

<https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i1.s287>

Супрамолекулярная структура и функциональные характеристики пектиновых полисахаридов

В. Н. Голубев¹, Т. Б. Цыганова²

¹ Научно-технологический парк университета Жироны, Жирона, Испания

² Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

Корреспонденция:

Цыганова Татьяна Борисовна,
Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ),
125080, Россия, г. Москва,
Волоколамское шоссе, 11
E-mail: tsyganovatb@mgupp.ru

Конфликт интересов:

авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 15.07.2025

Поступила после
рецензирования: 09.02.2026

Принята: 30.03.2026

Copyright: © 2026 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время наблюдается рост числа исследований, посвященных пектинам, которые приобретают всё большее значение и широко применяются в пищевой и фармацевтической промышленности, а также в биомедицинских исследованиях.

Цель. Данный обзор показывает, что направленное конструирование супрамолекулярных пектиновых систем и создание из них строительных блоков высокоупорядоченных супрамолекулярных соединений с заданной структурой и свойствами стало одной из важнейших задач современной химии.

Материалы и методы. В качестве материала для исследования использованы научные публикации, отобранные по следующим критериям: год издания (2009–2024), география изданий, цитируемость, достоверность результатов относительно структурных характеристик пектиновых полисахаридов и их функциональных свойств. Поиск и отбор статей осуществлялся в библиографических базах eLIBRARY.RU, RSCI, Scopus, Web of Science, PubMed, после чего был выполнен анализ полученных результатов с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением с использованием элементов искусственного интеллекта.

Результаты. В результате можно констатировать, что существует широкий спектр химических соединений и биополимеров, совместимых с пектиновыми полисахаридами, что позволяет получать супрамолекулярные структуры с новыми свойствами, которые можно целенаправленно модифицировать, в том числе для выполнения конкретных биомедицинских задач.

Выводы. Анализ позволяет сделать вывод, что в настоящее время активно изучается объединение пектина с другими биополимерами, гибридными наночастицами и минеральными соединениями для улучшения его функциональных свойств, включая растворимость, стабильность, антиоксидантную активность и физиологическую совместимость.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

пектин; структурные характеристики; пищевые системы; биомедицинские системы; конъюгаты пектина; супрамолекулярная структура



Для цитирования: Голубев, В. Н., & Цыганова, Т. Б. (2026). Супрамолекулярная структура и функциональные характеристики пектиновых полисахаридов. *Health, Food & Biotechnology*, 8(1), 27–40. <https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i1.s287>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i1.s287>

Supramolecular Structure and Functional Characteristics of Pectin Polysaccharides

Vladimir N. Golubev¹, Tatyana B. Tsyganova²

¹ Scientific and Technological Park of the University of Girona, Girona, Spain

² Russian Biotechnology University (BIOTECH University), Moscow, Russia

Correspondence:

Tatyana B. Tsyganova,
Russian Biotechnology University
(BIOTECH University),
125080, Russia, Moscow,
Volokolamskoe shosse, 11
E-mail: tsyganovtb@mgupp.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 15.07.2025

Received in revised form: 09.02.2026

Accepted: 30.03.2026

Copyright: © 2025 The Authors

ABSTRACT

Introduction. Currently, there is a growing number of studies devoted to pectins, which are gaining increasing importance and are widely used in the food and pharmaceutical industries, as well as in biomedical research.

Purpose. This review shows that the targeted design of supramolecular pectin systems and the creation of building blocks of highly ordered supramolecular compounds with a given structure and properties from them have become one of the most important tasks of modern chemistry.

Materials and Methods. The object of study in this work was scientific publications, most of which were published between 2009 and 2024. The search and selection of research on pectin conjugates were carried out in the bibliographic databases eLIBRARY.RU, RSCI, Scopus, Web of Science, PubMed, taking into account the structural features of various types of pectins, including modified ones, based on ideas about the supramolecular structure of pectin polysaccharides.

Results. As a result, it can be concluded that there is a wide range of chemical compounds and biopolymers compatible with pectin polysaccharides, which makes it possible to obtain supramolecular structures with new properties that can be purposefully modified, including for specific biomedical applications.

Conclusion. The analysis shows that the combination of pectin with other biopolymers, hybrid nanoparticles and mineral compounds is currently being actively studied to improve its functional properties, including solubility, stability, antioxidant activity and physiological compatibility.

KEYWORDS

pectin; structural characteristics; food systems; biomedical systems; pectin conjugates; supramolecular structure



To cite: Golubev, V. N., & Tsyganova, T. B. (2026). Supramolecular structure and functional characteristics of pectin polysaccharides. *Health, Food & Biotechnology*, 8(1), 27–40. <https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i1.s287>

ВВЕДЕНИЕ

Пектиновые полисахариды — это класс растительных биополимеров, широко варьирующих как структурно, так и функционально (Kertesz, 1951). Основным признаком всех пектинов является наличие в их структуре галактуроновой кислоты, которая придает молекуле отрицательный заряд. Специфику строения пектиновым полисахаридам, влияющую на их свойства, функции и применение, может придавать как химический состав основной цепи, где остатки галактуроновой кислоты могут быть модифицированы, так и состав и длина боковых цепей рамногалактуронана I (Оводов, 2009). Линейная структура полигалактуроновой кислоты прерывается внедрением (1→2) — связанной L-рамнозы, которая является точкой присоединения боковых цепей, содержащих такие моносахара, как D-галактоза, L-арабиноза, D-ксилоза и др. В зависимости от природы пектинсодержащего сырья содержание L-рамнозы в молекулярной цепи пектина составляет от 1% до 9,2% (Tsai, 2007). Физико-химические и биологические свойства разных типов пектинов зависят от их структуры, а разнообразие структур даже в рамках одного типа полисахарида говорит о широком спектре возможного применения этих природных полимеров (Птичкин & Птичкина, 2012).

Аналогично белкам, надмолекулярные структуры полисахаридов могут быть определены на нескольких уровнях структурной организации, которые стабилизируются с помощью различных типов молекулярных воздействий (Tsai, 2007). В частности, ключевой особенностью первичной структуры полисахарида является наличие цепочки из остатков α-D-галактуроновой кислоты, при этом выделяют несколько структурных подтипов: гомогалактуронан (GalA), рамногалактуронан I (RG-I) и рамногалактуронан II (RG-II). Карбоксильные группы остатков гомогалактуронана могут быть модифицированы, например, этерифицированы метилом, ацетилированы или амидированы (Оводов, 2009) (Рисунок 1).

Рамногалактуронаны I (RG-I) образованы чередующимися остатками галактуроновой кислоты и рамнозы: [→4)-α-D-GalpA(1→2)-α-L-Rhap(1→)], которые могут различаться по длине цепочки, составу и структуре расположения боковых цепей, а также по наличию модифицирующих групп (Оводов, 2009). Рамногалактуронан II (RG-II) имеет очень сложную структуру, представляющую собой цепь гомогалактуронана длиной как минимум семь мономеров α-D-GalpA, к которой прикреплены четыре различных олигосахаридных цепочки (Оводов, 2009).

Первичная структура полисахаридной молекулы оказывает непосредственное влияние на её вторичную структуру, основными вариантами которой являются спирали, форма которых зависит от количества мономеров входящих на виток и шаг спирали. Это как правило,

ленточные структуры, в том числе и гофрированные, сформированные аксиальными связями, которые почти параллельны друг другу, но смещены относительно пиранозного кольца (Rees, 1977). Вторичная структура может быть стабилизирована внутримолекулярными водородными связями, электростатическими взаимодействиями и силами Ван-дер-Ваальса. Межмолекулярные ассоциации вторичных структур за счет межмолекулярных водородных связей или межмолекулярных переплетений цепей приводят к образованию третичной структуры полисахаридов (Muller, 1986). Четвертичная структура полисахаридов формируется в результате ассоциации индивидуальных молекул, которые легко накладываются друг на друга и создают надмолекулярные образования за счет многочисленных водородных связей. В результате формируются структуры, регулярные в трех измерениях, устанавливаются трехмерные сети или гели (Lang & Kajiwara, 1993).

