





Оптимизация ультразвуковой водной экстракции фенольных соединений из ягод облепихи (*Hippophae rhamnoides L.*) методом Бокса-Бенкена





Максим С. Иванов	¹	msivanov@itmo.ru	 0009-0000-5754-5026
Наталья В. Яковченко	¹	nviakovchenko@itmo.ru	 0000-0002-5188-5916
Евгения В. Кравцова	¹	evkravtcova@itmo.ru	 0000-0003-1393-3347
Валерий А. Ширяев	²	valryshirbox@gmail.com	 0009-0005-4007-7795

¹ Университет ИТМО, улица Ломоносова, д. 9, г. Санкт-Петербург, 192002, Россия

Аннотация. Облепиха (*Hippophae rhamnoides L.*) является ценным источником биологически активных веществ, в том числе фенольных соединений с выраженной антиоксидантной активностью. Целью исследования являлась оптимизация параметров ультразвуковой водной экстракции ягод облепихи для максимизации выхода фенольных соединений и антиоксидантной активности с использованием метода планирования эксперимента Бокса-Бенкена. В качестве независимых переменных выбраны температура экстракции (50–90 °С), время ультразвуковой обработки соноотродом (0–5 мин в рамках 45 мин общего времени экстракции) и гидромодуль (1:10–1:30). Оценивались три отклика: антирадикальная активность IC50, общее содержание фенольных соединений (ОСФС) по методу Фолина-Чокальтеу и содержание сухих веществ СВ (%). Проведено 15 экспериментов, включая три повтора в центральной точке. Разработаны математические модели второго порядка с высокими коэффициентами детерминации ($R^2 = 0.898$ для IC50, $R^2 = 0.983$ для ОСФС, $R^2 = 0.889$ для СВ). Установлено, что температура экстракции оказывает значимое положительное влияние на IC50 (-2,45) и на ОСФС (+3,74). А гидромодуль на СВ – отрицательное влияние (-1,11). Время ультразвуковой обработки статистически незначимо влияло на все исследуемые отклики. Определены оптимальные параметры: для максимизации FRSA — температура 90 °С, гидромодуль 1:12–15 (прогноз IC50 \approx 5,4–7,6); для максимизации ОСФС – температура 90 °С, гидромодуль 1:30 (прогноз ТРС \approx 22 мг ГК/г). Разработанные модели могут применяться для промышленного получения экстрактов облепихи с заданными свойствами.

Ключевые слова: облепиха (*Hippophae rhamnoides L.*), фенольные соединения, ультразвуковая экстракция, соноотрод, оптимизация, метод Бокса-Бенкена, антиоксидантная активность, DPPH, планирование эксперимента.

Optimization of ultrasound aqueous extraction of phenolic compounds from sea buckthorn berries (*Hippophae rhamnoides L.*) using Box-Behnken design

Maksim S. Ivanov	¹	msivanov@itmo.ru	 0009-0000-5754-5026
Natalia V. Iakovchenko	¹	nviakovchenko@itmo.ru	 0000-0002-5188-5916
Evgeniya V. Kravtcova	¹	evkravtcova@itmo.ru	 0000-0003-1393-3347
Valerii A. Shiriaev	²	valryshirbox@gmail.com	 0009-0005-4007-7795

¹ ITMO University, 9 Lomonosov Street, Saint Petersburg, 192002, Russia

Abstract. Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides L.*) is a valuable source of bioactive compounds, including phenolic compounds with pronounced antioxidant activity. The aim of this study was to optimize ultrasound-assisted aqueous extraction parameters from sea buckthorn berries to maximize phenolic compounds yield and antioxidant activity using Box-Behnken experimental design. Extraction temperature (50–90 °C), ultrasonic treatment time with sonotrode (0–5 min within 45 min total extraction time), and liquid-to-solid ratio (1:10–1:30) were selected as independent variables. Three responses were evaluated: free radical scavenging activity FRSA (%), total phenolic content TPS by Folin-Ciocalteu method, and dry matter content DM (%). Fifteen experiments were conducted, including three replicates at the center point. Second-order mathematical models with high determination coefficients were developed ($R^2 = 0.898$ for IC50, $R^2 = 0.983$ for TPC, $R^2 = 0.889$ for DM). It was established that extraction temperature has a significant positive effect on IC50 (-2,45), and TPC (+3,74). As for liquid-to-solid ratio – negative effect (-1,11). Ultrasound treatment time had no statistically significant effect on all studied responses. Optimal parameters were determined: for IC50 miniization – temperature 90 °C, liquid-to-solid ratio 1:12–15 (predicted FRSA \approx 5,4–7,6); for TPC maximization – temperature 50 °C, liquid-to-solid ratio 1:30 (predicted TPS \approx 22 mg GAE/g). The developed models can be applied for industrial production of sea buckthorn extracts with specified properties

Keywords: sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides L.*), phenolic compounds, ultrasound-assisted extraction, sonotrode, optimization, Box-Behnken design, antioxidant activity, DPPH, experimental design.

