Химия растительного сырья. 2026. №2. С. 160–168.
Khimiya rastitel'nogo syr'ya, 2026, no. 2, pp. 160–168.
DOI: 10.14258/jcprm.20260217957

УДК 542.06.542.93.547.918.615.322.634.572

ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ ПОЛИФЕНОЛЬНОГО ПРОФИЛЯ И АНТИОКСИДАНТНОЙ АКТИВНОСТИ ЭКСТРАКТОВ ШЕЛУХИ КРАСНОГО ЛУКА ОТ МЕТОДА ЭКСТРАКЦИИ

© ***Н.И. Борисенко*, С.С. Хизриева, С.Н. Борисенко, Е.В. Максименко***

Научно-исследовательский институт физической и органической химии Южного федерального университета, пр. Стачки, 194/2, Ростов-на-Дону, 344090, Россия, niborisenko@sfedu.ru

Для получения экстрактов вторичных растительных метаболитов (ВРМ) с высокой антиоксидантной активностью (АОА) все чаще рассматриваются методы зеленой химии. В представленной работе для получения фитокомпозиций с высокой антиоксидантной активностью из шелухи красного лука (ШКЛ) использовалась субкритическая водная среда (СБВ) в диапазоне температур от 130 до 240 °С. Использование среды СБВ позволяет не только повысить извлечение ВРМ из растительного матрикса, но и добиться изменения фитохимического профиля полученных экстрактов, что будет определять АОА полученных композиций и возможности их использования. Показано, что АОА фитокомпозиций, полученных из шелухи красного лука, зависит от условий экстракции и определяется полифенольным профилем экстрактов ВРМ, определяемым методом УФ-видимой спектрофотометрии. Продемонстрировано, что содержание полифенольных соединений и АОА экстрактов зависит от условий экстракции (температуры СБВ). Экстракты, полученные из ШКЛ в среде СБВ при 170 °С, демонстрируют максимальную АОА (EC_{50} = 21.4 мкг/мл) среди полученных экстрактов. При этой температуре (170 °С) достигают максимума как антиоксидантная активность (EC_{50} = 21.4 мкг/мл), так и сумма полифенолов (по галловой кислоте – 125.7 мг/г и по рутину – 287.4 мг/г). Дальнейшее повышение температуры СБВ приводит к снижению содержания полифенолов и ослаблению антиоксидантной активности исследуемых экстрактов. Представленные результаты демонстрируют перспективность использования СБВ для получения экстрактов из ШКЛ с высоким содержанием полифенолов для разработки фармацевтических препаратов и пищевых добавок с высокой АОА.

Ключевые слова: субкритическая вода, антиоксидантная активность, шелуха красного лука, полифенолы, флавоноиды, дифенилпикрилгидразил (ДФПГ).

Для цитирования: Борисенко Н.И., Хизриева С.С., Борисенко С.Н., Максименко Е.В. Оценка зависимости полифенольного профиля и антиоксидантной активности экстрактов шелухи красного лука от метода экстракции // Химия растительного сырья. 2026. №2. С. 160–168. https://doi.org/10.14258/jcprm.20260217957.

Введение

Антиоксидантные (АО) вторичные растительные метаболиты (ВРМ) (полифенолы, полисахариды и т.д.) используются для производства широкого спектра полифункциональных продуктов, где важны их *антиоксидантная* и биологическая активности: прекурсоры для фармацевтических и косметических препаратов, пищевых добавок, природных пигментов, наполнителей, сорбентов, компонентов пищевых пленок и т.д. [1–3]. Экономически выгодными источниками ВРМ являются отходы агропромышленного комплекса (АПК), которые образуются ежегодно в огромных количествах. Одним из таких ресурсов являются отходы переработки лука – шелуха лука репчатого. Лук репчатый (*Allium cepa* L.) занимает второе место по значимости после томатов среди огородных культур во всем мире (в 2022 году мировое производство лука достигло 110,6 млн тонн, в РФ 1.6 млн тонн). Известно, что только европейские страны ежегодно производят более 600 тыс. тонн луковых отходов, тогда как в России ежегодно образуется порядка 256 тыс. тонн (до 16% от общей массы). Накопление многотонных отходов луковой шелухи представляет серьезную экологическую и агропромышленную проблему [4]. В этой связи *актуальны* поиск и разработка эффективных «зеленых» технологий утилизации луковой шелухи и производства из них продуктов с высокой добавленной

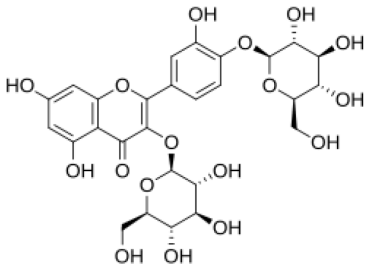
* Автор, с которым следует вести переписку.

стоимостью [5], и, в первую очередь, за счет содержащихся в них антиоксидантных ВРМ. Одной из таких зеленых технологий может стать *экстракция субкритической водой (СБВ)*.

