

<https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i3.s240>

УДК 577.114:581.192

Пектиновые полисахариды – полифункциональные ингредиенты пищевых и биомедицинских систем

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 сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 21.10.2024

Поступила после

рецензирования: 25.12.2024

Принята: 30.12.2024

Copyright: © 2024 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Пектин – это биосовместимый полисахарид с полифункциональной технологической и биологической активностью, в зависимости от его источника и метода экстракции. Извлечение пектина из вторичных продуктов сокового или сахарного производств представляет собой экологичный вариант для утилизации агропромышленных отходов путем получения коммерческого продукта с высокой добавленной стоимостью. В настоящее время появилась тенденция использовать пектин для производства съедобных покрытий для защиты пищевых продуктов, антимикробных пленок на биокомпозитной основе и наночастиц, синтеза различных лечебных препаратов и лекарственных форм при терапии рака. Кроме того, пектин может использоваться в сочетании с широким спектром биополимеров с дифференцированными свойствами и специфическими функциями.

Цель. Проанализировать комплексную информацию о пектине, с акцентом на подробное описание взаимодействия его структурных уровней с его функциональными свойствами, а также варианты его модификации в соответствии с различными процессами экстракции.

Материалы и методы. Объектом исследования служили научные публикации, большинство из которых опубликовано в 2009–2024 годах. Поиск и отбор статей осуществлялся в библиографических базах eLIBRARY.RU, RSCI, Scopus, Web of Science, PubMed. Анализ данных выполнен с их систематизацией, обобщением, промежуточными выводами и общим заключением с использованием элементов искусственного интеллекта.

Результаты. Сделан вывод о том, что в связи с расширением областей применения пектиновых полисахаридов и источников пектинсодержащего сырья необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение взаимосвязи молекулярно-структурных особенностей пектинов с показателями функциональности и с закономерностями поведения их в пищевых и биомедицинских системах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

пектинсодержащее сырье, структурные элементы полисахарида, функциональные свойства, структурная модификация, области применения пектина, биомедицинские продукты



Для цитирования: Голубев, В. Н., & Цыганова, Т. Б. (2024). Пектиновые полисахариды – полифункциональные ингредиенты пищевых и биомедицинских систем. *Health, Food & Biotechnology*, 6(4), 57-72. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i3.s240>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i3.s240>

Pectic Polysaccharides – Multifunctional Ingredients of Food and Biomedical Systems

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 Biotechnological University
(BIOTECH University), 11, Volokolamskoe
shosse, Moscow, 125080, Russia
E-mail tsyganovatb@mgupp.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 17.09.2024

Received in revised form: 30.11.2024

Accepted: 30.12.2024

Copyright: © 2024 The Authors

ABSTRACT

Introduction. Pectin is a biocompatible polysaccharide with multifunctional technological and biological activity, depending on its source and extraction method. Extracting pectin from by-products of juice or sugar production represents an approach to utilizing agro-industrial waste by obtaining a commercial product with high added value. Recently, there has been a growing trend to use pectin for producing edible coatings to protect food products, antimicrobial films based on biocomposites and nanoparticles, and for synthesizing various medicinal preparations and dosage forms.

Purpose. The aim of this review is to analyze and summarize research findings regarding the relationship between the structural characteristics and functional properties of pectic polysaccharides.

Materials and Methods. The study is based on scientific publications, most of which were published between 2009 and 2024. The search and selection of articles were conducted using bibliographic databases such as eLIBRARY.RU, RSCI, Scopus, Web of Science, and PubMed. Data analysis involved systematization, summarization, intermediate conclusions, and a general conclusion utilizing elements of artificial intelligence.

Results. It has been concluded that due to the expanding applications of pectic polysaccharides and sources of pectin-containing raw materials, further research is necessary to investigate the relationship between the molecular-structural features of pectins, their functionality indicators, and their behavior in food and biomedical systems.

KEYWORDS

pectin containing raw material, structural elements of polysaccharide, functional properties, structural modification, areas of application of pectin, biomedical products.



To cite: Golubev, V. N., & Tsyganova, T. B. (2024). Pectic polysaccharides – multifunctional ingredients of food and biomedical systems. *Health, Food & Biotechnology*, 6(4), 57-72. <https://doi.org/10.36107/hfb.2024.i3.s240>

ВВЕДЕНИЕ

Пектиновые вещества входят в состав практически всех растений, являются их основными функциональными компонентами, выполняют в растительных клетках множество различных жизненно важных функций и характеризуются широким спектром технологической и физиологической активности (Kertes, 1951; Голубев, 1995). Благодаря своей полифункциональности они на сегодняшний день являются одними из самых востребованных и наиболее применяемых ингредиентов пищевых и биомедицинских систем (Martau, 2019; Истомин & Пилат, 2009) для получения широкого ассортимента функциональных продуктов (Нечаев и соавт., 2024) и для получения биомедицинских продуктов на основе модифицированных биополимеров, в частности, пектина как носителей лекарственных препаратов (Brouns et al., 2012). С одной стороны, пектиновые полисахариды используются как технологические добавки, изменяющие структуру и химические свойства пищевых продуктов, с другой стороны, являются эффективными полифункциональными ингредиентами, которые способны оказывать благоприятное физиологическое воздействие как на отдельные системы организма человека, так и на весь организм в целом. В современной пищевой отрасли наблюдается интенсивный рост требований к потребительским свойствам пищевых продуктов и в таких условиях огромная роль отводится целенаправленному использованию пищевых добавок, каждая группа которых несет свои технологические функции. При этом следует отметить, что мировой рынок гидроколлоидов огромен, а успешное применение того или иного ингредиента требует достоверных знаний его химических и структурных свойств. Пектин, водорастворимый анионный биополимер, выделяется среди наиболее коммерциализированных биополимеров (Голубев, 1995). Структура пектиновых веществ зависит от многих параметров и может существенно изменяться в процессе роста и развития растения, поэтому пектиновые полисахариды рассматриваются как один из самых сложных и динамических по структуре класс биополимеров. Многочисленные функциональные группы, присутствующие в структуре пектина, могут стимулировать различные функции, а определенные модификации позволяют использовать пектин для широкого аспекта применений (Zhang et al., 2015; Wang et al., 2018; Nguemazong et al., 2015; Freitas et al., 2020a), в основном потому, что этот продукт считается нетоксичным и безопасным, с низкой стоимостью производства и высокой доступностью (Оводов, 2009). Данные литературы о пектине в основном касаются его применения в пищевой промышленности, сельском хозяйстве, медицине и биомедицине, с тенденцией к производству съедобных пищевых покрытий, биокompозитных антимикробных пленок и наночастиц для исследований в области лечения рака, заживления ран

и перевязочных материалов (Espitia et al, 2014; Мамедов и соавт., 2021).

Имеющиеся в настоящее время достаточно обширные литературные данные рассредоточены по многочисленным изданиям и данный обзор позволит научному и практическому сообществу иметь комплексную информацию об этом полисахариде, с акцентом на подробное описание взаимодействия его структурных уровней с его функциональными свойствами, а также тому, как его можно модифицировать в соответствии с различными процессами экстракции, а также возможными направлениями исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве материала для исследования использованы научные публикации, отбираемые по следующим критериям: год издания (2009–2024), география изданий, цитируемость, достоверность результатов относительно структурных характеристик пектиновых веществ 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 ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структурные особенности пектина

По химической структуре пектины представляют собой полисахариды гетерогенной природы, основой пектиновых веществ является молекулярная цепь построенная из остатков α -D-галактуроновой кислоты, соединенных $\alpha(1-4)$ гликозидными связями и сопутствующими арабинами, галактанами и арабиногалактанами, имеющими, как правило, сложное разветвленное строение (Mohnen, 2008). Остатки галактуроновой кислоты, как правило, представляют собой метиловые эфиры и их доля, выраженная в процентах, называется степенью этерификации (DE). По этому показателю различают высокоэтерифицированные пектины ($DE > 50\%$) и низкоэтерифицированные ($DE < 50\%$). Низкоэтерифицированные пектины делятся на две основные группы: обычный низкоэтерифицированный пектин и амидированный низкоэтерифицированный пектин. Амидированные пектины представляют собой низкоэтерифицированные пектины, которые в процессе производства были деэтерифицированы с помощью аммиака и часть

эфирных групп (менее 25 %) в молекуле пектина замещена на амидные группы.

Несмотря на то, что пектины встречаются практически во всех растениях, источниками коммерческого пектина являются цитрусовые отжимы, яблочные выжимки и свекловичный жом. Из перечисленных видов сырья вырабатывают пектин трех основных видов (Рисунок 1):

- высокоэтерифицированный;
- низкоэтерифицированный;
- амидированный.

Высокоэтерифицированные пектины могут быть преобразованы в низкоэтерифицированные посредством химической деэтерификации щелочью или ферментативной обработки пектинметилэстеразой (Bichara et al., 2016).

На Рисунке 2 приведена структура молекулы пектина.

