

Ольга Евгеньевна Темникова¹, Дарья Романовна Александрова^{2✉}

¹Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

²ООО «Логика молока», Самара, Россия

¹mionagrey@mail.ru

²dcher02@yandex.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МИКРОВОЛНОВОГО ЭКСТРАГИРОВАНИЯ *ACHILLEA MILLEFOLIUM* L. И ОЦЕНКА ЕГО БИОАКТИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Цель исследования – поиск оптимальных условий и разработка методики получения экстракта тысячелистника обыкновенного, пригодного для использования в пищевой промышленности, с использованием СВЧ-излучения. Сбор травы тысячелистника проводили в период цветения во второй половине июня 2024 г. Место сбора – Муранский бор вблизи поселка Львовка Шигонского района Самарской области. Исследование комплексного воздействия технологических параметров получения экстракта тысячелистника на содержание растворимых сухих веществ выполняли с применением методов математического моделирования. В каждом экстракте определяли массовую долю растворимых сухих веществ рефрактометрическим методом. Этот показатель служил параметром оптимизации при проведении эксперимента. После определения оптимальных параметров микроволновой экстракции (МВЭ) был получен образец экстракта по традиционной методике для проведения сравнительного анализа содержания биологически активных веществ. В экстрактах, полученных различными методами (традиционным и МВЭ), определяли титруемую кислотность по ГОСТ ISO 750-2013, количество витамина С – по ГОСТ 24556-89, количество антоцианов – по ГОСТ 32709-2014, количество β-каротина – по ГОСТ Р 54058-2010, а также общее количество фенольных соединений и флавоноидов и антирадикальную активность. В ходе работы были идентифицированы и научно обоснованы три ключевых технологических параметра, определяющих эффективность процесса экстрагирования: мощность микроволнового излучения (оптимум 650 Вт), гидромодуль (1 : 30) и продолжительность обработки (35–45 с). Сравнительный анализ экстрактов тысячелистника показал, что микроволновая экстракция превосходит традиционный метод по эффективности извлечения сухих веществ (18,9 % против 14,4 %), демонстрирует почти двукратное превосходство по антирадикальной активности ($(5,4 \pm 0,3)$ мг/мл против $(9,7 \pm 0,4)$ мг/мл), позволяет сохранить на 81 % больше аскорбиновой кислоты, способствует увеличению содержания β-каротина на 35 % и антоцианов в 2,1 раза. Полученные результаты подтверждают потенциал МВЭ для пищевой промышленности и могут быть использованы при производстве функциональных продуктов.

Ключевые слова: тысячелистник обыкновенный, микроволновая экстракция, факторный эксперимент, биологически активные вещества, оптимизация условий экстрагирования

Для цитирования: Темникова О.Е., Александрова Д.Р. Оптимизация параметров микроволнового экстрагирования *Achillea millefolium* L. и оценка его биоактивных компонентов // Вестник КрасГАУ. 2025. № 11. С. 249–259. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-249-259.

Olga Evgen'evna Temnikova¹, Darya Romanovna Aleksandrova^{2✉}

¹Samara State Technical University, Samara, Russia

²LLC “Logika moloka”

¹mionagrey@mail.ru

²dcher02@yandex.ru

OPTIMIZATION OF MICROWAVE EXTRACTION PARAMETERS OF ACHILLEA MILLEFOLIUM L. AND EVALUATION OF ITS BIOACTIVE COMPONENTS

The aim of the study is to find optimal conditions and develop a method for obtaining an extract of common yarrow suitable for use in the food industry using microwave radiation. Yarrow was harvested during the flowering period in the second half of June 2024. The collection site was the Muransky pine forest near the village of Lvovka, the Shigonsky District, the Samara Region. A study of the complex impact of the process parameters for producing yarrow extract on the content of soluble solids was conducted using mathematical modeling methods. The mass fraction of soluble solids in each extract was determined using refractometry. This indicator served as an optimization parameter during the experiment. After determining the optimal microwave extraction (MVE) parameters, a sample of the extract was obtained using a traditional method for comparative analysis of the content of biologically active substances. The extracts obtained by various methods (traditional and microwave oven) were determined for titratable acidity according to GOST ISO 750-2013, vitamin C content according to GOST 24556-89, anthocyanin content according to GOST 32709-2014, β -carotene content according to GOST R 54058-2010, as well as the total amount of phenolic compounds and flavonoids and antiradical activity. During the study, three key technological parameters determining the efficiency of the extraction process were identified and scientifically substantiated: microwave power (optimum 650 W), hydromodulus (1 : 30), and processing time (35–45 s). A comparative analysis of yarrow extracts showed that microwave extraction is superior to the traditional method in terms of dry matter extraction efficiency (18.9 % versus 14.4 %), demonstrates almost twofold superiority in antiradical activity ((5.4 \pm 0.3) mg/ml versus (9.7 \pm 0.4) mg/ml), allows for the preservation of 81 % more ascorbic acid, and promotes an increase in β -carotene content by 35 % and anthocyanins by 2.1 times. The obtained results confirm the potential of microwave extraction for the food industry and can be used in the production of functional foods.

Keywords: yarrow, microwave extraction, factorial experiment, biologically active substances, optimization of extraction conditions

For citation: Temnikova OE, Aleksandrova DR. Optimization of microwave extraction parameters of *Achillea millefolium* L. and evaluation of its bioactive components. *Bulletin of KSAU*. 2025;(11):249-259. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-11-249-259.

