

DOI: 10.7868/S3034574X26020059
УДК 615.322+577.114.7

Оригинальная статья

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСОВ ПОЛИФЕНОЛОВ С ХИТОЗАНОМ

Л.В. Шульц^{1*}, А.А. Красноштанова¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», кафедра биотехнологии,
Москва, Российская Федерация

*E-mail: Leo-schulz@yandex.ru

Аннотация. Нерастворимые комплексы полифенолов растительных экстрактов с хитозаном представляют интерес в качестве возможной системы доставки полифенолов в кишечник. Рассмотрены комплексы полифенолов водного экстракта шалфея с хитозаном (полифенол-хитозановые комплексы, ПХК). Показано, что данные комплексы стабильны в нейтральной среде и высвобождают полифенолы в сильнокислой и щелочной средах. В модельных средах желудочно-кишечного тракта комплексы показали значительное высвобождение полифенолов в кишечнике при низком высвобождении в желудке и ротовой полости. Показано, что комплекс с хитозаном образуют по большей части гликозиды флавоноидов и, вероятно, фенольные кислоты, тогда как агликаны флавоноидов в комплексе присутствуют в следовых количествах.

Ключевые слова: полифенолы, флавоноиды, хитозан, комплексы, система доставки, тонкослойная хроматография, ИК-спектроскопия, растительные экстракты

Финансирование.

1. Исследование проведено без дополнительного финансирования.
2. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Соблюдение этических стандартов. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей и животных в качестве объектов.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи.

Ссылка для цитирования: Шульц Л.В., Красноштанова А.А. Получение и исследование комплексов полифенолов с хитозаном. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 2. С. 196–204. <https://doi.org/10.7868/S3034574X26020059>

© Л. В. Шульц, А. А. Красноштанова, 2026

OBTAINING AND STUDY OF POLYPHENOL AND CHITOSAN COMPLEXES

L.V.Shults^{1*}, A.A. Krasnoshtanova¹

¹*Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, department of biotechnology, Moscow, Russian Federation*

*E-mail: Leo-schulz@yandex.ru

Abstract. Insoluble complexes of polyphenols from plant extracts with chitosan are interesting as possible systems for delivering polyphenols to intestine. Complexes of polyphenols of aqueous sage extract with chitosan have been considered. It is shown that these complexes are stable in neutral medium and release polyphenols in highly acidic and highly alkaline mediums. The complexes have shown a significant release of polyphenols in simulated intestinal fluid with low releases in simulated gastric and salivary fluids. It is shown that complex with chitosan is formed mainly by flavonoid glycosides and probably phenolic acids, whereas flavonoid aglycones are present in complex in trace amounts.

Keywords: polyphenols, flavonoids, chitosan, complexes, delivery system, thin layer chromatography, IR spectroscopy, plant extracts

Funding.

1. The study was conducted without additional funding.
2. No additional grants were received for the conduct or supervision of this specific study.

Ethic declarations. This article does not contain any studies involving human or animal subjects.

Conflict of interests. The authors of this work declare that they have no conflicts of interest.

Author contributions. All authors made a significant contribution to the conception, conduct of the study, and preparation of the article.

For Citation: Shults L.V., Krasnoshtanova A.A. Obtaining and study of polyphenol and chitosan complexes. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology*. 2026;62(2):196–204. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034574X26020059>

ВВЕДЕНИЕ

Полифенолы являются веществами растительного происхождения, имеющими в своем составе несколько фенольных групп. Они могут быть как низкомолекулярными веществами, так и олиго- и полимерами. Выделяют следующие основные классы полифенолов: флавоноиды, танины, стильбены, фенольные кислоты. Также в некоторых публикациях выделяют классы халконов, катехинов (например, в [1, 2]), однако чаще их считают подклассами флавоноидов [3, 4]), а также лигнаны, ксантоны, антроны, куркуминоиды и другие классы [2, 3, 5]. Наиболее распространенным классом полифенолов являются флавоноиды, низкомолекулярные гетероциклические полифенолы с двумя ароматическими ядрами, производные флавона. Полифенолы могут находиться как в виде агликонов, так и в виде гликозидов, то есть связанные гликозидной связью с молекулой углевода. В целом, гликозиды встречаются среди всех классов полифенолов.

Полифенолы обладают рядом полезных для здоровья человека свойств, таких как противовоспалительные, противораковые, антимикробные, антиоксидантные [6]. Одной из биологических активностей полифенолов, которые представляют интерес для современной медицины, является способность ингибировать пищеварительные ферменты, ответственные за усвоение углеводов: амилазы и глюкозидазы. Такая активность может быть применена для терапии сахарного диабета [7, 8]. В связи с этим актуальным является вопрос доставки полифенолов в тонкий кишечник для реализации такой их активности, а также других полезных для человека биологических активностей.