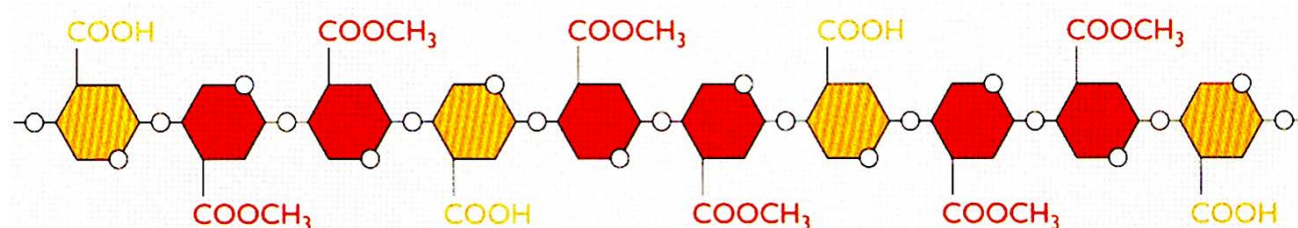
Как видно из Рисунка 2, структура молекулы пектина имеет сложную химическую структуру, состоящую из нескольких структурных субъединиц, рамногалактуронана I (RG-I), рамно-галактуронана II (RG-II) и ксилогалактуронана (XGA), прикрепленных к скелету гомогалактуронана (HG). Гомогалактуронан это линейная структура полигалактуроновой кислоты, в которой имеются метильные группы, присоединенные α -(1–4)-связями к углероду в положении С-6, и ацетильные группы, присоединенные к атому кислорода в положении О-2 или О-3 (Behall, 1986). Содержание галактуроновой кислоты в пектинах, полученных из различного растительного сырья, должно быть не менее 65 % (Voragen et al., 1995). Домен RG-I содержится в количестве 20–35 % в разных видах пектинов, имеет главную цепь из чередующихся остатков

Рисунок 1

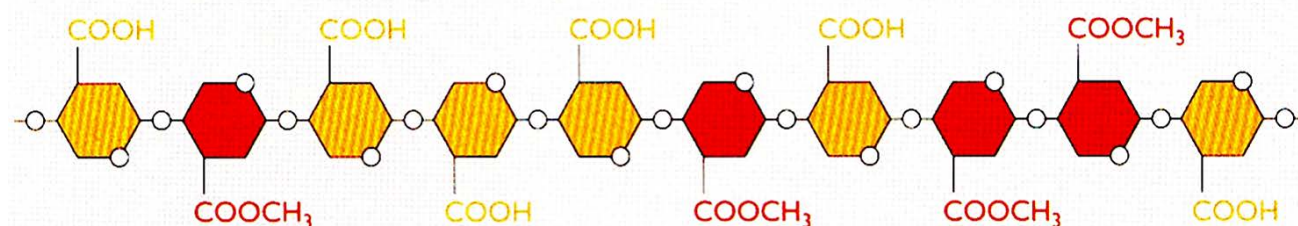
Химические структуры коммерческих пектинов

Figure 1

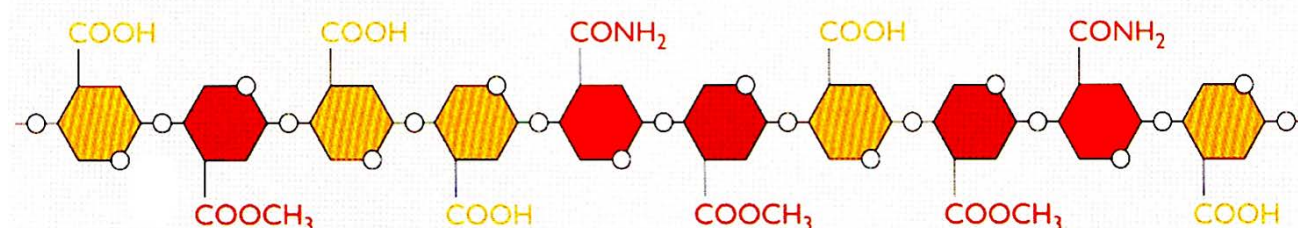
Chemical Structures of Commercial Pectins



Высокометоксилированный пектин (более 50% карбоксильных групп этерифицировано метанолом)



Низкометоксилированный пектин (менее 50% карбоксильных групп этерифицировано метанолом)



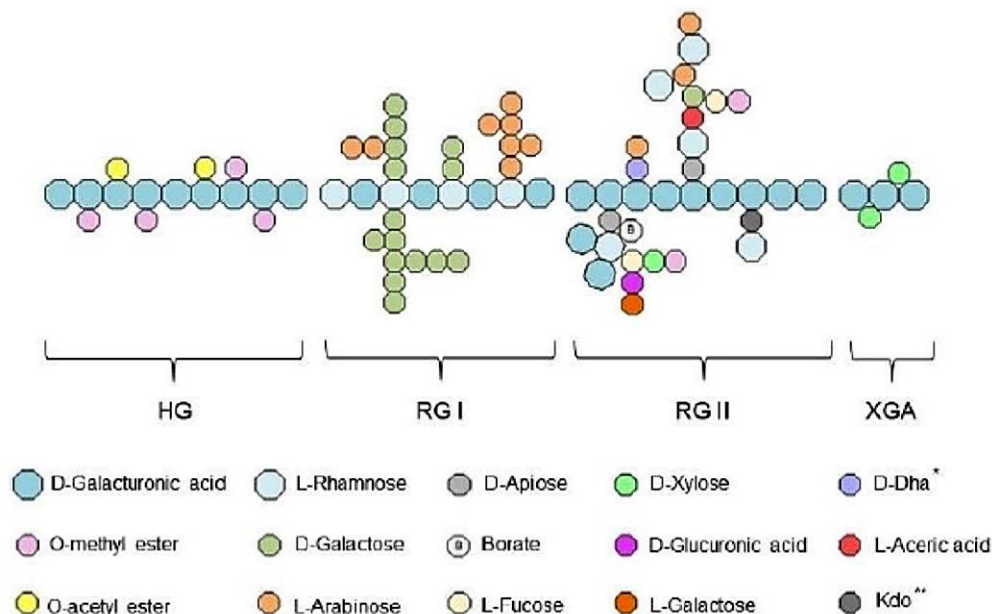
Амидированный пектин (менее 50% карбоксильных групп этерифицировано метанолом и менее 25% — амидировано)

Рисунок 2

Структура молекулы пектина (Mohnen, 2008; Maxwell et al. 2012)

Figure 2

Structure of the Pectin Molecule (Mohnen, 2008; Maxwell et al. 2012)

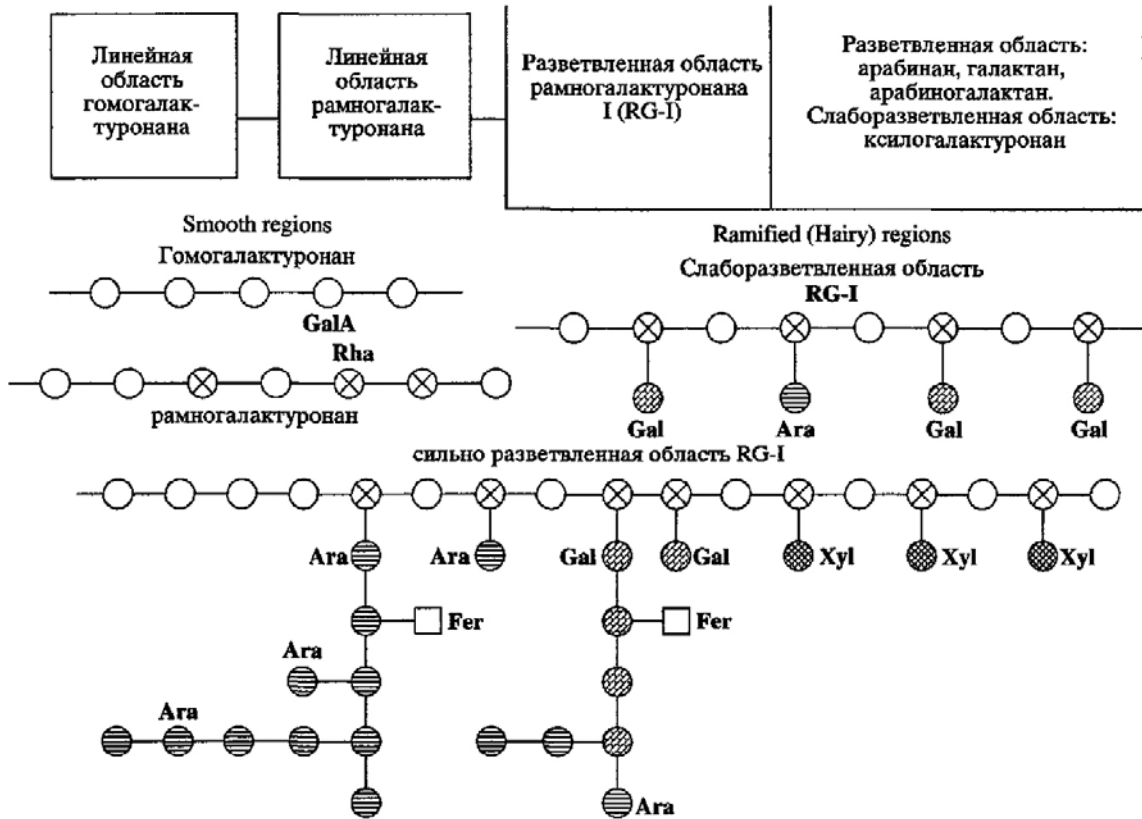


1,4-связанной галактуроновой кислоты и 1,2-связанных остатков рамнозы, частично замещенных остатками галактозы, присоединенными 1,4-связями к остаткам рамнозы (Endress, 1991). Домен RG-II, сравнительно небольшой по размерам полисахарид, который имеет очень сложную химическую структуру, состоящую из 7–9 единиц D- галактуроновой кислоты и 12 различных моно-сахаридных остатков L-рамнозы, D-галактозы, L-арабинозы, L-фукозы и др., в числе которых была установлена 3-дезоксид- D- ликсо-гептулозаровая кислота (DHA) и 2-кето-3-дезоксид- D- маннооктановая кислота (KDO) (Endress, 1991). Ксилогалактуронан (XGA) представляет собой структурный линейный комплекс, прикрепленный β-гликозидной связью с галактуроновой кислотой к атому кислорода в положении O-3 к гомогалактуронану (Behall, 1986). С геометрической точки зрения структурная цепь полисахаридов может быть линейной, линейной с боковыми заместителями и разветвленной (Рисунок 3).