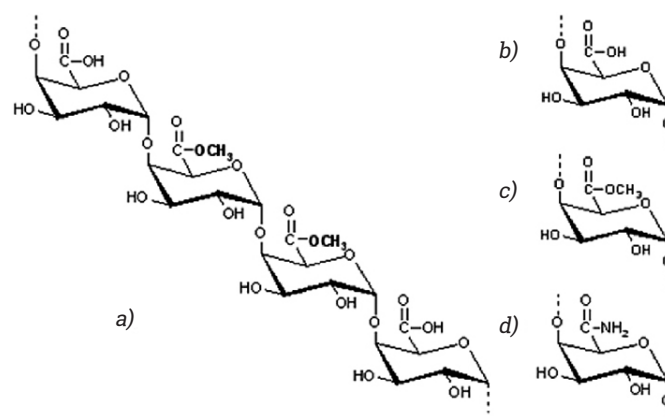
Структура полисахаридов непосредственно в геноме не кодируется и существует некоторая вариабельность многих параметров их строения (молекулярная масса, длина и расположение боковых цепей, наличие модифицирующих групп и т. д.) (Голубев & Цыганова, 2024). Формат этой вариабельности ограничивается «функциональной пригодностью», которая во многом основана на параметрах пространственной организации и способности к формированию супрамолекулярных структур определенного типа в водных растворах (Горшкова и соавт., 2013). При этом образующаяся трехмерная супра-

Рисунок 1

Структура цепи гомогалактуронана и типы модифицирующих групп, входящих в его состав (Sriamornsak, 2003)

Figure 1

The Structure of the Homogalacturonan Chain and the Types of Modifying Groups it Contains (Sriamornsak, 2003)



Примечание. (a) — структура цепи гомогалактуронана; (b) — карбоксильная группа; (c) — метоксильная, (d) — амидная.

Note. (a) — homogalacturonan chain structure; (b) — carboxyl group; (c) — methoxyl group; (d) — amide group.

молекулярная структура захватывает и иммобилизует окружающие молекулы растворителя как в полости кар-каса, так и в результате специфических межмолекулярных взаимодействий, а размер первичной, вторичной и третичной структур супрамолекулярного комплекса составляет соответственно 5 Å – 10 нм – 10 μм (Estroff & Hamilton, 2004).

Высокометоксилированные пектины (50 % остатков галактуроновой кислоты в составе метилэтерифицировано) способны образовывать «кислые гели» за счет гидрофобных взаимодействий метиловых групп и создания водородных связей между карбоксильными и гидроксильными группами. Для формирования гелей необходима кислая среда и присутствие низкомолекулярных углеводов, в частности сахарозы (May, 1986). Низкометоксилированные пектины (50 % остатков галактуроновой кислоты в составе метилэтерифицированного пектина) образуют гели за счет сшивания ионизированных карбоксильных групп через бивалентные катионы (обычно Ca²⁺). В этом случае присутствие низкомолекулярных углеводов и кислот не обязательно, и такая надмолекулярная структура получила название «egg-box» (Рисунок 2) (Axelos & Thibault, 1991).

Полученные в настоящее время сведения об особенностях структурной агрегации пектинов в зависимости от их молекулярной и надмолекулярной структуры дают инновационную основу для эффективного использования различных типов пектиновых полисахаридов в пищевых и биомедицинских технологиях (Freitas et al., 2021, Нечаев и соавт. 2024; Фарзалиев и соавт., 2021). Ионотропные гели на основе низкометоксилированных пектинов, полученные методом внутреннего гелеобразования, имеют большой потенциал как в основе низкокалорийных пищевых продуктов, так и в качестве перспективных материалов для биомедицины. Регулируемые механические свойства, биоразлагаемость, биосовместимость, а также способность загружать и высвобождать биогенные и лекарственные соединения открывают широкие перспективы применения пектиновых полисахаридов.

Цель обзора – анализ и обобщение исследований, направленных на изучение взаимосвязи структурных особенностей и функциональных свойств пектиновых полисахаридов, включая супрамолекулярные представления о пектиновых веществах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материала для исследования использованы научные публикации, отобранные по следующим критериям: год издания (2009–2024), география изданий, цитируемость, достоверность результатов относительно структурных характеристик пектиновых полисахаридов и их функциональных свойств.

Поиск и отбор статей осуществлялся в библиографических базах eLIBRARY.RU, RSCI, Scopus, Web of Science, PubMed, после чего был выполнен анализ полученных результатов с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением с использованием элементов искусственного интеллекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Супрамолекулярные системы на основе пектиновых полисахаридов

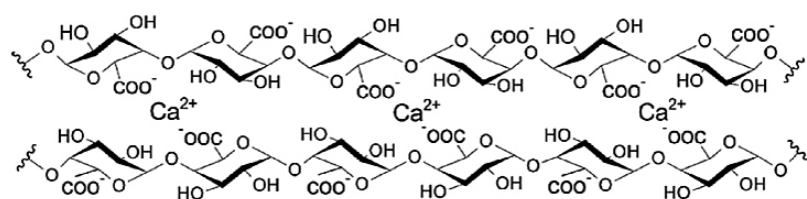
Супрамолекулярные системы стремительно ворвались в современные научные исследования и технологии, что вызвано прежде всего уникальными свойствами таких структур, способных к самопроизвольному образованию и легкой трансформации под воздействием технологических факторов – температуры, pH и химического состава сред, что обусловлено динамическим характером межмолекулярных взаимодействий, лежащих в основе их формирования (Antipin et al., 2021). Особый интерес в последнее время привлекает дизайн самоорганизующихся функциональных супрамолекулярных систем на основе пектиновых полисахаридов, которые уже стали основой для создания функцио-

Рисунок 2

Структура «egg-box», формируемая молекулами полигалактуроновой кислоты в присутствии ионов кальция (Gawkowska et al., 2018)

Figure 2

“Egg-box” Structure Formed by Polygalacturonic Acid Molecules in the Presence of Calcium Ions (Gawkowska et al., 2018)



нальных пищевых продуктов с заданными характеристиками (Yemenicioglu et al., 2020, Фаткуллин и соавт. 2021), перспективных биоматериалов и лекарственных средств (Manzoor et al. 2020; Eivazzadeh-Keihan et al. 2022). Пектиновые вещества в принципе сами являются супрамолекулярной структурой на основе кислоты (14)- β -D-галактуронана (Tsai, 2007). Одним из критериев, обеспечивающих функциональную пригодность пектинов и востребованность этих биополимеров в различных технологиях, может служить специфика формирования ими супрамолекулярных структур в зависимости от наличия в структуре определенных элементов и особенностей. В частности, молекулы пектиновых полисахаридов способны к самопроизвольной агрегации в водных растворах, причем подкисление и снятие заряда с карбоксильных групп приводит к дополнительной агрегации молекул (Phillips & Williams, 2020). Особый интерес представляют гели на основе низкоэтерифицированного пектина, которые имеют медленную кинетику гелеобразования, что позволяет избежать преждевременного гелеобразования и получать однородные гели для биоматериалов, которые используются в регенеративной медицине для доставки лекарственных препаратов и заживления ран (Vokov et al., 2020). Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет визуализацию супрамолекулярной структуры пектиновых гелей в виде разветвленных и изогнутых цепей, удерживаемых вместе нековалентными взаимодействиями (Fishman et al., 2004) (Рисунок 3).

Эти изображения показывают, что пектиновый сетевой каркас в отсутствие сахарозы (А) представляет собой частично сшитую сеть, в которой многие из сшивающих фрагментов связаны только на одном конце. Визуальный осмотр показывает, что плотность пектиновых молекул в гелях из низкоэтерифицированного пектина выше, чем в гелях из высокометоксилированного пектина. Исследования показали, что при соответствующих условиях ионной силы и рН-линейные молекулы пектина могут подвергаться агрегации с образованием разветвленных структур, которые после сшивания критического числа молекул могут образовывать кольцевые сети, а при достаточно высокой концентрации эти сети объединяются в бесконечную сеть, т.е в гель (Kirby et al., 2008).