Для цитирования

Иванов М.С., Яковченко Н.В., Кравцова Е.В., Ширяев В.А. Оптимизация ультразвуковой водной экстракции фенольных соединений из ягод облепихи (*Hippophae rhamnoides L.*) методом Бокса-Бенкена // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 176–183. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-176-183

For citation

Ivanov M.S., Iakovchenko N.V., Kravtcova E.V., Shiriaev V.A., Optimization of ultrasound aqueous extraction of phenolic compounds from sea buckthorn berries (*Hippophae rhamnoides L.*) using Box-Behnken design. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 176–183. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-176-183

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

Введение

Облепиха крушиновидная (*Hippophae rhamnoides L.*) является одним из наиболее ценных видов дикорастущих плодово-ягодных растений, распространённых в умеренном климате Евразии. Ягоды облепихи содержат широкий спектр биологически активных веществ, включая витамины, каротиноиды, органические кислоты, флавоноиды и другие фенольные соединения [1, 2, 20]. Фенольные соединения облепихи проявляют выраженную антиоксидантную, противовоспалительную и антимикробную активность, что определяет перспективность их использования в пищевой, фармацевтической и косметической промышленности [3, 4].

Плоды облепихи характеризуются высоким содержанием органических кислот, которые влияют на вкус, стабильность и состав экстрактов [21].

В настоящее время актуальной задачей является разработка эффективных технологий извлечения биологически активных веществ из растительного сырья. Традиционные методы экстракции часто характеризуются низкой эффективностью, длительностью процесса и высокими энергозатратами [5]. Ультразвуковая экстракция (УЗ-экстракция) является перспективной альтернативой традиционным методам, поскольку позволяет интенсифицировать процесс массообмена за счёт явления акустической кавитации [2, 6, 7]. При схлопывании кавитационных пузырьков возникают локальные зоны высокого давления и температуры, что приводит к разрушению клеточных стенок растительного сырья и ускорению диффузии целевых компонентов в экстрагент [8].

Перспективным направлением является также вовлечение в переработку побочных продуктов (шрота, жома и вегетативных частей) с целью расширения сырьевой базы и повышения ресурсной эффективности технологий [22].

Wu и соавт. [1] показали, что выбор растворителя и условий экстракции существенно влияет на фенольный профиль и антиоксидантную активность экстрактов облепихи. Sanwal и соавт. [11] оптимизировали параметры ультразвуковой экстракции масла из семян облепихи, продемонстрировав возможность повышения выхода биологически активных веществ. Hosi и соавт. [10] применили метод Бокса-Бенкена для оптимизации УЗ-экстракции антиоксидантов из *Melastoma malabathricum*, достигнув значительного увеличения выхода фенольных соединений.

Метод поверхности отклика (Response Surface Methodology, RSM) является эффективным статистическим инструментом для оптимизации

многофакторных процессов [15, 16, 19]. Планирование эксперимента по Боксу-Бенкену позволяет минимизировать число опытов при построении адекватных математических моделей, описывающих влияние технологических факторов на целевые показатели [15, 16].

Несмотря на значительное число работ, посвящённых экстракции биологически активных веществ из облепихи, в литературе недостаточно представлены комплексные исследования по оптимизации параметров ультразвуковой водной экстракции фенольных соединений с применением погружных ультразвуковых излучателей (сонотродов). Водная экстракция является более безопасной, экологичной и экономически целесообразной альтернативой использованию органических растворителей, особенно для пищевых применений [17].

Цель работы – оптимизация параметров ультразвуковой водной экстракции фенольных соединений из ягод облепихи с использованием сонотрода методом планирования эксперимента Бокса-Бенкена

Материалы и методы

Материалы исследования. В качестве объекта исследования использовали ягоды облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides L.*) урожая 2024 года. Ягоды были собраны в стадии полной зрелости, промыты фильтрованной водой, высушены и измельчены до размера частиц 2–3 мм.

Планирование эксперимента. Для оптимизации процесса экстракции применяли метод планирования эксперимента Бокса-Бенкена с тремя факторами на трёх уровнях. В качестве независимых переменных были выбраны:

- x_1 – температура экстракции, °C (50, 70, 90);
- x_2 – время ультразвуковой обработки сонотродом, мин (0, 2.5, 5);
- x_3 – гидромодуль, соотношение вода:сырьё (1:10, 1:15, 1:30).

Общее время экстракции составляло 45 минут. Ультразвуковая обработка проводилась в начале процесса в течение заданного времени, после чего экстракция продолжалась при постоянном перемешивании.

Матрица планирования включала 15 экспериментов: 12 факторных точек и 3 повтора в центре плана для оценки ошибки эксперимента.

Методика экстракции. Навеску измельчённых ягод облепихи помещали в стеклянный стакан объёмом 250 мл, добавляли дистиллированную воду в соответствии с заданным гидромодулем. Ультразвуковую обработку проводили погружной ультразвуковой установкой (И100–6/4 (производитель ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ», Россия) при заданной температуре и времени обработки. После ультразвуковой

обработки экстракцию продолжали при постоянном перемешивании на магнитной мешалке до достижения общего времени 45 минут. По окончании процесса экстракт охлаждали, фильтровали через бумажный фильтр «синяя лента» и доводили объём до метки дистиллированной водой.

Определение общего содержания фенольных соединений (ОСФС). Определение проводили по методу Фолина-Чокальтеу в соответствии с ГОСТ Р ИСО 14502-1-2010. К 1 мл разбавленного раствора экстракта добавляли 5 мл 10% реактива Фолина-Чокальтеу (разбавленного 1:9). Через 3–8 мин добавляли 4 мл 7.5% раствора карбоната натрия и выдерживали в темноте в течение 60 мин при комнатной температуре. Оптическую плотность измеряли при длине волны 765 нм на спектрофотометре. Калибровочный график строили по раствору галловой кислоты (0.5 мг/мл). Результаты выражали в мг эквивалента галловой кислоты на г навески сырья (мг ГК/г) [5].