Линейная область молекулы пектина состоит из 1,4-связанных остатков α-D-галактопиранозилуроновой кислоты, которые соединяются между собой одним или двумя остатками α-L-рамнопиранозы, включенными в линейную цепь 1,2-связями. Разветвленная область состоит из трех доменов: рамногалактуронана 1 (RG-I), арабиногалактана и ксилогалактуронана, которые могут присутствовать в различных соотношениях. Домен RG-I в пектинах, полученных из различных видов растительного сырья, может заметно различаться, имея главную цепь из чередующихся остатков 1,4-связанной галак-

туроновой кислоты и 1,2-связанных остатков рамнозы, частично замещенными одиночными остатками галактозы, присоединенными 1,4-связями к остаткам рамнозы (Endress, 1991). Структурная модель, представленная на Рисунке 3 характерна для яблочных, цитрусовых и свекловичных пектинов (Guillotin, 2005), в составе последнего имеются остатки феруловой кислоты (Fer), которые присоединены к остаткам L-арабинофуранозы сложнэфирной связью. Несмотря на общие химические и структурные характеристики пектины могут иметь различные структуры, которые различаются в зависимости от источника растительного сырья и метода экстракции пектиновых веществ, а именно, молекулярная масса и ее распределение, состав нейтральных углеводных боковых цепей, степени метоксилирования и ацетилирования, наличия белков и др. (Ciriminna et al., 2015). Это все в целом определяет и многоуровневую структурную организацию пектина в водных растворах и соответственно его функциональные свойства (Птичкин & Птичкина, 2012). Таким образом, можно констатировать, что цепь пектиновой биомолекулы имеет многоуровневый характер, сходный со структурой белков (Linderstrom-Lange, 1959). Согласно (Rees, 1977) под первичной структурой полисахаридов понимают последовательность ковалентно связанных в макромолекулу мономерных единиц. Вторичная структура – эта форма макромолекулы в трех измерениях. Третичная структура – это компактные формирования фиксированной геометрии, возникающие в результате взаимодействия между цепями. И четвертичная структура это объединение третичных структур в ассоциаты, агрегаты и пр.

Рисунок 3
Геометрия структуры молекулы пектина (Behall, 1986)
Figure 3
Geometry of the Structure of the Pectin Molecule (Behall, 1986)



Обычно химические анализы экстрактов пектина выявляют наличие белков, которые считаются балластными веществами. Они являются неотъемлемыми частями биополимера, поскольку первичная клеточная стенка растений содержит полисахариды и структурные белки, которые преимущественно связаны с нейтральными боковыми цепями пектиновой молекулы (Chen et al., 2015).

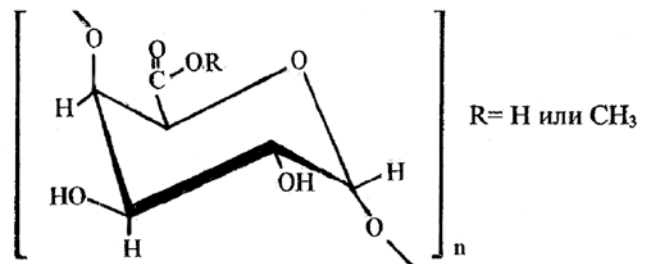
Таким образом можно констатировать, что пектин является сложным полисахаридом, поэтому идентификация и характеристика его химической структуры проводятся с помощью современных аналитических инструментов, таких как инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (Freitas et al., 2021), спектроскопия Рамана с преобразованием Фурье (Bichara et al., 2016), спектроскопия ядерного магнитного резонанса ЯМР (Endress, 1991), масс-спектропия с газовой хроматографией (Wang et al., 2018), высокоэффективная жидкостная хроматография (ВЭЖХ), электрофорез в углеводном геле (Goubet et al., 2005), а также атомно-силовая микроскопия (AFM) (Round et al., 1997). Использование этих методов привело к представлению первичной структуры полисахаридов, в частности, пектина в виде молекулярной цепи построенной из остатков D-галактуроновой

кислоты, соединенных α(1–4) гликозидными связями (Птичкин & Птичкина, 2012) (Рисунок 4).

Линейная структура полигалактуроновой кислоты обладает определенной гибкостью и прерывается внедрением (1–2)-связанной L-рамнозы и других моносахаров (Оводова и соавт., 2010). Вторичная структура полисахаридов т.е. форма макромолекулы в трех измерениях,

Рисунок 4
Первичная структура частично этерифицированного пектина (Птичкин & Птичкина, 2012)

Figure 4
Primary Structure of Partially Esterified Pectin (Ptichkin & Ptichkina, 2009)



определяется действием ряда факторов, среди которых основными являются: ближние вдольцепные взаимодействия; дальние объемные взаимодействия; энтропийные эффекты; взаимодействия с внешней средой (Munoz-Almagro et al., 2019). Эти факторы действуют одновременно, но интенсивность каждого из них может быть различной, что и определяет соответствующую конформацию полисахарида. Упорядоченная формула молекул полисахаридов зависит от относительной ориентации гликозидных связей, премыкающих с обеих сторон к моносахаридному остатку. Макромолекулы пектина практически параллельны друг другу, но смещены фактически на ширину пиранозного кольца, в результате чего цепь находится в спиральной конформации типа изогнутой ленты (Бирштейн, 1996).

Третичная структура пектиновых полисахаридов представляется в виде двойной спирали с шагом 13.4 Å⁰ (Rees, 1977) и зависит от степени этерификации пектина. Низкоэтерифицированный пектин в присутствии ионов Ca²⁺ имеет первичную структуру сильно «гофрированной ленты» и его третичную структуру можно представить в виде укладки яиц в специальный ящик (egg-box model) (Fishman et al., 1999). В настоящее время однозначного теоретического ответа на вопрос о происхождении третичной структуры пектина не существует. Можно считать, что основным фактором образования таких упорядоченных структур является наличие водородных или нековалентных связей, действие которых носит кооперативный характер (Птичкин & Птичкина, 2012), приводящих к формированию упорядоченных структур. Четвертичная структура пектиновых полисахаридов по определению есть объединение третичных структур (Round et al., 1997).

Химическая и пространственная организация пектиновой молекулы может быть подвержена физическим, химическим и ферментативным изменениям и различные функциональные группы, присутствующие в структуре пектина, могут стимулировать различные функции, а определенные модификации могут позволить пектину иметь новые применения из-за изменений его физико-химических свойств, таких как формальный заряд, степень этерификации и молекулярная масса (Wang et al., 2018; Freitas et al., 2020b; Chen et al., 2015).

Технология извлечения пектина

Пектиновые вещества включают протопектин, пектиновые полисахариды и сопутствующие арабинаны, галактаны и арабиногалактаны (Kertesz, 1951). Протопектин (Голубев, 1995; Донченко & Фирсов, 2007) представляет собой нерастворимый пектиновый комплекс, образующий вместе с целлюлозой и гемицеллюлозами каркас клеточной стенки, и дающий при обработке кислотными

агентами растворимый пектин, извлекаемый из растительного материала. Все существующие способы получения пектиновых веществ из растительного сырья состоят в обработке последнего экстрагирующей жидкостью для перевода в раствор как можно большего количества водорастворимого пектина. Для извлечения пектиновых веществ из любого растительного сырья необходимо провести гидролиз протопектина, чтобы максимально возможная молекулярная масса образующегося пектина позволила ему диффундировать из клеточной ткани. При этом желательно, чтобы межмолекулярное расщепление преобладало над внутримолекулярным (Robinson, 1982; Brant, 1980). В промышленных масштабах пектин извлекается в основном из отходов сокового производства, в частности, цитрусовых (85 %) и яблочных (14 %) выжимок и отходов сахарного производства — свекловичного жома (1 %) (Wang et al., 2018; Ma et al., 2016). Однако имеющиеся современные данные показывают, что пектин можно извлекать из широкого спектра агропромышленных отходов пищевого назначения — кожуры манго (Rojas et al., 2018), арбузных корок (Petkowicz et al., 2017), корзинок подсолнечника (Джонмуродов и соавт., 2015), кожуры граната (Moorthy et al., 2015), жома тыквы (Torkova et al., 2018; Lalnunthari et al., 2020), створки коробочек хлопчатника (Рахматов и соавт., 2013), морских водорослей (Семенова и соавт., 2019), а также из дикорастущих плодов (Фарзалиев и соавт., 2021) и из непищевых растений (Freitas et al., 2021; Оводова и соавт., 2010), обладающих специфической физиологической активностью.