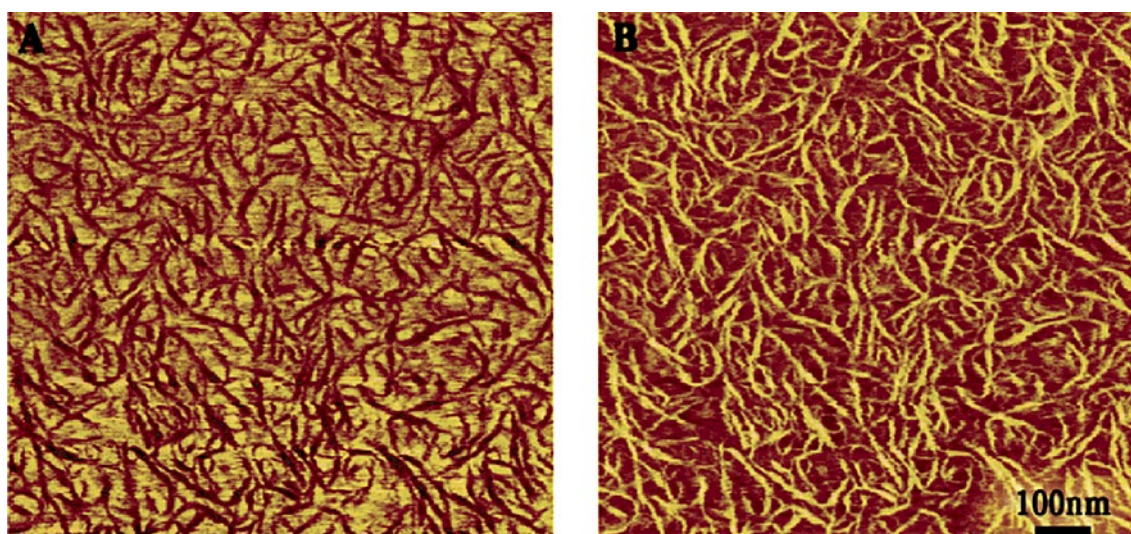
Супрамолекулярные системы на основе пектиновых полисахаридов (пектиновые конъюгаты) широко востребованы в современных пищевых, нано- и биотехнологиях для модификации и стабилизации различных дисперсий в пищевой и косметической индустрии (Freitas et al., 2021; Yemenicioglu et al., 2020), для создания систем доставки лекарственных средств (Vokov et al., 2020). В данном обзоре сделан акцент на этих двух актуальных направлениях, которые привлекают внимание исследователей на современном этапе развития супрамолекулярной химии, в частности, на взаимосвязи функциональных свойств и структурных особенностей пектиновых полисахаридов.

Рисунок 3

АСМ-изображение пектиновых гелей (Fishman et al., 2004)

Figure 3

AFM Image of Pectin Gels (Fishman et al., 2004)



Примечание. А – АСМ-изображение пектиновых гелей на основе низкометоксилированного пектина; В – АСМ-изображение пектиновых гелей на основе высокометоксилированного пектина.

Note. A – AFM image of pectin gels based on low-methoxylated pectin; B – AFM image of pectin gels based on high-methoxylated pectin

Пищевые продукты

Под функциональными характеристиками пектиновых полисахаридов понимают такие их физико-химические свойства, которые определяют их целевое использование. К числу таких свойств относится способность пектиновых полисахаридов загущать водные растворы, образовывать студни, создавать эмульсии, пены, выступать их стабилизаторами, связывать тяжелые металлы и др.

Супрамолекулярные комплексы на основе полисахаридов и белков находят широкое применение в индустрии производства функциональных продуктов питания (Тутельян & Нечаев, 2013), поскольку их физико-химические и функциональные свойства легко регулируются за счет гидрофобных воздействий, водородных связей и температурных режимов. Чувствительность белка к изменению pH и температуры является ограничением для его промышленного использования, поэтому применение пектиновых полисахаридов с высокой молекулярной массой в супрамолекулярных системах позволяет существенно расширить технофункциональные и эмульгирующие свойства белков (Koch et al., 2017). Использование пектина в качестве эмульгатора в пищевых системах, содержащих белковые вещества и олигопептиды, позволяет уменьшить размер капель эмульсий от 4,12 до 1,2 мкм в растворах с содержанием белков от 0,5 до 3 мас. %, подавляя их склонность к агрегированию (Chen et al., 2016). Такие супрамолекулярные пектин-белковые комплексы нашли широкое применение в качестве стабилизирующего агента и заменителя жира при производстве майонезов с пониженной жирностью (Nguematzong et al., 2015), мороженого (Yang et al., 2018), обезжиренных молочных продуктов (Ma et al., 2020), эмульгированных мясных продуктов (Kim et al., 2016). В настоящее время широкое распространение и признание получили напитки из свежих фруктов и ягод — смузи (от англ. *smooth* — мягкий, однородный), в которых для формирования необходимой текстуры и сохранения вкусоароматического профиля напитков используются природные полисахариды (Грызлова и соавт., 2013).

Супрамолекулярные структуры на основе комплексов «гость-хозяин» (Антипин и соавт., 2021), где в качестве «хозяина» выступают пектиновые биомолекулы, а в качестве «гостя» — низкомолекулярные минорные биологически активные вещества, в частности, полифенолы, а также ионы биогенных химических элементов — серебра, йода и др. (Боков и соавт., 2023; Фарзалиев и соавт., 2022; Камилов и соавт., 2022; Василькевич и соавт., 2021), позволяют получать обогащенные, специализированные, функциональные продукты. На примере компонентов полифенольного комплекса (флавоноиды) (Боков и соавт., 2023), полифенольных экстрактов дикорастущих плодов боярышника и барбариса (Фарзали-

ев и соавт., 2022) и низкоэтерифицированного пектина были получены супрамолекулярные пищевые ингредиенты с повышенной биодоступностью *in vitro* и *in vivo* и высокой антиоксидантной активностью. Комплексное ИК- и ЯМР-исследование структуры низкоэтерифицированного пектина дикорастущих плодов облепихи (Фарзалиев и соавт., 2021) показало, что супрамолекулярная структура пектина образуется за счет линейных и разветвленных пектиновых молекул, и эта структура обеспечивает высокую комплексообразующую способность к двух- и трехвалентным ионам металлов. Образование таких супрамолекулярных систем происходит за счет водородных связей между функциональными группами боковых цепей пектиновой макромолекулы и ОН-группами молекул полифенолов (Slobodova et al., 2024). Установлено, что супрамолекулярные комплексы пектин-йод образуют устойчивые водные дисперсии с размером , удобные для обогащения йодом молока и других пищевых продуктов (Камилов и соавт., 2022), обладающих низкой токсичностью и высокой биодоступностью. Поскольку линейная структура пектиновой молекулы проявляет в водных растворах гидрофильное действие, а боковые цепочки молекул пектина имеют гидрофобный характер, то супрамолекулярная структура пектинового полисахарида обеспечивает разнообразные реакции связывания (Слободова и соавт., 2020). Это позволяет получать пищевые ингредиенты, в том числе и нанокапсулированные с различными растительными экстрактами (спирулин, хлорелла, витамины и др.), используя низкоэтерифицированный или высокоэтерифицированный яблочный или цитрусовый пектин (Lara-Espinoza et al., 2018; Кролевец и соавт., 2021). Одним из перспективных направлений в пищевой технологии является контролируемое включение (и высвобождение) веществ, обладающих ароматом (запах лимона — лимонена) (Шамсара и соавт., 2013), или компонентов, формирующих запах соевого молока и соевого белка (Муридинов и соавт., 2013), в супрамолекулярные структуры пектиновых полисахаридов.