Определение содержания сухих веществ (СВ) Содержание сухих веществ определяли гравиметрическим методом путём высушивания навески экстракта массой 5 г при температуре 105 °С до постоянной массы. Результаты выражали в процентах.

Определение антирадикальной активности методом DPPH (IC50). Антирадикальную активность определяли по способности экстрактов ингибировать стабильный радикал 2,2- дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH). К 0.05 мл образца

добавляли 3.95 мл раствора DPPH в метаноле (0.1 мг/мл) в пробирке. Через 60 мин инкубации при комнатной температуре измеряли оптическую плотность при длине волны 518 нм. Контрольную пробу готовили аналогично, заменяя образец на метанол. Измерения проводили в трёх повторностях [12].

$$FRSA = \frac{A_{DPPH} - A_{образец}}{A_{DPPH}} \times 100\% \quad (1)$$

где A_{DPPH} – оптическая плотность контрольного раствора DPPH; $A_{образец}$ – оптическая плотность раствора с образцом.

Для определения значения IC50 производились измерения FRSA в 5 точках для построения калибровочного графика.

Для описания зависимости откликов от факторов использовали полиномиальные модели второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

Расчёт коэффициентов регрессии и оценку адекватности моделей проводили с использованием программного обеспечения Python. Качество моделей оценивали по коэффициенту детерминации R^2 и скорректированному R^2 .

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлена матрица планирования эксперимента с экспериментальными значениями откликов.

Таблица 1.

План эксперимента и экспериментальные значения откликов

Table 1.

Experimental design and response values

Опыт Test	X1: Температура, °С Temperature °C	X2: УЗ (мин) US (min)	X3: Гидро модуль (1:Y) Solid-to-liquid ratio (1:Y)	X1	X2	X3	IC50, мг/мл mg/ml	СВ, % DM. %	ОСФС, мг ГК/г навески TPC, mg GAE/g
1	50	0	15	-1	-1	0	11,8	1,95	14,2
2	90	0	15	1	-1	0	7,2	2,25	20,5
3	50	5	15	-1	1	0	12,5	2,45	13,5
4	90	5	15	1	1	0	5,4	1,95	21,8
5	50	2,5	10	-1	0	-1	12,1	3,15	13,8
6	90	2,5	10	1	0	-1	7,6	3,85	20,9
7	50	2,5	30	-1	0	1	11,2	0,75	14,6
8	90	2,5	30	1	0	1	7,8	1,15	22,8
9	70	0	10	0	-1	-1	11,9	2,95	15,2
10	70	5	10	0	1	-1	11,4	2,9	15,8
11	70	0	30	0	-1	1	10,2	0,85	17,3
12	70	5	30	0	1	1	10,8	1,2	18,5
13 (II)	70	2,5	15	0	0	0	11,2	2,05	16,1
14 (II)	70	2,5	15	0	0	0	10,95	1,95	15,9
15 (II)	70	2,5	15	0	0	0	11,1	2	16

На основе экспериментальных данных построены редуцированные математические модели (после исключения незначимых членов).

Модель для антирадикальной активности (IC50):

$$Y_{IC50} = 11,08 - 2,45x_1 - 0,13x_2 - 0,38x_3 - 1,63x_1^2 - 0,23x_2^2 + 0,22x_3^2 - 0,63x_1x_2 + 0,28x_1x_3 + 0,28x_2x_3$$

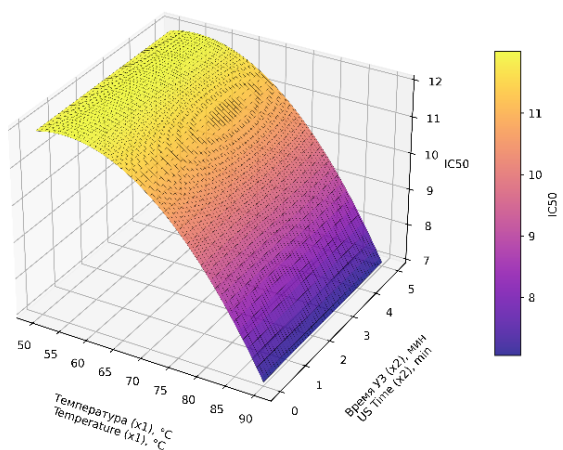
$$Y_{IC50} = 11,08 - 2,45x_1 - 1,63x_1^2$$

$$R^2 = 0,964; R^2_{adj} = 0,898$$

Температура экстракции (x_1) оказывает решающее влияние на антиоксидантную

способность: коэффициент $-2,45$ указывает на то, что при повышении температуры значение IC50 интенсивно снижается, что эквивалентно росту активности экстракта. Наличие значимого отрицательного квадратичного эффекта ($x_1^2 = -1,63$, $p = 0,006$) свидетельствует о нелинейном характере зависимости: при приближении к 90°C скорость улучшения показателя возрастает. Факторы времени ультразвуковой обработки (x_2) и гидромодуля (x_3) в данных условиях оказались статистически незначимыми ($p > 0,05$).