Кислотная экстракция и спиртовое осаждение обычно используется для получения коммерческих пектинов, что можно объяснить отсутствием технологической сложности, несмотря на высокие затраты энергии и растворителя и высокую экологическую нагрузку на окружающую среду (Freitas et al., 2021; Yang et al., 2018; Badaro et al., 2020). Многие исследователи изучали влияние различных кислотных экстрагентов и условий экстракции (pH, температура, величина гидромодуля — соотношение твердой и жидкой фаз) в статическом режиме на выход, структуру и физико-химические свойства пектиновых веществ. Как правило, в процессе экстракции применяются высокие температуры (60–90 °C, длительный период времени (1–6 час), а для осаждения пектина используется спиртовое осаждение (Freitas et al., 2021; Wickler et al., 2014; Sun et al., 2020). Все это приводит к распаду боковых цепей полисахаридной молекулы и к частичной деградации других структурных единиц и, как следствие, к потере физико-химических свойств конечного продукта (Alexos, 1991).

В последние годы изучались альтернативные методы экстракции пектиновых веществ для преодоления экологических проблем, связанных с образованием достаточно токсичных сточных вод, образующихся

при традиционной технологии. С момента популяризации «Зеленой химии» появились новые технологии, которые включают для экстракции микроволновую вспомогательную экстракцию (Xu et al., 2018; Lefsih et al., 2017; Arrutia et al., 2020), ультразвуковую экстракцию (Wang et al., 2018; Souza et al., 2018; Jafarzadeh-Moghaddam et al., 2020; Wafaa et al., 2021), субкритическую водную экстракцию (Munoz-Almagro et al., 2019; Liew et al., 2018; Li et al., 2019), импульсное электрическое поле (Богус & Шаззо, 2003), гидролиз при высоком давлении (флеш-метод) (Mohnen, 2008; Fishman et al., 1999; Muhidinov et al., 2012). Гидроакустические процессы позволяют не только резко интенсифицировать массообмен в системе пектин-содержащее сырье – экстрагент, но и осуществлять гидролиз протопектина и его диффузию в водный раствор при температуре окружающей среды и в безреагентном режиме (Соснина и соавт., 1999; Zhang et al., 2013). Ультразвуковой массоперенос вызывает гидратацию пектинового комплекса в средней пластинке растительных клеточных структур, что приводит к разрушению растительных тканей, и, соответственно, к исключительно высокому выходу пектиновых веществ при очень коротком времени обработки и снижению энергозатрат на их экстракцию. Установлено (Горшкова & Слободов, 2018; Liu et al., 2013), что трансформация протопектина и диффузия его из растительной ткани в динамических условиях непрерывного потока гидролизующего агента протекает как усредненная химическая реакция разрушения ковалентной связи компонентов пектинового полисахарида с растительной клеточной стенкой, включая боковые связи структурных компонентов HG и RG, а также ионные связи карбоксильных групп с ионами кальция по кинетическому уравнению первого порядка (Шелухина, 1988).

Таким образом можно констатировать, что структурные характеристики и физико-химические показатели пектина во многом зависят не только от вида растительного сырья, но и условий проведения процесса экстракции, а, следовательно, влияют и на функциональную активность конечного продукта и эти вопросы остаются в центре внимания исследователей (Freitas et al., 2021; Mikshina et al., 2017).

Применение пектина

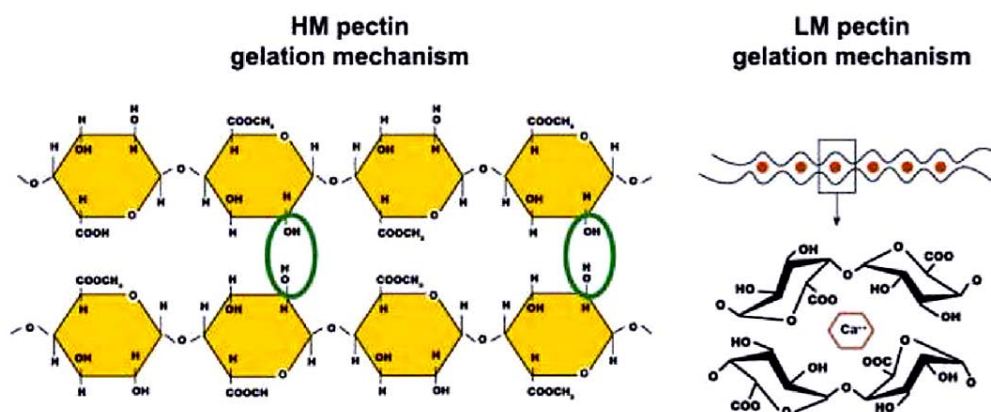
Являясь составной частью земных растений, пектин всегда был компонентом пищи со времени происхождения человека. Всемирной организацией Здравоохранения пектин признан абсолютно токсикологически безопасным продуктом (Maxwell et al., 2012; Истомин & Пилат, 2009). Он не имеет ограничений по применению и признан в подавляющем большинстве стран как ценный пищевой многофункциональный ингредиент со статусом "GRAS" и на сегодня коммерческий пектин нашел широкое применение во всех областях пищевой индустрии (Голубев, 1995; Донченко & Фирсов, 2007; Naqash et al., 2017). Одной из важнейших технологических характеристик пектина является его способность образовывать гели. Гелеобразование – это следствие структурных особенностей пектиновых полисахаридов, которое проявляется в объединении или сшивании длинных полимерных цепей для формирования трехмерной непрерывной сети, которая захватывает и иммобилизует жидкость внутри, образуя прочную и жесткую структуру (Kertez, 1951; Mikshina et al., 2017; Микшина, 2019). Характерные различия между гелями возникают из-за различий в гибкости сети, количестве и природе поперечных связей, притяжении и отталкивании между элементами

Рисунок 5

Механизм гелеобразования высокоэтерифицированного (HM pectin) и низкоэтерифицированного пектина (LM pectin) (Forsberg et al., 1982)

Figure 5

Mechanism of Highly Esterified (HM Pectin) and Low Esterified Pectin (LM Pectin) Gelation (Forsberg et al., 1982)



сети и взаимодействиях полимер-растворитель (Мельникова и соавт., 1995; Мазур и соавт., 2014). Степень этерификации пектина определяет его растворимость и механизм гелеобразования (Рисунок 5), поэтому высокометоксилированные и низкометоксилированные пектины образуют гели в совершенно разных условиях.

Сложноэфирная группа менее гидрофильна, чем карбоксильная группа, поэтому высокоэтерифицированный пектин будет гелеобразовываться с большей скоростью и при более высоких температурах, чем низкометоксилированный пектин. Установлено (Rees, 1977), что на процесс гелеобразования могут влиять такие параметры как степень метилирования, распределение заряда вдоль основной цепи молекулы пектина, его средняя молекулярная масса, ионная сила, pH, температура и наличие растворимых твердых веществ. Структура геля, образованная двухвалентными ионами и низкометоксилированным пектином, известна как модель яичного ящика (egg-box) (Grant et al., 1973) и прочность геля во многом зависит как от концентрации солей кальция, так и от концентрации пектина. Кросс-связывание молекул пектина ионами кальция играет большую роль в организации полисахаридов как в стенках растений, так и в пищевых системах (Свиридов & Чижов, 1976). Свойства геля с высокоэтерифицированным пектином зависят от присутствия сахара, кислоты и молекулярной массы пектина, которые определяют его конформационную и термодинамическую стабильность (Martau et al., 2019; Chen et al., 2015; Микшина, 2019). Сближение пектиновых цепочек происходит с равномерной частотой на линейных участках в так называемых зонах связывания, которые прерываются встроенными остатками рамнозы, а также пространственными изгибами самой цепочки. Хотя первичная структура достаточно детально изучена, вторичная, третичная и четвертичная структуры в гелях или растворах окончательно не установлены (Chen et al., 2015; Свиридов & Чижов, 1976). Изучение структуры гелей с помощью атомно-силовой микроскопии (Forsberg et al., 1982) на примере ультраструктур с яблочным, апельсиновым, персиковым и томатным пектинами показало, что отдельные молекулы пектина имеют диаметр в диапазоне 0.5–0.8 нм, а среднечисленная длина контура пектиновых поперечных связей в кольцевых микрогелевых сетях, растворенных в воде составляет около 70 нм (Fishman et al., 2009) и предполагаемый пектиновый каркас в отсутствие сахарозы представляет собой частично сшитую сеть, в которой многие из потенциально сшивающих фрагментов связаны только на одном конце (Fishman et al., 2004). Температура во время хранения гелей также очень важна и может оказать большое влияние на взаимодействие молекул пектина и время, необходимое для образования геля (Мазур и соавт., 2014).

Пектин в пищевой промышленности

Пектин обычно используется в пищевой промышленности в качестве желирующего, загущающего, стабилизирующего и эмульгирующего агента (Ma et al., 2020; Sun et al., 2020; Celus et al., 2018; Espitia et al., 2014) при производстве джемов, фруктовых соков, десертов, молочных продуктов и желе. Пектин образует гели и поэтому широко используется в гидратированных и вязких продуктах (Douglas et al., 2018). Использование пектина в качестве эмульгатора обусловлено его молекулярными характеристиками (белковая часть, ацетильная группа, содержание феруловой кислоты, степень метоксилирования, нейтральные боковые цепи сахаров и значительный молекулярный вес) и составом эмульгируемых растворов. Так размер капель эмульсий, стабилизированных пектином, уменьшается от 4.12 до 1.5 мкм, что приводит к повышению коллоидной стабильности и увеличению качества и срока хранения белковых и молочных продуктов (Chen et al., 2016). В молочной промышленности применяют модифицированные пектины для стабилизации структуры и удлинения сроков хранения разнообразных молочных продуктов – жидких йогуртов, йогуртов с желеобразной консистенцией, творога, пудингов, десертов и мороженого (Донченко & Фирсов, 2007).