Биомедицинские продукты

В последние годы использование пектиновых полисахаридов рассматривается как инновационное направление в технологии биоматериалов и фармацевтических продуктов благодаря их положительному влиянию на здоровье. Исследования фокусируются на следующих направлениях: адресная доставка лекарственных препаратов, доставка генов, заживление ран, снижение уровня холестерина, тканевая инженерия, изготовление мембран, используемых для создания контактных линз, искусственных роговиц, катетеров, противораковых средств (Martau et al., 2019; Munarin et al., 2012; Lopez-Mata et al., 2018; Naqash et al., 2017; Ullah et al., 2019; Haas et al., 2020), а также слизистых и желудочно-кишечных

носителей для введения лекарств. Биосовместимость, способность формировать супрамолекулярные структуры и гели, поведением которых можно управлять путем изменения условий среды или структуры биомолекулы, делают пектиновые полисахариды привлекательным материалом для создания матриц, применяемых для адресной доставки лекарственных препаратов. Такая эффективность применения пектиновых полисахаридов обусловлена их химическим составом и наличием специфических структурных доменов, придающих биомолекуле пектина супрамолекулярную структуру, обладающую биоактивными свойствами (Qi et al., 2017). Что касается противоопухолевых механизмов, то они связаны с пробиотической активностью этих структур, усилением иммунитета, ингибированием роста опухолей и антимутагенным потенциалом (Zhang et al., 2015; Леонтьева и соавт., 2020).

Гидрофильность пектиновых полисахаридов и наличие функциональных групп в их супрамолекулярной структуре предоставляют возможность инкапсулировать в эти структуры лекарственные соединения за счет физических и химических взаимодействий, а также способствуют их более эффективной биоадгезии к клеточному проникновению (Mao et al., 2020). В результате взаимодействия цитрусового пектина с практически нерастворимым в воде нестероидным противовоспалительным препаратом Ибупрофен (Rainsford, 2012), была получена новая лекарственная форма этого препарата, отличающаяся повышенной растворимостью и биодоступностью (Минзанова и соавт., 2020).

Пектиновые полисахариды широко используются в супрамолекулярных комплексах для доставки лекарственных средств из-за их способности подвергаться широкому спектру химических и ферментативных реакций с образованием новых структурных форм (Tian et al., 2020). Пектин выделяется тем, что имеет относительно простые механизмы гелеобразования, адгезию к слизистой оболочке, легко растворяется в основных средах, способен образовывать гели в кислых средах (Martau et al., 2019), кроме того, он нетоксичен, а его функциональные группы (COOH, -OH) возможно легко модифицировать, что обеспечивает широкое применение (Zhang et al., 2015). Было установлено (Леонтьева и соавт., 2020), что бинарные биополимерные матрицы являются хорошими носителями лекарственных средств, так как они проявляют высокую селективность фармакологической активности путем фармакокинетического и фармадинамического контроля скорости введения этих средств. Сочетание пектина с хитозаном, линейным биополимером, имеющим гидроксильные и аминогруппы (Mao et al., 2020) или с биоактивными соединениями, такими как куркумин (Tian et al., 2020) и цистеин (Msartau et al., 2019), позволяет получить большую биоразлагаемость, биосовместимость, растворимость, стабильность, механиче-

скую устойчивость и стимулированное высвобождение лекарственных препаратов (Mao et al., 2020). Уникальные особенности гидрогелей на основе супрамолекулярных структур пектиновых полисахаридов, такие как контролируемая набухаемость и высокое содержание воды, обеспечивают подобие естественным соединительным тканям и позволяют инкапсулировать биологически активные макромолекулы (нуклеиновые кислоты, белковые препараты) и низкомолекулярные соединения без нарушения структуры и активности биофармацевтических препаратов (Diao et al., 2019). Высокая подвижность полисахаридных цепей в определенных условиях снижает плотность супрамолекулярной матрицы, что облегчает диффузию лекарственного средства и дает высокий потенциал для создания стимул-чувствительных систем их доставки, поскольку могут быстро претерпевать фазовые переходы (золь-гель, набухание-сжатие) и предоставляют уникальную возможность контролировать диффузию лекарств заданным образом (Nehra et al., 2019). Поэтому для улучшения биодоступности лекарственных средств используются водорастворимые супрамолекулярные комплексы включения по типу «хозяин-гость», где в качестве «хозяина» используются пектиновые полисахариды способные к образованию липофильных полостей, а в качестве «гостя» выступают уже зарегистрированные лекарственные молекулы (ацетилсалициловая кислота, ибупрофен, куркумин, д-азепам, бета-каротин) (Хвостов и соавт., 2019). Как правило, между молекулами лекарственных средств и комплексом «хозяина» не образуются ковалентные связи, а возникают лишь водородные и ван-дер-ваальсовы взаимодействия. Такая слабая связь не требует больших затрат энергии на отрыв молекулы лекарственного средства от комплекса «хозяина», тем самым обеспечивается быстрая диссоциация таких систем с последующей абсорбцией лекарственного средства организмом.

Часто пектиновые полисахариды используются в тандеме с другими полимерами как синтетическими, так и природными. Было показано (Pourjavadi & Barzegar, 2009), что такие матрицы чувствительны к pH, благодаря чему в них можно доставлять лекарственные средства в кишечник, не теряя их в желудке.

Электростатические взаимодействия между биополимерами могут использоваться в сочетании с технологиями 3D-печати (Long et al., 2019). В частности, на основе пектина и хитозана была разработана гидрогелевая раневая повязка для доставки гидрохлорида лидокаина. Материал подходит для послойного нанесения и 3D-биопечати и демонстрирует значительную самоадгезию к коже.

Таким образом, можно констатировать, что существует широкий спектр химических соединений и биополимеров, совместимых с пектиновыми полисахаридами,

что позволяет получать супрамолекулярные структуры с новыми свойствами, которые можно целенаправленно модифицировать для выполнения конкретных биомедицинских задач (Martau et al., 2019).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ областей и рынка применения пектиновых полисахаридов для производства пищевых ингредиентов и функциональных пищевых продуктов, а также фармацевтических пектинсодержащих био-препаратов позволяет сделать вывод, что супрамолекулярные пектиновые системы с учетом их физико-химических и фармакологических свойств могут успешно использоваться не только для лечения, но и для профилактики социально значимых для современного человеческого общества заболеваний. И одним из перспективных направлений исследований, наряду с изучением функциональных свойств пектинов из нетрадиционных источников растительного сырья с новыми элементами их супрамолекулярного строения (химический состав, структурные и конформационные особенности), следует считать химическую модификацию достаточно подробно изученных и доступных пектиновых полисахаридов из традиционного сырья. Необходимо отметить, что большинство работ не ставит своей целью выявить особенности формирования супрамолекулярных струк-

тур полисахаридов в привязке к специфике строения и не включают исследований сопоставительного плана на различных структурных типах пектиновых веществ. Это имеет существенное значение при последующей разработке их функциональных приложений.

Направленное конструирование таких систем и создание из них строительных блоков высокоупорядоченных супрамолекулярных соединений с заданной структурой и свойствами стало одной из важнейших задач современной химии.

ВКЛАД АВТОРОВ

Голубев В. Н.: написание рукописи — рецензирование, редактирование.

Цыганова Т. Б.: написание рукописи — рецензирование, редактирование.

AUTHORS' CONTRIBUTION

Golubev V.N.: writing — Review & Editing.

Tsyganova T.B.: writing — Review & Editing.