А: Поверхность отклика для IC50 (зависимость от x_1 и x_2 при $x_3=15$)
Response surface for IC50 (dependency on x_1 and x_2 at $x_3=15$)



В: Контурный график для IC50
Contour plot for IC50

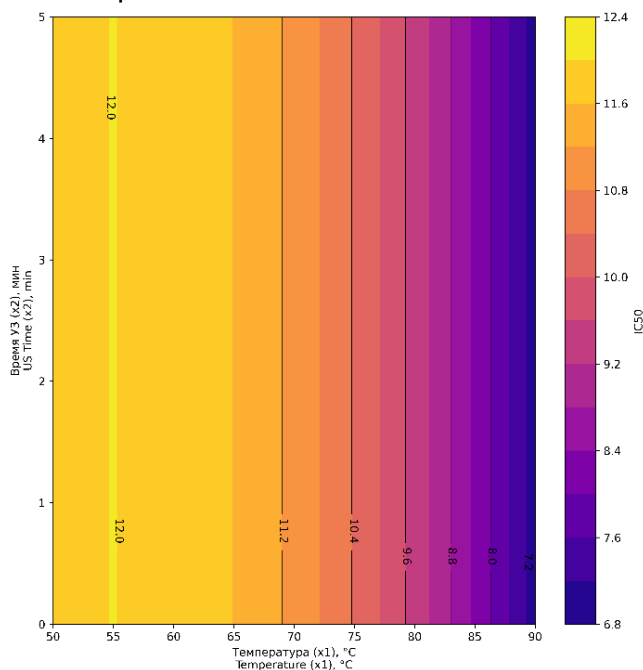


Рисунок 1. Поверхность отклика и контурный график для IC50 (зависимость от x_1 и x_2 при $x_3 = 15$)
Figure 1. Response surface and contour plot for IC50 (dependence on x_1 and x_2 at $x_3 = 15$)

Модель для общего содержания фенольных соединений (TPC):

$$Y_{TPC} = 16,00 + 3,74x_1 + 0,30x_2 + 0,94x_3 + 1,41x_1^2 + 0,09x_2^2 + 0,61x_3^2 + 0,50x_1x_2 + 0,28x_1x_3 + 0,15x_2x_3$$

$$Y_{TPC} = 16,00 + 3,74x_1 + 0,94x_3 + 1,41x_1^2 + 0,61x_3^2$$

$$R^2 = 0,994; R^2_{adj} = 0,983$$

На выход полифенольных соединений статистически значимое влияние оказывают температура (x_1) и гидромодуль (x_3). Температура является доминирующим фактором (линейный эффект $+3,74$). Гидромодуль также

вносит значимый положительный вклад ($+0,94$, $p = 0,001$). Обе зависимости носят выраженный криволинейный характер, о чем свидетельствуют положительные квадратичные коэффициенты (x_1^2 и x_3^2). Это указывает на ускорение экстракции при переходе к верхним границам факторов. В отличие от предыдущих моделей, время ультразвуковой обработки (x_2) здесь близко к порогу значимости ($p = 0,089$), однако формально считается незначимым. Эффекты взаимодействия между факторами не выявлены.

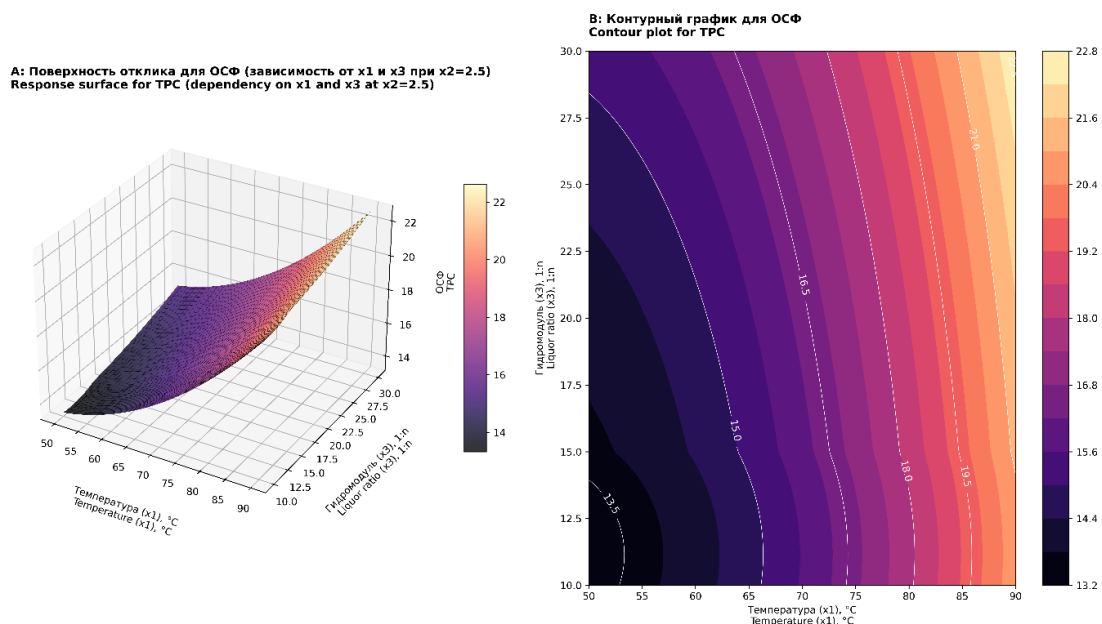


Рисунок 2. Поверхность отклика и контурный график для ОСФС (зависимость от x_1 и x_3 при $x_2 = 2.5$)
 Figure 2. Response surface and contour plot for OSF (dependence on x_1 and x_3 at $x_2 = 2.5$)

Модель для содержания сухих веществ (СВ):

$$Y_{DM} = 2,00 + 0,11x_1 + 0,06x_2 - 1,11x_3 + 0,20x_1^2 - 0,05x_2^2 + 0,03x_3^2 - 0,20x_1x_2 - 0,08x_1x_3 + 0,10x_2x_3$$

$$Y_{DM} = 2,00 - 1,11x_3$$

$$R^2 = 0,960; R^2_{adj} = 0,889$$

Содержание сухих веществ в данной системе практически полностью определяется гидромодулем (x_3). Отрицательный коэффициент (-1,11) при высокой значимости ($p < 0,001$)

подтверждает действие эффекта разбавления: увеличение объема растворителя закономерно снижает концентрацию сухих веществ. Все остальные факторы (температура и время УЗ) и их взаимодействия статистически незначимы ($p > 0,05$). Модель обладает высокой предсказуемостью ($R^2 = 0,960$), описывая процесс как строго линейный.