Введение. Функциональные продукты питания приобретают все большую популярность благодаря их способности предотвращать алиментарные заболевания и улучшать качество жизни человека. Эти продукты содержат значительное количество биоактивных веществ, источниками которых служат фрукты, овощи, злаки, орехи, семена, а также культурные и дикорастущие травы и специи [1, 2].

Исторически ключевую роль в питании, особенно в условиях дефицита продовольствия, играли дикорастущие съедобные растения (ДСР). Однако с развитием сельского хозяйства и последующей промышленной революцией их потребление в развитых странах резко сократилось. В последнее время ограниченное использование дикорастущих растений стало рассматриваться как упущенная возможность для устойчивого питания населения [2–4].

Возрождение интереса к дикорастущим растениям связано с накоплением данных об их составе, а также с повышенным спросом на здоровую и экологически безопасную пищу. Благодаря оптималь-

ному балансу белков, углеводов, жиров и пищевых волокон при низкой калорийности ДСР представляют собой перспективный компонент диетического питания [3, 5]. Кроме того, они богаты биологически активными веществами (фенольными соединениями, витаминами, микро- и макроэлементами), концентрация которых зачастую выше, чем у культивируемых аналогов. Это делает их ценностными функциональными добавками, способными укреплять иммунитет и снижать риск развития возрастных заболеваний [1–7].

Одним из широко распространенных ДСР является тысячелистник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.) – лекарственное растение семейства астровых. Оно представляет собой многолетний травянистый поликарпик с тонким (до 1,2 мм в диаметре) корневищем,ирующими многочисленные придаточные корни и вегетативные побеги. Имеет узловатый стебель, достигающий высоты 50 см, спирально расположенные листья с густым опушением и зонтиковидные соцветия преимущественно белого (иногда розового) цвета [8].

Водные и спиртовые экстракты из надземных частей тысячелистника традиционно используются для лечения расстройств пищеварительного тракта и дыхательных путей, заболеваний печени и желчного пузыря, а также при воспалительных поражениях кожи и слизистых оболочек [9]. Исследования показали, что трава тысячелистника содержит различные биологически активные вещества (БАВ), основными из которых являются сесквитерпеновые лактоны, флавоноиды, фенольные кислоты, танины, кумарины, стерины, алканы, полиацетилены, аминокислоты, жирные кислоты. Характерный аромат растения обусловлен присутствием в его составе эфирного масла, богатого тимолом, эвкалиптом и борнеолом [9–12].

Классические методы экстрагирования биологически активных соединений из растительного сырья характеризуются рядом существенных технологических ограничений, включая недостаточную эффективность процесса и продолжительное время обработки. Микроволновая экстракция (МВЭ) относится к современным методам извлечения фитохимических соединений, в основе которых лежит синергетический эффект применения энергии сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения и полярных растворителей. Ее главными преимуществами являются сокращение продолжительности процесса и повышенный выход целевых соединений. Микроволновая энергия вызывает селективный нагрев полярных молекул, преимущественно воды, внутри клеточных структур, что приводит к их быстрому испарению и созданию значительного внутреннего давления. Это резкое повышение давления вызывает механическое разрушение клеточных стенок и мембран, нарушая структурную целостность растительной ткани. В результате происходит эффективное высвобождение внутриклеточного содержимого, включая ценные БАВ, которые быстро диффундируют в окружающий растворитель. Такой механизм воздействия, характеризующийся локализованным перегревом и созданием градиентов давления, обеспечивает не только полное извлечение внутриклеточных компонентов, но и сохранение структуры термолабильных соединений, что объясняет существенное преимущество микроволновой экстракции по сравнению с традиционными методами [13–17].

Несмотря на перспективность метода МВЭ, его применение для получения экстрактов травяных растений, в частности тысячелистника, остается недостаточно изученным.

Цель исследования – поиск оптимальных условий и разработка методики получения экстракта тысячелистника обыкновенного, пригодного для использования в пищевой промышленности, с использованием СВЧ-излучения.

Задачи: получение экстрактов тысячелистника при варировании технологических условий и оценка массовой доли растворимых сухих веществ в каждом из них; математическая обработка данных факторного эксперимента и определение наиболее эффективных условий экстракции; приготовление экстракта тысячелистника по классической технологии и сравнение содержания БАВ в экстрактах, полученных традиционным методом и методом МВЭ.

Объекты и методы. Объектами исследования служили водные экстракты тысячелистника обыкновенного, приготовленные различными способами. Сбор травы тысячелистника проводили в период цветения во второй половине июня 2024 г. Место сбора – Муранский бор вблизи поселка Львовка Шигонского района Самарской области. Заготовку растений осуществляли поздним утром, выбирали тысячелистник без капель росы, с максимально раскрывшимися бутонами и крепкими стеблями с листьями. Собранные сырье сушили естественным способом. Растения связывали в пучки и подвешивали к потолку в сухом помещении с хорошей вентиляцией без доступа к солнечному свету. Влажность конечного сырья составила 5 %. Высушенную траву перекладывали в картонные коробки и хранили в темном месте при комнатной температуре.