Учитывая, что водные растворы пектиновых веществ обладают антиоксидантной активностью, выражающейся в нейтрализации свободных радикалов (Celus et al., 2018), добавление его в пищевые эмульсии в качестве антиоксиданта способствует многочисленным функциональным возможностям в плане уменьшения количества синтетических добавок, что позволяет его использовать в качестве альтернативы синтетическим антиоксидантам (Xu et al., 2018; Fishman et al., 2004).

Пектин, являясь гидроколлоидом, позволяет улучшить качественные показатели хлеба, в частности, увеличение объема и пористости, улучшение структурно-механических свойств мякиша и увеличение его влажности (Силко и соавт., 2005). Установлено (Древин и соавт., 2016), что хлебобулочные изделия, обогащенные различными видами пектинов, обладают сорбционным, местным противовоспалительным и антиоксидантным эффектом.

Способность пектина образовывать гели и пленки обуславливает и его эффективное применение при производстве биоразлагаемых защитных упаковочных материалов и съедобных покрытий (Espitia et al., 2014; Sakooei-Vayghan et al., 2020). В пищевых продуктах биокompозитное покрытие на основе пектина оказывает значительное влияние на контроль потери воды и уменьшение микробной порчи фруктов, сохраняя их текстуру и продлевая срок их годности (Anastas & Eghbali, 2010). Учитывая, что пищевая упаковка еже-

годно становится причиной миллионов тонн отходов, что является серьезной экологической проблемой (Souza et al., 2020), исследования в области биоразлагаемых упаковочных материалов пищевых продуктов являются особенно актуальными (Мельникова и соавт., 1995; Eca et al., 2015). Следует отметить, что использование для этих целей 3D-технологий многослойных покрытий позволяет получать пленки с высокими физическими, транспортными и механическими свойствами (Gaona-Sanchez et al., 2021).

Пектин в биомедицинских продуктах

В последние годы, одной из инновационных областей технологии биокompозитных материалов является использование пектиновых полисахаридов в производстве биомедицинских препаратов, которые используются для доставки лекарственных средств, доставки генов, заживления ран, снижения уровня холестерина, тканевой инженерии, изготовления мембран для контактных линз, искусственных роговиц, катетеров, противораковых препаратов (Martau et al., 2019; Lopez-Mata et al., 2018; Munarin et al., 2012; Li et al., 2021; Ullah et al., 2019), а также слизистых и желудочно-кишечных носителей для введения лекарств и носителей клеток костной ткани (Lopez-Mata et al., 2018). Наличие такой функциональной активности пектина обусловлено его составом и наличием структурных фрагментов, обладающих биоактивными свойствами (Li et al., 2021). Благодаря способности пектина образовывать гели в кислой среде, улучшается время контакта лекарств от ожирения и лечения глаз (Sriamornsak et al., 2010). Это связано с тем, что когда гели попадают в водную среду желудочного сока, они набухают и прилипают к стенкам желудка до переваривания, обеспечивая чувство сытости и отсутствия аппетита (Martau et al., 2019). Кроме того, диеты богатые растворимой клетчаткой, включая пектин, увеличивают выведение желчных кислот и, следовательно, приводят к снижению уровня холестерина, что положительно сказывается на снижении риска сердечно-сосудистых заболеваний (Wicker et al., 2014; Li et al., 2021). Исследования показывают, что высокоэтерифицированный пектин снижает уровень холестерина более эффективно, чем низкоэтерифицированный пектин (Wickler et al., 2014). Полисахариды широко используются в системах доставки лекарственных средств из-за их способности подвергаться широкому спектру химических и ферментативных реакций, образуя новые молекулы (Tian et al., 2020). В этом смысле 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), а нетоксичность и возможность легко модифицировать его функциональные группы, например, $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$,

что обеспечивает ему широкое применение (Zhang et al., 2015). В некоторых случаях применение пектина в качестве инкапсулирующего агента при введении лекарственных средств более пригодны высокоэтерифицированные пектины, поскольку они имеют более высокую молекулярную массу и меньшую растворимость в воде (Zhang et al., 2015). Достаточно эффективным является использование пектина в сочетании с другими природными биополимерами (Zhang et al., 2015; Tian et al., 2020), например хитозаном (Hwang & Shin, 2018) или биоактивными соединениями, такими как куркумин (Bai et al., 2017) и цистин (Majzoob et al., 2006). Производство мембран на основе геля и экстракта алоэ позволило создать биоматериал для эффективного заживления ран (Tian et al., 2020), а биокompозит из пектина и желатина с содержанием алоэ Вера и куркумином позволил создать высокоэффективные повязки для лечения широкого спектра ран, в том числе и ожоговых (Tian et al., 2020).

Исследования с пектином, разложенном на более мелкие фрагменты с более низкой молекулярной массой, которую может усвоить организм человека, показали его эффективность в ингибировании метастазирования при заболеваниях раком (Maxwell et al., 2012; Ullah et al., 2019). Модифицированный пектин загруженный цитотоксическими препаратами для индукции апоптоза неопластических клеток, может повысить эффективность традиционной химиотерапии (Martau et al., 2019; Munarin et al., 2012), сенсibiliзируя опухолевые клетки к химиотерапевтическим препаратам. Перспективными системами доставки лекарств являются биокompозитные системы на основе пектина в виде гидрогелей и гибридных наночастиц (Cheewatanakornkool et al., 2017). Нанокompозиты на основе наночастиц AgO , покрытые оболочкой высокометоксилированного пектина размером 20–30 нм, проявляют общетоксическое действие с критическими органами-мишенями (печень и селезенка) при внутрижелудочном пути поступления (Bai et al., 2017). Пектин в этом смысле имеет много преимуществ, включая хорошую биосовместимость, биоразлагаемые гидрофильные свойства и регулируемые свойства высвобождения лекарственных препаратов (Ye et al., 2018; Li et al., 2018).

Было установлено (Sarioglu et al., 2019), что комплексы пектина с ацетилсалициловой кислотой показывают снижение ее ulcerогенного действия на стенки желудочно-кишечного тракта и сохранение фармакологической активности. Известно (Rainsford, 2012), что большинство нестероидных противовоспалительных средств, которые широко применяются в клинической практике, практически нерастворимы в воде. На примере ибупрофена установлено (Минзанова и соавт., 2020), что комплексообразование его с яблочным пектином позволяет получить их водорастворимые комплексы, где на один моль пектина приходится 14 молей ибупрофена. Полу-

ченная лекарственная форма препарата ибупрофена отличается повышенной растворимостью и биодоступностью, что приводит к высокой терапевтической эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы к пектиновым полисахаридам обращено особенно пристальное внимание научного сообщества, производителей, потребителей, поскольку пектиновые вещества широко распространены в природе, имеют относительно низкую стоимость и обладают широким аспектом полифункциональности.

Широкий набор направлений использования пектиновых полисахаридов, а также невозможность большей частью его адекватной замены как полифункционального ингредиента, позволяет отнести их к пищевым добавкам, без которых невозможно производство качественно новых пищевых продуктов, отвечающих современным физиологическим и эстетическим потребностям человека. К тому же для пектиновых полисахаридов характерно образование супрамолекулярных структур с биологически активными веществами, другими биополимерами, лекарственными препаратами и наночастицами металлов. В этой связи представляется актуальным проведение комплексных исследований параллельного изучения структурных особенностей пектина и его технологических и функциональных свойств одновременно.

Из результатов обзора очевидно, что в настоящее время достигнуты большие и принципиально важные успехи, особенно в выяснении основных структурных и химических характеристик, физико-химических свойств и биологической активности пектиновых веществ. Наблюдается растущий рост исследований пектинов, которые становятся все более значимыми и широко распространенными для различных применений в пищевой, фармацевтической промышленности, а также в биомедицинских приложениях.

Современные знания о взаимосвязи между физико-химическими, технологическими и структурно-молекулярными особенностями пектиновых полисахаридов позволяют модифицировать их функциональные свойства. Актуальным является и выявление новых структурных типов пектинов из новых природных источников, уста-

новление их строения, в том числе выяснение элементов тонкой структуры, включая характер связи с белком, присутствующим в составе пектиновых веществ. Можно сказать, что пектин может быть адаптирован для создания новых биомедицинских лекарственных средств, поскольку структурные изменения приводят к появлению различных функций и широкой биологической активности при лечении различных заболеваний и для увеличения продолжительности активной жизни человека.

На основе выявленных теоретических сведений по взаимосвязи свойств и структурных особенностей пектиновых полисахаридов важным аспектом является исследование и разработка новых технологий извлечения пектиновых веществ из различных источников растительного сырья с целью получения модифицированных пектинов с новыми биоактивными структурами и технологическими функциями. И для этих целей исходя из пятого принципа зеленой химии, необходимо использовать более безопасные растворители и вспомогательные вещества к числу которых относятся ионные жидкости и глубокие натуральные эвтектические растворители для высокоэффективной экстракции пектиновых веществ.