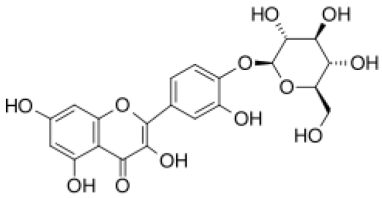
Состав шелухи лука меняется в зависимости от различных сортов, агрономических условий региона, в котором они выращивались, и используемых методов экстракции. Несмотря на эти различия, в среднем отходы лука, включая шелуху и кожицу, являются богатыми источниками общих фенольных соединений (19.7−415 мг эквивалент галловой кислоты/г) и флавоноидов (10.6−184 мг эквивалент кверцетина/г). Шелуха лука репчатого богата антиоксидантными ВРМ, включая флавоноиды, а именно антоцианами и флавонолами, которые придают фиолетовый/красный и коричневый цвета различным сортам лука. В работе [5] показано, что луковая шелуха содержит в 20 раз больше флавоноидов, чем мякоть. Более того, *кверцетин* (0.012−1.78 мг/г) [6] и его производные являются основными компонентами, способствующими их антиоксидантной активности (АОА) [7]. Авторы недавней работы [8] пришли к выводу, что добавление экстрактов луковой шелухи в пищу приводит к повышению общей АОА по сравнению с контролем. Кверцетин подавляет образование активных форм кислорода, тем самым предотвращая окислительное повреждение клеток и улучшая когнитивные функции за счёт подавления активности ацетилхолинэстеразы [9]. В недавней работе [10] было обнаружено, что основными флавоноидами (рис. 1), выделенными методом ускоренной экстракции растворителем из шелухи красного лука (ШКЛ) являются кверцетин 3,4′-диглюкозид (51.63 мг/г), спиреозид – это 4-О-глюкозид кверцетина (184.45 мг/г) и кверцетин (7.74 мг/г). Структурные формулы основных флавоноидов в шелухе красного лука представлены на рисунке 1.

Луковая шелуха также является богатым источником углеводов (сахароза, свободная фруктоза, глюкоза, фруктаны, целлюлоза, гемицеллюлоза и пектиновые полисахариды), которые составляют до 65–80% по весу. В целом, можно сделать вывод, что экстракт луковой шелухи является богатым источником полифенольных соединений и может быть использован для разработки биологических агентов. Полученные продукты с ВРМ, обладающие АОА, могут использоваться также для создания новых функциональных материалов: как восстановители в реакциях «зеленого синтеза» для получения наночастиц металлов, биосорбенты, а также в производстве тонких пленок [11].

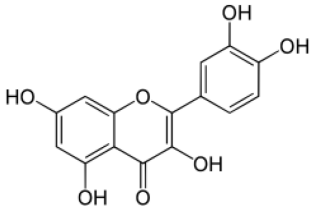
Цель работы: оценка зависимости полифенольного профиля и антиоксидантной активности экстрактов шелухи красного лука от метода экстракции.



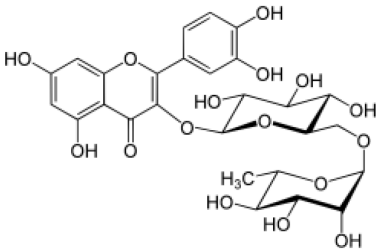
Кверцетин 3,4'-диглюкозид, $C_{27}H_{30}O_{17}$ (1)



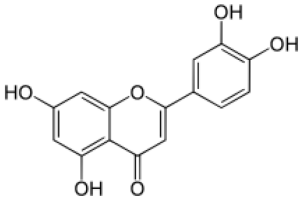
Спиреозид, $C_{21}H_{20}O_{12}$ (2)



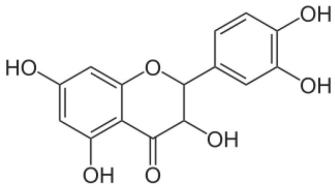
Кверцетин, $C_{15}H_{10}O_7$ (3)



Рутин, $C_{27}H_{30}O_{16}$ (4)



Лютионин, $C_{15}H_{10}O_6$ (5)



Дигидрокверцетин (taxifolin), $C_{15}H_{12}O_7$ (6)

Рис. 1. Структурные формулы основных флавоноидов в шелухе красного лука

Экспериментальная часть

Используемое оборудование. Спектрофотометр СПЕКС ССП 705 (*UV-VIS*, 190–1100 нм, производитель ЗАО «Спектроскопические системы», РФ) с программным обеспечением (*UV-VIS analyst*).