Одной из основных задач при разработке системы доставки полифенолов в кишечник является предотвращение воздействия на них среды желудка, что может вызвать их разрушение или преждевременное всасывание. Данная задача решается созданием такой системы доставки, которая высвобождает полифенолы в среде кишечника и не высвобождает в среде желудка, то есть реализует контролируемое высвобождение [9]. Чаще всего этого добиваются при помощи рН-чувствительной системы доставки, обеспечивающей высвобождение в щелочной среде кишечника и не высвобождающей полифенолы в кислой среде желудка, что достигается, как правило, использованием заряженных полисахаридов (альгината, хитозана, ксантана и др.) [10, 11]. Кроме того, возможно использование в качестве носителей полифенолов пищевых волокон, устойчивых к средам желудочно-кишечного тракта человека и разрушаемых ферментами кишечной микрофлоры, что также обеспечивает направленную доставку полифенолов в кишечник. В частности, к таким пищевым

волокнам относятся пектин, инулин, гуаровая камедь [10].

Хитозан является линейным положительно заряженным полисахаридом, звеньями которого являются остатки D-глюкозамина, связанные β -(1 \rightarrow 4) связями. Поскольку хитозан получается путем деацелирования хитина, в нем также могут встречаться звенья N-ацетил-D-глюкозамина. Известны два типа соединений полифенолов с хитозаном: комплексы и конъюгаты.

В литературе имеется крайне мало сведений о спонтанно образующихся комплексах хитозана с полифенолами. В одном из исследований указывается, что комплекс такого типа образуется в две стадии: образование растворимого комплекса за счет нековалентных связей, смещение равновесия и осаждение комплекса. Образование данного типа комплекса, как правило, обратимо на всех этапах. Авторами отмечается, что скорость высвобождения полифенолов из данного комплекса возрастает с увеличением рН [12].

В другом исследовании был использован метод молекулярного докинга с генетическим алгоритмом Ламарка для предсказания взаимодействия флавоноидов с хитозаном. Были исследованы четыре флавоноида: артеметин, кверцетин (агликоны), кверцитрин (кверцетин-3-рамнозид) и рутин (кверцетин-3-O-рутинозид). Было показано, что среди исследованных флавоноидов только рутин не демонстрирует взаимодействия с хитозаном, что вызвано его высокой энергией кручения (torsional energy). Наибольший вклад в связывание с хитозаном вносят ван-дер-ваальсовы взаимодействия между кольцами флавоноидов и хитозана, также присутствуют электростатические взаимодействия в виде водородных связей [13].

Существенно больше исследований посвящено хитозан-полифенольным конъюгатам. Основное отличие конъюгатов от комплексов заключается в том, что конъюгаты образованы за счет ковалентного связывания полифенолов с хитозановой матрицей. В отличие от рассмотренных выше комплексов, конъюгаты получают за счет введения дополнительных химических агентов, обеспечивающих связывание полифенолов с хитозаном. Такими агентами могут быть 1-этил-3-(3-диметиламинопропил)карбодиимид (ЭДК), оксидазы, смесь пероксида водорода и аскорбиновой кислоты и другие вещества. При помощи ЭДК осуществляют модификацию активированным эфиром, суть которой заключается в том, что ЭДК соединяется с полифенолами с образованием O-ацилизомачевины, которая далее образует амидную связь с аминогруппой хитозана. Оксидазы используются для окисления полифенолов до хинонов, которые способны вступать с хитозаном в реакцию Михаэля или образовывать с ним основания Шиффа. Смесь пероксида водорода и аскорбиновой кислоты ис-

пользуется для генерирования свободных радикалов из аминокрупп, гидроксильных и метиленовых групп хитозана и полифенолов, что вызывает их ковалентное связывание [14].

Основным преимуществом использования конъюгатов полифенолов с хитозаном является то, что данные конъюгаты не имеют некоторых недостатков, присущих отдельно полифенолам и хитозану. Например, антиоксидантная активность полифенол-хитозановых конъюгатов зачастую выше, чем активности хитозана и полифенолов по отдельности. Также конъюгация с хитозаном повышает стабильность полифенолов в биологических средах, продлевая тем самым их потенциальный терапевтический эффект [14].

Хитозан-полифенольные конъюгаты демонстрируют, как правило, более высокую растворимость в воде по сравнению с нативным хитозаном. Это вызвано тем, что ковалентно связанные с хитозаном крупные молекулы полифенолов нарушают его кристалличность, препятствуя образованию межмолекулярных связей между цепями полисахарида. Данный механизм также снижает термостабильность конъюгатов по сравнению с нативным хитозаном [15].

Цель работы — исследование состава и свойств полифенол-хитозановых комплексов (ПХК) и рассмотрение их в качестве потенциального средства доставки полифенолов в кишечник.

МЕТОДИКА

Материалы. В качестве источника полифенолов был выбран водный экстракт шалфея лекарственного, полученный путем экстракции полифенолов водой при 95 °С в течение 1 ч из высушенных измельченных листьев шалфея, так как ранее [16] было показано, что этот метод является наиболее целесообразным для получения полифенольных экстрактов из шалфея. Соотношение массы сухих листьев шалфея к воде при экстракции 1:20. После экстракции твердые частицы отделяли от экстракта фильтрованием.

