



СВЯЗЫВАНИЕ 5-ГИДРОКСИМЕТИЛФУРФУРОЛА ФЛАВОНОИДАМИ ШРОТОВ ЗОЛОТАРНИКА КАНАДСКОГО

Игорь Сергеевич Черепанов ¹, Анна Юрьевна Садрдинова ²,
Алина Игоревна Егорова ³, Дарья Александровна Тарасова ⁴

^{1, 2, 3, 4} Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

¹ cherchem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0880-5474>

² yarmukhametova17@gmail.ru

³ ealiapril@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-6602-4008>

⁴ dashatarasova20@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4555-2196>

Аннотация. Компоненты растительного сырья фенольной природы являются важными биологически активными веществами с широким профилем функциональности. Одним из перспективных направлений применения полифенолов в качестве регуляторов динамики реакций неферментативного окрашивания является взаимодействие с промежуточными продуктами, в частности с 5-гидроксиметилфурфуролом. В настоящей работе изучены компонентный состав шротов докритической CO_2 -экстракции Золотарника канадского и взаимодействие идентифицированных флавоноидов методами тонкослойной хроматографии и колебательной спектроскопии флавоноидов (кверцетин, рутин, гисперидин, гиперозид) с 5-гидроксиметилфурфуролом. Методами ИК- и УФ-спектроскопии показано, что связывание 5-гидроксиметилфурфурола реализуется посредством конденсации последнего по карбонильной группе с участием А-циклов молекул флавоноидов. Листья и соцветия Золотарника аналогичны по структурно-групповому составу, при этом соцветия характеризуются более высоким содержанием флавоноидов, что позволяет рекомендовать их в качестве более перспективного источника для разработки составов пищевых систем.

Ключевые слова: флавоноиды, Золотарник канадский, вытяжки, шроты, неферментативное окрашивание, 5-гидроксиметилфурфурол, электронная спектроскопия, ИК-спектроскопия.

Благодарности: Авторы выражают благодарность д.б.н. В.Г. Сергееву и к.б.н. И.А. Черенкову за предоставленные для исследования объекты растительного сырья.

Для цитирования: Черепанов И. С., Садрдинова А. Ю., Егорова А. И., Тарасова Д. А. Связывание 5-гидроксиметилфурфурола флавоноидами шротов Золотарника канадского // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 54–59. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.009. EDN: <https://elibrary.ru/YOVVFK>.

Original article

SOLIDAGO CANADENSIS L. MEALS FLAVONOIDS BINDING 5-HYDROXYMETHYLFURFURAL

Igor S. Cherepanov ¹, Anna Yu. O. Sadrtdinova ², Alina I. Egorova ³,
Dar'ya A. Tarasova ⁴

^{1, 2, 3, 4} Udmurt State University, Izhevsk, Russia

¹ cherchem@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0880-5474>

² yarmukhametova17@gmail.ru

³ ealiapril@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-6602-4008>

⁴ dashatarasova20@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4555-2196>

Abstract. The phenolic nature components of plant raw materials are important biologically active substances with a wide range of functionality. One of the promising areas of application of polyphenols as regulators of the dynamics of non-enzymatic staining reactions through interaction with intermediates, in particular with 5-hydroxymethylfurfural. In this work, the component composition of *Solidago canadensis* L. subcritical CO_2 extraction meal and the interaction of flavonoids identified by thin-layer chromatography and vibrational spectroscopy (quercetin, rutin, hesperidin, hyperoside) with 5-hydroxymethylfurfural were studied. IR and UV spectroscopy have shown that the binding of 5-hydroxymethylfurfural is realized by condensation of the latter along the carbonyl group with the participation of A-cycles of flavonoid molecules.

© Черепанов И. С., Садрдинова А. Ю., Егорова А. И., Тарасова Д. А., 2025

СВЯЗЫВАНИЕ 5-ГИДРОКСИМЕТИЛФУРФУРОЛА ФЛАВОНОИДАМИ ШРОТОВ ЗОЛОТАРНИКА КАНАДСКОГО

The leaves and inflorescences of Solidago canadensis are similar in structural and group composition, while the inflorescences are characterized by a higher content of flavonoids, which allows them to be recommended as a more perspective source for the development of food system.

Keywords: flavonoids, *Solidago canadensis* L, extracts, meals, non-enzymatic browning, 5-hydroxymethylfurfural, UV-Vis-spectroscopy, infrared spectroscopy.

Acknowledgements: Authors expresses gratitude to doctor of biological sciences V.G. Sergeev and candidate of biological sciences I.A. Cherenkov for the objects of plant raw materials provided for research.

For citation: Cherepanov, I.S., Sadrtdinova, A.Yu., Egorova, A.I. & Tarasova, D.A. (2025). *Solidago canadensis* L. meals flavonoids binding 5-hydroxymethylfurfural. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 54-59. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.009. EDN: <https://elibrary.ru/YOWFK>.