Химические вещества (реактивы). Серная кислота (осч), хлороформ (осч), Na_2CO_3 (безводный, ч) и уксусная ледяная кислота (хч) приобретали у ОАО «*Вектон*» (Россия). Реактив Фолина-Чокальтеу (2 М) приобретен у *Sigma-Aldrich*. Дифенилпикрилгидразил (ДФПГ, 95%, Япония) фирмы *Alfa Aesar*. Галловая кислота (б/в, не менее 98%) фирмы *ДИА-М* (Россия). Соляная кислота (осч, фирма *СигмаТек*). Рутин (98%) фирмы *Sichuan Xieli Pharmaceutical* Co., Ltd. (Китай).

Сырье – шелуха красного лука (*Allium cepa*) сорта *Red Baron* (урожай 2024 г. – торговая сеть «Окей», Ростов-на-Дону, Россия). Шелуху красного репчатого лука отделяли от мякоти, помещали в сушильный шкаф при температуре 60 °С. Влажность сырья – 13%. Шелуху измельчали, делили на фракции, пропуская через лабораторные сита (размер частиц 0.5–3.0 мм) для получения однородной репрезентативной пробы.

Получение экстрактов. Экстракты были получены как традиционным методом водно-этанольной экстракции (ВЭЭ), так и в субкритической водной среде при температуре 130–240 °С, как описано ранее [12].

Традиционная экстракция. Традиционную водно-спиртовую экстракцию проводили следующим образом: навеску 1 г ШКЛ подвергали фор-экстракции 30 мл гексана (60 мин) для удаления неполярных соединений. Далее высушенное сырье кипятили в колбе с обратным холодильником на водяной бане (Т=80.1 °С) в течение 60 мин в 30 мл 70% этанола. Процедуру повторяли 3 раза. Общее время экстракции составило 240 мин. Полученные экстракты фильтровали, остаток на фильтре промывали 70% этанолом, этанольные фракции объединяли и анализировали.

СБВ-экстракция. Получение экстрактов в среде СБВ проводили с использованием изготовленного из нержавеющей стали (марки 12Х18Н10Т) реактора с внутренним V=10 мл [13], в который помещали навеску 0.3 г измельченной ШКЛ и 7 мл дистиллированной воды. При таком соотношении обеспечивается наличие свободного от жидкости объема в реакторе. Реактор герметично закрывали и устанавливали в сушильный шкаф при заданной температуре (130–240 °С; ±1 °С) на 60 мин. Затем реактор охлаждали до комнатной температуры. Содержимое реактора количественно переносили на бумажный фильтр и промывали остаток на фильтре 70% этанолом (до бесцветных вод).

Полученные после традиционной и СБВ-экстракции фильтраты высушивали при t< 50 °С под вентилятором и определяли массу экстракта гравиметрически. Для определения суммы полифенолов, флавоноидов в ШКЛ и АОА (*in vitro)* сухие экстракты растворяли в 70% этаноле ($C_{экстракта}$=1 мг/мл).

Определение суммы полифенолов и флавоноидов в экстрактах шелухи красного лука. Определение суммы фенольных соединений в объектах оценивали спектрофотометрически методом Фолина-Чокальтеу при длине волны 750 нм [14]. В качестве полифенольных стандартов использовали водно-спиртовые растворы галловой кислоты (С=0.06 мг/мл), и рутина (С=0.12 мг/мл. Построение градуировочных кривых проводили так, как описано ранее в работе [13]. Сумму флавоноидов (мг/г сырья) в экстрактах ШКЛ определяли методом прямой спектрофотометрии на длине волны 362 нм, как описано ранее в работе [11].

Определение антиоксидантной активности (АОА) экстрактов в тесте с ДФПГ (in vitro). АОА экстрактов ШКЛ (*in vitro)* исследовали в реакции со стабильным свободным радикалом ДФПГ (1,1-дифенил-2-пикрилгидразил) [15] как описано ранее [16]. Количественный анализ реакции переноса атома водорода (Н-атома) от данного фенола к ДФПГ представляет простой и эффективный способ определения АОА фенолов (рис. 2).

За реакциями переноса водорода следят с помощью УФ/Вид-спектроскопии путем регистрации затухания видимого поглощения ДФПГ – полосы при λ_{max}=516 нм (в этаноле), которая отражает конверсию радикала ДФПГ в соответствующий бесцветный дифенилпикрилгидразин (ДФПГ-Н) антиоксидантом [17].

Исследуемые на АОА растворы экстрактов (С=1 мг/мл) разбавляли подкисленным этанолом (0.5 мМ HCl) до концентраций стандартного разведения. В кювету помещали 1.7 мл этанольного раствора ДФПГ ($C_{ДФПГ}=1\times10^{-4}$ М). Фиксировали длину волны (λ), приходящуюся на максимум поглощения раствора ДФПГ и оптическую плотность D_0. Затем в кювету с ДФПГ добавляли 0.05–0.12 мл раствора антиоксиданта ($C_{экстракта}$=0.5 мг/мл) и быстро перемешивали содержимое кюветы. Кинетические измерения проводили на спектрофотометре в кюветах *l*=10 мм при λ=516 нм и t=25 °С, регистрируя расходование ДФПГ в реакции с полифенольным соединением. АОА определяли как значения величины EC_{50}, которую выражают как количество мкг антиоксиданта в 1 мл раствора ДФПГ стандартизованной концентрации, необходимое для ее

уменьшения в 2 раза. Чтобы получить количественный параметр EC_{50}, рассчитывали % непрореагировавшего ДФПГ за 30 мин реакции по формуле:

$$D_{t=30мин}/D_0 \cdot 100,$$

где $D_{t=30мин}$ – поглощение раствора антиоксиданта через 30 мин реакции с ДФПГ на λ=516 нм; D_0 – поглощение стандартного этанольного раствора ДФПГ на λ=516 нм.