ЛИТЕРАТУРА

- Боков, Д. О., Богачук, М. Н., Малинкин, А. Д., Назарова, В. А., & Бессонов, В. В. (2023). Оценка взаимодействия полисахаридов и минорных биологически активных веществ в функциональных пищевых ингредиентах растительного происхождения. *Вопросы питания*, 92(1), 108–115. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-108-115>
- Василькевич, В. М., Богданов, Р. В., Гилевская, К. С., & Куликовская, В. И. (2021). Изучение токсичности и особенностей биологического действия наноконструкта пектин — Ag: результаты субхронического эксперимента. *Токсикологический вестник*, 29(5), 25–33. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2021-29-5-25-33>
- Голубев, В. Н., & Цыганова, Т. Б. (2024). Пектиновые полисахариды — полифункциональные ингредиенты в пищевых и биомедицинских системах. *Health, Food & Biotechnology*, 6(4), 58–72. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i4.s240>
- Горшкова, Т. А., Козлова, Л. В., & Микшина, П. В. (2013). Пространственная структура полисахаридов растительных клеточных стенок и ее функциональная значимость (Обзор). *Биохимия*, 78(7), 1068–1088.
- Грызлова, В. В., Филатова, И. А., & Кочеткова, А. А. (2013). Смузи нового поколения с пребиотиками. *Пищевая промышленность*, (3), 8–13.
- Камилов, Ф. Х., Конкина, И. Г., Козлов, В. Н., Ганеев, Т. И., Бадыкова, Л. А., & Крячко, А. Н. (2022). Оценка наноразмерности и устойчивости водных дисперсий йодсодержащих конъюгатов на основе носителей растительного происхождения, перспективных для обогащения йодом пищевых продуктов. *Вопросы питания*, 91(6), 110–116. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-6-110-117>
- Кролевец, А. А., Мячикова, Н. И., Биньковская О. В., Глотова, С. Г., Семичев, К. М., Мамаева, Е. М., & Шкондин, Е. А. (2021). Наноструктурированный витамин Е: его свойства и применение в функциональных продуктах питания. *Товаровед продовольственных товаров*, (5), 372–381

- Леонтьева, Е. А., Вихарева, В. В., Калитник, А. А., & Хотимченко, М.Ю. (2020). Противоопухолевая активность пектинов различной молекулярной массы. *Тихоокеанский медицинский журнал*, 4, 68–72. <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2020-4-68-72>
- Минзанова, С. Т., Чекунов, Е. В., Милюков, В. А., Миронова, Л. Г., Хабибуллина, А. В., Архипова, Д. М., Самигуллина, А. И., Губайдуллин, А. Т., & Миронов, В. Ф. (2020). Получение, состав и физико-химические свойства комплексов пектина с ибупрофеном. *Доклады РАН, химия, науки о материалах*, т. 491, 49–54. <https://doi.org/10.31857/s2686953520020065>
- Муридинов, З. К., Бобокалонова, М. Р., Рахимов, И. Ф., Шамсара, О., Бобокалонов, Д. Т., & Лиу, Л. Ш. (2013). Кинетика высвобождения пироксикама из эмульсионных микрочастиц низкометилированных пектинов и концентрата лактоглобулинов молочной сыворотки. *Известия АН Республики Таджикистан, Отд. физ.-мат.хим.,геол. И техн. Наук*, 1(150), 89–98.
- Нечаев, А. П., Кочеткова, А. А., Колпакова, В. В., Траубенберг, С. Е., Витол, И. С., Кобелева, И. Б., Алексеенко, Е. В., Бессонов, В. В., Семенова, П. А., Николаева, Ю. В., Тарасова, В. В., & Сусянок, Г. М. (2024). *Пищевая химия*, 7-е изд. испр. и доп. ГИОРД.
- Оводов, Ю. С. (2009). *Современные представления о пектиновых веществах*. *Биоорганическая химия*, 35(3), 293–310.
- Птичкин, И. И., & Птичкина, Н. М. (2012). *Пищевые полисахариды: Структурные уровни и функциональность*. Типография номер 6.
- Слободова, Д. А., Горшкова, Р. М., Панков, С. А., Новоселов, Н. П., & Халиков, Д. Х. (2020). Термообратимое гелеобразование пектиновых полисахаридов, полученных методом комбинированного фракционирования. *Вестник СПГУТД. Серия 1. Естественные и технические науки*, № 2, 95–98. <https://elibrary.ru/mdmwel>
- Тутельян, В. А., & Нечаев, А. П. (2013). *Пищевые ингредиенты в создании современных продуктов питания*. ДеЛи плюс.
- Фарзалиев, Э. Б., Голубев, В. Н., & Давидович, И. Ю. (2022). Получение субмолекулярных комплексов на основе пектина с растительными пролифенолами. *Техника и технология пищевых производств*. БГУТ, 1, 75–76.
- Фарзалиев, Э. Б., Голубев, В. Н., & Цыганова, Т. Б. (2021). Исследование и идентификация пектиновых веществ дикорастущих плодов облепихи (*Hippophae rhamnoides L.*). *Хранение и переработка сельхозсырья*, (3), 115–125. <http://dx.doi.org/10.36107/spfp.2021.247>
- Фаткуллин, Р. И., Потороко, И. Ю., & Калинина, И. В. (2021). Теоретические аспекты взаимодействия растительных полифенолов с макромолекулами в функциональных пищевых системах. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*, 9(1), 82–90.
- Хвостов, М. В., Толстикова, Т. Г., Борисов, С. А., & Душкин, А. В. (2019). Применение природных полисахаридов в фармацевтике. *Биоорганическая химия*, 45(6), 563–575. <https://doi.org/10.1134/S0132342319060241>
- Шамсара, О., Муридинов, З. К., Бобокалонов, Д. Т., Усманова, С. Р., Лиу, Л. Ш., & Халиков, Д. Х. (2013). Микрокапсулы на основе низкометилированных пектинов и концентрата белков молочной сыворотки. *Доклады АН Республики Таджикистан*
- Antipin, I. S., Alfimov, M. V., Arslanov, V. V., Burirov, V. A., Vatsadze, S. Z., Voloshin, Y. Z., Volcho, K. P., Gorbachuk, V. V., Gorbunova, Y. G., Gromov, S. P., Dudkin, S. V., Zaitsev, S. Yu., Zakharova, L. Ya., Ziganshin, M. A., Zolotukhina, A. V., Kalinina, M. A., Karakhanov, E. A., Kashapov, R. R., Koifman, O. I., & Kononov, A. I. (2021). Functional supramolecular systems: design and applications. *Russian Chemical Reviews*, 90(8), 895–1107. <https://doi.org/10.1070/rcr5011>
- Axelos, M. A., & Thibault, J. F. (1991). The chemistry of low-methoxyl pectin gelation. *The chemistry and technology of pectin*, Chapter 6, 109–118. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092644-5.50011-X>
- Bokov, D. O., Sokurenko, M. S., Malinkin, A. D., Khromchenkova, E. P., Shevyakova, L. V., & Bessonov, V. V. (2020). Physicochemical features, qualitative and quantitative analysis, present status and application prospects of polysaccharide gums. *International Journal of Pharmaceutical Quality Assurance*, 11, 154–162. <http://dx.doi.org/10.25258/ijpqa.11.1.24>
- Chen, H., Qui, S., Gan, J., Liu, Y., Zhu, Q., & Yin, L. (2016). New insights into the functionality of protein to the emulsifying properties of sugar beet pectin. *Food Hydrocolloids*, 57, 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.005>
- Diao, J., Bai, F., Wang, Y., Han, Q., Xu, X., Zhang, H., Luo, Q., & Wang, Y. (2019). Engineering of pectin-dopamine nanoconjugates for carrying ruthenium complex: A potential tool for biomedical application. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 191, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2018.11.016>
- Eivazzadeh-Keihan, R., Noruzi, E., Aliabadi, H., Shekhaleslami, S., Akbarzadeh, A., Hashemi, S., Gorab, M., Maleki, A., Cohan, R., Mahdavi, M., Poodat, R., Keyvanlou, F., & Esmaeili, M. (2022). Recent advances on biomedical applications