В исследовании использовали 1%-ный раствор пищевого хитозана производства Protein Company (Россия) с молекулярной массой 120 кДа (степень деацетилирования 80 %) в 1%-ной уксусной кислоте.

Измерение концентрации полифенолов в экстракте. Для определения концентрации полифенолов использовали метод Фолина-Чокальтеу [17]. Для этого к 150 мкл исследуемой пробы добавляли 2,4 мл дистиллированной воды, 150 мкл 2 М реактива Фолина-Чокальтеу, 300 мкл 0,7 М раствора карбоната натрия. После этого пробы перемешивали, выдерживали в темноте при комнатной температуре в течение 2 ч, затем измеряли оптическую плотность при длине волны 765 нм. Калибровоч-

ный график строили по стандартным растворам галловой кислоты. Результат представлен в г/л эквивалента галловой кислоты (ЭГК).

Оценка качественного состава растворов полифенолов. Для оценки качественного состава полифенолов в растворе использовали метод тонкослойной хроматографии (ТСХ) на пластинках Сорбфил (аналитические, сорбент: силикагель, размер частиц сорбента 5–17 мкм, подложка: алюминий). В качестве элюента использовали смесь этилацетат–уксусная кислота–вода в соотношении 5:1:1. Хроматограммы проявляли последовательно парами аммиака и 1%-ным спиртовым раствором хлорида алюминия. Хроматограммы изучали под ультрафиолетовым светом. В качестве веществ-свидетелей использовали водный раствор рутина как представителя гликозидов флавоноидов и ацетоновый раствор кверцетина как представителя агликонов флавоноидов, а также водный раствор галловой кислоты как представителя класса фенольных кислот.

Оценка качественного состава сухих веществ. Для качественной оценки сухих веществ использовали метод ИК-спектроскопии, проводимой методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Сухой порошкообразный образец помещали на поверхность призмы приставки НПВО, прижимали при помощи прижимного устройства, снимали ИК-спектр. ИК-спектры были получены в Центре коллективного пользования РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Моделирование условий ЖКТ. Для моделирования ЖКТ человека использовали буферные растворы с пищеварительными ферментами, описанные в работе [18] (буферные системы NaCl, KCl, MgCl₂, CaCl₂, KH₂PO₄, NaHCO₃ в различных соотношениях; для среды желудка pH дополнительно доводили до 2,5 1 М раствором HCl). В качестве источника ферментов использовали медицинские ферментные препараты «Панкреатин-ЛекТ» производства ОАО «Тюменский химико-фармацевтический завод» (Россия) для среды кишечника, «Ацидин-пепсин» производства ОАО «Белмедпрепараты» (Беларусь) для среды желудка. Инкубирование проводилось при 37 °С. В среде полости рта инкубирование проводили в течение 5 мин, в среде желудка и кишечника в течение 2 ч. Моделирование проводили в последовательном профиле, подразумеваемом следующее: после окончания инкубирования в каждом отделе ЖКТ твердый осадок отделяли от жидкой фазы и переносили в среду следующего отдела, в надосадочной жидкости определяли содержание полифенолов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получение ПХК. Для получения ПХК 1%-ный раствор хитозана в 1%-ной уксусной кислоте приливали к полифенольному экстракту шалфея.

Исследовали зависимость степени осаждения полифенолов с хитозаном от количества добавленного хитозана. Для этого к 1 мл экстракта шалфея приливали 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 и 0,5 мл раствора хитозана. Осадок отделяли центрифугированием, в надосадочной жидкости определяли содержание полифенолов. Результаты представлены на рис. 1.

Как видно по рис. 1, в исследуемом диапазоне степень осаждения практически не зависела от количества добавленного хитозана и составляла около 40 %. Это может свидетельствовать о том, что с хитозаном связываются определенные фракции полифенолов, в то время как остальные полифенолы не способны к связыванию с хитозаном в нерастворимый комплекс.

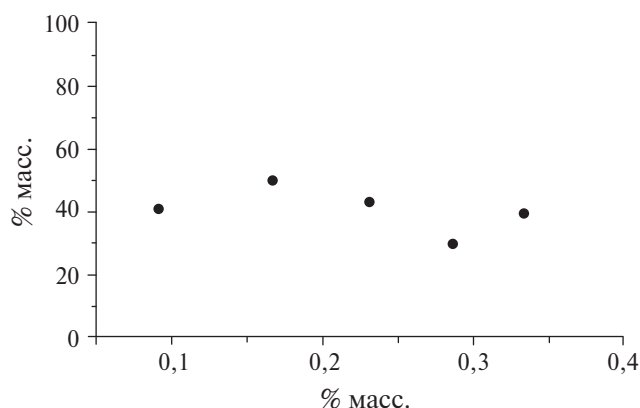


Рис. 1. Зависимость степени осаждения полифенолов (%) от содержания хитозана (%) в смеси

Fig. 1. Dependence of the degree of precipitation of polyphenols (%) on the chitosan content (%) in the mixture

Для дальнейшего исследования получали ПХК при содержании хитозана в конечной смеси 0,09 %, что соответствовало соотношению объемов экстракта и раствора хитозана 10:1. Осадок отделяли центрифугированием, промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе.