ВВЕДЕНИЕ

Полифенольные соединения, являясь известными антиокислительными производными, характеризуются приобретающей в последние годы популярностью в связи с проявлением широкого спектра действия в биологических системах. Одним из новых направлений изучения действия полифенольных, в частности флавоноидных соединений, является их способность связывать токсичные продукты (акриламид, гетероциклы) важнейших процессов пищевой химии – реакции неферментативного окрашивания углеводов (карамелизация, реакция Майяра) [1]. Эффект связывания, вероятно, реализуется за счет конденсации посредством взаимодействия фенольных циклов и функциональных групп потенциально токсичных продуктов [2], механизмы которого находятся в стадии активного изучения. Кроме того показано, что связывание продуктов реакций неферментативного окрашивания может быть реализовано с участием большой группы веществ различных классов и их композитов в форме гидрогелей [3], что является развитием другого перспективного направления пищевой индустрии – регулирования цветности пищевых систем [4].

Главным источником биологически активных полифенолов является растительное сырье, извлечение из которого флавоноидов и родственных соединений изучено в представительном количестве работ и с каждым годом число публикаций по данной тематике только возрастает. В подавляющем большинстве случаев для извлечения природных соединений применяют экстракционные методы, в том числе углекислотную экстракцию, и полученные вытяжки, как правило, являются основной формой применения полифенольных композиций.

Одной из основных проблем практического применения извлечений из растительного сырья отмечается их сложный многокомпонентный состав, определяющий при этом их основные свойства. В настоящее время для исследования состава растительных экстрактов широко используются хроматографические методы (ВЭЖХ) в сочетании с tandemной масс-спектрометрией [5, 6]. Применение для указанных целей более доступных спектроскопических методов (ИК-Фурье спектроскопия, спектроскопия УФ-и видимой области) в сочетании с фитохимическим анализом позволяет охарактеризовать функционально-групповой состав (классы извлекаемых классическими растворителями или сверхкритической экстракцией вторичных метаболитов растений) экстрактов и оценить соотношение биологически активных компонентов [5]. Регистрация и анализ колебательных спектров поглощения и отражения с применением современных ИК-Фурье спектрометров дает возможность исследовать как фракционированные с применением хроматографических методов экстракты, так и извлекаемые из разных частей растений масла без их предварительного разделения с под-

тверждением спектральных данных результатами фитохимического анализа [5].

Информация о функционально-групповом и фитохимическом составе растительных экстрактов позволяет не только оценивать их биологическую активность, но и в свете описанных выше свойств прогнозировать способность к связыванию токсичных продуктов сахар-аминных реакций, что, несомненно, является актуальным как в части разработки теории и методологии исследований в данном направлении, так и в практическом плане для подбора пищевых составов функционального назначения. Так, за последние несколько лет опубликованы результаты исследований по изучению влияния строения флавоноидов на эффективность связывания акриламида и участвующего в его образовании 5-гидроксиметилфурфурола (5-ГМФ) [2, 7], в частности показано, что конденсация по альдегидной группе 5-ГМФ предпочтительна по расположению 6 А-цикла флавонов [7], при этом наиболее способствуют проявлению связывающей по отношению к акриламиду способности 5,7-ОН-группы А-цикла [2].

Тем не менее, ранее полученные результаты указывают на отсутствие у некоторых фенолов способности к торможению образования акриламида и 5-ГМФ, образующимися в условиях реакции Майяра [8]. Авторами одной из последних работ по данной проблеме [9] показана возможность исследования связывания 5-ГМФ полифенольными компонентами растительных экстрактов, при этом анализ механизмов образования и строения образующихся промежуточных и конечных продуктов не приводится, что предполагает актуальность и перспективность дополнительного исследований в данном направлении в части установления корреляций природы и состава растительных экстрактов с их связывающей способностью.

Цель работы – изучение компонентного состава этанольных вытяжек шротов докритической углекислотной экстракции растений Золотарника канадского (листьев и соцветий) с целью оценки их связывающей способности по отношению к 5-гидроксиметилфурфуролу.

МЕТОДЫ

В качестве исследуемого растительного материала использовали листья и соцветия Золотарника канадского (*Solidago canadensis* L.), собранного на территории Удмуртской Республики и предоставленного кафедрой Ботаники, зоологии и физиологии животных Удмуртского государственного университета.

Фитохимическая идентификация флавоноидов

Добавление к водно-спиртовому извлечению 3 %-ного раствора хлорида алюминия в 95 %-ном этаноле при наличии флавоноидов дает желто-зеленое окрашивание; описанный эффект был отмечен для обоих типов исследуемых объектов (листьев и соцветий).

Получение шротов докритической углекислотной экстракции

Исследуемые шроты после докритической CO_2 -экстракции (экстрактор РАЭ-01-05; 10 МПа; 50 °C) были предоставлены кафедрой Физиологии, клеточной биологии и биотехнологии Удмуртского государственного университета.