В таблице 2 приведены оптимальные значения факторов для различных критериев оптимизации.

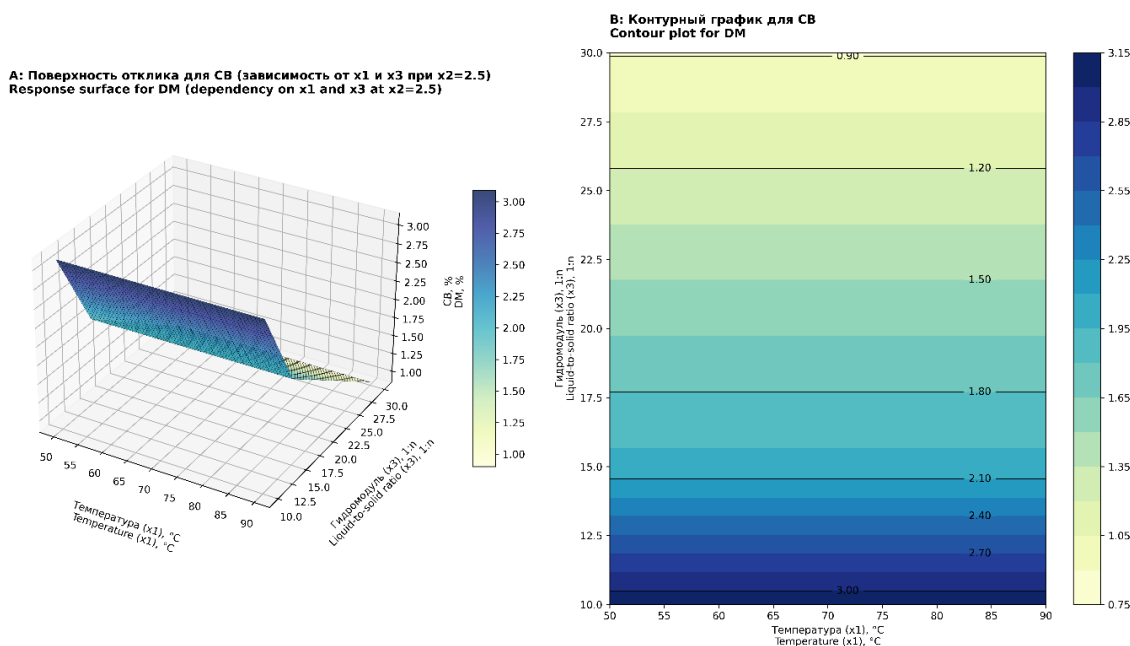


Рисунок 3. Поверхность отклика и контурный график для СВ (зависимость от x_1 и x_3 при $x_2 = 2.5$)
 Figure 3. Response surface and contour plot for SV (dependence on x_1 and x_3 at $x_2 = 2.5$)

Оптимальные параметры экстракции

Table 2.

Optimal extraction parameters

Критерий	Температура, °С	Время УЗ, мин	Гидромодуль	Прогноз
Criterion	Temperature, °C	US time, min	Ratio	Prediction
Минимум IC50 / Min IC50	90	любое / any	1:12–15	IC50 ≈ 5,4 – 7,6
Максимум TPS / Max TPS	90	любое / any	1:30	ОСФС ≈ 22 мг ГК/г
Максимум СВ / Max DM	90	любое / any	1:10	СВ ≈ 2.2%
Компромисс / Compromise	90	0–2.5	1:15–20	IC50 ≈ 10, ОСФС ≈ 16 мг ГК/г

Полученные результаты согласуются с данными литературы о влиянии температуры на эффективность экстракции фенольных соединений. Wu и соавт. [1] при оптимизации экстракции облепихи также установили положительное влияние температуры на антиоксидантную активность. В нашем исследовании повышение температуры от 50 до 90 °С снижает IC50 примерно на 39%.

Важным результатом является установление статистической незначимости времени ультразвуковой обработки для всех откликов. Это согласуется с данными Hosni и соавт. [10], показавших, что при УЗ-экстракции 80% целевых соединений извлекается в первые минуты обработки. Отсутствие значимого эффекта времени УЗ может быть объяснено тем, что даже кратковременное воздействие сонотрода достаточно для разрушения клеточных структур, а дальнейшее увеличение времени не повышает выход целевых компонентов.

Выявлен конфликт оптимумов для IC50 и ОСФС: максимальная антирадикальная активность достигается при более низком гидромодуле, тогда как максимальное содержание фенолов – при более высоком гидромодуле. Это требует выбора приоритетного критерия или использования компромиссного режима в зависимости от целевого назначения экстракта.

Адекватность разработанных моделей подтверждается значениями $R^2 = 0.889–0.983$.