Для приготовления экстрактов использовали всю надземную часть растения (цветки, стебель и листья). Растительное сырье измельчали на лабораторной мельнице «Выюга» до порошкообразного состояния с диаметром частиц не более 0,5 мм. В качестве экстрагента использовали дистиллированную воду. Для получения экстрактов тысячелистника методом МВЭ смешивали растительный порошок с экстрагентом в соотношении 1 : 10, 1 : 20 или 1 : 30, содержимое тщательно перемешивали и настаивали в течение 10 мин. После чего проводили активацию БАВ с помощью микроволнового излучения, выдерживая экстракт в поле токов СВЧ с параметрами мощности и времени, соответствующими экспериментальным условиям (табл. 1). Полученные экстракты фильтровали через бумажные фильтры «Красная лента».

Значения экспериментальных факторов
Values of experimental factors

Номер опыта	Мощность СВЧ-излучения (X_1), Вт	Гидромодуль (X_2)	Время выдержки (X_3), с	Массовая доля растворимых сухих веществ (Y), %
1	350	10	20	9,9±0,5
2	350	10	40	9,5±0,5
3	350	10	60	9,6±0,5
4	350	20	20	7,7±0,4
5	350	20	40	8,0±0,4
6	350	20	60	8,1±0,4
7	350	30	20	10,2±0,5
8	350	30	40	10,9±0,6
9	350	30	60	9,4±0,5
10	500	10	20	13,1±0,7
11	500	10	40	12,6±0,6
12	500	10	60	12,9±0,7
13	500	20	20	11,7±0,6
14	500	20	40	12,0±0,6
15	500	20	60	12,5±0,6
16	500	30	20	14,7±0,8
17	500	30	40	11,8±0,6
18	500	30	60	13,2±0,7
19	650	10	20	14,0±0,7
20	650	10	40	13,7±0,7
21	650	10	60	14,6±0,8
22	650	20	20	14,8±0,8
23	650	20	40	16,1±0,9
24	650	20	60	14,2±0,8
25	650	30	20	17,3±0,9
26	650	30	40	17,9±0,9
27	650	30	60	18,9±0,9

В каждом экстракте определяли массовую долю растворимых сухих веществ рефрактометрическим методом. Этот показатель служил параметром оптимизации при проведении эксперимента. Исследование комплексного воздействия технологических параметров получения экстракта тысячелистника на содержание растворимых сухих веществ выполняли с применением методов математического моделирования. Анализ экспериментальных данных проводили с использованием программы Statistica 10.0, предназначенный для статистической обработки. В качестве плана эксперимента был выбран трехуровневый полный факторный эксперимент, позволяющий реализовать все возможные сочетания уровней факторов.

Факторами, влияющими на массовую долю растворимых сухих веществ, выступали гидромодуль – соотношение сырья к экстрагенту (1 : 10 (10) – 1 : 30 (30) с шагом 10), мощность микроволнового излучения (350–650 Вт с шагом 150 Вт) и продолжительность обработки (20–60 с, с шагом 20 с). Значения факторов приведены в таблице 1.

После определения оптимальных параметров МВЭ был получен образец экстракта по традиционной методике для проведения сравнительного анализа содержания БАВ. Для этого 3 г порошка тысячелистника помещали в коническую колбу, добавляли к нему 30 мл дистиллированной воды (соотношение сырье – экстрагент 1 : 10), тщательно перемешивали и выдерживали на магнитной мешалке с подогревом при

температуре 55 °С в течение трех часов. Полученный экстракт фильтровали через бумажный фильтр «Красная лента». Затем в экстрактах, полученных различными методами (традиционным и МВЭ), определяли титруемую кислотность по ГОСТ ISO 750-2013, количество витамина С – по ГОСТ 24556-89, количество антоцианов – по ГОСТ 32709-2014, количество β-каротина – по ГОСТ Р 54058-2010, а также общее количество фенольных соединений и флавоноидов и антирадикальную активность.

Определение содержания фенольных соединений (в эквиваленте галловой кислоты) проводили спектрофотометрическим методом Фолина – Чокальтеу с использованием одноименного реагента и насыщенного раствора карбоната натрия. Содержание флавоноидов (в кетхиновом эквиваленте) устанавливали фотоэлектроколориметрическим методом через реакции с нитритом натрия и хлоридом алюминия. Антирадикальную активность оценивали методом DPPH-теста, основанного на способности экстрактов нейтрализовать стабильный радикал 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил, выражая результаты в виде полу максимальной ингибирующей концентрации (IC_{50}) [18, 19].

Результаты и их обсуждение. Статистическая обработка результатов исследования влияния мощности микроволнового излучения (X_1), гидромодуля (X_2) и продолжительности экстракции (X_3) на выход растворимых сухих веществ (Y) в экстракте тысячелистника позволила получить следующую регрессионную зависимость:

$$Y = 0,092630 + 0,000179X_1 - 0,007261X_2 - 0,000453X_3 + 0,000133X_2^2.$$

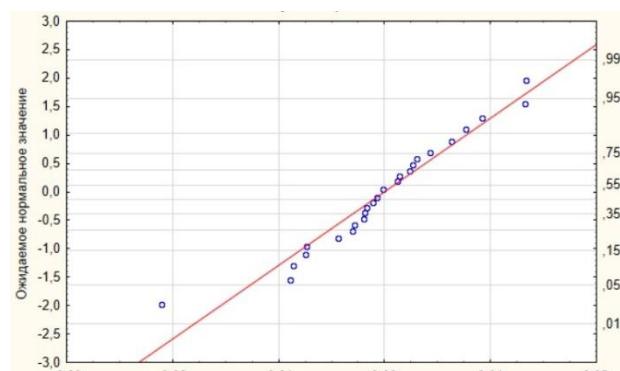


Рис. 1. Нормальный вероятностный график распределения остатков регрессии
Normal probability distribution plot of regression residual