Исходя из полученных данных, строили графики зависимости (по четырем концентрациям) процента падения оптической плотности раствора ДФПГ от первоначальной концентрации экстракта ШКЛ в мкг/мл. Из уравнения линейной зависимости полученной прямой рассчитывали значения EC_{50} – концентрации экстракта ШКЛ, при которой значение оптической плотности на λ=516 нм за первые 30 мин реакции с растворами экстрактов достигало 50% от начального значения.



Рис. 2. Схема определения АОА (*in vitro)* в тест реакции со стабильным радикалом ДФПГ

Результаты и обсуждение

На первом этапе была изучена зависимость массы выхода экстракта (рис. 3) от условий эксперимента (в интервале температур 130–240 °С и традиционной водно-спиртовой экстракцией).

Как следует из рисунка 3, масса экстракта растет от 219 мг/г сырья для водно-спиртового экстракта до 342 мг/г для СБВ-экстракта при температуре СБВ 170 °С. При дальнейшем увеличении температуры СБВ (180–240 °С) выход экстракта уменьшается с ростом температуры, так как наблюдаются процессы термического разложения исходного сырья, сопровождающиеся образованием воды и газообразных продуктов, в связи с чем уменьшается и выход экстракта.

Оптимальным параметром экстракции можно считать температуру 170 °С, при которой были достигнуты максимальные значения выхода экстракта и содержания фенольных соединений в экстракте (125.7 мг/г сырья в пересчете на галловую кислоту), а также получены самые высокие показатели АОА (EC_{50}=21.4 мкг/мл) среди изученных экстрактов. Результаты по выходу экстракта, общему содержанию полифенолов и АОА экстрактов в зависимости от способа извлечения представлены в таблице.

Также сделана оценка общего содержания флавоноидов в полученных экстрактах (рис. 4). Как и в случае с общим содержанием фенольных соединений, общее содержание флавоноидов зависело от условий экстракции.

Таким образом, показано, что с изменением температуры субкритической воды изменяются общий полифенольный состав и антиоксидантная активность экстрактов. Ранее в работах авторов [18] уже обсуждалась возможность селективной экстракции биофлавоноидов шелухи лука, путем управления качественным составом экстракта посредством изменения параметров среды СБВ (в простейшем случае – температуры), с целью получения смеси с заданным соотношением количества гликозидов и агликонов биофлавоноидов. Это, в свою очередь, позволяет целенаправленно менять физиологически активные свойства экстрактов из шелухи лука, полученных в среде СБВ.

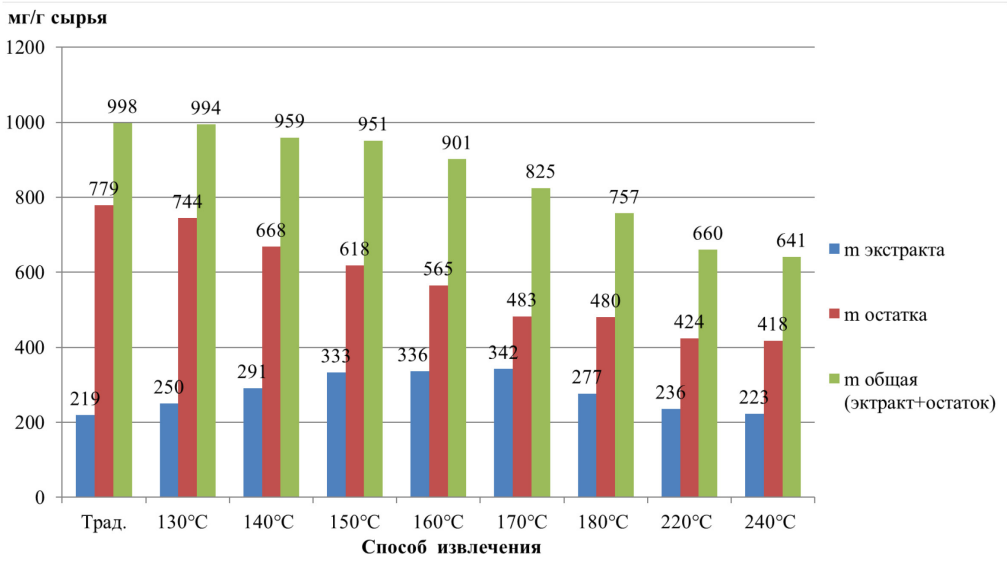


Рис. 3. Зависимость выхода экстракта ШЛР от условий экстракции

Зависимость АОА (EC_{50}) экстрактов, полученных различными методами экстракции: традиционной экстракцией растворителем (Трад.) и субкритической водной экстракцией (СБВ) от суммы полифенолов