Следует отметить, что полифенолы способны выпадать в осадок при снижении рН среды. Так как раствор хитозана имеет кислую среду (1 % уксусной кислоты), измеряли рН смеси раствора хитозана с экстрактом в данном соотношении и определяли степень осаждения полифенолов при этом значении рН без добавления хитозана. Доведение рН осуществляли 0,05 М раствором HCl. При рН среды 4,5 полифенолы экстракта шалфея показали степень осаждения около 1 %. Исходя из данного факта, можно заключить, что осаждение полифенолов не может быть объяснено только смещением рН в кислую сторону, что доказывает взаимодействие полифенолов с хитозаном.

Оценка качественного состава ПХК. Качественный состав ПХК исследовали с помощью ИК-спектроскопии. На рис. 2 и 3 представлены ИК-спектры

воздушно-сухого экстракта и полученного ПХК. На рис. 4 приведен ИК-спектр чистого хитозана для сравнения.

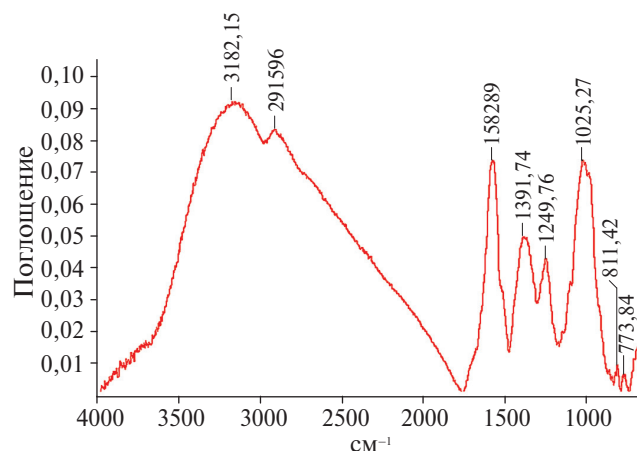


Рис. 2. ИК-спектр воздушно-сухого водного экстракта шалфея

Fig. 2. IR spectrum of air-dry aqueous sage extract

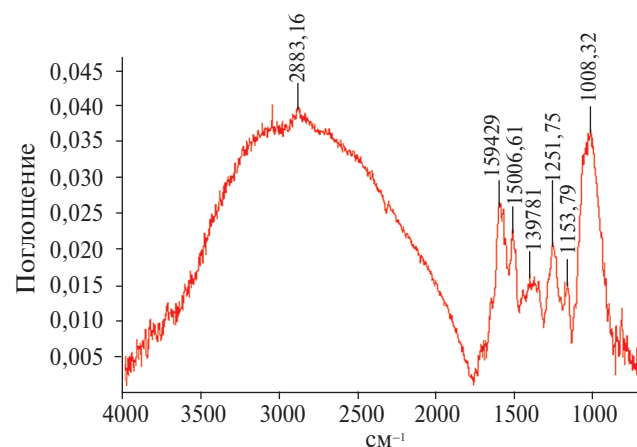


Рис. 3. ИК-спектр ПХК

Fig. 3. IR spectrum of PCBs

Можно отметить, что на спектре рис. 3 наблюдалось два пика в диапазоне 1700–1600 см⁻¹, которые не видны на спектре рис. 2. На спектре рис. 2 в этом диапазоне присутствовало плечо пика 1582 см⁻¹, что может свидетельствовать о перекрытии этих пиков пиком бензольного кольца полифенолов. Пики в данном диапазоне соответствовали ароматическим карбоновым кислотам и их анионам, что говорит о том, что с хитозаном связываются фенольные кислоты в среднем интенсивнее других полифенолов, и их содержание в полученном комплексе выше, чем в экстракте. Кроме того, в данном диапазоне находится пик валентного колебания карбонильной группы флавоноидов.

Определение условий высвобождения полифенолов из ПХК. Для определения условий высвобождения исследовали высвобождение полифенолов из

комплекса при различных значениях pH. Навеску 0,02 г воздушно-сухого ПХК помещали в 10 мл среды с различными значениями pH и выдерживали в течение 1 ч при комнатной температуре при постоянном перемешивании. В надосадочной жидкости определяли концентрацию полифенолов. Результаты приведены на рис. 5.

