Polishchuk** consultation during the study

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 20/03/2026	После редакции 01/04/2026	Принята в печать 02/05/2026
Received 20/03/2026	Accepted in revised 01/04/2026	Accepted 02/05/2026