Получение вытяжек из шротов

Сухие шроты CO_2 -экстрактов помещали в растворитель (80 % этанол) и термостатировались в колбах с обратным холодильником при температуре кипения в течение заданного времени (1.5 ч), после чего фильтровали, получая вытяжки для исследования функционально-группового и компонентного состава.

Анализ вытяжек методом тонкослойной хроматографии

Идентификацию флавоноидов методом ТСХ проводили на пластинах «Silufol» в элюентных системах: а) н-бутанол-уксусная кислота-вода (4:1:5) и б) этилацетат-уксусная кислота-вода (7:1:2). Этanolные растворы (экстракты) наносили на линию старта, после чего помещали пластины (10 x 4 см) в камеру и выдерживали до достижения фронтом растворителя линии финиша. Пластины высушивали до исчезновения запаха растворителя, после чего опрыскивали 5 % спиртовым раствором хлорида алюминия с последующим нагреванием в сушильном шкафу при 105 °C в течение 5 минут. Рассчитывали значения R_f по отношению пробегов компонентов (центры ярко-желтых пятен) и растворителя от линии старта до линии финиша.

Количественное определение содержания флавоноидов в шротах

Точную навеску измельченного сырья (1 г) помещали в круглодонную колбу вместимостью 250,0 мл и прибавляли 50,0 мл 60 % спирта этилового. Колбу с содержимым кипятили на водяной бане с обратным холодильником в течение 2 часов. Полученное извлечение фильтровали через беззольный фильтр (раствор «А»). Аликвоту 5,0 мл раствора «А» помещали в мерную колбу вместимостью 50,0 мл и доводили объем раствора до метки 60 % спиртом этиловым (раствор «Б»). По 5,0 мл раствора «Б» помещали в две мерные колбы вместимостью 50,0 мл. В первую колбу прибавляли 2,0 мл 3 %-го раствора алюминия хлорида в спирте этиловом. В обеих колбах доводили объем растворов до метки 60 %-ным спиртом этиловым и через 40 минут измеряли оптическую плотность раствора из первой колбы при длине волны 389 нм в кюветах с толщиной слоя 1 см на спектрофотометре СФ-2000 (ОКБ «Спектр», СПб, Россия). В качестве раствора сравнения использовали раствор из второй колбы. Содержание флавоноидов (%) в изучаемом сырье рассчитывали по формуле:

$$X = 5000 \cdot A / \varepsilon \cdot a,$$

где A – оптическая плотность испытуемого раствора; ε – удельный показатель поглощения комплекса флавоноидов с алюминия хлоридом, равный 401; a – навеска шрота, г.

Регистрация колебательных спектров твердых фаз вытяжек

Вытяжки из исходных экстрактов исследовали в виде высушенных после удаления растворителя твердых фаз в КВг-таблетках (1 мг пробы в 200 мг КВг). ИК-Фурье спектры регистрировали на ИК-Фурье спектрометре ФСМ-2201 (ООО «Инфраспек», СПб, Россия) в интервале волновых чисел 4000–400 cm^{-1} с разрешением по волновому числу 4 cm^{-1} при 40 сканах и обрабатывали в программе FSpec 4.3.0.9. На основании отнесения наиболее интенсивных спектральных полос к структурным фрагментам вторичных метаболитов с использованием ранее описанного подхода [10] были идентифицированы соответствующие производные, потенциально обладающие альдегид-связывающей способностью.

Изучение процессов связывания 5-гидроксиметилфурфурола

Неферментативное окрашивание, приводящее к образованию 5-ГМФ, моделировали кислотно-катализируемой реакцией карамелизации *D*-фруктозы (80 °C, 1 час), реализуемой в герметичной колбе, в которую вносили 20 мл раствора фруктозы (400 г/л), содержащего 0,004 моль/л HCl, контроль окончания процесса осуществляли спектрофотометрически ($\lambda_{\text{max}} = 277 \pm 2$ нм). По истечении времени к 15 мл полученного раствора добавляли 0,01 г твердых фаз вытяжек и в течение 1 часа непрерывно перемешивали в колбе с обратным холодильником при $t = 30$ °C на модуле ротационного испарителя ИР-1МЗ [11]. По окончании процесса регистрировали электронные спектры проб (5 мл) в кварцевых кюветах (1 см) в диапазоне длин волн 200–500 нм с разрешением по длине волны 2 нм. На завершающем этапе удаляли избыток растворителя концентрированием и полученную гомогенизированную систему исследовали ИК-спектроскопически (параметры регистрации спектров аналогичны вышеописанным) в форме тонких пленок между солевыми пластинаами с соответствующим контролем толщины оптического пути.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первичные испытания шротов включали фитохимические исследования, тонкослойную хроматографию и определение массового содержания флавоноидов. Фитохимический анализ подтверждает присутствие в исходном сырье флавоноидов, ТСХ шротов (табл. 1) позволяет идентифицировать три компонента.