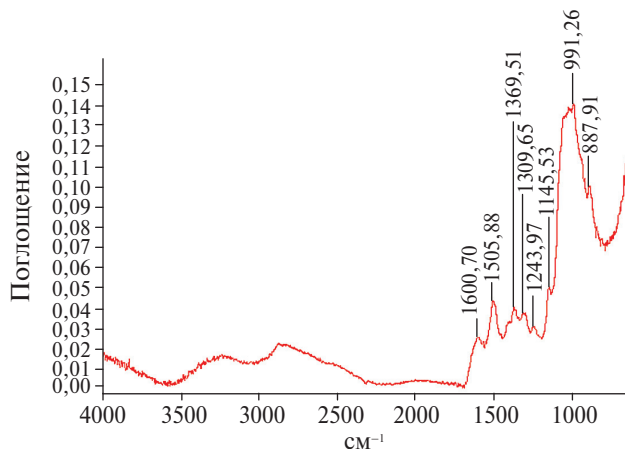


Рис. 4. ИК-спектр хитозана
Fig. 4. IR spectrum of chitosan

Как видно по рис. 5, ПХК стабилен при pH от 3 до 9 и высвобождает полифенолы в сильнокислой и сильнощелочной средах. При этом высвобождение в кислых средах происходило более резко при падении pH, чем в щелочных средах при увеличении pH. При pH меньше 3,0 наблюдается резкий рост концентрации полифенолов и плавный рост при pH выше 6,0. Наблюдаемый рост концентрации полифенолов в кислой среде, вероятно, связан с высоким содержанием фенольных кислот, в частности, розмариновой кислоты в экстракте шалфея.

Полученные данные, а также ИК-спектры позволили предположить, что взаимодействие полифенолов с хитозаном происходило за счет образования нековалентных связей, то есть водородных и ионных. В кислой среде высвобождение полифенолов происходило, по-видимому, за счет протонирования полифенолов и вытеснения их анионов из комплекса более сильной кислотой, тогда как в щелочной среде происходило депротонирование аминогрупп хитозана, из-за чего падало его сродство к анионам полифенолов. Таким образом, нерастворимость комплекса может быть объяснена разрушением гидратной оболочки растворенного хитозана за счет вытеснения полифенолами молекул воды из связей с аминогруппой.

Моделирование переваривания ПХК. Для оценки возможности использования ПХК как средства доставки полифенолов в кишечник исследовали его перевариваемость в модельных средах, имитирующих среды ЖКТ человека. Инкубирование проводили при 37 °С последовательно 5 мин в среде ротовой полости и по 2 ч в средах желудка

и кишечника. Для переваривания была взята навеска 0,19 г ПХК, объем каждой из сред составлял 20 мл. Оценивали выход полифенолов из ПХК в конце каждой стадии переваривания. Результаты представлены на рис. 6 (а).

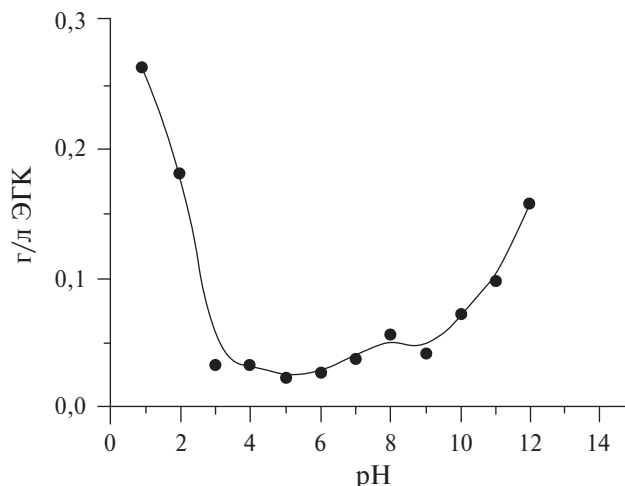


Рис. 5. Зависимость концентрации полифенолов в надосадочной жидкости при высвобождении из ПХК от pH
Fig. 5. Dependence of the concentration of polyphenols in the supernatant upon release from PCBs on pH

Как видно по рис. 6 (а), выход полифенолов в среде кишечника при последовательном переваривании значительно превышал таковой в средах ротовой полости и желудка. Несмотря на представленные выше данные о более интенсивном высвобождении полифенолов из ПХК в кислой среде по сравнению со щелочной, моделирование переваривания показало значительно более высокий выход полифенолов в кишечнике при pH 9,0, чем в желудке при pH 2,5. Вероятно, причиной этому является высокое содержание минеральных веществ, в частности, карбонатов в среде кишечника, которые также способствуют разрушению ПХК, вытесняя полифенолы из комплекса.

Из данных, представленных на рис. 5 и 6 (а), обнаруживается противоречие, заключающееся в том, что выход полифенолов в среде желудка существенно зависит от pH. По рис. 5 видно, что в области физиологических значений pH желудочного сока наблюдался резкий скачок выхода полифенолов из ПХК. Для разрешения данного противоречия провели дополнительное исследование выхода полифенолов из ПХК при моделировании переваривания в средах желудка и кишечника, при этом pH среды желудка варьировали от 1 до 3. Результаты приведены на рис. 6.