- of pectin-containing biomaterials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 217, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.016>
- Estroff, L., & Hamilton, A. (2004). Water Gelation by Small Organic Molecules. *Chemical Reviews*, 104(3), 1201–1218.
- Fishman, M. L., Cooke, P. H., & Coffin, D. R. (2004). Nanostructure of native pectin sugar acid gels visualized by atomic force microscopy. *Biomacromolecules*, 5, 334–341. <https://doi.org/10.1021/bm0300655>
- Freitas, C. M. P., Coimbra, J. S. R., Souza, V. G. L., & Sousa, R. C. S. (2021). Structure and applications of pectin in food, biomedical and pharmaceutical industry: A review. *Coatings*, 11, 922, <https://doi.org/10.3390/coatings11080922>.
- Gawkowska, D., Cybulska, J., & Zdunek, A. (2018). Structure-related gelling of pectins and linking with other natural compounds: A review. *Polymers*, 10, 762. <https://doi.org/10.3390/polym10070762>
- Haas, K. T., Wightman, R., Meyerowitz, E. M., Peaucelle, A. (2020). Pectin homogalacturanan nanofilament expansion drives morphogenesis in plant epidermal cells. *Science*, 367, 1003–1007. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5103>
- Kertesz, Z. I. (1951). *The pectin substances*. Interscience Publishers.
- Kim, H. W., Lee, Y. I., & Kim, Y. H. B. (2016). Effects of membrane-filtered soy hull pectin and pre-emulsified fiber/oil on chemical and technological properties of low fat and low salt meat emulsions. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 2580–2588. <http://dx.doi.org/10.1007/s13197-016-2221-0>
- Kirby, A. R., MacDougall, A. J., & Morris, V. J. (2008). Atomic force microscopy of tomato and sugar beet pectin. *Carbohydrate Polymers*, 71, 640–647. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.07.014>
- Koch, L., Emin, M. A., & Schuchmann, H. P. (2017). Influence of processing conditions on the formation of whey protein-citrus pectin conjugates in extrusion. *Journal of Food Engineering*, 193, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.08.012>
- Lang, P., & Kajiwara, K. (1993). Investigations of the architecture of tamarind seed polysaccharide in aqueous solution by different scattering techniques. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 4, 517–528. <https://doi.org/10.1163/156856293X00177>
- Lara-Espinoza, C., Carvajal-Millan, E., Balandran-Quintana, R., Lopez-Franco, Y., & Rascon-Chu, A. (2018). Pectin and pectin-based composite materials: Beyond food texture. *Molecules*, 23(4), 942. <https://doi.org/10.3390/molecules23040942>
- Long, J., Etxeberria, A., Nand, A., Bunt, C., Ray, S., & Seyfoddin, A. (2019). A 3-D printed chitosan-pectin hydrogel wound dressing for lidocaine hydrochloride delivery. *Materials Science and Engineering:C*, 194, 109873. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.109873>
- Lopez-Mata, M. A., Gastelum-Cabrera, M., Valbuena-Gregorio, E., Zamudio-Flores, P. B., Burruel-Ibarra, S. E., Morales-Figueroa, G. G., Quihui-Cota, L., & Juárez-Onofre, J. E. (2018). Physicochemical properties of novel pectin Aloe gel membranes. *Iranian Polymer Journal*, 27, 545–553. <https://doi.org/10.1007/s13726-018-0631-8>
- Ma, X., Chen, W., Yan, T., Wang, D., Hou, F., Miao, S., & Liu, D. (2020). Comparison of citrus pectin and apple pectin in conjugation with soy protein isolate (SPI) under controlled dry-heating conditions. *Food Chemistry*, 309, 125501, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125501>
- Manzoor, M., Singh, J., Bandral, J., Gani, A., & Shams, R. (2020). Food hydrocolloids: Functional, nutraceutical and novel applications for delivery of bioactive compounds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 554–567, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.182>
- Mao, Y., Millett, R., Lee, C., Yakubov, G., Harding S. E., & Binner, E. (2020). Investigating the influence of pectin content and structure on its functionality in bio-flocculant extracted from okra. *Carbohydrate Polymers*, 241, 116414, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116414>
- Martau, G. A., Mihai, M., & Vodnar, D. C. (2019) The use of chitosan, alginate and pectin in the biomedical and food sector- biocompatibility, bioadhesiveness and biodegradability. *Polymers*, 11, 1837, <https://doi.org/10.3390/polym11111837>
- May, C. D., & Stainsby, G. (1986). Factors affecting pectin gelation. In G. O. Phillips, D. J. Wedlock, P. A. Williams (Eds.), *Gums and stabilizers for the food industry*. Elsevier.
- Muller, G. (1986). Charge-induced order-disorder transition in an ionic polysaccharide derived from schizophyllan. *Carbohydrate polymers*, 6, 177–191
- Munarin, F., Tanzi, M., & Petrini, P. (2012). Advances in biomedical application of pectin gels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 51, 681–689, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.07.002>
- Naqash, F., Masoodi, F. A., Rather, S. A., Wani, S. M., & Gani, A. (2017). Emerging concepts in the nutraceutical and functional properties of pectin: A review. *Carbohydrate Polymers*, 168, 227–239, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.carbpol.2017.03.058>

- Nehra, S., Raghav, S., & Kumar, D. (2019). Biopolymer scaffold of pectin and alginate for the application of health hazardous fluoride removal studies by equilibrium adsorption, kinetics and thermodynamics, *Journal of Molecular Liquids*, 284, 203–214, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.155>
- Ngouemazong, E. D., Christiaens, S., Shpigelman, A., Loey, A. V., & Hendrickx M. (2015). The emulsifying and emulsion-stabilizing properties of pectin: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14, 705–718. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12160>
- Phillips, G. O., & Williams, P. A. (2020). *Handbook of Hydrocolloids*. Woodhead publishing.
- Pourjavadi, A., & Barzegar, S. (2009) Smart pectin-based superabsorbent hydrogel as a matrix for ibuprofen as an oral non-steroidal anti-inflammatory drug delivery. *Starch-Starke*, 61(3–4), 173–187. <https://doi.org/10.1002/star.200800032>
- Qi, P. X., Xiao, Y., & Wickham, E. D., (2017). Charges in physical, chemical and functional properties of whey protein isolate (WPI) and sugar beet pectin (SBP) conjugates forms by controlled dry-heating. *Food Hydrocolloids*, 69, 86–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.01.032>
- Rainsford, K. D. (2012). *Ibuprofen: Pharmacology, therapeutics and side effects*. Springer Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0496-7>
- Rees, D. A., (1977). Secondary and tertiary structure of polysaccharides in solutions and gels. *Upsala Journal of Medical Sciences*, v. 82, 214–224, <https://doi.org/10.3109/03009737709179075>
- Slobodova, D. A., Gorschikova, R. M., & Gladyshev, P. P., (2024). Thermodynamics of sorption processes in sorbents based on pectic polysaccharides. *Fibre Chemistry*, (55), 290–298. <https://doi.org/10.1007/s10692-024-10479-1>
- Sriamornsak, P. (2003). Chemistry of pectin and its pharmaceutical uses: A review. *Silpakorn University International Journal*, 3, 206–228.
- Tian, L., Singh, A., & Singh, A. V. (2020), Synthesis and characterization of pectin-chitosan conjugate for biomedical application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 533–538. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.313>
- Tsai, C. S. (2007). *Biomacromolecules: Introduction to structure, function and informatics*. John Wiley & Sons. <http://dx.doi.org/10.1002/0470080124>
- Ullah, K., Sohail, M., Buabeid, M., Murtaza, G., Ullah, A., Rashid, H., Khan, M. A., & Khan, S. A. (2019). Pectin-based (LA-co-MAA) semi-IPNS as a potential biomaterial for colonic delivery of oxaliplatin. *International Journal of Pharmaceutics*, 569, 118557. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118557>
- Yang, J. S., Mu, T. H., & Ma, M. M. (2018). Extraction, structure and emulsifying properties of pectin from potato pulp. *Food Chemistry*, 244, 197–205, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.059>
- Yemenicioglu, A., Farris, S., Turkyilmaz, M., & Gulec, S. (2020). A review of current and future food applications of natural hydrocolloids. *International Journal of Food Science and Technology*, 55, 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14363>
- Zhang, W., Xu, P., & Zhang, H. (2015). Pectin in cancer therapy :A Review. *Trends in Food Science & Technology*, 44, 258–271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.001>