Достоверность и прогностическая способность разработанной математической модели были оценены с использованием комплекса статистических критериев. Подтверждением работоспособности математической модели и свидетельством ее качества служит коэффициент детерминации R^2 , значение которого составило 0,89 (значения $R^2 < 0,3$ обычно указывают на неэффективность модели). Помимо этого для проверки адекватности регрессионного уравнения были использованы нормальный вероятностный график распределения остатков регрессии (рис. 1) и диаграмма рассеяния (рис. 2). Близкое расположение точек к кривой регрессии на рисунке 1 подтверждает нормальность распределения остатков, а случайный характер распределения точек на рисунке 2 – отсутствие зависимости остатков от предсказанных значений.

На рисунках 3–5 продемонстрирована графическая интерпретация построенной математической модели.

Чтобы окончательно определиться с оптимальными параметрами экстрагирования, воспользовались профилями предсказанных значений и функцией желательности (рис. 6).

Применение метода МВЭ позволило получить экстракты тысячелистника с массовой долей растворимых сухих веществ от 7,7 до 18,9 %. Из полученных поверхностей отклика и профилей предсказанных значений следует, что на содержание растворимых сухих веществ значительное влияние оказывают мощность СВЧ-излучения и гидромодуль. Наибольший выход экстрактивных веществ наблюдается при значении мощности микроволнового излучения 650 Вт и гидромодуле 1 : 30.

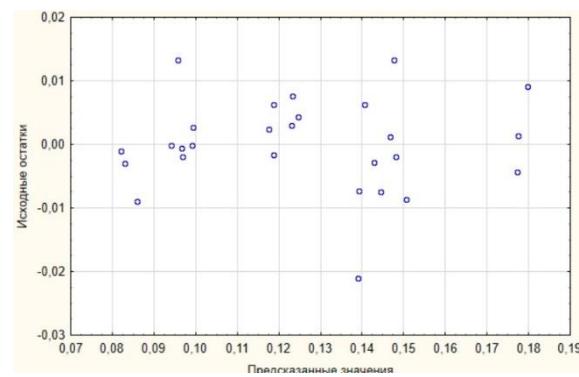


Рис. 2. Диаграмма рассеяния
Scatterplot

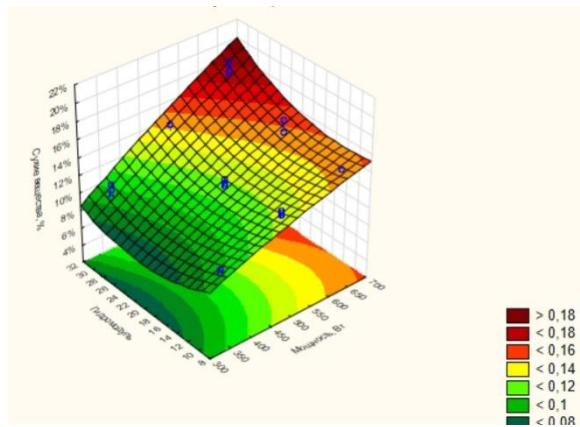


Рис. 3. Зависимость содержания растворимых сухих веществ от мощности СВЧ-излучения и гидромодуля

Dependence of the content of soluble dry substances on the power of microwave radiation and the water module

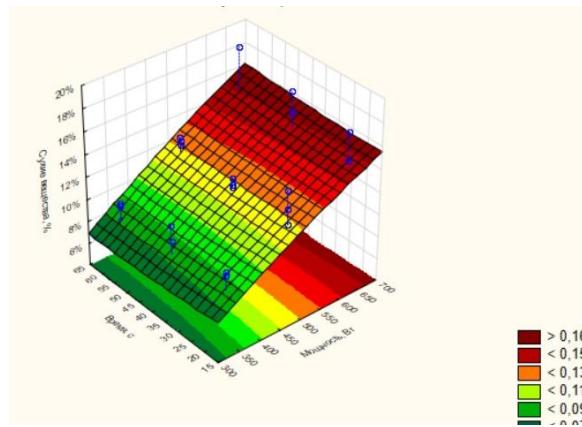


Рис. 4. Зависимость содержания растворимых сухих веществ от мощности СВЧ-излучения и продолжительности обработки

Dependence of the content of soluble dry substances on the power of microwave radiation and the duration of treatment

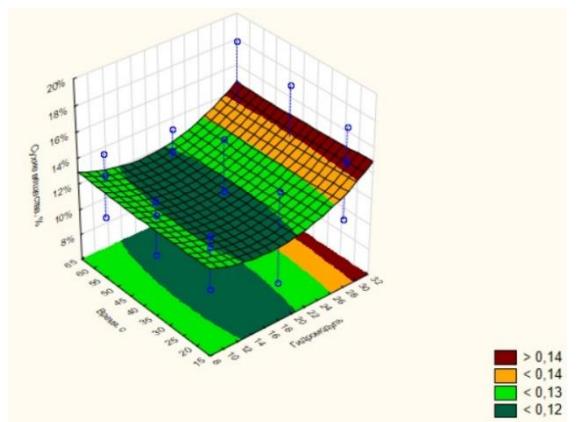


Рис. 5. Зависимость содержания растворимых сухих веществ от гидромодуля и продолжительности обработки