Как видно по рис. 6 (б), при pH среды желудка 1,0 выход полифенолов из ПХК в желудке превышал выход в кишечнике. Таким образом, полученные

данные позволяют рассматривать ПХК в качестве потенциального средства доставки полифенолов в кишечник, что может быть использовано, в частности, в терапии сахарного диабета для ингибирования кишечных амилаз и глюкозидаз полифенолами. Однако

при высокой кислотности желудочного сока ПХК как система направленной доставки полифенолов в кишечник теряет эффективность в связи с выходом полифенолов в желудке. Дальнейшие исследования будут направлены на решение данной проблемы.

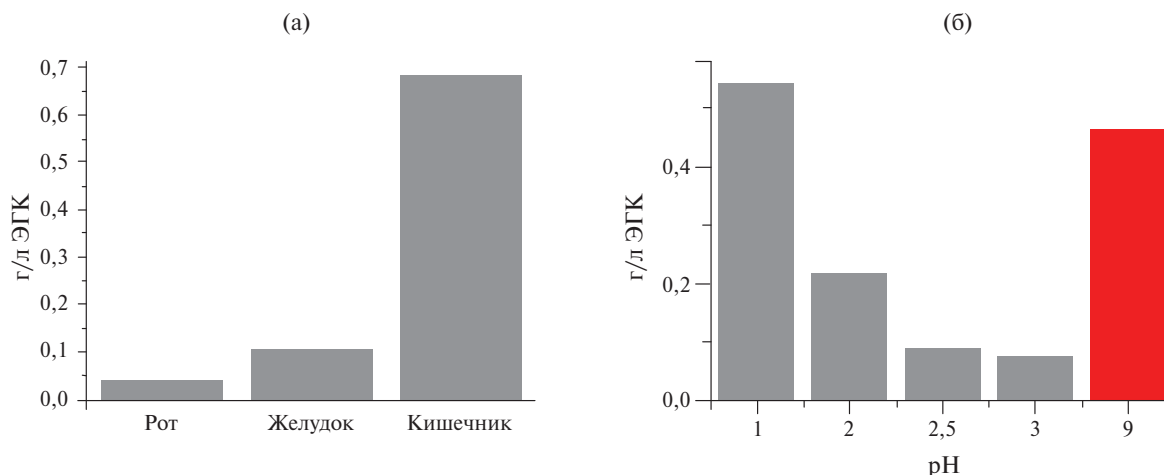


Рис. 6. Концентрация полифенолов после инкубирования в модельных средах ЖКТ (а) и в средах кишечника (красный) и желудка при различных рН (серый) (б)

Fig. 6. Concentration of polyphenols after incubation in model gastrointestinal media (a) and in intestinal media (red) and stomach at different pH (gray) (b)

Исследование состава ПХК. Для оценки состава полифенолов, входящих в ПХК, использовали метод тонкослойной хроматографии. При проведении хроматографии исследовали следующие растворы: 1 — водный экстракт шалфея; 2 — надосадочную жидкость после осаждения ПХК; 3 — раствор полифенолов, вышедших из ПХК в 0,1 н растворе гидроксида натрия; 4 — раствор полифенолов, высвобождаемых из ПХК в 0,1 н растворе соляной кислоты.

На хроматограммах наблюдались три основные группы пятен: со значениями R_f ~0,45 (группа 1, желтая флуоресценция), ~0,7 (группа 2, желтая и зеленая флуоресценция), ~0,97 (группа 3, зеленая флуоресценция). Рутин принадлежит к группе 1, кверцетин — к группе 3, галловая кислота по значению R_f близка к группе 3, но не демонстрирует флуоресценции. Отсюда был сделан вывод, что группу 1 составляли гликозиды флавоноидов, группу 2, по-видимому, составляли как гликозиды, так и агликony флавоноидов, а группу 3 составляли агликony флавоноидов и фенольные кислоты. Кроме того, в пробе 4 наблюдалось отчетливое пятно с R_f 0,14, не показавшее флуоресценции и, вероятно, принадлежащее к нефлавоноидным классам полифенолов.

Из полученных результатов видно, что в ПХК присутствуют в основном гликозиды флавоноидов, однако не все гликозиды флавоноидов способны образовывать ПХК. Агликony флавоноидов в ПХК находятся в следовых количествах. Также агликony могут присутствовать в ПХК вследствие наличия в

нем остаточного физически захваченного экстракта, не связанного с хитозановой матрицей.

Таким образом, были рассмотрены особенности взаимодействия хитозана с растительными полифенольными экстрактами, а также возможность использования получаемых при этом ПХК в качестве системы доставки полифенолов в кишечник. Рассмотрены особенности химического состава и свойств ПХК. Были получены следующие выводы.