ИК-спектроскопия является одним из методов, позволяющих достаточно оперативно и достоверно проводить идентификацию флавоноидных компонентов экстрактов. Вытяжки шротов листьев и соцветий Золотарника схожи по функционально-групповому составу между собой (рис. 1).

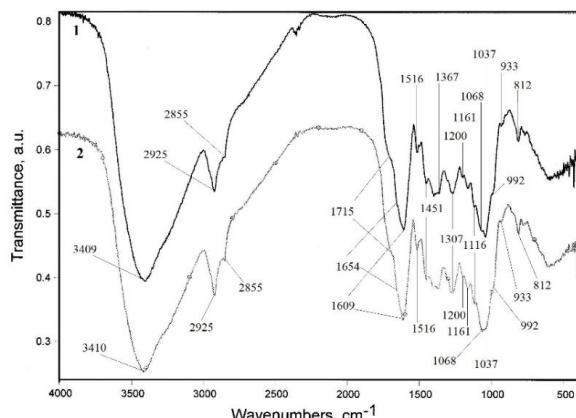


Рисунок 1 – Колебательные спектры твердых фаз этанольных вытяжек шротов Золотарника канадского: 1 – листья; 2 – соцветия (КВг, 1:200)

Figure 1 – *Solidago canadensis* L. meals ethanolic extract solid phases vibrational spectra: 1 – leaves; 2 – inflorescences (1:200 KBr)

СВЯЗЫВАНИЕ 5-ГИДРОКСИМЕТИЛФУРФУРОЛА ФЛАВОНОИДАМИ ШРОТОВ ЗОЛОТАРНИКА КАНАДСКОГО

Таблица 1 – Данные первичных испытаний исходного растительного сырья

Table 1 – Primary investigation data of the initial plant material

| Система | Значения R_f при ТСХ флавоноидов в различных элюентных системах | | | Массовое содержание флавоноидов в шротах (Х), % |
|----------|---|-----------|--|--|
| | Бутанол-уксусная кислота-вода (4:1:5) | | Этилацетат-уксусная кислота-вода (7:1:2) | |
| Листья | 0,89 | Кверцетин | 0,90 0,74 0,46 | Кверцетин Гиперозид Рутин $3,3 \pm 0,3$ |
| Соцветия | 0,85 | Кверцетин | 0,91 0,67 0,51 | Кверцетин Гиперозид Рутин $3,7 \pm 0,2$ |

В таблице 2 представлено сопоставление экспериментальных данных и результатов расчета ИК-спектра молекулы кверцетина в рамках теории функционала плотности [12]. Подобное сопоставление позволяет дать оценку отнесениям полос в области валентных колебаний кратных C=C-связей [13], что необходимо в плане получения достоверной информации о структурных изменениях в процессе взаимодействия молекул флавоноидов с 5-ГМФ. В частности, анализ данных таблицы 2 показывает отнесение сигналов 1609, 1516 см⁻¹ к валентным колебаниям C=C соответственно циклов C и A молекулы кверцетина [12]. Тем не менее, при сопоставлении положения полос, в том числе со спектрами стандартных образцов, следует учитывать возможность проявления близких по частоте сигналов для разных структурных фрагментов молекул флавоноидов, а также взаимодействие компонентов в матрице шротов, приводящее к изменению положения характеристических пиков [12].

Таблица 2 – Отнесение полос (см⁻¹) в спектрах твердых фаз вытяжек исследуемых шротов (эксп) и кверцетина (расч) и (станд)

Table 2 – Assignment of bands wavenumber values (cm⁻¹) in the meals extracts solid phases spectra (exp) and quercetin (calc) and (stand)

| Отнесение | $\nu_{\text{эксп}}$ | $\nu_{\text{расч}}$ | $\nu_{\text{станд}}$ |
|--|---------------------|---------------------|----------------------|
| $\nu_{\text{C=C}}$ | 1609 | 1608 | 1616 |
| $\nu_{\text{C=C}}$ | 1516 | 1516 | 1523 |
| $\nu_{\text{C-OH}} + \nu_{\text{C=C}}$ | 1451 | 1440 | 1446 |
| $\nu_{\text{C-OH}} + \delta_{\text{C-OH}}$ | 1367 | 1375 | 1383 |
| $\delta_{\text{C-OH}}$ | 1307 | 1312 | 1325 |

В области ниже 1000 см⁻¹ интенсивность полос в спектрах флавоноидов низкая [13], однако некоторые отнесения могут быть использованы для получения дополнительной информации о составе шротов. Низкочастотные сигналы 933, 812, 762 см⁻¹ относятся к колебаниям моносахаридных циклов а-гликозидов и/или ароматических =C-H-фрагментов фенолов, C=C-H-фрагментов флавоноидов. Первая из них проявляется в спектре кверцетина [12], вторая и третья характерны как общие для флавонолов и флавононов (гиперозид, гисперидин) [14, 15].