Dependence of the content of soluble dry substances on the water module and the duration of treatment

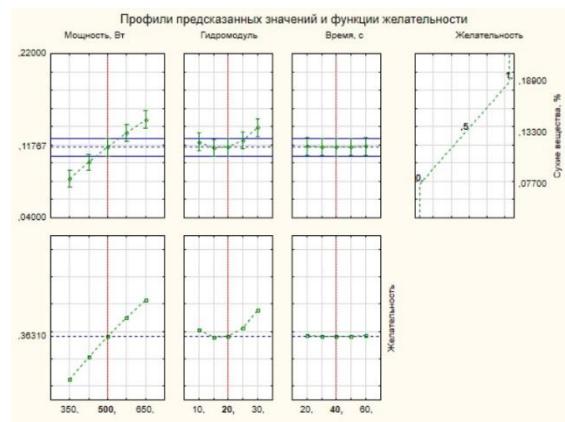


Рис. 6. Профили предсказанных значений и функции желательности

Profiles of predicted values and desirability functions

При МВЭ электромагнитное излучение обеспечивает мгновенный тепловой перенос энергии как в растворитель, так и в растительную матрицу. Данный процесс индуцирует термическое разрушение клеточных структур с последующим увеличением проницаемости тканей, что способствует интенсивному проникновению растворителя в межклеточное пространство и существенно повышает эффективность экстракции целевых соединений. Кроме того, СВЧ-излучение индуцирует нагрев растворителя посредством дипольной реориентации молекул, что приводит к трем ключевым эффектам: увеличе-

нию коэффициента диффузии экстрагируемых соединений, повышению их растворимости и снижению вязкости растворителя [13]. Эти синергетические эффекты существенно повышают кинетику и эффективность процесса экстракции. Следовательно, увеличение мощности СВЧ-излучения обеспечивает повышенный выход целевых соединений. Однако, как показывают научные данные, при работе с мощностями более 700 Вт существует значительный риск термического повреждения БАВ, связанный с перегревом экстрагируемых веществ и разрушением их молекулярной структуры [15, 16].

Поэтому применение мощности 650 Вт в сочетании с непродолжительным временем экстракции позволяет достичь высокой эффективности при минимальной термической деградации компонентов.

Гидромодуль также существенно влияет на параметры МВЭ. Экспериментальные данные продемонстрировали, что рост доли растворителя в системе приводит к увеличению экстракционной эффективности. Наиболее наглядно данная зависимость прослеживается на рисунках 5–6: после кратковременного резкого возрастания наблюдается постепенный рост выхода экстрактивных компонентов по мере увеличения гидромодуля. Это объясняется интенсивным взаимодействием между растворителем и твердой фазой, что способствует ускоренному переходу экстрактивных веществ в водный раствор. Указанный эффект связан с оптимальным соотношением фаз, которое обеспечивает улучшенную растворимость целевых компонентов и образование водородных связей в системе, тем самым повышая степень извлечения растворимых сухих веществ [20].

Продолжительность процесса МВЭ обычно варьирует от нескольких десятков секунд до

получаса в зависимости от типа растительного материала, что позволяет минимизировать термическую деградацию и окисление целевых соединений. При этом заметный эффект на длительность микроволнового воздействия оказывают диэлектрические свойства растворителя. Растворители с высокой диэлектрической проницаемостью способны быстро нагреваться, что делает возможным сокращение времени экстракции [21]. В данном исследовании это подтвердилось при использовании дистиллированной воды в качестве экстракционной среды. Результаты исследования также показали, что влияние этого параметра на процесс экстракции оказалось незначительным, что связано с изначально малым диапазоном варьирования времени (20–60 с). В связи с этим оптимальным решением является использование средних значений (35–45 с) для обеспечения эффективности и стабильности процесса.

В таблице 2 представлены сравнительные характеристики экстрактов, полученных методами традиционного и микроволнового экстрагирования.

Таблица 2

Сравнительный анализ экстрактов, полученных методами традиционного и микроволнового экстрагирования
Comparative analysis of extracts obtained by traditional and microwave extraction methods

Измеряемый показатель / Вид экстракта	Экстракт тысячелистника, полученный традиционным методом экстракции	Экстракт тысячелистника, полученный методом МВЭ
Массовая доля растворимых сухих веществ, %	14,4±0,7	18,9±0,9
Общее содержание фенольных соединений, мг галловой кислоты / 100 г исходного сырья	1396,3±50,5	1354,6±45,7
Флавоноиды, мг катехина / 100 г исходного сырья	324,9±17,3	315,8±16,8
Антирадикальная активность, IC ₅₀ , мг/мл	9,7±0,4	5,4±0,3
Содержание β-каротина, мг / 100 мл	0,17±0,02	0,23±0,03
Содержание антоцианов, мг цианидин-3-гликозида / 100 г исходного сырья	0,07±0,01	0,15±0,02
Содержание витамина С, мг / 100 г исходного сырья	18,26±1,50	33,17±2,25
Титруемая кислотность, г яблочной кислоты / 100 г исходного сырья	0,19±0,02	0,21±0,03