1. Хитозан эффективно и обратимо связывает определенные фракции полифенолов в растительных экстрактах за счет образования нековалентных водородных и ионных связей полифенолов с аминогруппой хитозана;

2. Комплекс хитозана с полифенолами устойчив при нейтральном рН и высвобождает полифенолы в сильнокислой и сильнощелочной средах, вероятно, вследствие реакций ионного обмена;

3. В комплексе хитозана с полифенолами присутствуют определенные фракции гликозидов флавоноидов, следовые количества агликонov флавоноидов и, вероятно, фенольные кислоты;

4. Комплекс хитозана с полифенолами может служить основой для создания системы доставки полифенолов в кишечник с минимальными потерями полифенолов в среде желудка. При высокой кислотности среды желудка комплекс теряет эффективность как система доставки полифенолов в кишечник в связи с утечкой полифенолов в желудке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mojzis J. et al.* Antiangiogenic effects of flavonoids and chalcones // *Pharmacological research*. 2008. Vol. 57. № 4. P. 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2008.02.005>
2. *Корнякова В.В., Муратов В.А., Лацерус К.В.* Использование полифенолов в медицине для профилактики и лечения заболеваний // *Научное обозрение. Медицинские науки*. 2024. № 2. С. 21–26. <https://doi.org/10.17513/srms.1389>
3. *Tsimogiannis D., Oreopoulou V.* Classification of phenolic compounds in plants // *Polyphenols in plants*. Academic Press, 2019. P. 263–284. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813768-0.00026-8>
4. *Bulea M. et al.* Flavonoids (flavones, flavonols, flavanones, flavanonols, flavanols or flavan-3-ols, isoflavones, anthocyanins, chalcones/coumestans) // *Recent Advances in Natural Products Analysis*. 2015. P. 42–56.
5. *Singla R.K. et al.* Natural polyphenols: Chemical classification, definition of classes, subcategories, and structures // *Journal of AOAC International*. 2019. Vol. 102. № 5. P. 1397–1400. <https://doi.org/10.1093/jaoac/102.5.1397>
6. *Xiao J., Kai G. et al.* Advance in dietary polyphenols as α -glucosidases inhibitors: a review on structure-activity relationship aspect // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2013. Vol. 53. № 8. P. 818–836. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.561379>
7. *Кунакова Р.В. и др.* Растения как перспективные источники ингибиторов амилазы при разработке функциональных продуктов питания и профилактики сахарного диабета // *Вестник Академии наук Республики Башкортостан*. 2016. Т. 21. № 1 (81). С. 6–15.
8. *Sales P.M. et al.* α -Amylase inhibitors: a review of raw material and isolated compounds from plant source // *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*. 2012. № 15 (1). P. 141–183. <https://doi.org/10.18433/j35s3k>
9. *Школьникова М.Н., Воронова Е.В.* Микрокапсулирование полифенолов как способ повышения их биодоступности в составе пищевых систем: обзор современных технологий // *Индустрия питания/Food Industry*. – 2021. Т. 6. № 2. С. 90–98. <https://www.doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-2-11>
10. *Tang H.Y. et al.* Dietary fiber-based colon-targeted delivery systems for polyphenols // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 100. P. 333–348. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.028>
11. *Micale N. et al.* Hydrogels for the delivery of plant-derived (poly) phenols // *Molecules*. 2020. Vol. 25. № 14. P. 3254. <https://doi.org/10.3390/molecules25143254>
12. *Popa M.I. et al.* Study of the interactions between polyphenolic compounds and chitosan // *Reactive and Functional Polymers*. 2000. Vol. 45. № 1. P. 35–43. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(00\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(00)00009-2)
13. *de Oliveira Neto D. et al.* Flavonoid interaction with chitosan: Planning active packing with antioxidant and antimicrobial activity // *Mol2net*. 2017. <https://www.doi.org/10.3390/mol2net-03-04626>
14. *Pattnaik A. et al.* Chitosan-polyphenol conjugates for human health // *Life*. 2022. Vol. 12. № 11. P. 1768.
15. *Hu Q., Luo Y.* Polyphenol-chitosan conjugates: Synthesis, characterization, and applications // *Carbohydrate polymers*. 2016. Vol. 151. P. 624–639. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.109>
16. *Шульц Л.В., Красноштанова А.А.* Экстракция фенольных веществ из листьев шалфея // *Наука и технологии - 2023: сборник статей III Международной научно-практической конференции (5 декабря 2023 г.)*. Петрозаводск: МЦНП «НОВАЯ НАУКА». 2023. С. 139–146.
17. *Ainsworth E. A., Gillespie K.M.* Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin–Ciocalteu reagent // *Nature protocols*. 2007. Vol. 2. № 4. P. 875–877. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102>
18. *Minekus M. et al.* A standardised static in vitro digestion method suitable for food—an international consensus // *Food & function*. 2014. Vol. 5. № 6. P. 1113–1124. <https://doi.org/10.1039/C3FO60702J>