По данным литературы [15] отмечают, что значения $R^2_{adj} > 0.70$ свидетельствуют о хорошей предсказательной способности модели.

Водная экстракция с применением сонотрода является перспективной для производства пищевых продуктов, поскольку исключает использование органических растворителей и позволяет сократить время обработки [17, 18].

Заключение

1. Разработаны адекватные математические модели второго порядка, описывающие зависимость антирадикальной активности IC50 ($R^2 = 0.898$), общего содержания фенольных соединений ОСФС ($R^2 = 0.983$) и содержания сухих веществ DM ($R^2 = 0.889$) от параметров экстракции.

2. Установлено, что температура экстракции является наиболее значимым фактором для IC50 (-2,45) и для ОСФС (+3,74). Время ультразвуковой обработки соноотродом в диапазоне 0–5 мин статистически незначимо для всех откликов.

3. Определены оптимальные параметры: для максимизации антирадикальной активности – температура 90 °С, гидромодуль 1:12–15 (IC50 ≈ 5,4 – 7,6); для максимизации выхода фенольных соединений – температура 90 °С, гидромодуль 1:30 (ОСФС ≈ 22 мг ГК/г).

4. Незначимость времени УЗ-обработки позволяет минимизировать энергозатраты производства без снижения качества экстракта.

Литература

- 1 Wu D., Yang Z., Li J. et al. Optimizing the solvent selection of the ultrasound-assisted extraction of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) pomace: phenolic profiles and antioxidant activity // *Foods*. 2024. V. 13. № 3. P. 482. doi: 10.3390/foods13030482
- 2 Singh B., Oberoi S., Kaur A. Phenolic compounds in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) and their health-promoting activities: a review // *International Journal of Food Science & Technology*. 2024. V. 59. P. 3145–3162. doi: 10.1111/ijfs.17143
- 3 He Q., Yang K., Wu X. et al. Phenolic compounds, antioxidant activity and sensory evaluation of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) leaf tea // *Food Science & Nutrition*. 2022. V. 10. № 12. P. 4258–4270. doi: 10.1002/fsn3.3155
- 4 Luntrarar C., Apostol L., Oprea O. et al. Reclaim and valorization of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) by-products: antioxidant activity and chemical characterization // *Foods*. 2022. V. 11. № 3. P. 462. doi: 10.3390/foods11030462
- 5 Lawag I., Nolden E.S., Schaper A.A.M. et al. A modified Folin–Ciocalteu assay for the determination of total phenolics content in honey // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. № 4. P. 2135. doi: 10.3390/app13042135
- 6 Radulescu C., Olteanu R., Stihl C. et al. Chemometric assessment of spectroscopic techniques and antioxidant activity for *Hippophae rhamnoides* L. extracts // *Analytical Letters*. 2020. V. 53. № 8. P. 1201–1220. doi: 10.1080/00032719.2019.1590379
- 7 Naseem Z., Hanif M., Zahid M. et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent-based extraction of phytochemicals from *Mentha arvensis* // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. V. 13. P. 9361–9373. doi: 10.1007/s13399-021-01617-4
- 8 Brzezińska R., Górska A., Wirkowska-Wojdyła M., Piasecka I. Response surface methodology as a tool for optimization of extraction process of bioactive compounds from spent coffee grounds // *Applied Sciences*. 2023. V. 13. № 13. P. 7634. doi: 10.3390/app13137634

- 9 Rodrigues R.P., Sousa A.M., Gando-Ferreira L., Quina M. Grape pomace as a natural source of phenolic compounds: solvent screening and extraction optimization // *Molecules*. 2023. V. 28. № 6. P. 2715. doi: 10.3390/molecules28062715
- 10 Hosni K., Hassen I., Sebei H. Optimization of ultrasound-assisted extraction of antioxidant compounds from plant materials using Box–Behnken design // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. V. 72. P. 105417. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105417
- 11 Sanwal S., Rai N., Buragohain J. Ultrasound-assisted extraction of oil from sea buckthorn seeds: process optimization and quality evaluation // *Journal of Food Process Engineering*. 2021. V. 44. № 9. P. e13768. doi: 10.1111/jfpe.13768
- 12 Chen Y., Wang L., Li S. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from plant matrices: recent advances and challenges // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. V. 84. P. 105952. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.105952
- 13 Kowalska H., Czajkowska K., Cichowska J., Lenart A. What's new in biorefinery of agricultural wastes? // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. V. 110. P. 1–13. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.035
- 14 Тринеева О.В. Биологически активные вещества плодов облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides* L.) при хранении с применением различных способов консервации // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2022. № 1. С. 32–54. doi: 10.36107/spfp.2022.269
- 15 Петров С.М., Филатов С.Л., Михайличенко М.С., Подгорнова Н.М. Интенсификация производства пектина из свекловичного жома с помощью ультразвуковой и микроволновой экстракции // *Системы и средства биотехнологии*. 2024. № 1. С. 13–17. doi: 10.20914/2304-4691-2024-1-13-17
- 16 Ковалёва Н.А., Тринеева О.В., Чувикова И.В., Дьякова Н.А. Применение ультразвуковой экстракции для выделения флавоноидов из листьев облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides* L.) // *Биофармацевтический журнал*. 2024. Т. 16. № 1. С. 12–18. doi: 10.30906/2073-8099-2024-16-1-12-18
- 17 Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G. et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products: mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications // *Green Extraction of Natural Products*. Elsevier, 2024. P. 257–292. doi: 10.1016/B978-0-12-821884-6.00012-7
- 18 Еремеева Н.Б., Макарова Н.В. Изучение содержания антиоксидантов и их активности в концентрированных экстрактах ягод клюквы, облепихи, ежевики, калины и рябины // *Химия растительного сырья*. 2021. № 4. С. 157–164. doi: 10.14258/jcprm.2021049365
- 19 Тринеева О.В., Рудая М.А. Комплексное исследование профиля свободных органических кислот плодов облепихи крушиновидной (*Hippophae rhamnoides* L.) различных сортов // *Химия растительного сырья*. 2021. № 4. С. 231–239. doi: 10.14258/jcprm.2021049215
- 20 Аверьянова Е.В., Школьникова М.Н., Рожнов Е.Д., Баташов Е.С. Биоконверсия облепихового шрота в физиологически активные ингредиенты // *Химия растительного сырья*. 2023. № 1. С. 297–305. doi: 10.14258/jcprm.2023011884
- 21 Aranda-Ledesma N.E., Aguilar-Zárate P., Bautista-Hernández I. et al. The optimization of ultrasound-assisted extraction for bioactive compounds from *Flourensia cernua* and *Jatropha dioica* and the evaluation of their functional properties // *Horticulturae*. 2024. V. 10. № 7. P. 709. doi: 10.3390/horticulturae10070709
- 22 Siddiqui S.A., Bahmid N.A., Taha A. et al. Factors affecting the extraction of (poly)phenols from plant matrices and recent advances in ultrasound-assisted extraction: a critical review // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2025. doi: 10.1080/10408347.2023.2266846