Деформационные CH-колебания гликозидной составляющей рутина – рамногиранозил и глюкогиранозил-циклов представлены в спектрах полосами 1116 и 1161 см⁻¹, сигнал 992 см⁻¹ обусловлен наложением колебаний ω_{CH} рамногиранозы и колебаний C-O-C-связей между циклами [15]. Присутствие сочетающихся углеводных фрагментов подтверждается наличием характерных для колебаний C-O-C-связей гликозидов с фенольным остатком полос 1068 и 1037 см⁻¹ [14].

Колебательные спектры реакционных систем флавоноиды – 5-ГМФ в сравнении со спектрами твердых фаз шротов представлены на рис. 2.

Сопоставление ИК-спектров (рис. 2) показывает наличие полос, центрированных при 1030 см⁻¹ (спектры 3, 4), характерных для C-O-колебаний связанных по карбонильной группе фурановых циклов [16], взаимодействие 5-ГМФ с участием C=O-функции также подтверждается слабой интенсивностью полос $\nu_{\text{C=O}}$ (1651 см⁻¹). С другой стороны, наблюдается существенная депрессия характерных для флавоноидов полос колебаний C=C-ароматических циклов, что, вероятно, объясняется конденсацией молекул полифенолов: подобный эффект ранее описан авторами [17]. Новая полоса 1470 см⁻¹ в спектрах 3, 4 относится по данным [18] к колебаниям C=C-C-фрагментов конденсированных молекул флавоноидов.

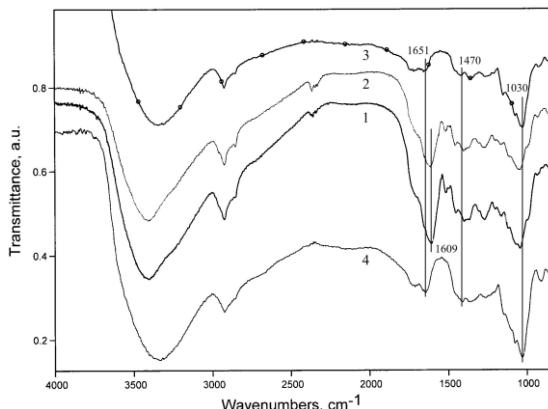


Рисунок 2 – Колебательные спектры твердых фаз этанольных вытяжек шротов: 1 – листья; 2 – соцветия в сопоставлении со спектрами систем флавоноиды-5-ГМФ: 3 – листья; 4 – соцветия

Figure 2 – Vibrational spectra of solid phases of ethanol meal extracts: 1 – leaves; 2 – inflorescences in comparison with the spectra of flavonoids-5-GMF systems: 3 – leaves; 4 – inflorescences

Электронные спектры (рис. 3) показывают интенсивное поглощение 5-ГМФ в исходном растворе термостабилизированной фруктозы (276 нм), при этом после введения в систему твердых фаз вытяжек шротов (систем флавоноиды – 5-ГМФ) спектральные контуры меняются и по окончании экспериментов наблюдается полоса 380 нм, характеризующая поглощение флавоноидов [19], при этом более коротковолновая полоса регистрируется в только форме инфлексии и смещается к значениям 265 нм.

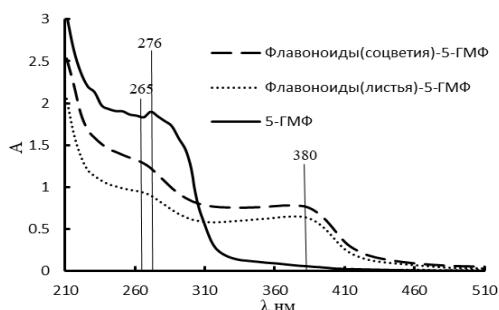
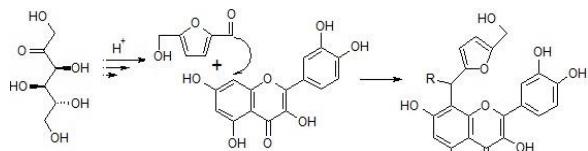


Рисунок 3 – Электронные спектры исследуемых реакционных систем

Figure 3 – UV-Vis spectra of investigated reactive systems

Схема взаимодействия 5-ГМФ с полифенольными компонентами исследуемого растительного сырья (на модели молекулы кверцетина) может быть представлена в виде:



R – структурно-аналогичный фрагмент молекулы флавонида.