REFERENCES

1. *Mojzis J. et al.* Antiangiogenic effects of flavonoids and chalcones. *Pharmacological research*. 2008. Vol. 57. № 4. P. 259–265. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2008.02.005>
2. *Korniyakova V.V., Muratov V.A., Lacerus K.V.* Use of polyphenols in medicine for the prevention and treatment of diseases. *Scientific Review. Medical Sciences*. 2024. No. 2. P. 21–26. <https://doi.org/10.17513/srms.1389>
3. *Tsimogiannis D., Oreopoulou V.* Classification of phenolic compounds in plants. *Polyphenols in plants*. Academic Press, 2019. P. 263–284. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813768-0.00026-8>
4. *Bulea M. et al.* Flavonoids (flavones, flavonols, flavanones, flavanonols, flavanols or flavan-3-ols, isoflavones, anthocyanins, chalcones/coumestans). *Recent Advances in Natural Products Analysis*. 2015. P. 42–56.

5. Singla R.K. et al. Natural polyphenols: Chemical classification, definition of classes, subcategories, and structures. *Journal of AOAC International*. 2019. Vol. 102. № 5. P. 1397–1400. <https://doi.org/10.1093/jaoac/102.5.1397>
6. Xiao J., Kai G et al. Advance in dietary polyphenols as α -glucosidases inhibitors: a review on structure-activity relationship aspect. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2013. Vol. 53. № 8. P. 818–836. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.561379>
7. Kunakova R.V. et al. Plants as promising sources of amylase inhibitors in the development of functional foods and the prevention of diabetes mellitus. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 2016. Vol. 21. No. 1 (81). P. 6–15.
8. Sales P.M. et al. α -Amylase inhibitors: a review of raw material and isolated compounds from plant source. *Journal of Pharmacy & Pharmaceutical Sciences*. 2012. № 15 (1). P. 141–183. <https://doi.org/10.18433/j35s3k>
9. Shkolnikova M.N., Voronova E.V. Microencapsulation of polyphenols as a way to increase their bioavailability in food systems: a review of modern technologies. *Food Industry*. - 2021. Vol. 6. No. 2. P. 90–98. <https://www.doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-2-11>
10. Tang H.Y. et al. Dietary fiber-based colon-targeted delivery systems for polyphenols. *Trends in Food Science & Technology*. 2020. Vol. 100. P. 333–348. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.028>
11. Micale N. et al. Hydrogels for the delivery of plant-derived (poly) phenols. *Molecules*. 2020. Vol. 25. №. 14. P. 3254. <https://doi.org/10.3390/molecules25143254>
12. Popa M.I. et al. Study of the interactions between polyphenolic compounds and chitosan. *Reactive and Functional Polymers*. 2000. Vol. 45. № 1. P. 35–43. [https://doi.org/10.1016/S1381-5148\(00\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S1381-5148(00)00009-2)
13. de Oliveira Neto D. et al. Flavonoid interaction with chitosan: Planning active packing with antioxidant and antimicrobial activity. *Mol2net*. 2017. <https://www.doi.org/10.3390/mol2net-03-04626>
14. Pattnaik A. et al. Chitosan-polyphenol conjugates for human health. *Life*. 2022. Vol. 12. № 11. P. 1768.
15. Hu Q., Luo Y. Polyphenol-chitosan conjugates: Synthesis, characterization, and applications. *Carbohydrate polymers*. 2016. Vol. 151. P. 624–639. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.05.109>
16. Shults L.V., Krasnoshtanova A.A. Extraction of phenolic substances from sage leaves. *Science and Technology - 2023: collection of articles from the III International Scientific and Practical Conference (December 5, 2023)*. Petrozavodsk: MCNP “NEW SCIENCE”. 2023. P. 139–146.
17. Ainsworth E. A., Gillespie K.M. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin–Ciocalteu reagent. *Nature protocols*. 2007. Vol. 2. № 4. P. 875–877. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.102>
18. Minekus M. et al. A standardised static in vitro digestion method suitable for food—an international consensus. *Food & function*. 2014. Vol. 5. № 6. P. 1113–1124. <https://doi.org/10.1039/C3FO60702J>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шульц Леонид Викторович — аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, кафедра биотехнологии, Москва, Российская Федерация
E-mail: Leo-schulz@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0007-0721-3454>

Красноштанова Алла Альбертовна — доктор химических наук, профессор, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, кафедра биотехнологии, Москва, Российская Федерация
E-mail: aak28@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1095-2641>

Поступила в редакцию 12.05.2025
После доработки 25.08.2025
Принята к публикации 05.12.2025

ABOUT THE AUTHORS

Shults, Leonid V. — Postgraduate, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Department of Biotechnology, Moscow, Russian Federation
E-mail: Leo-schulz@yandex.ru
<https://orcid.org/0009-0007-0721-3454>

Krasnoshtanova, Alla A. — Dr. Sci. in Chemistry, Professor, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Department of Biotechnology, Moscow, Russian Federation
E-mail: aak28@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1095-2641>

Received May 12, 2025
Revised August 25, 2025
Accepted December 05, 2025