ВКЛАД АВТОРОВ

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

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

AUTHORS CONTRIBUTION STATEMENT:

Vladimir N. Golubev: writing — review and editing

Tatyana B. Tsyganova: writing — review and editing

ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

- Бирштейн, Т. М. (1996). Конформация макромолекул. *Соросовский образовательный журнал*, 11, 26–29
- Birstein, T. M. (1996). Conformation of macromolecules. *Sorosovsky Educational Journal*, 11, 26–29. (In Russ.)
- Богус, А. М., & Шаззо, З. И. (2003). *Физические способы получения пектина*. Издательство «Экоинвест».
- Bogus, A. M., & Shazzo, Z. I. (2003). *Physical methods of pectin extraction*. Ecoinvest Publishing. (In Russ.)
- Донченко, Л. В., & Фирсов, Г. Г. (2007). *Пектин: основные свойства, производство и применение*. ДеЛи принт.
- Donchenko, L. V., & Firsov, G. G. (2007). *Pectin: Basic properties, production, and application*. Deli Print. (In Russ.)
- Древин, В. Е., Крючков, Е. И., & Крючкова, Т. Е. (2016). Биологические аспекты применения пектина при производстве пшеничного хлеба. *Биологические аспекты производства сельскохозяйственной продукции*, 2(34), 37–42.
- Drevnin, V. E., Kryuchkov, E. I., & Kryuchkova, T. E. (2016). Biological aspects of pectin application in wheat bread production. *Biological Aspects of Agricultural Production*, 2(34), 37–42. (In Russ.)
- Джонмуродов, А. С., Тешаев, Х. И., Холов, Ш. Е., Усманова, С. Р., Мухидинов З.К., Чау Х.К., & Лиу Л.С. (2015). Физико-химические и гидродинамические свойства пектиновых полисахаридов подсолнечника. *Доклад АН РТ*, 58, 241–247.
- Jonmurodov, A. S., Teshae, Kh. I., Kholov, Sh. E., Usmanova, S. R., Mukhidinov, Z. K., Chau, H. K., & Liu, L. S. (2015). Physicochemical and hydrodynamic properties of sunflower pectin polysaccharides. *Report of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan*, 58, 241–247. (In Russ.)
- Голубев, В. Н., & Шелухина, Н. П. (1995). *Пектин: химия, технология, применение*. Изд-во АТН РФ.
- Golubev, V. N., & Shelukhina, N. P. (1995). *Pectin: Chemistry, technology, application*. ATN RF Publishing. (In Russ.)
- Горшкова, Р. М., Халиков, Д. Х., Слободова, Г.А., Успенский А.А., & Слободов А.А. (2018). Физико-химическое исследование процесса распада протопектина под действием кислотных катализаторов. *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*, 43(69), 7–11.
- Gorshkova, R. M., Khalikov, D. Kh., Slobodova, G. A., Uspensky, A. A., & Slobodov, A. A. (2018). Physicochemical study of the protopectin degradation process under the action of acid catalysts. *Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 43(69), 7–11. (In Russ.)
- Истомин, А. В., & Пилат, Т. П. (2009). *Гигиенические аспекты использования пектина и пектиновых веществ в лечебно-профилактическом питании: пособие для врачей*. Медиздат.
- Istomin, A. V., & Pilat, T. P. (2009). *Hygienic aspects of using pectin and pectin substances in therapeutic and preventive nutrition: A guide for physicians*. Medizdat. (In Russ.)
- Мазур, Л. М., Попова, И. В., Симурова, Н. В., & Слива, Ю. В. (2014). Физикохимические процессы гелеобразования пектинов в пищевых технологиях. *Сахар*, 2, 43–46.
- Mazur, L. M., Popova, I. V., Simurova, N. V., & Sliva, Yu. V. (2014). Physicochemical processes of pectin gelation in food technologies. *Sugar*, 2, 43–46. (In Russ.)
- Мамедов, Э. И., Дергунова, Е. С., & Калмыкова, Е. Н. (2021). Возможности биомедицинского применения модифицированных пектинов. *Сорбционные и хроматографические процессы*, 21(1), 77–85. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3222>
- Mamedov, E. I., Dergunova, E. S., & Kalmykova, E. N. (2021). Possibilities of biomedical application of modified pectins. *Sorption and Chromatographic Processes*, 21(1), 77–85. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3222> (In Russ.)
- Мельникова, Г. Г., Кузнецова, Г. Б., Каллистов, О. В., & Сидорович, А. В. (1995). Упругое рассеяние поляризованного света и надмолекулярная структура водно-солевых растворов фракций яблочного пектина. *Высокомолекулярные соединения, Серия Б*, 37, 1206–1208.
- Melnikova, G. G., Kuznetsova, G. B., Kallistov, O. V., & Sidorovich, A. V. (1995). Elastic scattering of polarized light and the supramolecular structure of aqueous-salt solutions of apple pectin fractions. *High Molecular Compounds, Series B*, 37, 1206–1208. (In Russ.)
- Микшина, П. В. (2019). Классические и новые типы пектиновых гелей для пищевых биотехнологий и медицины. *Пищевые технологии и биотехнологии. материалы XVI Всероссийской конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, посвященной 150-летию Периодической таблицы химических элементов: в 3 частях*, 313–338.
- Mikshina, P. V. (2019). Classical and new types of pectin gels for food biotechnology and medicine. *Food Technologies and Biotechnology: Proceedings of the XVI All-Russian Conference of Young Scientists, Graduate Students, and Students with International Participation, Dedicated to the 150th Anniversary of the Periodic Table of Chemical Elements (Vol. 3, pp. 313–338)*. (In Russ.)
- Минзанова, С. Т., Чекунов, Е. В., Милуков, В. А., Миронова, А. В., Хабибуллина, А. В., Архипова, Д. М., Самигуллина, А. И., & Губайдуллин, А. Т. (2020). Получение, состав и физико-химические свойства комплексов пектина с ибупрофеном. *Доклады РАН, Химия, Науки о материалах*, 491, 49–54. <https://doi.org/10.31857/S2686953520020065>
- Minzanova, S. T., Chekunkov, E. V., Milyukov, V. A., Mironova, A. V., Khabibullina, A. V., Arkhipova, D. M., Samigullina, A. I., & Gubaidullin, A. T. (2020). Preparation, composition, and physicochemical properties of pectin-ibuprofen complexes. *Reports of the Russian Academy of Sciences: Chemistry, Materials Science*, 491, 49–54. <https://doi.org/10.31857/S2686953520020065> (In Russ.)

- 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., & Суслянок, Г. М. (2024). *Пищевая химия*. ГИОРД, 688.
- 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*. GIORД. (In Russ.)
- Оводов, Ю. С. (2009). Современные представления о пектиновых веществах. *Биоорганическая химия*, 35(3), 293–310.
- Ovodov, Yu. S. (2009). Modern concepts of pectin substances. *Biorganic Chemistry*, 35(3), 293–310. (In Russ.)
- Оводова, Р. Г., Головченко, В. В., Попов, С. В., & Оводов, Ю. С. (2010). Новейшие сведения о пектиновых полисахаридах. *Известия коми научного центра УРО РАН*, 3(3), 37–45.
- Ovodova, R. G., Golovchenko, V. V., Popov, S. V., & Ovodov, Yu. S. (2010). Latest data on pectin polysaccharides. *Proceedings of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 3(3), 37–45. (In Russ.)
- Птичкин, И. И., & Птичкина, Н. М. (2012). *Пищевые полисахариды: Структурные уровни и функциональность*. ГУП Типография, 6.
- Ptichkin, I. I., & Ptichkina, N. M. (2012). *Food polysaccharides: Structural levels and functionality*. GUP Typography 6. (In Russ.)
- Рахматов, О., Нуриев, К. К., & Юсупов, А. М. (2013). Безотходная технология переработки остатков хлопчатника. *Вестник Алтайского аграрного университета*, 6, 103–110.
- Rakhmatov, O., Nuriev, K. K., & Yusupov, A. M. (2013). Waste-free technology for processing cotton residues. *Bulletin of the Altai Agricultural University*, 6, 103–110. (In Russ.)
- Свиридов, А. Ф., & Чижов, О. С. (1976). Химические методы частичного расщепления полисахаридов. *Биоорганическая химия* 2(3), 315–350.
- Sviridov, A. F., & Chizhov, O. S. (1976). Chemical methods of partial polysaccharide cleavage. *Bioorganic Chemistry*, 2(3), 315–350. (In Russ.)
- Семенова, Е. В., Билименко, А. С., & Чеботок, В. В. (2019). Использование продуктов морских водорослей в медицине и фармации. Современные проблемы науки и образования, 5.
- Semenova, E. V., Bilimenko, A. S., & Chebotok, V. V. (2019). The use of seaweed products in medicine and pharmacy. *Modern Problems of Science and Education*, 5. (In Russ.)
- Силко, С. Н., Сокол, Н. В., & Донченко, Л. В. (2005). Использование пектина с целью улучшения качества хлеба. *Успехи современного естествознания*, 5, 60–60.
- Silko, S. N., Sokol, N. V., & Donchenko, L. V. (2005). The use of pectin to improve bread quality. *Advances in Modern Natural Sciences*, 5, 60. (In Russ.)
- Соснина, И. А., Миронов, В. Ф., Коновалов, В. И., Михалкина, Г. С., Смоленцев, А. В., Лапин, А. А., Федоров, А. Д., & Харитонов, В. Д. (1999). Экстрагирование пектиновых веществ амаранта в суперкавитирующем аппарате роторно-пульсационного типа. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 6, 32–35.
- Sosnina, I. A., Mironov, V. F., Konovalov, V. I., Mikhalkina, G. S., Smolentsev, A. V., Lapin, A. A., Fedorov, A. D., & Kharitonov, V. D. (1999). Extraction of pectin substances from amaranth in a supercavitating rotary-pulsation apparatus. *Storage and Processing of Agricultural Raw Materials*, 6, 32–35. (In Russ.)
- 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. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.247>
- Farzaliev, E. B., Golubev, V. N., & Tsyganova, T. B. (2021). Study and identification of pectin substances from wild sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.) fruits. *Storage and Processing of Farm Products*, 3, 115–125. <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.247> (In Russ.)
- Шелухина, Н. П. (1988). *Научные основы технологии пектина*. Илим.
- Shelukhina, N. P. (1988). *Scientific foundations of pectin technology*. Ilim.
- Alexos, M. A. V., & Thibault, J. M. (1991). Influence of substituents of the carboxyl groups and of the rhamnose content on the solution properties of pectin. *International Journal of Biological Macromolecules*, 13(2), 77–82. [https://doi.org/10.1016/0141-8130\(91\)90052-V](https://doi.org/10.1016/0141-8130(91)90052-V)
- Anastas, P., & Eghbali, N. (2010). Green chemistry: Principles and practice. *Chemical Society Review*, 39, 301–312. <https://doi.org/10.1039/b918763b>
- Arrutia, F., Adam, M., Calvo-Carrascal, M., Mao, Y., & Binner, E. (2020). Development of a continuous-flow system for microwave-assisted extraction of pectin-derived oligosaccharides from food waste. *Chemical Engineering*, 395, 250–256. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125056>
- Bai, F., Diao, J., Wang, Y., Sun, S., Zhang, H., Liu, Y., Wang, Y., & Cao, J. (2017). A new water-soluble nanomicrocell formed through self-assembly of pectin-curcumin conjugates: Preparation, characterization and anticancer activity. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 65, 6840–6847. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02250>
- Badaró, A. T., Garcia-Martin, J. F., López-Barrera, M. D. C., Barbin, D. F., & Alvarez-Mateos, P. (2020). Determination of pectin content in orange peels by near infrared hyperspectral imaging. *Food chemistry*, 323, 126861. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126861>
- Behall, K., & Reiser, S. (1986). Chemistry and function of pectins. In M. L. Fishman (Ed.), *Effects of Pectin on Human Metabolism*. Washington, DC: American Chemical Society (pp. 248–265). <https://doi.org/10.1021/BK-1986-0310>
- Bichara, L. C., Alvarez, P. E., Fiori Bimbi, M. V., & Vaca, Y. (2016). Structural and spectroscopic study of a pectin isolated from citrus peel by using FTIR and FT-Raman spectra and DFT calculation. *Infrared Physics & Technology*, 76, 315–327. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.03.009>