Способ экстракции	Антиоксидантная активность (EC_{50}), мкг/мл	Масса экстракта, мг/г сырья	Сумма полифенолов по галловой кислоте, мг/г сырья	Сумма полифенолов по рутину, мг/г сырья
Трад.	26.8	219	84.9	193.6
СБВ – 130 °C	29.0	250	92.9	216.0
СБВ – 140 °C	25.9	291	107.3	248.3
СБВ – 150 °C	23.6	333	121.3	280.7
СБВ – 160 °C	24.0	336	124.6	289.3
СБВ – 170 °C	21.4	342	125.7	287.4
СБВ – 180 °C	26.9	277	97.3	215.9
СБВ – 220 °C	27.7	236	88.6	208.0
СБВ – 240 °C	37.7	223	83.7	199.2

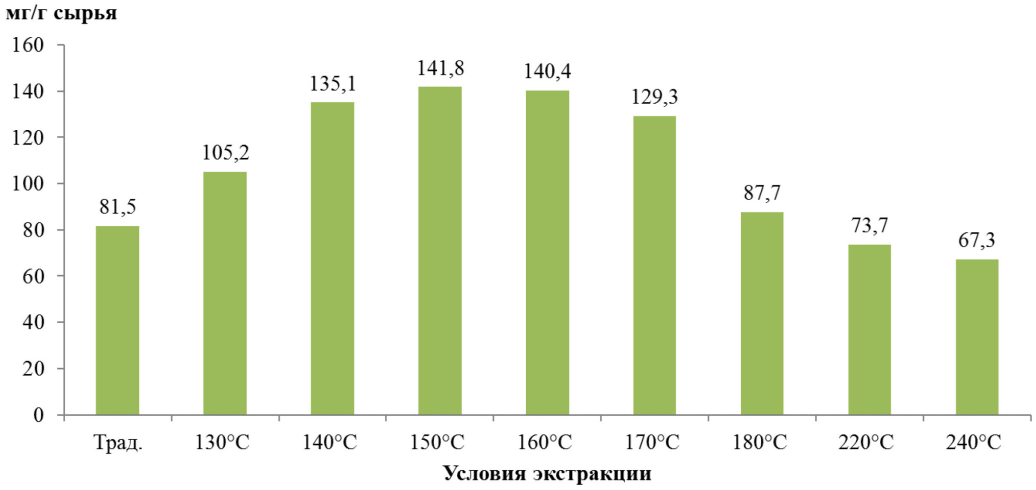


Рис. 4. Сумма флавоноидов (мг/г сырья) в полученных экстрактах ШЛР в пересчете на рутин

На основе ранее полученных данных было определено, что температура воды ниже 130 °C оказывается недостаточной для полноценного процесса экстрагирования, а повышение температуры приводит к изменению состава получаемого экстракта (в пересчете на рутин), как за счет гидролиза гликозидов кверцетина (1, 2, 4), так и за счет трансформации многочисленных полифенолов ШКЛ. При повышении температуры может также иметь место частичное разложение и трансформация нативных ВРМ ШКЛ.

Заключение

Для получения экстрактов с высокой антиоксидантной активностью, обогащенных полифенолами из шелухи лука репчатого (сорт *Red Baron*), использована среда СБВ в диапазоне температур от 130 до 240 °С. Показано, что использование среды СБВ для процессов экстракции позволяет не только увеличить извлечение вторичных метаболитов растений из растительной матрицы, но и добиться изменения фитохимического профиля получаемых экстрактов.

Дана оценка зависимости фитохимического профиля содержания вторичных растительных метаболитов в виде суммы полифенольных соединений (и флавоноидов) и АОА экстрактов от метода экстракции (в среде СБВ или водно-спиртовой экстракции) с использованием УФ/видимой спектрофотометрии.

Показано, что общее содержание полифенольных соединений и АОА экстрактов зависят от условий экстракции (температуры СБВ). Продемонстрировано, что экстракты, полученные из ШКЛ в СБВ в диапазоне температур 150–170 °С, содержат наибольшее количество полифенольных соединений и демонстрирует максимальную АОА (EC_{50}=21.4–24.0 мкг/мл) среди полученных СБВ-экстрактов.

Продемонстрировано, что эффективность извлечения полифенолов и антиоксидантная активность выше в среде СБВ в сравнении с результатами традиционного способа извлечения. Процедура субкритической водной экстракции в несколько раз (в 3–4 раза) быстрее по времени и исключает использование дорогостоящих, пожароопасных и, зачастую, токсичных органических растворителей.