Фруктоза в кислой среде при нагревании претерпевает ряд последовательных превращений, основным конечным продуктом которых является 5-ГМФ. Далее происходит алкилирование молекулы флавонида в положение 8 (А-цикл), на что указывают литературные данные [11]. Анализ описанных выше спектральных эффектов дополнительно подтверждает участие А-циклов в конденсации: спектральный профиль интервала, включающего полосы C=C-валентных колебаний существенно трансформируется, в частности, помимо смещения полосы 1609 cm^{-1} в высокочастотную область с понижением интенсивности [19], практически полностью нивелируется полоса 1516 cm^{-1} ($\nu_{\text{C}=\text{C}}$ А-цикла, табл. 2). Анализ изменения профилей электронных спектров (рис. 3) показывает снижение поглощения (276 нм, $\pi \rightarrow \pi^*$ -переход) участвующей в конденсации карбонильной группы 5-ГМФ. Поглощение флавонидов характеризуется двумя максимумами в спектрах: полоса I (300–400 нм), относимая к переходам с участием π-электронной системы В-цикла и полоса II (220–280 нм), связанная с переходами электронов А-цикла [20]. Первая полоса сохраняет свое положение, тогда как вторая проявляется только в форме плеча, подтверждая конденсацию с 5-ГМФ по А-циклу [17].

Дальнейшее развитие исследований в данном направлении перспективно в части выделения и изучения структуры продуктов взаимодействия флавонидов с 5-ГМФ, что открывает подходы к синтезу новых антиокислительных препаратов на основе конденсированных полифенолов [17, 18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе проведенного исследования изучены компонентный состав шротов докритической CO_2 -экстракции Золотарника канадского и взаимодействие идентифицированных методами тонкослойной хроматографии и колебательной спектроскопии флавонидов (кверцетин, рутин, гисперидин, гиперозид) с 5-гидроксиметилфурфуролом.

2. Методами ИК- и УФ-спектроскопии показано, что связывание 5-гидроксиметилфурфурола реализуется посредством конденсации последнего по карбонильной группе с участием А-циклов молекул флавонидов.

3. Листья и соцветия Золотарника аналогичны по структурно-групповому составу, при этом соцветия характеризуются более высоким содержанием флавонидов, что позволяет рекомендовать их в качестве источника для разработки составов пищевых систем.

4. Дальнейшее развитие исследований в данном направлении перспективно в части выделения и изучения структуры продуктов взаимодействия флавонидов с 5-ГМФ, открывающих подходы к синтезу новых антиокислительных препаратов на основе конденсированных полифенолов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Impact and inhibitory mechanism of phenolic compounds on the formation of toxic Maillard reaction products in food / G. Teng [et al.] // Front. Agr. Sci. Ing. 2018. Vol. 3. Issue 5. PP. 321–329. DOI: 10.15302/J-FASE-2017182.
- Structure guided unraveling: Phenolic hydroxyls contribute to reduction of acrylamide using multiplex quantitative structure-activity relationship modelling / Y. Zhang [et al.] // Food Chem. 2016. Vol. 199. PP. 492–501. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.12.038.
- Novel roles of hydrocolloids in foods: inhibition of toxic Maillard reaction products formation and attention of their harmful effects / N. Zhang [et al.] // Trends Food Sci. Technol. 2021. Vol. 111. PP. 706–715. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.03.020.
- Черепанов И.С., Тарасова Д.А., Егорова А.И. Оценка изменения структурно-группового состава продукта соприментации L-аскорбиновой кислоты и D-глюкозы в условиях окислительного стресса // Вестник ВГСГУТУ. 2023. № 4. С. 25–32. DOI: 10.53980/24131997_2023_4_25.
- Essential oil quality and purity evaluation via FT-IR spectroscopy and pattern recognition techniques / S. Agatonovic-Kustrin [et al.] // Appl. Sci. 2020. Vol. 10. PP. 7294. DOI: 10.3390/app10207294.
- Biocomposites of silk-elastin and essential oil from *Mentha piperita* display antibacterial activity / D. Gomes [et al.] // ASC Omega. 2022. Issue 7. PP. 6568–6578. DOI: 10.1021/acsomega.1c05704.
- Epicatechin adduction of 5-hydroxymethylfurfural as an inhibitory mechanism against acrylamide formation in Maillard reaction / Y. Qi [et al.] // J. Agric. Food Chem. 2018. Vol. 66. PP. 12536–12543. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b03952.
- Isolation and structural characterization of anthocyanin-furfuryl pigments / A. Sousa [et al.] // J. Agric. Food Chem. 2010. Vol. 58. PP. 5664–5669. DOI: 10.1021/jf1000327.
- Verma V., Yadav N. Effect of plant extracts on the reduction of acrylamide and hydroxymethylfurfural formation in French fries // Food Chemistry Advances. 2024. Vol. 4. PP. 100708. DOI: 10.1016/j.focha.2024.100708.
- Нуреева Р.Н., Феофилова Д.С., Черепанов И.С. Изучение группового и компонентного состава растительных экстрактов с применением методов разделения и спектральной идентификации // Научные исследования: итоги и перспективы. 2024. Том 5. № 1. С. 48–54.
- Es-Safi N.-E., Cheynier V., Moutouet M. Role of aldehydic derivatives in the condensation of phenolic compounds with emphasis on the sensorial properties of fruit-derived foods // J. Agric. Food Chem. 2002. Vol. 50. PP. 5571–5585. DOI: 10.1021/jf025503y.
- Baranovic G., Segota S. Infrared spectroscopy of flavones and flavonols: reexamination of the hydroxyl and carbonyl vibrations in relation of the interaction of flavonoids with membrane lipids // Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectroscopy. 2018. Vol. 192. Issue 2. PP. 473–486. DOI: 10.1016/j.saa.2017.11.057.
- Шагаутдинова И.Т., Элькин М.Д., Лихтер А.М. Спектральная идентификация колебательных спектров апигенина и лютеолина // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2015. № 7. С. 105–112. DOI: 10.7868/S0207352815070173.
- Krysa M., Szymanska-Charget M., Zdunek A. FT-IR