- Brant, D. A. (1980). Conformation and behavior of polysaccharides in solution. *The Biochemistry of Plants* (Vol. 3, pp. 425–472). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-675403-2.50017-X>
- Brouns, F., Theuvsissen, E., Adam, A., et al. (2012). Cholesterol-lowering properties of different pectin types in mildly hypercholesterolemic men and women. *European Journal of Clinical Nutrition*, 66, 591–599. <https://doi.org/10.1038/ejcn.2011.208>
- Celus, M., Salvia-Trujillo, L., Kyomugasho, C., Maes, I., Van Loey, A. M., Grauwet, T., & Hendrickx, M. E. (2018). Structurally modified pectin for targeted lipid antioxidant capacity in linseed/sunflower oil-in-water emulsions. *Food chemistry*, 241, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.056>
- 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>
- Chen, J., Liu, W., Liu, C., Li, T., Liang, R., & Luo, S. (2015). Pectin modifications: A review. *Critical Review of Food Science and Nutrition*, 55, 1684–1698. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.718722>
- Cheewatanakornkool, K., Niratisai, S., Manchun, S., Dass, C. R., & Sriamornsak, P. (2017). Characterization and *in vitro* release studies of oral microbeads containing thiolated pectin-doxorubicin conjugates for colorectal cancer treatment. *Asian journal of pharmaceutical sciences*, 12(6), 509–520. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2017.07.005>
- Ciriminna, R., Chavarria-Hernandez, N., Hernandez, A., & Pagliaro, M. (2015). Pectin: A new perspective from the biorefinery standpoint. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 9(4), 368–377. <https://doi.org/10.1002/bbb.1551>
- Douglas, T. E. L., Hempel, U., Zydek, J., Vladescu, A., Pietryga, K., Kaeswurm, J., Buchweitz, M., Surmenev, R., Surmeneva, M., Cotrut, C., Koptug, A., & Pamula, E. (2018). Pectin coatings on titanium alloy scaffolds produced by additive manufacturing: Promotion of human bone marrow stromal cell proliferation. *Materials Letters*, 227, 225–228. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.05.060>
- Eca, K. S., Machado, M. T., Hubinger, M. D., & Menegalli, F. C. (2015). Development of active films from pectin and fruit extracts: Light protection, antioxidant capacity and compounds stability. *Journal of Food Science*, 80(11), C2389–C2396. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13074>
- Endress, H. U. (1991). The chemistry and technology of pectin. In Walter, B. H. (Ed.), *Nonfood Uses of Pectin*. Academic Press. 251–268
- Espitia, P. J. P., Du, W. X., Avena-Bustillos, R. D. J., Soares, N. F. F., & McHugh, T. H. (2014). Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties: A review. *Food Hydrocolloids*, 35, 287–296. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.06.005>
- Fishman, M. L., Chau, H. K., Hoagland, P., & Ayyad, K. (1999). Characterization of pectin, flash-extracted from orange albedo by microwave heating under pressure. *Carbohydrate Research*, 323(1–4), 126–138. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(99\)00244-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(99)00244-X)
- 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>
- Fishman, M. L., Cooke, P. (2009). The structure of high-methoxy sugar acid gels of citrus pectin as determined by AFM. *Carbohydrate Research*, 344(14), 1792–1797. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2008.09.031>
- Forsberg, L. S., Dell, A., Walton, D. J., & Ballon, C. E. (1982). Revised structure for the 6-O-methylglucose polysaccharide of *Mycobacterium smegmatis*. *Journal of Biological Chemistry*, 257, 3555–3563. [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)34815-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-9258(18)34815-4)
- Freitas, C. M., Costa, A. R., Rodrigues, F. A., Junior, M. M., Dias, M. M., et al. (2020a). Optimization of pectin extraction from passion fruit (*Passiflora edulis flavicarpa*) using the response surface method *Brazilian Journal of Development*, 6, 25609–25625. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n5-132>
- Freitas, C. M., Sousa, R. C., Dias, M. V., & Coimbra, J. S. (2020b). Extraction of pectin from passion fruit peel. *Food Engineering Review*, 12, 460–472. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09254-9>
- 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, 922–942. <https://doi.org/10.3390/coatings11080922>
- Gaona-Sanchez, V. A., Calderon-Dominguez, G., Morales-Sanchez, E., Moreno-Ruiz, L. A., et al. (2021). Physicochemical and superficial characterization of a bilayer film of zein and pectin obtained by electrospraying. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(12). <https://doi.org/10.1002/app.50045>
- Grant, G. T., Morris, E. R., Rees, D. A., Smith, P. J., & Thom D., (1973). Biological interaction between polysaccharides and divalent cations: The egg-box model. *FEBS Letters*, 32(1), [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(73\)80770-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(73)80770-7)
- Goubet, F., Strom, A., Dupree, P., & Williams, M. (2005). An investigation of pectin methylesterification patterns by two independent methods: Capillary electrophoresis and polysaccharide analysis using carbohydrate gel electrophoresis. *Carbohydrates Review*, 340(6), 1193–1199. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2005.01.037>
- Guillotin, S. E. (2005). *Studies on intra- and intermolecular distributions of substituents in commercial pectins*. Chemistry, Agricultural and Food Sciences. <https://doi.org/10.18174/121697>
- Hwang, S. W., & Shin, J. S. (2018). Pectin-coated curcumin-chitosan microparticles crosslinked with Mg²⁺ for delayed drug release in the digestive system. *International Journal of Polymer Science*, 218, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2018/2071071>
- Kertes, Z. I. (1951). *The pectin substances*. Interscience Publishers.
- Jafarzadeh-Moghaddam, M., Shaddel, R., & Peighambaroust, S. (2020). Sugar beet pectin extracted by ultrasound or conventional heating: A comparison. *Journal of Food Science*