Таким образом, показано, что экстракция СБВ является перспективным экологически чистым инструментом утилизации многотонных отходов переработки лука для получения широкого спектра полифункциональных субстанций с высокой добавленной стоимостью.

Благодарности
Исследования проводились на оборудовании Центра коллективного пользования «Молекулярная спектроскопия» Южного федерального университета.

Финансирование
Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание в сфере научной деятельности, проект No - FENW-2026-0014).

Конфликт интересов
Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ
Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Elshafie H.S., Camele I., Mohamed A.A. A comprehensive review on the biological, agricultural and pharmaceutical properties of secondary metabolites based-plant origin // International journal of molecular sciences. 2023. Vol. 24, no. 4. 3266. https://doi.org/10.3390/ijms24043266.
2. Bai T., Wang X., Du W., Cheng J., Zhang J., Zhang Y., Klinjapo R., Asavasanti S., Yasurinet P. Recent Advances, Challenges, and Functional Applications of Natural Phenolic Compounds in the Meat Products Industry // Antioxidants. 2025. Vol. 14, no. 2. 138. https://doi.org/10.3390/antiox14020138.
3. Kirubakaran D., Karmegam N., Sellapillai L., Senthilkumar K.J., Rajkumar M., Jeevika R., Wahid J.B.A. A comprehensive review on the green synthesis of nanoparticles: advancements in biomedical and environmental applications // Biomedical Materials & Devices. 2025. Pp. 1–26. https://doi.org/10.1007/s44174-025-00295-4.
4. Benítez V., Martín-Cabrejas M.A., Mollá E., Aguilera Y., López-Andréu F.J., Cools K., Terry L.A., Esteban R.M. Characterization of Industrial Onion Wastes (*Allium cepa* L.): Dietary Fibre and Bioactive Compounds // Plant foods for human nutrition. 2011. Vol. 66, no. 1. Pp. 48–57. https://doi.org/10.1007/s11130-011-0212-x.
5. Bains A., Sridhar K., Singh B.N., Kuhad R.C., Chawla P., Sharma M. Valorization of onion peel waste: From trash to treasure // Chemosphere. 2023. Vol. 343. 140178. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140178.
6. Burri S.C.M., Ekholm A., Håkansson Å., Tornberg E., Rumpunen K. Antioxidant capacity and major phenol compounds of horticultural plant materials not usually used // Journal of functional foods. 2017. Vol. 38. Pp. 119–127. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.003.
7. Kumar M., Rais N., Hasan M., Pandiselvam R., Sinha N., Singh S., Dhumal S., Amarowicz R., Barbhai M.D., Senapathy M., Natta S. Onion (*Allium cepa* L.) peel: A review on the extraction of bioactive compounds, its antioxidant

potential, and its application as a functional food ingredient // Journal of food science. 2022. Vol. 87, no. 10. Pp. 4289–4311. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16297.

8. Chernukha I., Kupaeva N., Fedulova L., Kulikovskii A., Vasilevskaya E., Kotenkova E. Antioxidant effect of ethanolic onion (*Allium cepa*) husk extract in ageing rats // Saudi Journal of Biological Sciences. 2021. Vol. 28, no. 5. Pp. 2877–2885. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.02.020.
9. Kumar M., Barbhai M.D., Hasan M., Punia S., Dhumal S., Radha R., Rais N., Chandran D., Pandiselvam R., Kothakota A., Tomar M., Satankar V., Senapathy M., Anitha T., Dey A., Sayed A.A.S., Gadallah F.M., Amarowicz R., Mekhemar M. Onion (*Allium cepa* L.) peels: A review on bioactive compounds and biomedical activities // Biomedicine & pharmacotherapy. 2022. Vol. 146. 112498. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112498.
10. Dhowlaghar N., Patil B., Pillai S.S., Dhanani T. Accelerated solvent extraction of red onion peel extract and its antimicrobial, antibiofilm, and quorum-sensing inhibition activities against *Listeria monocytogenes* and *Chromobacterium violaceum* // Food Bioscience. 2023. Vol. 53. 102649. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102649.
11. Борисенко Н.И., Хизриева С.С., Борисенко С.Н., Максименко Е.В., Щедрина К.О. Субкритическая вода как инструмент для получения фитокомпозиций метаболитов с высокой антиоксидантной активностью из лузги гречихи (*Fagopyrum esculentum*) // Химия растительного сырья. 2025. №2. С. 159–171. https://doi.org/10.14258/jcprm.20250215979.
12. Лекарь А.В., Филонова О.В., Борисенко С.Н., Максименко Е.В., Ветрова Е.В., Борисенко Н.И., Минкин В.И. Извлечение биофлавоноидов из шелухи лука в среде субкритической воды // Сверхкритические флюиды: Теория и практика. 2012. Т. 7, №4. С. 4–15.
13. Khizrieva S.S., Borisenko S.N., Maksimenko E.V., Borisenko N.I. Evaluation of different extraction techniques for the assay of anti-acetylcholinesterase activity of olive leaves *(Olea europaea*) // Chimica Techno Acta. 2021. Vol. 8, no. 4. 20218403. https://doi.org/10.15826/chimtech.2021.8.4.03.
14. Тутельян В.А., Эллер К.И., Алешко-Ожевский Ю.П. Руководство по методам контроля качества и безопасности биологически активных добавок к пище. М., 2004. С. 124–126.
15. Хасанов В.В., Рыжова Г.Л., Мальцева Е.В. Методы исследования антиоксидантов // Химия растительного сырья. 2004. №3. С. 63–75.
16. Хизриева С.С., Борисенко С.Н., Максименко Е.В., Жаркова Г.В., Борисенко Н.И. Субкритическая вода как инструмент для получения из листьев гинкго билоба (*Ginkgo biloba* L.) экстрактов вторичных растительных метаболитов с высокой антиоксидантной активностью // Химия растительного сырья. 2023. №2. С. 241–251. https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211437.
17. Roche M., Dufour C., Mora N., Dangles O. Antioxidant activity of olive phenols: mechanistic investigation and characterization of oxidation products by mass spectrometry // Organic and biomolecular chemistry. 2005. Vol. 3, no. 3. Pp. 423–430. https://doi.org/10.1039/b416101g.
18. Борисенко С.Н., Лекарь А.В., Филонова О.В., Ветрова Е.В., Борисенко Н.И. Масс-спектрометрия смесей биофлаваноидов, извлеченных из шелухи лука в среде субкритической воды // Масс-спектрометрия. 2012. Т. 9, №2. С. 103–108.