СВЯЗЫВАНИЕ 5-ГИДРОКСИМЕТИЛФУРФУРОЛА ФЛАВОНОИДАМИ ШРОТОВ ЗОЛОТАРНИКА КАНАДСКОГО

- and FT-Raman fingerprints of flavonoids // *Food Chem.*. 2022. Vol. 393. PP. 133430. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133430.
15. Phenolic Compound Explorer: A Mid Infrared Spectroscopy Database / O. Abbas [et al.] // *Vibrational Spectroscopy*. 2007. Vol. 92. PP. 111–118.
16. Surendra B., Veerabhadraswamy M. Microwave assisted synthesis of polymer via bioplatform chemical intermediate derived from Jatropha deoiled seed cake // *Journal of Sciences: Advanced Material and Devices*. 2017. Vol. 2. PP. 340–346. DOI: 10.1016/j.vibspec.2017.05.008.
17. Latos-Brozio M., Masek A., Piotrowska M. Polymeric forms of plant flavonoids obtained by enzymatic reactions // *Molecules*. 2022. Vol. 27. PP. 3702. DOI: 10.3390/molecules27123702.
18. Comprehensive investigation of the enzymatic oligomerization of esculetin by laccase in ethanol : water mixtures / A. Muniz-Mauro [et al.] // *RSC Adv.* 2017. Vol. 7. PP. 38424–38433. DOI: 10.1039/c7ra06972c.
19. Silica/quercentin sol-gel hybrids as antioxidant dental implant materials / M. Catauro [et al.] // *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2015. Vol. 16. PP. 035001. DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/035001.
20. Tosovic J., Markovic S. Reproduction and interpretation of the UV-vis spectra of some flavonoids // *Chem. Pap.* 2017. Vol. 71. Issue 3. PP. 543–552. DOI: 10.1007/s11696-016-0002-x.
- Информация об авторах**
- И. С. Черепанов – кандидат химических наук, доцент кафедры Фундаментальной и прикладной химии Удмуртского государственного университета.
- А. Ю. Садртдинова – студент 4 курса направления подготовки «Химия», Удмуртский государственный университет.
- А. И. Егорова – ассистент кафедры Фундаментальной и прикладной химии Удмуртского государственного университета.
- Д. А. Тарасова – ассистент кафедры Фундаментальной и прикладной химии Удмуртского государственного университета.