Сравнительный анализ экстрактов выявил значимые различия по ключевым биохимическим показателям. Наибольшие расхождения

наблюдаются в параметрах массовой доли сухих веществ, антирадикальной активности и содержания витамина С. Метод МВЭ обеспечи-

вает более высокий выход – $(18,9 \pm 0,9)$ % растворимых сухих веществ против $(14,4 \pm 0,7)$ % при традиционном методе, что свидетельствует о повышенной экстракционной эффективности микроволнового воздействия и демонстрирует почти двукратное превосходство по антирадикальной активности ($(5,4 \pm 0,3)$ мг/мл против $(9,7 \pm 0,4)$ мг/мл), указывая на лучшее сохранение антиоксидантных свойств. При этом метод МВЭ позволяет сохранить на 81 % больше аскорбиновой кислоты ($(33,17 \pm 2,25)$ мг/100 г против $(18,26 \pm 1,50)$ мг/100 г), что подтверждает его щадящее действие на термолабильные соединения.

Кроме того, СВЧ-излучение способствует увеличению содержания β -каротина на 35 % ($(0,23 \pm 0,03)$ мг/100 мл против $(0,17 \pm 0,02)$ мг/100 мл) и антоцианов в 2,1 раза ($(0,15 \pm 0,02)$ мг/100 г против $(0,07 \pm 0,01)$ мг/100 г), что делает его предпочтительным для экстракции липофильных и пигментных компонентов. Следует отметить, что количественное содержание как β -каротина, так и антоцианов в исследуемых экстрактах характеризуется низкими абсолютными значениями независимо от метода экстракции. Это явление объясняется следующим. Низкий выход β -каротина обусловлен его липофильными свойствами, требующими неполярных растворителей для эффективной экстракции, а также частичной термодеградацией каротиноидов при нагревании. Что касается антоцианов, их ограниченное содержание в экстрактах объясняется тканеспецифичным распределением – эти пигменты преимущественно накапливаются в репродуктивных органах растений (цветках и плодах), тогда как в листьях их концентрация незначительна.

Тем не менее некоторые параметры остаются сравнительно стабильными независимо от метода экстракции. Так, для фенольных соединений и флавоноидов наблюдаются значения в пределах погрешности ($(1396,3 \pm 50,5)$ и $(1354,6 \pm 45,7)$ мг/100 г для фенольных веществ; $(324,9 \pm 17,3)$ и $(315,8 \pm 16,8)$ мг/100 г для флавоноидов), что может объясняться устойчивостью этих соединений к термическому

воздействию, а практически идентичные значения титруемой кислотности ($(0,19 \pm 0,02)$ и $(0,21 \pm 0,03)$ г/100 г) отражают схожий кислотно-основной профиль экстрактов тысячелистника.

Заключение. Таким образом, в результате проведенных исследований была разработана и оптимизирована технология получения водного экстракта тысячелистника обыкновенного (*Achillea millefolium* L.) с применением метода микроволновой экстракции. В ходе работы были идентифицированы и научно обоснованы три ключевых технологических параметра, определяющих эффективность процесса экстрагирования:

1) мощность микроволнового излучения (оптимум 650 Вт): обеспечивает интенсивный, но контролируемый нагрев экстракционной системы;

2) гидромодуль (1 : 30): создает оптимальное соотношение «сырье – экстрагент» для максимального выхода целевых компонентов;

3) продолжительность обработки (35–45 с): позволяет достичь высокой степени экстракции при минимальной термической деградации биологически активных веществ.

Предложенная технология МВЭ соответствует современным тенденциям «зеленой химии», обеспечивая уменьшение энергозатрат и повышение экологической безопасности процесса, а ее преимущества создают перспективную альтернативу традиционным технологиям. Так, сравнительный анализ экстрактов тысячелистника показал, что микроволновая экстракция превосходит традиционный метод по эффективности извлечения сухих веществ, сохранности антиоксидантов (особенно витамина С) и других биологически активных соединений (β -каротина, антоцианов), а также антирадикальной активности.

Полученные результаты подтверждают потенциал МВЭ для пищевой промышленности и могут быть использованы при производстве функциональных продуктов и натуральных антиоксидантных добавок.

Список источников

1. Banwo K., Olojede A.O., Verma D.K., et al. Functional importance of bioactive compounds of foods with potential health benefits: a review on recent trends // Food Bioscience. 2021. Vol. 43. Article 101320. DOI: 10.1016/j.fbio.2021.101320.