Поступила в редакцию 27 сентября 2025 г.

После переработки 7 декабря 2025 г.

Принята к публикации 10 февраля 2026 г.

Borisenko N.I.[*], *Khizrieva S.S., Borisenko S.N., Maksimenko E.V.* EVALUATION OF THE DEPENDENCE OF THE POLYPHENOLIC PROFILE AND ANTIOXIDANT ACTIVITY OF RED ONION HUSK EXTRACTS ON THE EXTRACTION METHOD

Research Institute of Physical and Organic Chemistry of the Southern Federal University, ave. Stachki, 194/2, Rostov-on-Don, 344090, Russia, niborisenko@sfedu.ru

Secondary plant metabolite (SPM) extracts with high antioxidant activity (AOA) are increasingly attracting attention as biologically active additives. Green chemistry methods are increasingly being considered for their production. In the presented work, subcritical water medium (SBW) in the temperature range from 130 to 240 °C was used to obtain phytocompositions with high antioxidant activity from of red onion husk (ROH). The use of SBW medium for extraction processes allows not only to increase the extraction of SPM from the plant matrix, but also to achieve a change in the phytochemical profile of the obtained extracts, which will determine the AOA of the resulting compositions. It has been demonstrated that the AOA of phytocompositions obtained from red onion husk depends on the extraction conditions and is determined by the polyphenolic profile of the ROH extracts determined by UV/Vis spectrophotometry.

It has been shown that the content of polyphenolic compounds and the AOA of the extracts depend on the extraction conditions (temperature of SBW). It has been demonstrated that the extract obtained from ROH in the SBW medium at 170 °C demonstrates the maximum of AOA (EC_{50} = 21.4 μg/mL) among the obtained extracts. At this temperature (170 °C), both the antioxidant activity (EC_{50} = 21.4 μg/mL) and the total polyphenols (gallic acid, 125.7 mg/g) and (rutin (287.4 mg/g) reach their maximum. Further increases in SBW temperature lead to a decrease in the polyphenol content and a weakening of the antioxidant activity of the studied extracts.

The presented results demonstrate the prospects of using SBW for obtaining extracts from ROH with a high content of polyphenols for the development of pharmaceuticals and food additives with high AOA.

Keywords: subcritical water, antioxidant activity, red onion husk, polyphenols, flavonoids, diphenylpicrylhydrazyl (DPPH).

For citing: Borisenko N.I., Khizrieva S.S., Borisenko S.N., Maksimenko E.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 2, pp. 160–168. (in Russ.). https://doi.org/10.14258/jcprm.20260217957.