- and Technology, 58, 2567–2578. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04763-1>
- Lalnunthari, C., Devi, L. M., & Badwaik, L. S. (2020). Extraction of protein and pectin from pumpkin industry by-products and their utilization for developing edible film. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 1807–1816. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04214-6>
- Lefsih, K., Giacomazza, D., Dahmoune, F., Mangione, M., et al. (2017). Pectin from *Opuntia ficus indica*: Optimization of microwave-assisted extraction and preliminary characterization. *Food Chemistry*, 221, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.073>
- Li, D., Li, J., Dong, H., Zhang, J., Ramaswamy, S., & Xu, F. (2021). Pectin in biomedical and drug delivery application: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 185, 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.06.088>
- Li, W. J., Fan, Z. G., Wu, Y. Y., Jiang, Z. G., & Shi, R. C. (2019). Eco-friendly extraction and physicochemical properties of pectin from jackfruit peel waste with subcritical water. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 99, 5283–5292. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9729>
- Li, Z. P., Jiang, M. C., Chen, B., Gao, P., Yang, S., Liu, Y. F., Ye, P. J., He, D. X., Huang, H. L., & Yu, C. Y. (2018). Fabrication and characterization of a novel self-assembling micelle based on chitosan cross-linked pectin-doxorubicin conjugates macromolecular pro-drug for targeted cancer therapy. *RSC advances*, 8(22), 12004–12016. <https://doi.org/10.1039/c8ra01403e>
- Liew, S. Q., Teoh, W. H., Tan, C. K., & Yusoff, R. (2018). Subcritical water extraction of low methoxyl pectin from pomelo (*Citrus grandis* (L.) Osbeck) peels. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.013>
- Linderstrom-Lange, K., & Schellman, J. A. (1959). Protein structure and enzyme activity. In *Enzymes* (pp. 443–510). Academic Press Inc.
- Liu, D., Zhang L., Xu Y., Zhang X. (2013). The influence of ultrasound on the structure, rheological properties and degradation path of citrus pectin. *Proceedings of Meeting on Acoustics ASA*, 19.1, 45092, 1–9. <https://doi.org/10.1121/1.4800819>
- Lopez-Mata, M. A., Gastelum-Cabrera, M., Valbuena-Gregoria, E., & Zamudio-Flores, P. B. (2018). Physicochemical properties of novel pectin/Aloe gel membranes. *Iranian Polymer Journal*, 27, 545–553. <https://doi.org/10.1007/s13726-018-0631-8>
- Majzoob, S., Atyabi, F., Dorkoosh, F., Kafedjiiski, K., Loretz, B., & Bernkop-Schnürch, A. (2006). Pectin-cysteine conjugate: synthesis and in-vitro evaluation of its potential for drug delivery. *The Journal of pharmacy and pharmacology*, 58(12), 1601–1610. <https://doi.org/10.1211/jpp.58.12.0006>
- Martau, G. A., Mihai, M., & Vodhar, D. C. (2019). The use of chitosan, alginate and pectin in biomedical and food sector – Biocompatibility, Bioadhesiveness, and Biodegradability. *Polymers*, 11, 1837, 1–28. <https://doi.org/10.3390/polym11111837>
- Maxwell, E. G., Belshaw, N. J., Waldron, K. W., & Morris, V. J. (2012). Pectin: An emerging new bioactive food polysaccharide. *Trends in Food Science & Technology*, 24, 64–73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2011.11.002>
- 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>
- Ma, X., Zhan, L., et al. (2016). Synergistic effect and mechanisms of combining ultrasound and pectinase on pectin hydrolysis. *Food and Bioprocess Technology*, 9, 1249–1257. <https://doi.org/10.1007/s11947-016-1689-y>
- Mikshina, P. V., Makshakova, O. N., Petrova, A. A., Gaifullina, I. Z., Idiyattullin, B. Z., Gorshkova, T. A., & Zuev, Y. F. (2017). Gelation of rhamnogalacturonan I is based on galactan side chain interaction and does not involve chemical modifications. *Carbohydrate polymers*, 171, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.05.013>
- Mohnen, D. (2008). Pectin structure and biosynthesis. *Current Opinion in Plant Biology*, 11, 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.03.006>
- Moorthy, I. G., Maran, J. P., Suria, S. M., Naganyashree, S., & Shivamathi, C. S. (2015). Response surface optimization of ultrasound-assisted extraction of pectin from pomegranate peel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 72, 1323–1328. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.10.037>
- Muhidinov, Z. K., Teshae, K. I., Jonmurodov, A. S., Khalikov, D., & Fishman, M. (2012). Physico-chemical characterization of pectin polysaccharides from various sources obtained by steam-assisted flash extraction (SAFE). *Macromolecular Symposia*, 317–318.1, 142–148. <https://doi.org/10.1002/masy.201100108>
- Munarin, F., Tanzu, M. C., & 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>
- Munoz-Almagro, N., Valadez-Carmona, L., Mendiola, J., & Ibanez, E. (2019). Structural characterization of pectin obtained from cacao pod husk. Comparison of conventional and subcritical water extraction. *Carbohydrate Polymers*, 217, 69–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.040>
- Naqash, F., Masoodi, F., Rather, S., & Wani, S. (2017). Emerging concepts in the nutraceutical and functional properties of pectin—A Review. *Carbohydrate Polymers*, 168, 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.058>
- Nguemazong, E. D., Christiaens, S., Shpigelman, A., & Van Loey, A. (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>
- Petkowicz, C. L., Vriesmann, L. C., & Williams, P. A. (2017). Pectin from food waste: Extraction, characterization and properties of watermelon rind pectin. *Food Hydrocolloids*, 65, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.040>

- Rees, D. A., & Welsh, E. J. (1977). Secondary and tertiary structure in solution and gels. *Angewandte Chemie International Edition in English*, 16, 214–224. <https://doi.org/10.1002/ANIE.197702141>
- Rainsford, K. D. (2012). *Ibuprofen: Pharmacology, therapeutics and side effects*. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-0348-0496-7>
- Rojas, R., Alvarez-Perez, O. B., Contreras-Esquivel, J. C., Vicente, A., Flores, A., Sandoval, J., & Aguilar, C. N. (2018). Valorisation of mango peels: Extraction of pectin and antioxidant and antifungal polyphenols. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 89–98. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0433-4>
- Round, A. N., MacDougall, A. J., Ring, S. G., & Morris, V. J. (1997). Unexpected branching in pectin observed by atomic force microscopy. *Carbohydrate Research*, 303, 251–255. <https://elibrary.ru/aftidj>
- Sakoei-Vayghan, R., Peighambaroust, S., Hesari, J., & Peressini, D. (2020). Effects of osmotic dehydration (with and without sonication) and pectin-based coating pretreatments on functional properties and color of hot-air dried apricot cubes. *Food Chemistry*, 311, 125978. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125978>
- Sarioglu, E., Kocaaga, B., Turan, D., Batirel, S., & Guner, F. (2019). Theophylline-loaded pectin-based hydrogels. II. Effect of concentration of initial pectin solution, crosslinker type and cation concentration of external solution on drug release profile. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(43), 1–15. <https://doi.org/10.1002/app.48155>
- Souza, V. G. L., Pires, J. R. A., Rodrigues, C., Coelho, I. M., & Fernando, A. L. (2020). Chitosan composites in packaging industry – Current trends and future challenges. *Polymers*, 12(2), 417. <https://doi.org/10.3390/polym12020417>
- Souza, C. C., Rodrigues, T. H., Silva, L. M., Ribeiro, P. R., & Brito, E. S. (2018). Sequential extraction of flavonoids and pectin from yellow passion fruit ring using pressurized solvent or ultrasound. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(4), 1362–1368. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8601>
- Sriamornsak, P., Wattanakorn, N., & Takeuchi, H. (2010). Study on the mucoadhesion mechanism of pectin by atomic force microscopy and mucin-particle method. *Carbohydrate Polymers*, 79, 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.018>
- Sun, D., Chen, X., & Zhu, C. (2020). Physicochemical properties and antioxidant activity of pectin from hawthorn wine pomace: A comparison of different extraction methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 158, 1239–1247. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.052>
- Torkova, A. A., Lisitskaya, K. V., Filimonov, I. S., Glazunova O.A., Kachalova, G. S., Golubev, V. N., & Fedorova, T. V. (2018). Physicochemical and functional properties of *Cucurbita maxima* pumpkin pectin and commercial citrus and apple pectins: A comparative evaluation. *PLOS ONE*, 13(9), Article e0204261. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204261>
- 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>
- Ullah, K., Sohail, M., Buabeid, M. A., 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>
- Voragen, A. G. J., Pilnik, W., Thibault, J. F., Axelos, M. A., & Renard, C. M. (1995). Pectins. In A. M. Stephen (Ed.), *Food polysaccharides and their applications* (pp. 287–339). Marcel Dekker.
- Wafaa, S., Abou-Elseoud, A., & Hassan, M. (2021). Extraction of pectin from sugar beet pulp by enzymatic and ultrasound-assisted treatments. *Carbohydrate Polymers: Technology and Application*, 2, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100042>
- Wang, W., Chen, W., Zou, M., Lv, R., Wang, D., Hou, F., Feng, H., Ma, X., Zhong, J., Ding, T., Ye, X., & Liu, D. (2018). Applications of power ultrasound in oriented modification and degradation of pectin: A review. *Journal of Food Engineering*, 234, 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.04.016>
- Wicker, L., Kim, Y., Kim, M. J., Thirkield, B., Lin, Z., & Jung J. (2014). Pectin as a bioactive polysaccharide extracting tailored function from less. *Food Hydrocolloids*, 42, 251–259. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.01.002>
- Xu, S., Liu, J., Huang, X., Du, L., Shi, F., Dong, R., Huang, X., Zheng, K., Liu, Y., & Cheong, K. (2018). Ultrasonic-microwave assisted extraction, characterization and biological activity of pectin from jackfruit peel. *Lwt – Food Science and Technology*, 90, 577–582. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.007>
- 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>
- Ye, P. J., Huang, C., Yang, S., Gao, P., Li, Z. P., Tang, S. Y., Xiang, Y., Liu, Y. F., Chen, Y. P., He, D. X., & Yu, C. Y. (2018). Facile fabrication of a novel hybrid nanoparticles by self-assembling based on pectin-doxorubicin conjugates for hepatocellular carcinoma therapy. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, 46(sup3), 661–670. <https://doi.org/10.1080/21691401.2018.1505745>
- Zhang, L., Ye, X., Ding, T., Sun, X., Xu, Y., & Liu, D. (2013). Ultrasound effect on the degradation kinetics, structure and rheological properties of apple pectin. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 222–232. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.021>
- Zhang, V., 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>