2. Enri S.R., Falla N.M., Demasi S., et al. Exploring the potential of wild leafy vegetables widespread in European Alps as functional food // Journal of Agriculture and Food Research. 2024. Vol. 18. Article 101368. DOI: 10.1016/j.jafr.2024.101368.
3. Ceccanti C., Landi M., Benvenuti S., et al. Mediterranean wild edible plants: weeds or “new functional crops”? // Molecules. 2018. Vol. 23, is. 9. P. 1–15. DOI: 10.3390/molecules23092299.
4. Pinela J., Carvalho A.M., Ferreira I. Wild edible plants: nutritional and toxicological characteristics, retrieval strategies and importance for today's society // Food and Chemical Toxicology. 2017. Vol. 110. P. 165–188. DOI: 10.1016/j.fct.2017.10.020.
5. Disciglio G., Tarantino A., Frabboni L., et al. Qualitative characterisation of cultivated and wild edible plants: mineral elements, phenols content and antioxidant capacity // Italian Journal of Agronomy. 2017. Vol. 12, is. 4. P. 383–394.
6. Baldi A., Bruschi P., Campeggi S., et al. The renaissance of wild food plants: insights from Tuscany (Italy) // Foods. 2022. Vol. 11, is. 3. Article 300. DOI: 10.3390/foods11030300.
7. Renna M., Cocozza C., Gonnella M., et al. Elemental characterization of wild edible plants from countryside and urban areas // Food Chemistry. 2015. Vol. 177. P. 29–36. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.12.069.
8. Dabbagh M.M., Fadaei M.S., Goldoozian M. Promising impacts of *Achillea* spp., beyond a medicinal plant, against toxins, toxicities, and injuries: *in vivo* and *in vitro* mechanisms // Biochemistry and Biophysics Reports. 2025. Vol. 42. Article 102023. DOI: 10.1016/j.bbrep.2025.102023.
9. Villalva M., Jaime L., Villanueva-Bermejo D., et al. Supercritical anti-solvent fractionation for improving antioxidant and anti-inflammatory activities of an *Achillea millefolium* L. extract // Food Research International. 2019. Vol. 115. P. 128–134. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.08.027.
10. Far B.F., Behzad G., Khalili H. *Achillea millefolium*: mechanism of action, pharmacokinetic, clinical drug-drug interactions and tolerability // Heliyon. 2023. Vol. 9, is. 12. Article e22841.
11. Cvetkovic S., Ignjatijevic A., Kukic-Markovic J., et al. Further insights into antimicrobial and cytotoxic potential of *Achillea millefolium* herb methanol and dichloromethane extracts // Industrial Crops and Products. 2025. Vol. 225. Article 120553. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.120553.
12. Verma R.S., Joshi N., Padalia R.C., et al. Chemical composition and allelopathic, antibacterial, antifungal and *in vitro* acetylcholinesterase inhibitory activities of yarrow (*Achillea millefolium* L.) native to India // Industrial Crops and Products. 2017. Vol. 104. P. 144–155. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.04.046.
13. Milutinovic M., Radovanovic N., Corovic M., et al. Optimisation of microwave-assisted extraction parameters for antioxidants from waste *Achillea millefolium* dust // Industrial Crops and Products. 2015. Vol. 77. P. 333–341. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.09.007.
14. Wani K.M., Patidar R. Microwave-assisted extraction of pectin from lemon peel powder: optimization and physicochemical properties // Sustainable Chemistry for the Environment. 2025. Vol. 9. Article 100223. DOI: 10.1016/j.scenv.2025.100223.
15. Demir A.E., Armagan H.S. Valorization of black carrot pomace by using microwave-assisted hydro-thermal extraction method: an optimization and comparison research on pectin extraction // Food and Humanity. 2025. Vol. 4. Article 100637. DOI: 10.1016/j.foohum.2025.100637.
16. Du G., Liu Y., Zhang J., et al. Microwave-assisted extraction of dandelion root polysaccharides: extraction process optimization, purification, structural characterization, and analysis of antioxidant activity // International Journal of Biological Macromolecules. 2025. Vol. 299. Article 139732. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.139732.
17. Kuepethkaew S., Klomklao S., Phonsatta N., et al. Optimizing oil extraction from viscera of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) using ultrasound- and microwave-assisted methods: comparative analysis with wet rendering // Applied Food Research. 2025. Vol. 5, is.1. Article 100911. DOI: 10.1016/j.afres.2025.100911.
18. Wei F., Chen Q., Du Y., et al. Effects of hulling methods on the odor, taste, nutritional compounds, and antioxidant activity of walnut fruit // LWT – Food Science and Technology. 2020. Vol. 120. Article 108938. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108938.

19. Dhingra N., Kar A., Sharma R., et al. In-vitro antioxidative potential of different fractions from *prunus dulcis* seeds: vis a vis antiproliferative and antibacterial activities of active compounds // South African Journal of Botany. 2017. Vol. 108. P. 184–192. DOI: 10.1016/j.sajb.2016.10.013.
20. Mali P.S., Kumar P. Optimization of microwave assisted extraction of bioactive compounds from black bean waste and evaluation of its antioxidant and antidiabetic potential in vitro // Food Chemistry Advances. 2023. Vol. 3. Article 100543. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100543.
21. Martinez-Castro R., Florez-Santiago J., Valle-Molinares R., et al. Optimized microwave-assisted azadirachtin extraction using response surface methodology // Heliyon. 2024. Vol. 10, is. 10. Article e31504. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31504.