REFERENCES

- Antipin, I. S., Alfimov, M. V., Arslanov, V. V., Burilov, V. A., Vatsadze, S. Z., Voloshin, Y. Z., Volcho, K. P., Gorbachuk, V. V., Gorbunova, Y. G., Gromov, S. P., Dudkin, S. V., Zaitsev, S. Yu., Zakharova, L. Ya., Ziganshin, M. A., Zolotukhina, A. V., Kalinina, M. A., Karakhanov, E. A., Kashapov, R. R., Koifman, O. I., & Konovalov, A. I. (2021). Functional supramolecular systems: design and applications. *Russian Chemical Reviews*, 90(8), 895–1107. <https://doi.org/10.1070/rcr5011>
- Axelos, M. A., & Thibault, J. F. (1991). The chemistry of low-methoxyl pectin gelation. *The chemistry and technology of pectin*, Chapter 6, 109–118. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092644-5.50011-X>
- Bokov, D. O., Sokurenko, M. S., Malinkin, A. D., Khromchenkova, E. P., Shevyakova, L. V., & Bessonov, V. V. (2020). Physicochemical features, qualitative and quantitative analysis, present status and application prospects of polysaccharide gums. *International Journal of Pharmaceutical Quality Assurance*, 11, 154–162. <http://dx.doi.org/10.25258/ijpqa.11.1.24>
- Bokov, D. O., Bogachuk, M. N., Malinkin, A. D., Nazarova, V. A., Bessonov, V. V. (2023). Interaction assessment of polysaccharides and minor bioactive compounds in functional food ingredients of plant origin. *Problems of Nutrition*, 92(1), 108–115. <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2023-92-1-108-115>

- Chen, H., Qui, S., Gan, J., Liu, Y., Zhu, Q., & Yin, L. (2016). New insights into the functionality of protein to the emulsifying properties of sugar beet pectin. *Food Hydrocolloids*, 57, 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.005>
- Diao, J., Bai, F., Wang, Y., Han, Q., Xu, X., Zhang, H., Luo, Q., & Wang, Y. (2019). Engineering of pectin-dopamine nanoconjugates for carrying ruthenium complex: A potential tool for biomedical application. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 191, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2018.11.016>
- Eivazzadeh-Keihan, R., Noruzi, E., Aliabadi, H., Sheikholeslami, S., Akbarzadeh, A., Hashemi, S., Gorab, M., Maleki, A., Cohan, R., Mahdavi, M., Poodat, R., Keyvanlou, F., & Esmaeili, M. (2022). Recent advances on biomedical applications of pectin-containing biomaterials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 217, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.016>
- Estroff, L., & Hamilton, A. (2004). Water Gelation by Small Organic Molecules. *Chemical Reviews*, 104(3), 1201–1218.
- Farzaliev, E. B., Golubev, V. N., & Davidovich, I. Yu. (2022) Obtaining submolecular complexes based on pectin with plant proflifenols. *Equipment and technology of food production*. BSUT, 1, 75–76
- Farzaliev, E. B., Golubev, V. N., & Tsyganova, T. B. (2021). Study and identification of pectin substances of wild sea buckthorn fruits (*Hippophae rhamnoides* L.). *Storage and Processing of Farm Products*, (3), 115–125, <http://dx.doi.org/10.36107/spfp.2021.247>
- Fatkullin, R. I., Potoroko, I. Yu., & Kalinina, I. V. (2021). Theoretical aspects of the interaction of plant polyphenols with macromolecules in functional food systems. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*, 9(1), 82–90
- Fishman, M. L., Cooke, P. H., & Coffin, D. R. (2004). Nanostructure of native pectin sugar acid gels visualized by atomic force microscopy. *Biomacromolecules*, 5, 334–341. <https://doi.org/10.1021/bm0300655>
- Freitas, C. M. P., Coimbra, J. S. R., Souza, V. G. L., & Sousa, R. C. S. (2021). Structure and applications of pectin in food, biomedical and pharmaceutical industry: A review. *Coatings*, 11, 922, <https://doi.org/10.3390/coatings11080922>.
- Gawkowska, D., Cybulska, J., & Zdunek, A. (2018). Structure-related gelling of pectins and linking with other natural compounds: A review. *Polymers*, 10, 762. <https://doi.org/10.3390/polym10070762>
- Golubev, V. N., & Tsyganova, T. B. (2024). Pectin polysaccharides – polyfunctional ingredients in food and biomedical systems, *Health, Food & Biotechnology*, 6(4), 58–72, <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i4.s240>
- Gorshkova, T. A., Kozlova, L. V., & Mikshina P. V. (2013). Spatial structure of polysaccharides of plant cell walls and its functional significance (Review), *Biochemistry*, 78(7), 1068–1088.
- Gryzlova, V. V., Filatova, I. A., & Kochetkova, A. A. (2013). New generation smoothies with prebiotics. *Food industry*, (3), 8–13.
- Haas, K. T., Wightman, R., Meyerowitz, E. M., Peaucelle, A. (2020). Pectin homogalacturanan nanofilament expansion drives morphogenesis in plant epidermal cells. *Science*, 367, 1003–1007. <https://doi.org/10.1126/science.aaz5103>
- Kamilov, F. Kh., Konkina, I. G., Kozlov, V. N., Ganeev, T. I., Badykova, L. A., & Kryachko, A. N. (2022). Evaluation of nanoscale size and stability of aqueous dispersions of iodine-containing conjugates based on carriers of plant origin, promising for enrichment of food products with iodine. *Nutrition Issues*, 91(6), 110–116, <https://doi.org/10.33029/0042-8833-2022-91-6-110-117>
- Kertesz, Z. I. (1951). *The pectin substances*. Interscience Publishers.
- Khvostov, M. V., Tolstikova, T. G., Borisov, S. A., & Dushkin, A. V. (2019). Application of natural polysaccharides in pharmaceuticals. *Bioorganic Chemistry*, 45(6), 563–575, <https://doi.org/10.1134/S0132342319060241>
- Kim, H. W., Lee, Y. I., & Kim, Y. H. B. (2016). Effects of membrane-filtered soy hull pectin and pre-emulsified fiber/oil on chemical and technological properties of low fat and low salt meat emulsions. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 2580–2588. <http://dx.doi.org/10.1007/s13197-016-2221-0>
- Kirby, A. R., MacDougal, A. J., & Morris, V. J. (2008). Atomic force microscopy of tomato and sugar beet pectin. *Carbohydrate Polymers*, 71, 640–647. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.07.014>
- Koch, L., Emin, M. A., & Schuchmann, H. P. (2017). Influence of processing conditions on the formation of whey protein-citrus pectin conjugates in extrusion. *Journal of Food Engineering*, 193, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.08.012>
- Krolevets, A. A., Myachikova, N. I., Binkovskaya, O. V. Glotova, S. G., Semichev, K. M., Mamaeva, E. M., & Shkondin, E. A. (2021). Nanostructured vitamin E: its properties and application in functional food products. *Commodity Expert of Food Products*, (5), 372–381
- Lang, P., & Kajiwara, K. (1993). Investigations of the architecture of tamarind seed polysaccharide in aqueous solution by different scattering techniques. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 4, 517–528. <https://doi.org/10.1163/156856293X00177>