References

1. Elshafie H.S., Camele I., Mohamed A.A. *International journal of molecular sciences*, 2023, vol. 24, no. 4, 3266. https://doi.org/10.3390/ijms24043266.
2. Bai T., Wang X., Du W., Cheng J., Zhang J., Zhang Y., Klinjapo R., Asavasanti S., Yasurinet P. *Antioxidants*, 2025, vol. 14, no. 2, 138. https://doi.org/10.3390/antiox14020138.
3. Kirubakaran D., Karmegam N., Sellapillai L., Senthilkumar K.J., Rajkumar M., Jeevika R., Wahid J.B.A. *Biomedical Materials & Devices*, 2025, pp. 1–26. https://doi.org/10.1007/s44174-025-00295-4.
4. Benítez V., Martín-Cabrejas M.A., Mollá E., Aguilera Y., López-Andréu F.J., Cools K., Terry L.A., Esteban R.M. *Plant foods for human nutrition*, 2011, vol. 66, no. 1, pp. 48–57. https://doi.org/10.1007/s11130-011-0212-x.
5. Bains A., Sridhar K., Singh B.N., Kuhad R.C., Chawla P., Sharma M. *Chemosphere*, 2023, vol. 343, 140178. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140178.
6. Burri S.C.M., Ekholm A., Håkansson Å., Tornberg E., Rumpunen K. *Journal of functional foods*, 2017, vol. 38, pp. 119–127. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.09.003.
7. Kumar M., Rais N., Hasan M., Pandiselvam R., Sinha N., Singh S., Dhumal S., Amarowicz R., Barbhai M.D., Senapathy M., Natta S. *Journal of food science*, 2022, vol. 87, no. 10, pp. 4289–4311. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16297.
8. Chernukha I., Kupaeva N., Fedulova L., Kulikovskii A., Vasilevskaya E., Kotenkova E. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, vol. 28, no. 5, pp. 2877–2885. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.02.020.
9. Kumar M., Barbhai M.D., Hasan M., Punia S., Dhumal S., Radha R., Rais N., Chandran D., Pandiselvam R., Kothakota A., Tomar M., Satankar V., Senapathy M., Anitha T., Dey A., Sayed A.A.S., Gadallah F.M., Amarowicz R., Mekhemar M. *Biomedicine & pharmacotherapy*, 2022, vol. 146, 112498. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.112498.
10. Dhowlaghar N., Patil B., Pillai S.S., Dhanani T. *Food Bioscience*, 2023, vol. 53, 102649. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102649.
11. Borisenko N.I., Khizriyeva S.S., Borisenko S.N., Maksimenko Ye.V., Shchedrina K.O. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2025, no. 2, pp. 159–171. https://doi.org/10.14258/jcprm.20250215979. (in Russ.).
12. Lekar' A.V., Filonova O.V., Borisenko S.N., Maksimenko Ye.V., Vetrova Ye.V., Borisenko N.I., Minkin V.I. *Sverkhkriticheskiye flyuidy: Teoriya i praktika*, 2012, vol. 7, no. 4, pp. 4–15. (in Russ.).
13. Khizrieva S.S., Borisenko S.N., Maksimenko E.V., Borisenko N.I. *Chimica Techno Acta*, 2021, vol. 8, no. 4, 20218403. https://doi.org/10.15826/chimtech.2021.8.4.03.
14. Tutel'yan V.A., Eller K.I., Aleshko-Ozhevskiy Yu.P. *Rukovodstvo po metodam kontrolya kachestva i bezopasno-sti biologicheski aktivnykh dobavok k pishche*. [Guide to methods of quality control and safety of biologically active food supplements]. Moscow, 2004, pp. 124–126. (in Russ.).
15. Khasanov V.V., Ryzhova G.L., Mal'tseva Ye.V. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2004, no. 3, pp. 63–75. (in Russ.).

[*] Corresponding author.

16. Khizriyeva S.S., Borisenko S.N., Maksimenko Ye.V., Zharkova G.V., Borisenko N.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2023, no. 2, pp. 241–251. https://doi.org/10.14258/jcprm.20230211437. (in Russ.).
17. Roche M., Dufour C., Mora N., Dangles O. *Organic and biomolecular chemistry*, 2005, vol. 3, no. 3, pp. 423–430. https://doi.org/10.1039/b416101g.
18. Borisenko S.N., Lekar' A.V., Filonova O.V., Vetrova Ye.V., Borisenko N.I. *Mass-spektrometriya*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 103–108. (in Russ.).

Received September 27, 2025

Revised December 7, 2025

Accepted February 10, 2026

Сведения об авторах

Борисенко Николай Иванович – доктор химических наук, главный научный сотрудник, niborisenko@sfedu.ru
Хизриева Салима Салимовна – кандидат химических наук, младший научный сотрудник, hizrieva@sfedu.ru
Борисенко Сергей Николаевич – кандидат химических наук, научный сотрудник, snborisenko@sfedu.ru
Максименко Елена Владимировна – научный сотрудник, maksimenkoev52@mail.ru

Information about authors

Borisenko Nikolay Ivanovich – Doctor of Chemical Sciences, Chief Researcher, niborisenko@sfedu.ru
Khizrieva Salima Salimovna – Candidate of Chemical Sciences, Junior Researcher, hizrieva@sfedu.ru
Borisenko Sergey Nikolaevich – Candidate of Chemical Sciences, Researcher, snborisenko@sfedu.ru
Maksimenko Elena Vladimirovna – Researcher, maksimenkoev52@mail.ru