References

- 1 Wu D., Yang Z., Li J. et al. Optimizing the solvent selection of the ultrasound-assisted extraction of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) pomace: phenolic profiles and antioxidant activity. *Foods*. 2024. vol. 13. no. 3. article 482. doi: 10.3390/foods13030482.
- 2 Singh B., Oberoi S., Kaur A. Phenolic compounds in sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) and their health-promoting activities: a review. *International Journal of Food Science & Technology*. 2024. vol. 59. pp. 3145–3162. doi: 10.1111/ijfs.17143.
- 3 He Q., Yang K., Wu X. et al. Phenolic compounds, antioxidant activity and sensory evaluation of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) leaf tea. *Food Science & Nutrition*. 2022. vol. 10. no. 12. pp. 4258–4270. doi: 10.1002/fsn3.3155.
- 4 Luntraru C., Apostol L., Oprea O. et al. Reclaim and valorization of sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides*) by-products: antioxidant activity and chemical characterization. *Foods*. 2022. vol. 11. no. 3. article 462. doi: 10.3390/foods11030462.
- 5 Lawag I., Nolden E.S., Schaper A.A.M. et al. A modified Folin–Ciocalteu assay for the determination of total phenolics content in honey. *Applied Sciences*. 2023. vol. 13. no. 4. article 2135. doi: 10.3390/app13042135.
- 6 Radulescu C., Olteanu R., Stih C. et al. Chemometric assessment of spectroscopic techniques and antioxidant activity for *Hippophae rhamnoides* L. extracts. *Analytical Letters*. 2020. vol. 53. no. 8. pp. 1201–1220. doi: 10.1080/00032719.2019.1590379.
- 7 Naseem Z., Hanif M., Zahid M. et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvent-based extraction of phytochemicals from *Mentha arvensis*. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2023. vol. 13. pp. 9361–9373. doi: 10.1007/s13399-021-01617-4.
- 8 Brzezińska R., Górska A., Wirkowska-Wojdyła M., Piasecka I. Response surface methodology as a tool for optimization of extraction process of bioactive compounds from spent coffee grounds. *Applied Sciences*. 2023. vol. 13. no. 13. article 7634. doi: 10.3390/app13137634.
- 9 Rodrigues R.P., Sousa A.M., Gando-Ferreira L., Quina M. Grape pomace as a natural source of phenolic compounds: solvent screening and extraction optimization. *Molecules*. 2023. vol. 28. no. 6. article 2715. doi: 10.3390/molecules28062715.
- 10 Hosni K., Hassen I., Sebei H. Optimization of ultrasound-assisted extraction of antioxidant compounds from plant materials using Box–Behnken design. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. vol. 72. article 105417. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105417.
- 11 Sanwal S., Rai N., Buragohain J. Ultrasound-assisted extraction of oil from sea buckthorn seeds: process optimization and quality evaluation. *Journal of Food Process Engineering*. 2021. vol. 44. no. 9. article e13768. doi: 10.1111/jfpe.13768.
- 12 Chen Y., Wang L., Li S. Ultrasound-assisted extraction of polyphenols from plant matrices: recent advances and challenges. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2022. vol. 84. article 105952. doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.105952.
- 13 Kowalska H., Czajkowska K., Cichowska J., Lenart A. What's new in biorefinery of agricultural wastes? *Trends in Food Science & Technology*. 2021. vol. 110. pp. 1–13. doi: 10.1016/j.tifs.2021.01.035.

14 Trineeva O.V. Biologically Active Substances of Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) Fruits during Storage Using Various Preservation Methods. *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*. 2022. no. 1. pp. 32–54. doi: 10.36107/spfp.2022.269 (in Russian).

15 Petrov S.M., Filatov S.L., Mikhailichenko M.S., Podgornova N.M. Intensification of Pectin Production from Beet Pulp Using Ultrasonic and Microwave Extraction. *Systems and Means of Biotechnology*. 2024. no. 1. pp. 13–17. doi: 10.20914/2304-4691-2024-1-13-17 (in Russian).