References

1. Banwo K, Olojede AO, Verma DK, et al. Functional importance of bioactive compounds of foods with potential health benefits: a review on recent trends. *Food Bioscience*. 2021;43:101320. DOI: 10.1016/j.fbio.2021.101320.
2. Enri SR, Falla NM, Demasi S, et al. Exploring the potential of wild leafy vegetables widespread in European Alps as functional food. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2024;18:101368. DOI: 10.1016/j.jafr.2024.101368.
3. Ceccanti C, Landi M, Benvenuti S, et al. Mediterranean wild edible plants: weeds or “new functional crops”? *Molecules*. 2018;23(9):1-15. DOI: 10.3390/molecules23092299.
4. Pinela J, Carvalho AM, Ferreira I. Wild edible plants: nutritional and toxicological characteristics, retrieval strategies and importance for today's society. *Food and Chemical Toxicology*. 2017;110:165-188. DOI: 10.1016/j.fct.2017.10.020.
5. Disciglio G, Tarantino A, Frabboni L, et al. Qualitative characterisation of cultivated and wild edible plants: mineral elements, phenols content and antioxidant capacity. *Italian Journal of Agronomy*. 2017;12(4):383-394. DOI: 10.4081/ija.2017.1036.
6. Baldi A, Bruschi P, Campeggi S, et al. The renaissance of wild food plants: insights from Tuscany (Italy). *Foods*. 2022;11(3):300. DOI: 10.3390/foods11030300.
7. Renna M, Cocozza C, Gonnella M, et al. Elemental characterization of wild edible plants from countryside and urban areas. *Food Chemistry*. 2015;177:29-36. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.12.069.
8. Dabbagh MM, Fadaei MS, Golddoozian M. Promising impacts of *Achillea* spp., beyond a medicinal plant, against toxins, toxicities, and injuries: *in vivo* and *in vitro* mechanisms. *Biochemistry and Biophysics Reports*. 2025;42:102023. DOI: 10.1016/j.bbrep.2025.102023.
9. Villalva M, Jaime L, Villanueva-Bermejo D, et al. Supercritical anti-solvent fractionation for improving antioxidant and anti-inflammatory activities of an *Achillea millefolium* L. extract. *Food Research International*. 2019;115:128–134. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.08.027.
10. Far BF, Behzad G, Khalili H. *Achillea millefolium*: mechanism of action, pharmacokinetic, clinical drug-drug interactions and tolerability. *Heliyon*. 2023;9(12):e22841. doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22841.
11. Cvetkovic S, Ignjatijevic A, Kukic-Markovic J, et al. Further insights into antimicrobial and cytotoxic potential of *Achillea millefolium* herb methanol and dichloromethane extracts. *Industrial Crops and Products*. 2025;225:120553. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.120553.
12. Verma RS, Joshi N, Padalia RC, et al. Chemical composition and allelopathic, antibacterial, antifungal and *in vitro* acetylcholinesterase inhibitory activities of yarrow (*Achillea millefolium* L.) native to India. *Industrial Crops and Products*. 2017;104:144–155. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.04.046.
13. Milutinovic M, Radovanovic N, Corovic M, et al. Optimisation of microwave-assisted extraction parameters for antioxidants from waste *Achillea millefolium* dust. *Industrial Crops and Products*. 2015;77:333–341. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.09.007.
14. Wani KM, Patidar R. Microwave-assisted extraction of pectin from lemon peel powder: optimization and physicochemical properties. *Sustainable Chemistry for the Environment*. 2025;9:100223. DOI: 10.1016/j.scenv.2025.100223.

15. Demir AE, Armagan HS. Valorization of black carrot pomace by using microwave-assisted hydro-thermal extraction method: an optimization and comparison research on pectin extraction. *Food and Humanity*. 2025;4:100637. DOI: 10.1016/j.foohum.2025.100637.
16. Du G, Liu Y, Zhang J, et al. Microwave-assisted extraction of dandelion root polysaccharides: extraction process optimization, purification, structural characterization, and analysis of antioxidant activity. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2025;299:139732. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.139732.
17. Kuepethkaew S, Klomklao S, Phonsatta N, et al. Optimizing oil extraction from viscera of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) using ultrasound- and microwave-assisted methods: comparative analysis with wet rendering. *Applied Food Research*. 2025;5(1):100911. DOI: 10.1016/j.afres.2025.100911.
18. Wei F, Chen Q, Du Y, et al. Effects of hulling methods on the odor, taste, nutritional compounds, and antioxidant activity of walnut fruit. *LWT – Food Science and Technology*. 2020;120:108938. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.108938.
19. Dhingra N, Kar A, Sharma R, et al. In-vitro antioxidative potential of different fractions from *prunus dulcis* seeds: vis a vis antiproliferative and antibacterial activities of active compounds. *South African Journal of Botany*. 2017;108:184–192. DOI: 10.1016/j.sajb.2016.10.013.
20. Mali PS, Kumar P. Optimization of microwave assisted extraction of bioactive compounds from black bean waste and evaluation of its antioxidant and antidiabetic potential in vitro. *Food Chemistry Advances*. 2023;3:100543. DOI: 10.1016/j.focha.2023.100543.
21. Martinez-Castro R, Florez-Santiago J, Valle-Molinares R, et al. Optimized microwave-assisted azadirachtin extraction using response surface methodology. *Helijon*. 2024;10(10):e31504. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e31504.

Статья принята к публикации 05.09.2025 / The article accepted for publication 05.09.2025.

Информация об авторах:

Ольга Евгеньевна Темникова, доцент высшей биотехнологической школы, кандидат технических наук, доцент

Дарья Романовна Александрова, химик обеспечения качества

Information about the authors:

Olga Evgen'evna Temnikova, Associate Professor at the Higher School of Biotechnology, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Darya Romanovna Aleksandrova, quality assurance chemist