REFERENCES

1. Teng, G., Hu, X., Tao, N. & Wang, M. (2018). Impact and inhibitory mechanism of phenolic compounds on the formation of toxic Maillard reaction products in food. *Front. Agr. Sci. Ing.*, 5(3), 321-329. DOI: 10.15302/J-FASE-2017182.
2. Zhang, Y., Huang, M., Wang, Q. & Cheng, J. (2016). Structure guided unraveling: Phenolic hydroxyls contribute to reduction of acrylamide using multiplex quantitative structure-activity relationship modelling. *Food Chem.*, 199, 492-501. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.12.038.
3. Zhang, N., Zhou, Q., Fan, D. & Xiao, J. (2021). Novel roles of hydrocolloids in foods: inhibition of toxic Maillard reaction products formation and attention of their harmful effects. *Trends Food Sci. Technol.*, 111, 706-715. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.03.020.
4. Cherepanov, I.S., Tarasova, D.A. & Egorova, A.I. (2024). Estimation of structure-group content changes of L-ascorbic acid - D-glucose co-pigmentation product under oxidative stress condition. *Bulletin of ESSTU*, 4, 25-32. (In Russ). DOI: 10.53980/24131997_2023_4_25.
5. Agatonovic-Kustrin, S., Ristivojevic, P., Gegechkori, V. & Litvinova, T. (2020). Essential oil quality and purity evaluation via FT-IR spectroscopy and pattern recognition techniques. *Appl. Sci.*, 10, 7294. DOI: 10.3390/app10207294.
6. Gomes, D., Costa, A., Pereira, A. & Casal, M. (2022). Bio-composites of silk-elastin and essential oil from *Merita piperita* display antibacterial activity. *ASC Omega*, 7, 6568-6578. DOI: 10.1021/acsomega.1c05704.
7. Qi, Y., Zhang, H., Zhang, H., Wu, G., Wang, L., Quan, H. & Qu, X. (2018). Epicatechin addition of 5-hydroxymethylfurfural as an inhibitory mechanism against acrylamide formation in Maillard reaction. *J. Agric. Food Chem.*, 66, 12536-12543. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b03952.
8. Sousa, A., Mateus, N., Silva, A., Vivas, N., Nonier, M., Pianet, I. & Freitas, V. (2010). Isolation and structural characterization of anthocyanin-furfuryl pigments. *J. Agric. Food Chem.*, 58, 5664-5669. DOI: 10.1021/f1000327.
9. Verma, V. & Yadav, N. (2024). Effect of plant extracts on the reduction of acrylamide and hydroxymethylfurfural formation in French fries. *Food Chemistry Advances*, 4, 100708. DOI: 10.1016/j.focha.2024.100708.
10. Nureeva, R.N., Feofilova, D.S. & Cherepanov, I.S. (2024). Study of group and component content of plant extracts using extraction methods and spectral identification. *Scientific Investigation: Results and Perspectives*, 5(1), 48-54. (In Russ).
11. Es-Safi, N.-E., Cheynier, V. & Moutoutet, M. (2002). Role of aldehydic derivatives in the condensation of phenolic compounds with emphasis on the sensorial properties of fruit-derived foods. *J. Agric. Food Chem.*, 50, 5571-5585. DOI: 10.1021/jf025503y.
12. Baranovic, G. & Segota, S. (2018). Infrared spectroscopy of flavones and flavonols: reexamination of the hydroxyl and carbonyl vibrations in relation of the interaction of flavonoids with membrane lipids. *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectroscopy*, 192(2), 473-486. DOI: 10.1016/j.saa.2017.11.057.
13. Shagautdinova, I.T., El'kin, M.D. & Likhter, A.M. (2015). Spectral identification of apigenin and luteolin vibrational spectra. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron, Neutron Techniques*, 7, 105-112. DOI: 10.7868/S0207352815070173.
14. Krysa, M., Szymanska-Chagot, M. & Zdunek, A. (2022). FT-IR and FT-Raman fingerprints of flavonoids. *Food Chem.*, 393, 133430. DOI: 10.1016/j.foodchem.2022.133430.
15. Abbas, O., Compere, G., Larondelle, Y., Pompeu, D., Rogez, H. & Baeten, V. (2007). Phenolic Compound Explorer: A Mid Infrared Spectroscopy Database. *Vibrational Spectroscopy*, 92, 111-118. DOI: 10.1016/j.vibspec.2017.05.008.
16. Surendra, B. & Veerabhadraswamy, M. (2017). Microwave assisted synthesis of polymer via bioplatform chemical intermediate derived from Jatropha deoiled seed cake. *Journal of Sciences: Advanced Material and Devices*, 2, 340-346. DOI: 10.1016/j.jsamd.2017.07.004.
17. Latos-Brozio, M., Masek, A. & Piotrowska, M. (2022). Polymeric forms of plant flavonoids obtained by enzymatic reactions. *Molecules*, 27, 3702. DOI: 10.3390/molecules27123702.
18. Muniz-Mauro, A., Oliviera, I., Gullon, B., Lu-Chau, T., Moreira, M., Lema, J. & Eibes, J. (2017). Comprehensive investigation of the enzymatic oligomerization of esculetin by laccase in ethanol : water mixtures. *RSC Adv.*, 7, 38424-38433. DOI: 10.1039/c7ra06972c.
19. Catauro, M., Papale, F., Bollino, F., Piccolella, S., Marcianno, S., Nocera, P. & Pacifico, S. (2015). Silica/quercentin sol-gel hybrids as antioxidant dental implant materials. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 16, 035001. DOI: 10.1088/1468-6996/16/3/035001.
20. Tosovic, J. & Markovic, S. (2017). Reproduction and interpretation of the UV-vis spectra of some flavonoids. *Chem. Pap.*, 71(3), 543-552. DOI: 10.1007/s11696-016-0002-x.

Information about the authors

I.S. Cherepanov - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of «Fundamental and Applied Chemistry» of the Udmurt State University.

A.Yu. Sadrtdinova - 4th course student in chemistry of the Udmurt State University.

A.I. Egorova - Assistant of the Department of «Fundamental and Applied Chemistry» of the Udmurt State University.

D.A. Tarasova - Assistant of the Department of «Fundamental and Applied Chemistry» of the Udmurt State University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.