16 Kovaleva N.A., Trineeva O.V., Chuvikova I.V., Dyakova N.A. Application of Ultrasound Extraction for the Isolation of Flavonoids from Leaves of Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.). *Biopharmaceutical Journal*. 2024. vol. 16. no. 1. pp. 12–18. doi: 10.30906/2073-8099-2024-16-1-12-18 (in Russian).

17 Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G. et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products: mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. In: *Green Extraction of Natural Products*. Elsevier, 2024. pp. 257–292. doi: 10.1016/B978-0-12-821884-6.00012-7.

18 Eremeeva N.B., Makarova N.V. Study of the Content of Antioxidants and Their Activity in Concentrated Extracts of Cranberry, Sea Buckthorn, Blackberry, Viburnum and Rowan Berries. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2021. no. 4. pp. 157–164. doi: 10.14258/jcprm.2021049365 (in Russian).

19 Trineeva O.V., Rudaya M.A. Comprehensive Study of the Profile of Free Organic Acids of Sea Buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) Fruits of Various Varieties. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2021. no. 4. pp. 231–239. doi: 10.14258/jcprm.2021049215 (in Russian).

20 Averyanova E.V., Shkolnikova M.N., Rozhnov E.D., Batashov E.S. Bioconversion of Sea Buckthorn Meal into Physiologically Active Ingredients. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2023. no. 1. pp. 297–305. doi: 10.14258/jcprm.20230111884 (in Russian).

21 Aranda-Ledesma N.E., Aguilar-Zárate P., Bautista-Hernández I. et al. The optimization of ultrasound-assisted extraction for bioactive compounds from *Flourensia cernua* and *Jatropha dioica* and the evaluation of their functional properties. *Horticulturae*. 2024. vol. 10. no. 7. article 709. doi: 10.3390/horticulturae10070709.

22 Siddiqui S.A., Bahmid N.A., Taha A. et al. Factors affecting the extraction of (poly)phenols from plant matrices and recent advances in ultrasound-assisted extraction: a critical review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2025. [Online first]. doi: 10.1080/10408347.2023.2266846.

Сведения об авторах

Максим С. Иванов, аспирант, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, 192002, Россия, msivanov@itmo.ru

<https://orcid.org/0009-0000-5754-5026>

Наталья В. Яковченко к.т.н., факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, 192002, Россия, nviakovchenko@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5188-5916>

Евгения В. Кравцова к.т.н., факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Ломоносова, 9, г. ВСанкт-Петербург, 192002, Россия, evkravtcova@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1393-3347>

Валерий А. Ширяев аспирант, факультет биотехнологий, Университет ИТМО, Ломоносова, 9, г. Санкт-Петербург, 192002, Россия, valryshirbox@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-4007-7795>

Вклад авторов

Максим С. Иванов, сбор и первичная обработка экспериментальных данных; оформление таблиц/рисунков; написание первоначального текста рукописи, корректировал её до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

Наталья В. Яковченко научное руководство; разработка методологии (выбор факторов, дизайн Бокса–Бенкена, план эксперимента); контроль корректности аналитических определений ОФСФ и антиоксидантной активности; интерпретация результатов; критическое редактирование рукописи

Евгения В. Кравцова консультация в ходе исследования, статистическая обработка результатов и валидация моделей (RSM, регрессионный анализ, проверка адекватности); программная реализация расчетов (Python); проверка воспроизводимости расчётов; редактирование текста, оформление рукописи под требования журнала

Валерий А. Ширяев написание манускрипта, редакция перед подачей, помощь в проведении анализов

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Maksim S. Ivanov Postgraduate student, Faculty of Biotechnology, ITMO University, Lomonosova street 9, Saint Petersburg, 192002, Russia, msivanov@itmo.ru

<https://orcid.org/0009-0000-5754-5026>

Natalia V. Iakovchenko Cand. Sci. (Engin.), Faculty of Biotechnology, ITMO University, Lomonosova street 9, Saint Petersburg, 192002, Russia, nviakovchenko@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5188-5916>

Evgeniya V. Kravtcova Cand. Sci. (Engin.), Faculty of Biotechnology, ITMO University, Lomonosova street 9, Saint Petersburg, 192002, Russia, evkravtcova@itmo.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1393-3347>

Valerii A. Shiriaev Postgraduate student, Faculty of Biotechnology, ITMO University, Lomonosova street 9, Saint Petersburg, 192002, Russia, valryshirbox@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0005-4007-7795>

Contribution

Maksim S. Ivanov data collection and primary processing of experimental results; preparation of tables/figures; drafting the initial version of the manuscript; revision of the manuscript prior to submission and taking responsibility for plagiarism.

Natalia V. Iakovchenko scientific supervision; methodology development (factor selection, Box–Behnken design, experimental plan); control of analytical procedures for TPC and antioxidant activity; results interpretation; critical review and editing.

Evgeniya V. Kravtcova Consultation during the study; statistical analysis of the results and model validation (RSM, regression analysis, adequacy assessment); software implementation of calculations (Python); verification of calculation reproducibility; text editing and manuscript formatting according to the journal requirements.

Valerii A. Shiriaev wrote the manuscript, correct it before submitting, assist in experiments

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/12/2025	После редакции 12/01/2026	Принята в печать 02/02/2026
Received 11/12/2025	Accepted in revised 12/01/2026	Accepted 02/02/2026