- Lara-Espinoza, C., Carvajal-Millan, E., Balandran-Quintana, R., Lopez-Franco, Y., & Rascon-Chu, A. (2018). Pectin and pectin-based composite materials: Beyond food texture. *Molecules*, 23(4), 942. <https://doi.org/10.3390/molecules23040942>
- Leontyeva, E. A., Vikhareva, V. V., Kalitnik, A. A., & Khotimchenko, M. Yu. (2020). Antitumor activity of pectins of different molecular weights. *Pacific Medical Journal*, (4), 68–72, <https://doi.org/10.34215/1609-1175-2020-4-68-72>
- Long, J., Etxeberria, A., Nand, A., Bunt, C., Ray, S., & Seyfoddin, A. (2019). A 3-D printed chitosan-pectin hydrogel wound dressing for lidocaine hydrochloride delivery. *Materials Science and Engineering:C*, 194, 109873. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.109873>
- Lopez-Mata, M. A., Gastelum-Cabrera, M., Valbuena-Gregorio, E., Zamudio-Flores, P. B., Burruel-Ibarra, S. E., Morales-Figueroa, G. G., Quihui-Cota, L., & Juárez-Onofre, J. E. (2018). Physicochemical properties of novel pectin Aloe gel membranes. *Iranian Polymer Journal*, 27, 545–553. <https://doi.org/10.1007/s13726-018-0631-8>
- Ma, X., Chen, W., Yan, T., Wang, D., Hou, F., Miao, S., & Liu, D. (2020). Comparison of citrus pectin and apple pectin in conjugation with soy protein isolate (SPI) under controlled dry-heating conditions. *Food Chemistry*, 309, 125501, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125501>
- Manzoor, M., Singh, J., Bandral, J., Gani, A., & Shams, R. (2020). Food hydrocolloids: Functional, nutraceutical and novel applications for delivery of bioactive compounds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 554–567, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.182>
- Mao, Y., Millett, R., Lee, C., Yakubov, G., Harding S. E., & Binner, E. (2020). Investigating the influence of pectin content and structure on its functionality in bio-flocculant extracted from okra. *Carbohydrate Polymers*, 241, 116414, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116414>
- Martau, G. A., Mihai, M., & Vodnar, D. C. (2019) The use of chitosan, alginate and pectin in the biomedical and food sector-biocompatibility, bioadhesiveness and biodegradability. *Polymers*, 11, 1837, <https://doi.org/10.3390/polym11111837>
- May, C. D., & Stainsby, G. (1986). Factors affecting pectin gelation. In G. O. Phillips, D. J. Wedlock, P. A. Williams (Eds.), *Gums and stabilizers for the food industry*. Elsevier.
- Minzanova, S. T., Chekunkov, E. V., Milyukov, V. A., Mironova, L. G., Khabibullina, A. V., Arkhipova, D. M., Samigullina, A. I., Gubaidullin, A. T., & Mironov, V. F. (2020). Preparation, composition and physicochemical properties of pectin complexes with ibuprofen. *Reports of the Russian Academy of Sciences, Chemistry, Materials Science*, 491, 49–54. <https://doi.org/10.31857/s2686953520020065>
- Mukhidinov, Z. K., Bobokalonova, M. R., Rakhimov, I. F., Shamsara, O., Bobokalonov, D. T., & Liu, L. Sh. (2013). Kinetics of piroxicam release from emulsion microparticles of low-methylated pectins and whey lactoglobulin concentrate. *Bulletin of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan, Department of Phys.-Math., Chem., Geol. and Tech. Sciences*, 1 (150), 89–98.
- Muller, G. (1986). Charge-induced order-disorder transition in an ionic polysaccharide derived from schizophyllan. *Carbohydrate polymers*, 6, 177–191
- Munarin, F., Tanzi, M., & Petrini, P. (2012). Advances in biomedical application of pectin gels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 51, 681–689, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.07.002>
- Naqash, F., Masoodi, F. A., Rather, S. A., Wani, S. M., & Gani, A. (2017). Emerging concepts in the nutraceutical and functional properties of pectin: A review. *Carbohydrate Polymers*, 168, 227–239, <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.058>
- Nechaev, A. P., Kochetkova, A. A., Kolpakova, V. V., Traubenberg, S. E., Vitol, I. S., Kobeleva, I. B., Alekseenko, E. V., Bessonov, V. V., Semenova, P. A., Nikolaeva, Yu. V., Tarasova, V. V., Suslyanok, G. M. (2024). *Food Chemistry*, 7th ed. GIORD.
- Nehra, S., Raghav, S., & Kumar, D. (2019). Biopolimer scaffold of pectin and alginate for the application of health hazardous fluoride removal studies by equilibrium adsorption, kinetics and thermodynamics, *Journal of Molecular Liquids*, 284, 203–214, <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.03.155>
- Ngouemazong, E. D., Christiaens, S., Shpigelman, A., Loey, A. V., & Hendrickx M. (2015). The emulsifying and emulsion-stabilizing properties of pectin: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14, 705–718. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12160>
- Ovodov, Yu. S. (2009). *Modern concepts of pectin substances*. *Bioorganic chemistry*, 35(3), 293–310. <https://elibrary.ru/item.asp?id=11919320>
- Phillips, G. O., & Williams, P. A. (2020). *Handbook of Hydrocolloids*. Woodhead publishing.
- Ptichkin, I. I., Ptichkina, N. M. (2012). *Food polysaccharides: Structural levels and functionality*. Saratov Printing House number 6.

- Pourjavadi, A., & Barzegar, S. (2009) Smart pectin-based superabsorbent hydrogel as a matrix for ibuprofen as an oral non-steroidal anti-inflammatory drug delivery. *Starch-Starke*, 61(3–4), 173–187. <https://doi.org/10.1002/star.200800032>
- Qi, P. X., Xiao, Y., & Wickham, E. D., (2017). Changes in physical, chemical and functional properties of whey protein isolate (WPI) and sugar beet pectin (SBP) conjugates forms by controlled dry-heating. *Food Hydrocolloids*, 69, 86–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.01.032>
- Rainsford, K. D. (2012). *Ibuprofen: Pharmacology, therapeutics and side effects*. Springer Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0496-7>
- Rees, D. A., (1977). Secondary and tertiary structure of polysaccharides in solutions and gels. *Upsala Journal of Medical Sciences*, v. 82, 214–224, <https://doi.org/10.3109/03009737709179075>
- Shamsara, O., Mukhidinov, Z. K., Bobokalonov, D. T., Usmanova, S. R., Liu, L. Sh., & Khalikov, D. Kh. (2013). Microcapsules based on low-methylated pectins and milk whey protein concentrate. *Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*.
- Slobodova, D. A., Gorschkova, R. M., & Gladyshev, P. P., (2024). Thermodynamics of sorption processes in sorbents based on pectic polysaccharides. *Fibre Chemistry*, (55), 290–298. <https://doi.org/10.1007/s10692-024-10479-1>
- Slobodova, D. A., Gorshkova, R. M., Pankov, S. A., Novoselov, N. P., & Khalikov, D. H. (2020). Thermoreversible gelation of pectin polysaccharides obtained by combined fractionation. *Bulletin of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and technical sciences*, (2), 95–98.
- Sriamornsak, P. (2003). Chemistry of pectin and its pharmaceutical uses: A review. *Silpakorn University International Journal*, 3, 206–228.
- Tian, L., Singh, A., & Singh, A. V. (2020), Synthesis and characterization of pectin-chitosan conjugate for biomedical application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 153, 533–538. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.313>
- Tsai, C. S. (2007). *Biomacromolecules: Introduction to structure, function and informatics*. John Wiley & Sons. <http://dx.doi.org/10.1002/0470080124>
- Tutelyan, V. A., & Nechaev, A. P. (2013). *Food ingredients in the creation of modern food products*. DeLi plus.
- Ullah, K., Sohail, M., Buabeid, M., Murtaza, G., Ullah, A., Rashid, H., Khan, M. A., & Khan, S. A. (2019). Pectin-based (LA-co-MAA) semi-IPNS as a potential biomaterial for colonic delivery of oxaliplatin. *International Journal of Pharmaceutics*, 569, 118557. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118557>
- Vasilkevich, V. M., Bogdanov, R. V., Gilevskaya, K. S., Kulikovskaya, V. I. (2021). Study of toxicity and features of biological action of nanocomposite pectin – Ag: results of subchronic experiment. *Toxicological Bulletin*, 29(5), 25–33. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2021-29-5-25-33>
- Yang, J. S., Mu, T. H., & Ma, M. M. (2018). Extraction, structure and emulsifying properties of pectin from potato pulp. *Food Chemistry*, 244, 197–205, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.059>
- Yemenicioglu, A., Farris, S., Turkyilmaz, M., & Gulec, S. (2020). A review of current and future food applications of natural hydrocolloids. *International Journal of Food Science and Technology*, 55. 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/ijfs.14363>
- Zhang, W., Xu, P., & Zhang, H. (2015). Pectin in cancer therapy :A Review. *Trends in Food Science & Technology*, 44, 258–271. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.001>